



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Distribución de commodities en PYMEs de comercio al por menor: Un enfoque cuantitativo**

**Commodities distribution on retail SMEs:  
A quantitative approach**

**Juan Camilo Sepúlveda Sánchez**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Bogotá, Colombia

2014



# **Distribución de commodities en PYMEs de comercio al por menor: Un enfoque cuantitativo**

**Commodities distribution on retail SMEs:  
A quantitative approach**

**Juan Camilo Sepúlveda Sánchez**

Tesis presentada como requisito parcial para optar por el título de:  
**Magister en Ingeniería – Ingeniería Industrial**

Director:

Ph.D. Wilson Adarme Jaimes

Línea de investigación:

Logística – Distribución

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Bogotá, Colombia

2014



*“No es el conocimiento, sino el acto del aprendizaje,  
y no la posesión, sino el acto de llegar allí, que concede el mayor disfrute”*

*Carl Friedrich Gauss*



## **Agradecimientos**

Quisiera agradecer a mi familia por su apoyo incondicional, por ustedes aspiré a alcanzar este nivel académico. Gracias por motivarme a seguir.

Me gustaría expresar mi sincero agradecimiento al profesor Wilson Adarme y a todo su equipo por aceptarme en su grupo de investigación, quien me dio las directrices para desarrollar este estudio y por enriquecer mis habilidades investigativas.





## Resumen

La gestión logística comprende las funciones de aprovisionamiento, distribución y devolución de bienes y productos físicos entre el productor y el consumidor final. En la función de distribución se encuentran actividades como la ubicación de centros logísticos, el almacenamiento, *picking*, *packing*, *labeling*, ruteo de vehículos y transporte, entre otras. El ruteo de vehículos, conocido en la literatura como *VRP* (Vehicle Routing Problem, en inglés), es un tema ampliamente discutido desde 1959, inicialmente por Dantzig y Ramser [21]. En la actualidad el *VRP* tiene muchas variantes que se ajustan a diferentes problemas de la vida real.

Dado al continuo y acelerado avance de la ciencia y la tecnología, los métodos de solución actuales para los problemas de ruteo de vehículos desarrollados en las últimas cinco décadas son altamente complejos, lo anterior debido a que se han diseñado para satisfacer las necesidades de las grandes empresas en continuo crecimiento. Dichos modelos de ruteo requieren de alta tecnología para generar soluciones eficientes, precisas y oportunas.

Específicamente las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMEs) presentan desventajas relacionadas con los recursos disponibles, entre ellos el no contar con suficiente dinero para invertir en equipos y vehículos, para adquirir recursos tecnológicos o para emplear personal calificado para administrar y mantener tanto las plataformas y sistemas de distribución y ruteo de vehículos. Por otra parte las actividades de distribución de las PYMEs cuentan con características especiales, entre ellas, el uso de vehículos de baja capacidad (menores a 600 Kg) y velocidad, así como tiempos de respuesta cortos para atender las necesidades de sus clientes.

Dadas las condiciones particulares de las PYMEs, la toma de decisiones relacionadas con el ruteo de vehículos debería soportarse en herramientas cuantitativas adecuadas para el grado de complejidad y teniendo en cuenta las características de sus operaciones de ruteo. Empleando una heurística de inserción sencilla para el problema de ruteo de vehículos con fraccionamiento de carga y ventanas de tiempo (SDVRPTW), implementada en una plataforma tecnológica común (Microsoft® Excel™) teniendo en cuenta las restricciones de recursos de las PYMEs, se validó que el SDVRPTW es un enfoque adecuado para abordar las necesidades de ruteo de vehículos en PYMEs sobre las otras variantes del problema, se redujo en un 50% el número de vehículos empleados para el caso de estudio, así como se validó que no se requieren recursos adicionales a los que ya cuentan las PYMEs para modelar sus operaciones de distribución empleando métodos cuantitativos.

**Palabras clave:** Ruteo, PYME, Distribución, SDVRPTW, VRP, Fraccionamiento de carga

## Abstract

Logistic management includes provisioning, distribution and return of goods and physical products from provider to final customer. On distribution function there are activities like distribution centers location, storage, picking, packing, labeling, vehicle routing and transportation, among others. Vehicle routing, known as VRP is a widely discussed topic since 1959, firstly handled by Dantzig & Ramser [21]. Nowadays VRP has so many variants, which fits different real life problems.

Given the continued and accelerated progress of science and technology, current solution methods for vehicle routing problems developed in the last two decades are highly complex, that is because they have been designed to meet the needs of the big companies in continuous growing, which have a large number of customers. Those routing models need high technology to generate efficient, accurate and timely solutions.

Specifically Small and Medium sized Enterprises (SME) have disadvantages related to available resources, including no having enough money to invest in equipment and vehicles, to acquire technological resources or to employ trained personnel to manage and maintain distribution and vehicle routing platforms and systems. By the other hand, SMEs distribution activities have special characteristics like usage of vehicles of low capacity and speed and short service time to attend customer requirements.

Given specific conditions of SMEs, decision making related with vehicle routing should be supported by quantitative tools fitted to complexity and characteristics of their routing operations. Using a simple insertion heuristic for Split Deliveries Vehicle Routing Problem with Time Windows (SDVRPTW), developed on a

common technology platform (Microsoft® Excel™) taking into account SMEs resources restrictions, was validated that SDVRPTW is an appropriate approach for solving SMEs vehicle routing needs over other VRP variants, number of vehicles necessary was reduced about 50% for the study case, as well as was validated that is not necessary additional resources that SMEs already have for modeling their distribution activities using quantitative methods.

**Keywords:** Routing, SME, Distribution, SDVRPTW, Split deliveries





## Contenido

Resumen	VII
Abstract	IX
Contenido	XIII
Índice de figuras	XVII
Índice de tablas	XIX
Índice de algoritmos	XXI
Introducción	2
1. Generalidades	6
1.1 Definición del problema	6
1.2 Pregunta de investigación	11
1.3 Objetivos	11
2. Contexto del estudio	13
2.1 PYMEs	13
2.2 Actividades de distribución en PYMEs	24
3. Estado del arte	27
3.1 El Problema de Ruteo de Vehículos (VRP)	27
3.1.1 El Problema de Ruteo de Vehículos con restricciones de Capacidad (CVRP)	28
3.1.2 El Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRPTW)	28
3.1.3 El Problema de Ruteo de Vehículos con Recolección (VRPB)	30

3.1.4	El Problema de Ruteo de Vehículos con Fraccionamiento de la Demanda (SDVRP)	30
3.1.5	El Problema de Ruteo de Vehículos con carga en 3 Dimensiones (3L-VRP)	31
3.1.6	Otras variantes del VRP	31
3.2	Clasificación del VRP	32
3.3	Dinámica de publicación del VRP	34
3.4	Métodos cuantitativos para el VRP	35
3.4.1	Métodos exactos	35
3.4.2	Algoritmos aproximados y heurísticos	36
3.4.3	Simulación	37
3.5	Métodos cuantitativos para el VRP en PYMEs	38
4.	Metodología	40
4.1	Revisión de la literatura	40
4.2	Caracterización-Parametrización del caso de estudio	40
4.3	Formulación y despliegue del método desarrollado	42
4.4	Resolución del problema	43
4.5	Medición del impacto	43
5.	Resultados y discusión	44
5.1	Caso de estudio	44
5.1.1	Caracterización del caso de estudio	44
5.1.2	Datos del caso de estudio	48
5.2	Características del VRP en PYMEs y el SDVRPTW	50
5.3	Formulación matemática	53



Contenido	XV
5.4 Algoritmo desarrollado	56
5.4.1 Algoritmo de solución inicial	57
5.4.2 Algoritmo de Post-optimización	59
5.4.3 Algoritmo de asignación de vehículos	60
5.4.4 Algoritmo mejorado	61
5.5 Resultados computacionales	62
5.5.1 Instancias de Salomon (1987)	63
5.5.2 Resultados del caso de estudio	66
5.5.2.1 Escenario VRPTW ( $d < Q$ )	67
5.5.2.2 Escenario SDVRPTW ( $d < Q$ )	68
5.5.2.3 Escenario SDVRPTW ( $d > Q$ )	69
5.6 Discusión de resultados	71
6. CONCLUSIONES	74
6.1 Conclusiones principales	74
6.2 Estudios futuros	77
7. Referencias	78
APÉNDICE	90
Apéndice 1. Resultados de la heurística desarrollada para las instancias de Salomon (1987)	90
Apéndice 2. Conjunto de datos de la instancia real (caso de estudio)	94
Apéndice 3. Resultados del ruteo para cada escenario (3) de la instancia de la vida real	96
Apéndice 4. Interfaz de usuario de la aplicación en Microsoft® Excel™	108

Apéndice 5. Instrumento de recolección de información para la caracterización de los hábitos de compra	112
--	-----

## Índice de figuras

Figura 1-1. Herramientas de TI usadas para la administración de pedidos y despachos en el sector de manufactura por las empresas finlandesas	8
Figura 1-2. Herramientas de TI usadas para la administración de pedidos y despachos en el sector de comercio por las empresas finlandesas	9
Figura 1-3. Herramientas de TI usadas por las empresas alemanas para sus procesos logísticos	10
Figura 2-1. Distribución de PYMEs por tamaño en Colombia	15
Figura 2-2. Proporción de PYMEs inscritas en Bogotá con respecto al resto del país	16
Figura 2-3. Tamaño de la muestra por sector económico	17
Figura 2-4. Distribución de la muestra por sector económico	18
Figura 2-5. Distribución de la muestra por tamaño de empresa	19
Figura 2-6. Distribución de la muestra del sector “Comercio” por subsector	20
Figura 2-7. Principales problemas de las PYMEs	21
Figura 2-8. Empresas registradas en Bogotá por código CIIU	22
Figura 2-9. Empresas registradas con el código G en Bogotá	23
Figura 3-1. Diagrama arbóreo de la taxonomía del VRP propuesta por Eksioglu et. al. (2009)	33
Figura 3-2. Publicaciones por año con la palabra “vehicle routing”	34
Figura 5-1. Distribución de la muestra por tipo de establecimiento	44
Figura 5-2. Prioridad de criterios para la selección de proveedores	45
Figura 5-3. Proporción de empresarios con agotamiento imprevisto de insumos	46
Figura 5-4. Causas de agotamiento imprevisto de insumos	46
Figura 5-5. Frecuencia de compra de productos alimenticios	47
Figura 5-6. Medios de compra de los productos alimenticios	47
Figura 5-7. Ubicación del depósito y de la muestra de los clientes	49

Figura 5-8. Demanda de la muestra de clientes [Kg]	50
Figura 5-9. Rutas resultantes para el escenario VRPTW ( $d < Q$ ) (Ver Apéndice 3)	67
Figura 5-10. Rutas resultantes para el escenario SDVRPTW ( $d < Q$ ) (Ver Apéndice 3)	68
Figura 5-11. Rutas resultantes para el escenario SDVRPTW ( $d > Q$ ) (Ver Apéndice 3)	70

## Índice de tablas

Tabla 1-1. Organización logística formalizada en las empresas de Quebec-Canadá	7
Tabla 1-2. Otras herramientas usadas por las empresas de Quebec-Canadá para las actividades logísticas	7
Tabla 2-1. Definiciones específicas de PYME para algunos países	13
Tabla 2-2. Clasificación de las PYMEs en la Unión Europea	14
Tabla 5-1. Comparación del desempeño promedio de los algoritmos para VRPTW para las instancias del tipo 1	65
Tabla 5-2. Comparación del desempeño promedio de los algoritmos para VRPTW para las instancias del tipo 2	65
Tabla 5-3. Diferencias en el desempeño de la heurística desarrollada respecto del mejor resultado para cada conjunto de instancias	66
Tabla 5-4. Mejor solución igualada por el método desarrollado	66
Tabla 5-5. Asignación de rutas y secuencia de visita para el escenario VRPTW ( $d < Q$ )	67
Tabla 5-6. Asignación de rutas y secuencia de visita para el escenario SDVRPTW ( $d < Q$ )	69
Tabla 5-7. Clientes con demanda fraccionada para el escenario SDVRPTW ( $d < Q$ )	69
Tabla 5-8. Asignación de rutas y secuencia de visita para el escenario SDVRPTW ( $d > Q$ )	70
Tabla 5-9. Clientes con demanda fraccionada para el escenario SDVRPTW ( $d > Q$ )	71
Tabla 5-10. Resumen de resultados para los tres escenarios evaluados del caso de estudio	72



## Índice de algoritmos

Algoritmo 5-1. Algoritmo de solución inicial	57
Algoritmo 5-2. Algoritmo de Post-optimización	59
Algoritmo 5-3. Algoritmo de asignación de vehículos	60
Algoritmo 5-4. Algoritmo mejorado	61





## Introducción

Las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMEs) son una de las fuerzas principales en el desarrollo económico, pues estimulan la propiedad privada y las habilidades emprendedoras, son flexibles y pueden adaptarse rápidamente a las cambiantes demandas del mercado y situaciones de aprovisionamiento, ayudan a diversificar la actividad económica y realizan una contribución significativa al comercio y a las exportaciones [22].

Las PYMEs de los países en vías de desarrollo generalmente atienden necesidades específicas y focalizadas de la sociedad y la industria, por lo que sus medios de distribución se ajustan a pequeños volúmenes, frecuencias particulares de suministro y condiciones especiales de transporte. Teniendo en cuenta los mercados que atienden las PYMEs y sus volúmenes de producción, la cantidad de recursos que ellas invierten para planear y controlar las actividades de distribución son limitados, así como la robustez e innovación técnica y tecnológica de sus recursos son bajas.

Según [77], el acceso a oportunidades de financiación es la segunda mayor restricción para las PYMEs en la creación, desarrollo o diversificación de sus actividades económicas; asimismo menciona que de acuerdo con el CONPES 3484 de Agosto de 2007, las PYMEs tienen dificultades para acceder a créditos de largo plazo que les permitiría modernizar sus operaciones, en especial aquellas relacionadas con la logística de distribución.

La logística, de acuerdo con el Concejo de Profesionales de la Gestión de la Cadena de Abastecimiento (CSCMP) [20], es aquella que se encarga de planear, implementar y controlar la eficiencia y efectividad de los flujos de envío y devolución de bienes, servicios y de información relacionada entre el punto de

origen y el punto de consumo con el propósito de satisfacer los requisitos del cliente. Dentro de sus límites, incluye la gestión del transporte entrante y saliente administración de flota, almacenamiento, manejo de materiales, cumplimiento de pedidos, diseño de la red logística, gestión de inventarios, planeación del aprovisionamiento/demanda y administración de proveedores de servicios de transporte, entre otras actividades. Comprende asimismo todos los niveles de la planeación y ejecución: estratégica, técnica y operativa.

Planear y controlar las actividades logísticas contempla por consiguiente la toma de decisiones sobre el ruteo de vehículos para la distribución física de bienes, y por ende la administración del personal, vehículos, tiempo, entre otros aspectos relacionados con el cómo, el cuándo, el dónde y el con qué medios atender cierto requerimiento de un cliente en el tiempo, de la manera y con la cantidad deseada por este. Las PYMEs, considerando las diferentes dificultades expuestas previamente, realizan la toma de decisiones para la distribución física sin el uso adecuado de metodologías cuantitativas (o mixtas) que les permitan alcanzar sobresalientes resultados operacionales, afectando la rentabilidad y la competitividad de las compañías. Por consiguiente, las PYMEs que desean competir en los mercados globales e incluso en los regionales frente a las multinacionales y grandes compañías de una manera sostenible deben evaluar esa clase de métodos y herramientas para la toma de decisiones.

Algunas metodologías ampliamente conocidas en la literatura sobre las cuales están basadas las actuales herramientas computacionales para la planeación de las actividades de distribución física, son complejas heurísticas y metaheurísticas, que son algoritmos combinatoriales diseñados para proveer soluciones a instancias extensas de problemas de ruteo de vehículos de las grandes compañías. Ese tipo de métodos han sido bien desarrollados a través de los últimos cincuenta años, dado a la creciente complejidad y tamaño de las

actividades de distribución física alrededor del mundo, que requieren para la generación rápida de soluciones de calidad, recursos de alta tecnología y personal entrenado para manipular las plataformas y para interpretar los resultados obtenidos.

De acuerdo con [55], los mayores problemas que enfrentan las PYMEs en Latinoamérica y el Caribe incluyen deficiencias en entrenamiento y educación, acceso limitado a mejores prácticas, tecnologías y metodologías para mejorar el desempeño de la administración de la cadena de abastecimiento, dificultades para acceder a servicios logísticos avanzados del tipo 3PL (*Third Party Logistics*) y ausencia de colaboración para alcanzar un tamaño suficiente para competir globalmente.

Teniendo en cuenta lo expuesto, las PYMEs presentan diversas desventajas, incluyendo el no contar con suficiente dinero para invertir, dificultades para acceder a financiación, para adquirir recursos tecnológicos y para contratar el personal entrenado que satisfaga los requisitos para administrar las plataformas y los sistemas de apoyo operativo y técnico. Por otra parte, los actuales modelos cuantitativos para resolver los problemas de ruteo de vehículos no se ajustan adecuadamente a las necesidades específicas de las PYMEs, por lo que se requieren métodos acordes a sus condiciones operativas particulares, con bajos requerimientos tecnológicos, fáciles de usar y con bajos costos de implementación.

El grupo de investigación “SEPRO – Logística” de la Universidad Nacional de Colombia desarrolló bajo un esquema de co-financiación con el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación “COLCIENCIAS” una propuesta metodológica para la administración logística de las actividades de abasto/distribución para PYMEs en Colombia, del que diferentes trabajos de tesis

de pregrado, maestría y doctorado se derivaron. Para dicho proyecto, un conjunto de empresas de diferentes sectores económicos (entre ellos, comercio al por menor, cosméticos, agroindustria, artes gráficas) fueron seleccionadas para analizar sus casos particulares y para generar estrategias o propuestas que ayuden a fortalecer sus actividades logísticas y de almacenamiento. Se seleccionó el barrio “*La Candelaria*” como referente en este estudio, donde se realizó un estudio de georreferenciación y caracterización de hábitos de compra de Hoteles y Restaurantes, establecimientos que se constituían como clientes potenciales de la PYME de comercio al por menor seleccionada para el estudio realizado por SEPRO.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera. La sección 1 presenta los aspectos generales de esta investigación. En la sección 2 se revisa el contexto de las PYMEs en Bogotá – Colombia. En la sección 3 se analiza el estado del arte estudiando el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) y los métodos de solución desarrollados para las PYMEs. La sección 4 describe la metodología empleada y la sección 5 presenta los resultados obtenidos: la caracterización del caso de estudio, las características del VRP y del SDVRPTW (Problema de Ruteo de Vehículos con Fraccionamiento de Carga y Ventanas de Tiempo), la formulación matemática del SDVRPTW, la descripción del algoritmo desarrollado, los resultados computacionales para el SDVRPTW sobre las instancias de Salomon (1987) [72] e instancias de la vida real (caso de estudio) y la discusión de los resultados. En la sección 6 se presentan las conclusiones del estudio.

# 1. Generalidades

## 1.1 Definición del problema

Según Kummer (1995, citado por [44]), las PYMEs frecuentemente consideran que la logística debe ser tratada como algo de relevancia secundaria. El transporte, el almacenamiento y el manejo de las materias primas deben ser considerados como un mal necesario.

De acuerdo con [44], alrededor de media centena de artículos y estudios sobre logística en PYMEs han sido escritos desde 1985, mientras que la mayor parte de la investigación en logística se sigue enfocando en las grandes compañías, esto debido al hecho de que la función logística de las grandes compañías es más visible y fácil de investigar.

Según estudios realizados por Kummer (1995, citado por [44]), se identificó que las empresas con más de 200 empleados poseen problemas de coordinación logística, sin embargo, las empresas de menor tamaño, se enfocan en la implementación parcial de los procesos logísticos, así como la coordinación no es considerada importante, por lo que las problemáticas logísticas son resueltas a través de la improvisación.

[44] menciona que las PYMEs generalmente no cuentan con experticia logística ni de aprovisionamiento, que es relativamente raro encontrar especialistas con algún grado profesional y que los empleados de las PYMEs no tienen tiempo para asistir a cursos de entrenamiento debido a que deben mantener el negocio andando, por lo que usualmente consultan a su proveedor de transporte o de almacenamiento para consejo logístico. En la Tabla 1-1 puede observarse que el 53,1% de las Pequeñas empresas (para el caso de estudio en Quebec-Canadá) no tiene

formalizada una unidad organizacional para las actividades logísticas, así como el 33,8% de las Empresas medianas tampoco.

**Tabla 1-1.** Organización logística formalizada en las empresas de Quebec-Canadá

Formalización	Tamaño de la empresa		
	Pequeña	Mediana	Grande
No formalizada	53,1%	33,8%	15%
Actividades logísticas divididas entre algunas divisiones	27,8%	47,8%	41,9%
Departamento logístico	19,1%	18,4%	43,1%

Fuente: Preparado a partir de Roy et. al. (2002, citado por [44])

Respecto de las herramientas tecnológicas disponibles usadas en logística para las PYMEs, un estudio realizado por Roy et. al. (2002, citado por [44]) en Quebec-Canadá, determinó que los pedidos se reciben principalmente vía telefónica y fax, seguida por Intercambio Electrónico de Datos (EDI) e internet, también permitió concluir que la computarización de las actividades de logística es especialmente baja en Pequeñas empresas (30,6%) y es principalmente enfocada a la planeación de su demanda de materias primas. En la Tabla 1-2 se presentan otras herramientas usadas por las PYMEs en sus actividades logísticas y en las Figuras 1-1 y 1-2 se presentan resultados del uso de tecnologías de la información para la administración de pedidos y despachos por las empresas de manufactura y comercio finlandesas.

**Tabla 1-2.** Otras herramientas usadas por las empresas de Quebec-Canadá para las actividades logísticas

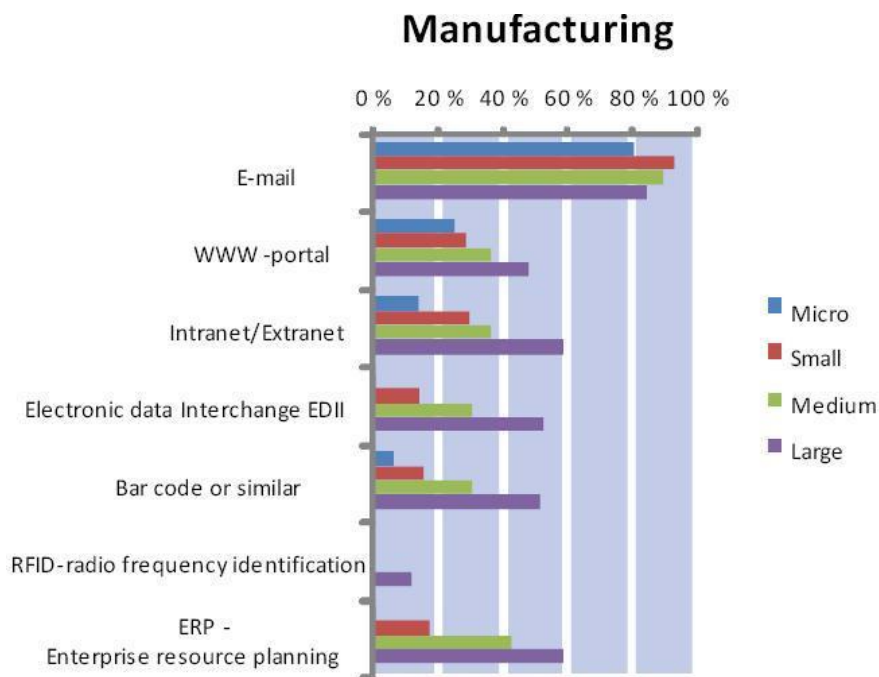
Herramienta	Tamaño de la empresa		
	Pequeña	Mediana	Grande
Código de barras	25,1%	48,8%	70%
Información compartida, compra automatizada	25,9%	44,9%	47,5%
Gestión de inventarios	29,6%	31,1%	40 %
Cooperación logística	28%	48,5%	60,4%
Indicadores logísticos	25,6%	31,3%	61,6%

Reaprovisionamiento continuo	12,3%	19,9%	35,2%
------------------------------	-------	-------	-------

Fuente: Preparado a partir de Roy et. al. (2002, citado por [44])

En un estudio realizado por Vizhányó (2006, citado por [44]) sobre una pequeña muestra de PYMEs de Hungría, se observó que el 67% de ellas realiza seguimiento a sus inventarios con un sistema integrado o aplicación particular, mientras que el 33% solo usa Excel para realizar dichas tareas.

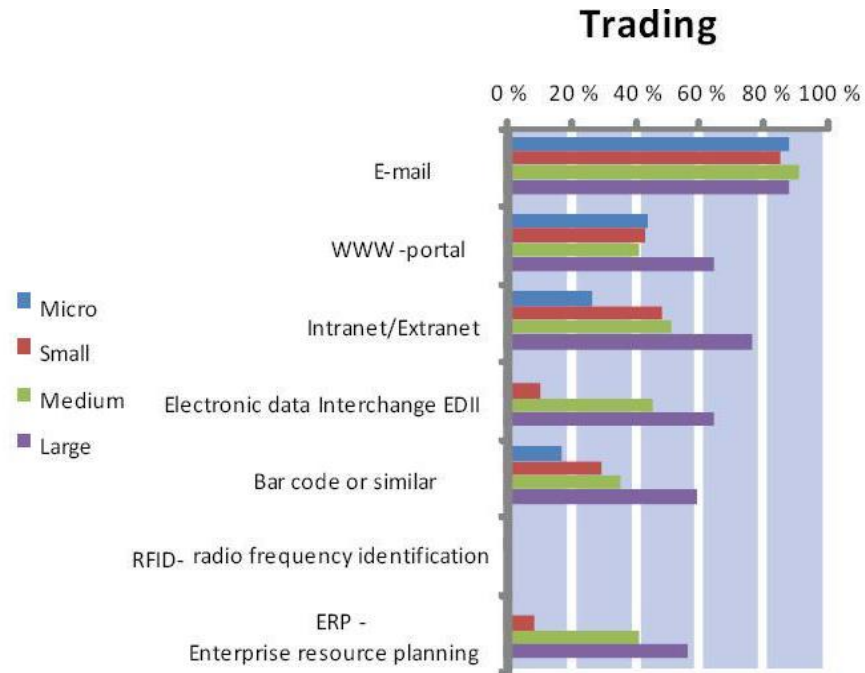
**Figura 1-1.** Herramientas de TI usadas para la administración de pedidos y despachos en el sector de manufactura por las empresas finlandesas



Fuente: Preparado a partir de Solakivi et. al. (2009, citado por [44])

Dentro de la logística, la distribución física contempla las tareas relacionadas con la planeación, implementación y control del flujo de materias primas, productos terminados y la información relacionada desde el punto de origen al cliente final, así como abarca, entre otras, las funciones de almacenamiento y transporte.

**Figura 1-2.** Herramientas de TI usadas para la administración de pedidos y despachos en el sector de comercio por las empresas finlandesas

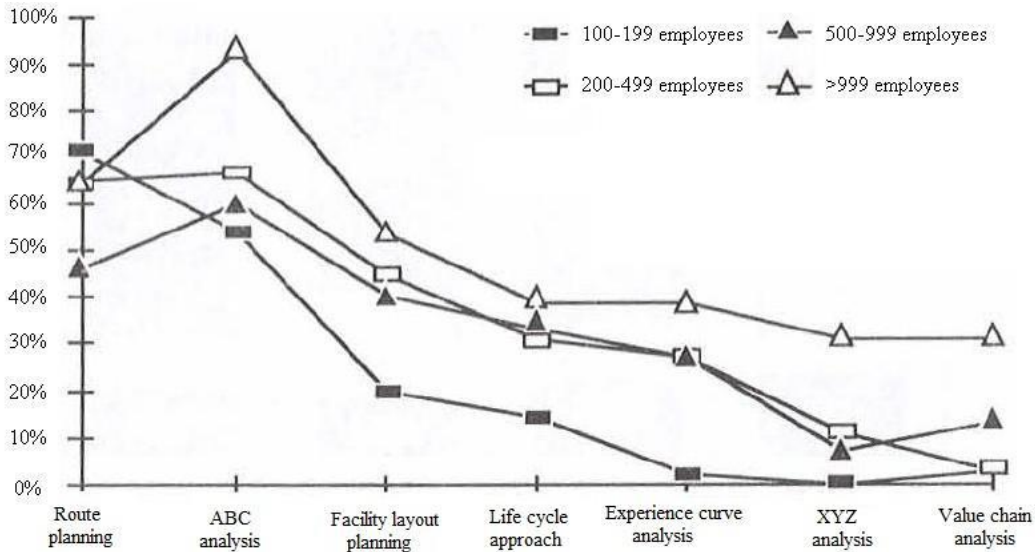


Fuente: Preparado a partir de Solakivi et. al. (2009, citado por [44])

Para el desarrollo efectivo de la función de transporte de la logística de distribución, se emplean diversas herramientas que apoyan la toma de decisiones operativas y tácticas. Entre las demás herramientas tecnológicas observadas en el estudio realizado por Kummer (1995, citado por [44]) para las actividades logísticas, se halló que entre las PYMEs alemanas el análisis ABC y el ruteo de vehículos son las herramientas más usadas. Ver Figura 1-3.



**Figura 1-3.** Herramientas de TI usadas por las empresas alemanas para sus procesos logísticos



Fuente: Preparado a partir de Kummer (1995, citado por [44])

El Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) es un tema ampliamente discutido desde 1959 cuando fue expuesto por primera vez por [21]. Hoy en día el VRP tiene muchas variantes que se ajustan a diferentes problemas de la vida real. Dado al continuo y acelerado avance de la ciencia y la tecnología, los actuales métodos de solución para los problemas de ruteo de vehículos desarrollados en las últimas dos décadas son altamente complejos, lo anterior debido a que dichos métodos han sido diseñados para satisfacer las necesidades de las grandes compañías en continuo crecimiento, que cuentan con un gran número de clientes y presentan características particulares.

Los métodos descritos anteriormente requieren alta tecnología y personal calificado para generar soluciones eficientes y precisas de manera oportuna. Las PYMEs en ese sentido han sido relegadas y hoy hay pocas herramientas y modelos apropiados a su tamaño, complejidad y recursos disponibles, en

consecuencia, las decisiones de ruteo de vehículos, entre otras decisiones, son tomadas por una parte de forma cualitativa principalmente basadas en la experiencia o, de acuerdo con Halley y Guilhon (1997, citado por [44]), mediante el uso de versiones económicas y simples, ya que a pesar de que el uso de las herramientas tecnológicas para la logística se ha extendido moderadamente a las PYMEs, necesariamente requiere inversión de recursos.

## 1.2 Pregunta de investigación

¿Qué medio o herramienta cuantitativa puede ser desarrollada para las PYMEs que ejecutan procesos logísticos de distribución, dadas sus limitaciones económicas, humanas y de recursos tecnológicos que les faciliten la toma de decisiones en ruteo de vehículos de una forma rápida y confiable y que contribuya de este modo a incrementar su competitividad?

## 1.3 Objetivos

Objetivo general:

Describir un enfoque cuantitativo para resolver el problema de ruteo de vehículos en PYMEs de comercio al por menor dadas las necesidades y restricciones específicas de un caso de estudio particular, que sea capaz de proveer soluciones de ruteo de manera rápida y confiable.

Objetivos específicos:

- Revisar la literatura relacionada con ruteo de vehículos en PYMEs con

el propósito de analizar las investigaciones recientes en el tema y para identificar potenciales estrategias para resolver el problema con el enfoque que se precisa.

- Definir los parámetros para el problema de ruteo de vehículos del caso de estudio.
- Adaptar o desarrollar un método cuantitativo para resolver el problema de ruteo de vehículos con las restricciones del caso de estudio.
- Presentar soluciones de ruteo de vehículos para la PYME seleccionada.
- Medir el impacto del modelo desarrollado en la operación logística de la PYME seleccionada.

## 2. Contexto del estudio

### 2.1 PYMEs

La definición de Pequeña y Mediana Empresa en el mundo difiere de país en país dadas las características particulares de mercado, legales, de capital, entre otros y se clasifican de acuerdo a ciertos indicadores, siendo el más frecuente de ellos es el número de empleados.

**Tabla 2-1.** Definiciones específicas de PYME para algunos países

País	Tipo de sector	Criterio o definición oficial
India	Micro	<2.5 millones de Rs de inversión en planta y maquinaria/equipos
	Mediana SSI	<1000 millones de Rs de inversión en P y M/E <10000 millones de Rs de inversión en P y M/E
Australia	Manufactura	Pequeña: 20 empleados. Mediana: < 1000 empleados
China	PYME	Depende del grupo de productos. Usualmente < 200 empleados
Francia	PYME	10-499 empleados
Indonesia	PYME	<100 empleados
Japón	Manufactura	<300 empleados y activos <100 millones de yenes
	Comercio al por mayor	<50 empleados y activos <30 millones de yenes
	Comercio al por menor y servicios	<50 empleados y activos <10 millones de yenes
Corea del sur	Mediana	En función del sub-sector: <50, 100, 200 o 300 empleados
	Pequeña	En función del sub-sector: <10 o 50 empleados
	Micro	En función del sub-sector: <5 o 10 empleados
Malasia	SMI	<75 empleados de tiempo completo o patrimonio < RM 205 millones
	SI	Empresas de manufactura con 5 a 50 empleados o con patrimonio hasta RM 500 mil
	MI	Empresas de manufactura con 50 a 75 empleados o con patrimonio entre RM 500 mil y RM 205 millones
Singapur	Manufactura	<SS 12 millones en activos <100 empleados
China (Taipei)	PYME	En manufactura, minería y construcción, capital invertido < NT\$40 millones o <200 empleados
Tailandia	Sectores de mano de obra intensiva	<200 empleados

	Sectores de capital intensivo	<100 empleados
Gran Bretaña	PYME	No hay una definición fija general
EEUU	PYME	En función del sub-sector, generalmente <500 empleados e ingresos de USD 7 millones
Vietnam	PYME	No hay una definición fija general, generalmente <200 empleados

Fuente: Preparado a partir de Thakkar et. al. (2009a, citado por [44])

En la Unión Europea contemplan más indicadores para la clasificación de las PYMEs, sin embargo su clasificación no es dependiente del sub-sector económico.

**Tabla 2-2.** Clasificación de las PYMEs en la Unión Europea

Tamaño	Número de empleados	Ingreso neto anual por ventas	Total del Balance
Micro	< 10 personas	<EURO 2 millones	<EURO 2 millones
Pequeña	10-49 personas	<EURO 10 millones	<EURO 10 millones
Mediana	50-249 personas	<EURO 50 millones	<EURO 43 millones

Fuente: Preparado a partir de [44]

En Colombia, de acuerdo a la *Ley 590 de 2000*<sup>1</sup> (“Ley para el Fomento de la Micro, Pequeña y Mediana Empresa”), las PYMEs se clasifican de la siguiente manera:

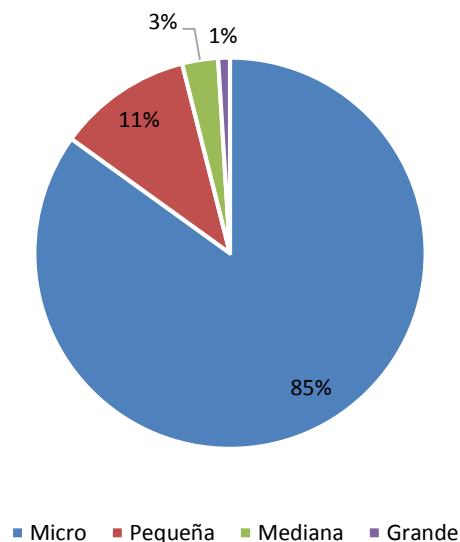
- *Micro*: Hasta 10 empleados. Activos totales menores a 501 Salarios Mínimos Mensuales Legales Vigentes (SMMLV).
- *Pequeña*: Entre 11 y 50 empleados. Activos totales entre 501 y 5001 SMMLV.

<sup>1</sup> Ley 590, Julio 10 de 2010. “POR LA CUAL SE DICTAN DISPOSICIONES PARA PROMOVER EL DESARROLLO DE LAS MICRO, PEQUEÑAS Y MEDIANAS EMPRESAS”. Congreso de la República de Colombia.

- *Mediana*: Entre 51 y 200 empleados. Activos totales entre 5001 y 15000 SMMLV.

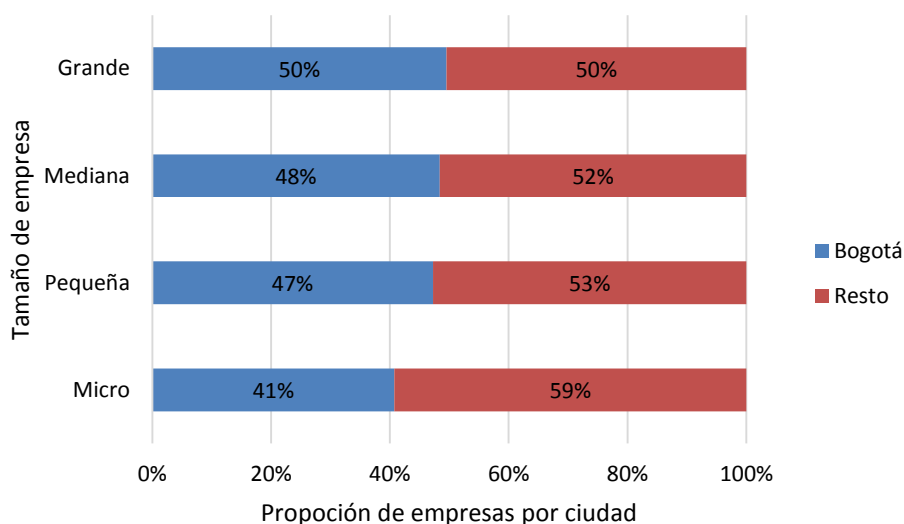
Según Wymenga et al. (2011, citado por [44]), en 2010 las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMEs) en la Unión Europea constituían el 99,8% de las empresas y empleaban el 66,9% del personal. En Colombia, según estadísticas del Registro Único Empresarial y Social (RUES) – Cámaras de Comercio del Ministerio de Comercio, Industria y Turismo de Colombia, a Agosto de 2013 existían 598.035 Microempresas, 78.267 Pequeñas empresas y 20.885 Empresas medianas, que constituían el 85%, 11% y 3% del total (excluyendo aquellas sin clasificar – 151.649). La ciudad de Bogotá condensa el 41% de las Microempresas, el 47% de las Pequeñas empresas y el 48% de las Empresas medianas del país.

**Figura 2-1.** Distribución de PYMEs por tamaño en Colombia



Fuente: Preparado a partir de estadísticas del Registro Único Empresarial y Social – Cámaras de Comercio del Ministerio de Comercio, Industria y Turismo de Colombia.

**Figura 2-2.** Proporción de PYMEs inscritas en Bogotá con respecto al resto del país

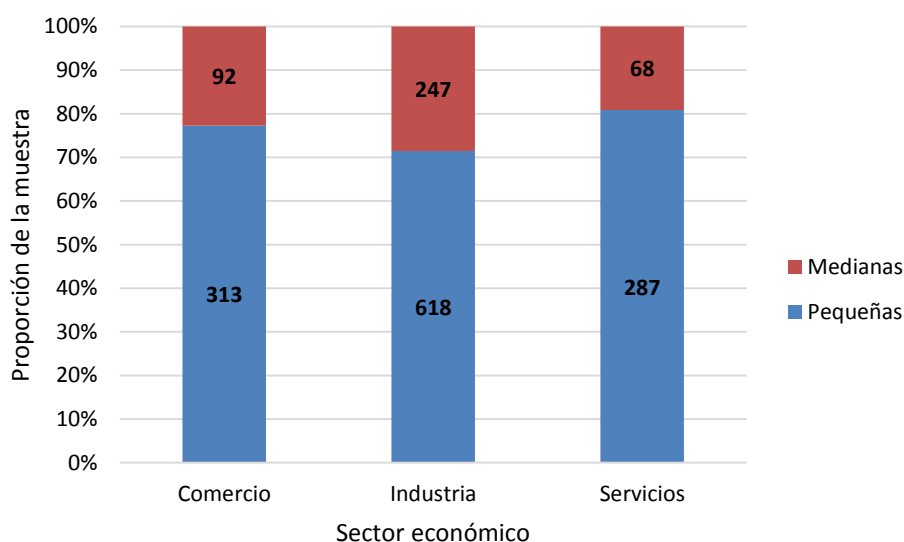


Fuente: Preparado a partir de estadísticas del Registro Único Empresarial y Social – Cámaras de Comercio del Ministerio de Comercio, Industria y Turismo de Colombia.

De acuerdo con [77], a pesar de la Ley MiPYME y la existencia de programas gubernamentales para apoyar el segmento de las Pequeñas y Medianas Empresas en Colombia, no hay información periódica suficiente respecto de las características, evolución o contribución general de las PYMEs en la economía colombiana, en muchos casos, se tiende a agrupar las PYMEs con las Micro empresas en las estadísticas oficiales. Dicho problema de información insuficiente se ha discutido por algún tiempo pero no ha sido resuelto aún, a pesar de que desde 2006 la Asociación Nacional de Instituciones Financieras, en colaboración con la Corporación Andina de Fomento (CAF), el Banco de la República y Bancoldex, iniciaran la realización de "La Gran Encuesta PYME", para evaluar diversas variables del mercado de las PYMEs en Colombia (Banco Mundial, 2007).

En la versión 2013-II de “La Gran Encuesta PYME” para el sector “Comercio”, el 38% de los empresario encuestados manifestaron que el desempeño de sus compañías empeoró en 2013-I basado en los resultados registrados en 2012-I, mientras que el 29% de los empresarios mencionó que el desempeño de sus negocios mejoró en dicho periodo de tiempo, siendo éste el registro más bajo desde la “Gran Encuesta PYME” en su versión 2009.

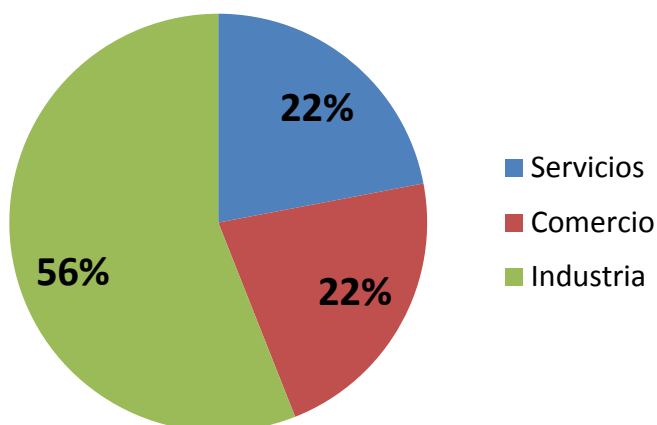
**Figura 2-3.** Tamaño de la muestra por sector económico



Fuente: Preparado a partir de información de la Asociación Nacional de Instituciones Financieras (ANIF), Gran Encuesta PYME 2013-II.

Por empresa, el 25% de las pequeñas empresas encuestadas reportaron mejoras en su situación económica sobre periodos anteriores, mientras que el 40% de las empresas encuestadas reportaron que su situación económica empeoró. Por otra parte, el 40% de las medianas empresas percibieron un incremento en sus negocios, mientras que el 33% de dichas empresas reportaron una reducción.



**Figura 2-4.** Distribución de la muestra por sector económico

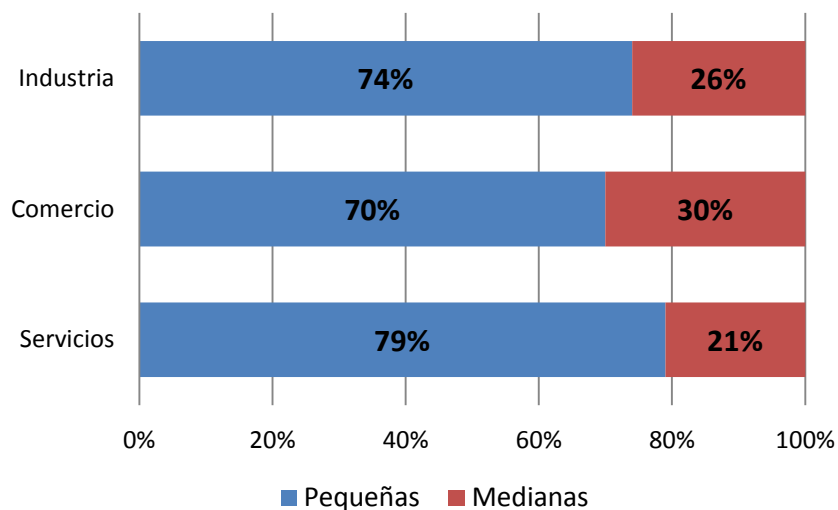
Fuente: Preparado a partir de información de la Asociación Nacional de Instituciones Financieras (ANIF), Gran Encuesta PYME 2013-II.

En todos los aspectos analizados en el estudio<sup>2</sup> (Situación económica general, Volumen de ventas, Nivel de pedidos recibidos, Margen comercial, Número de empleados y Costo de ventas), el balance de las respuestas positivas versus las respuestas negativas ha sido negativo para todos los subsectores de la categoría “Comercio”.

Adicionalmente, para la categoría “Comercio” en los periodos 2011-I, 2012-I y 2013-I los empresarios encuestados han tenido su opinión respecto de los principales problemas del sector, competencia de grandes empresas con un 30% y poca demanda con un 20%.

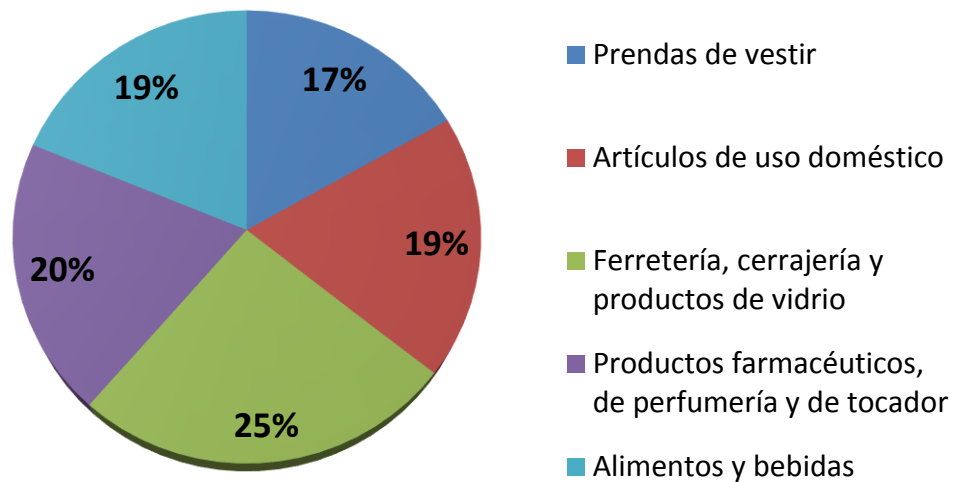
---

<sup>2</sup>Gran Encuesta PYME 2013-II

**Figura 2-5.** Distribución de la muestra por tamaño de empresa

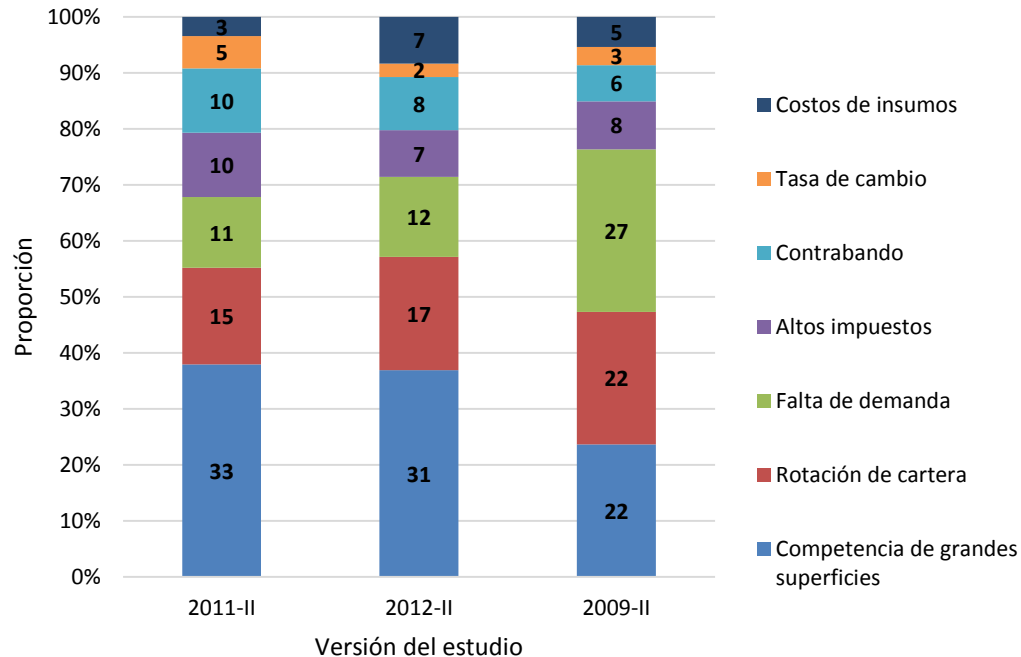
Fuente: Preparado a partir de información de la Asociación Nacional de Instituciones Financieras (ANIF), Gran Encuesta PYME 2013-II.

En Bogotá-Colombia hay 74686 empresas clasificadas con el código G, que significa “Comercio al por mayor y al por menor; reparación de vehículos automotores y motocicletas” en ISIC (International Standard Industrial Classification of all Economic Activities) o CIU (Código Internacional Industrial Uniforme) para Colombia. El 98% de estas compañías son MiPYMEs, y las “Micro” empresas representan el 87.8% del total, excluyendo las pequeñas y medianas empresas (No se contempló en el análisis aquellas compañías sin clasificar). En el barrio “*La Candelaria*”, hay 598 empresas de todos los tamaños clasificadas como “Comercio al por mayor y al por menor; reparación de vehículos automotores y motocicletas” registradas en la Cámara de Comercio de Bogotá hasta Julio de 2012.

**Figura 2-6.** Distribución de la muestra del sector “Comercio” por subsector

Fuente: Preparado a partir de información de la Asociación Nacional de Instituciones Financieras (ANIF), Gran Encuesta PYME 2013-II.

*La Candelaria* es el barrio más antiguo de Bogotá, está localizado en el centro de la ciudad y está caracterizado por su estilo colonial y barroco. De acuerdo con [61], el barrio “*La Candelaria*” tiene un área de 188.12 hectáreas y está localizado en el extremo suroriental de la ciudad a 2600 metros sobre el nivel del mar y fue declarado Monumento Nacional en 1963.

**Figura 2-7. Principales problemas de las PYMEs**

Fuente: Preparado a partir de información de la Asociación Nacional de Instituciones Financieras (ANIF), Gran Encuesta PYME 2013-II.

Al respecto de la movilidad, las autoridades de tránsito citadas por [61], mencionan que cada día 3500 vehículos motorizados ingresan al barrio *La Candelaria* entre las 7 AM y las 8 AM, y que dada la actual infraestructura de movilidad en las estrechas calles del centro histórico para el tránsito de vehículos motorizados se están generando efectos negativos en términos de congestión y accidentalidad, entre otros. En la misma investigación, desarrollada por [61], los autores resaltan la importancia de que las ciudades deberían promover el uso de la bicicleta y el caminar cuando transiten por los centros históricos con el propósito de preservar la arquitectura y reducir la contaminación ambiental, diseñando espacios y promoviendo el caminar y el uso de bicicletas en dichos centros históricos con el propósito de preservar la arquitectura y reducir la contaminación ambiental,

mitigando el uso del transporte particular individual a través de restricciones de acceso y peajes.

**Figura 2-8.** Empresas registradas en Bogotá por código CIU

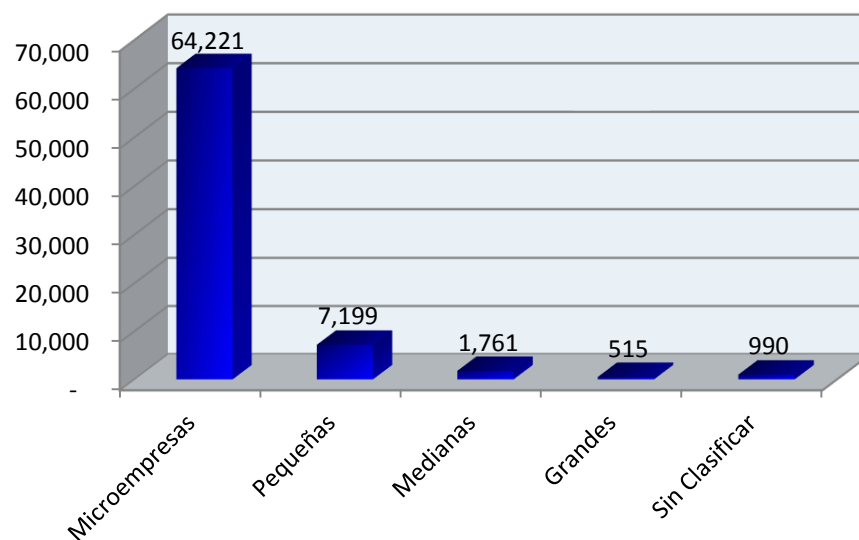


Fuente: Preparado a partir de información de la Base de datos de la Cámara de Comercio de Bogotá, Extraída en 2012-07-10.

En *La Candelaria*, Bogotá-Colombia, así como en muchas ciudades y municipios en Colombia y alrededor del mundo, las PYMEs de comercio al por menor que

abastecen generalmente otras PYMEs en el área cercana a donde se ubican sus depósitos, carecen de recursos económicos para grandes inversiones en vehículos de transporte, tecnología y personal, por lo que normalmente usan motocicletas (con contenedor o con tráiler) y bicicletas (de doble soporte la mayoría de los casos) para distribuir los productos a sus clientes. Dichas PYMEs a menudo no cuentan con sistemas de planeación y contratan muy pocas personas para apoyar las actividades administrativas.

**Figura 2-9.** Empresas registradas con el código G en Bogotá



Fuente: Preparado a partir de información de la Base de datos de la Cámara de Comercio de Bogotá, Extraída en 2012-07-10.

De acuerdo con [70] la velocidad promedio en la ciudad para vehículos particulares es de 23.8 Km/h, aunque en la Carrera 13 (entre otras vías de la ciudad), que es el límite oriental del barrio *La Candelaria*, velocidades promedio de 15.17 Km/h fueron registradas en la investigación.

## 2.2 Actividades de distribución en PYMEs

En los países europeos con una ampliamente difundida cultura de la bicicleta es una práctica común que el consumidor recoja directamente los productos en su bicicleta de la tienda a su casa. En los últimos 10 años en Europa y Estados Unidos algunas compañías han sido creadas para la distribución de productos usando bicicletas y triciclos con el propósito de atender el creciente mercado eco<sup>3</sup> para la distribución de productos en la última milla.

“La Petite Reine” en Paris (también en Bordeaux, Lyon, Rouen y Geneva), “Revolution Rickshaws” en Nueva York, “B-Line” en Portland y “Gnewt Cargo” en Londres son algunos ejemplos de compañías que usan triciclos impulsados por humanos o electricidad para distribuir los productos desde centros de Micro consolidación o para recogerlos directamente del cliente y llevarlos a su destino final en la logística de la última milla. Los triciclos tienen contenedores con capacidad de hasta 600 Kg.

Una investigación realizada por [2] ubicada en Palmira-Valle del Cauca, Colombia, estudió el uso de vehículos alternativos como la bicicleta y la motocicleta con tráiler en la distribución de commodities en la sub-industria del pan en el área urbana de dicha ciudad. En Palmira había 202 panaderías (registradas en la Cámara de Comercio) que tienen diferente tamaño, necesidades de commodities, frecuencia de pedidos, horarios de trabajo, entre otros. Los investigadores tomaron una muestra de la población de clientes (panaderías) y las caracterizaron. Los autores determinaron que el 80% de los clientes abren entre las 05:00 y 24:00 horas, entre otros aspectos que interesaron para la investigación. Respecto de la demanda de productos, [2] hallaron la cantidad media de los 4 principales commodities demandados por las panaderías en el estudio. Los autores también

---

<sup>3</sup> Se refiere a aquellas prácticas amigables con el medio ambiente

caracterizaron los dos vehículos referidos anteriormente, determinando que la velocidad promedio de la motocicleta con tráiler es de 7.3 Km/h en el centro de la ciudad, de 27.7 Km/h en áreas residenciales y cuentan con una capacidad de carga de 350 Kg. Para la bicicleta se encontró que la velocidad promedio es de 6.7 Km/h en el centro de la ciudad, de 8.2 Km/h en áreas residenciales y cuentan con una capacidad de carga de 100 Kg.

[48] analizaron el caso de Copacabana, el barrio más densamente poblado de Rio de Janeiro-Brasil. Se halló que 372 establecimientos (la mayoría de ellos PYMEs) incluyendo droguerías (11%), panaderías (10%), tiendas de ferreterías (9%), restaurantes (8%), lavasecos (8%), supermercados (8%) y otros, usan bicicletas para sus actividades de distribución. 732 bicicletas son usadas en total, donde el 40% son bicicletas regulares, el 30% son bicicletas de carga (de doble rack) y el 30% son triciclos. En promedio hay dos repartidores de tiempo completo haciendo 31 recorridos al día cada uno. El 29% de los viajes de carga que se realizan en Copacabana y los barrios cercanos (los cuales complementaron el estudio) cargaron hasta 25 Kg., el 17 % hasta 50 Kg., el 29% hasta 100 Kg., el 21% hasta 200 Kg. Y el 4% hasta 250 Kg.

Uno de los hallazgos más importantes en el estudio realizado por Hagen et. al. 2013 fue que el 42% de los empresarios entrevistados respondieron que sus negocios simplemente “no podrían funcionar” sin las bicicletas, refiriéndose a la viabilidad económica de sus negocios. La baja rentabilidad de esas PYMEs brasileras convierte a las bicicletas en un factor crítico para su supervivencia, incluso para los repartidores.

[48] revisaron las ventajas del uso de bicicletas de carga en frente de los vehículos motorizados (a menudo furgones, furgonetas y camionetas):



- Bajos costos asociados a los vehículos (incluyendo compra, mantenimiento y costo de operación).
- Mayor acceso para la distribución de productos. Las bicicletas de carga hallan parqueo sobre la vía mucho más fácil que los vehículos motorizados. Incluso durante las horas pico, las bicicletas superan a los vehículos motorizados atascados en los embotellamientos de tráfico.
- Bajos costos de infraestructura. Los vehículos motorizados causan un daño sustancial a puentes y caminos.
- Incremento de la seguridad vial con la reducción de la cantidad de camionetas y furgonetas en las vías de la ciudad.

### 3. Estado del arte

#### 3.1 El Problema de Ruteo de Vehículos (VRP)

En la literatura, el problema más simple que busca minimizar el costo o la distancia requerida para visitar a todos los clientes usando solo un vehículo es llamado Problema del Viajero de Negocios o “Traveler Salesman Problem” (TSP), al cual le han ido añadiendo mayor complejidad a través de diferentes restricciones y elementos con el objetivo de modelar la realidad de las diferentes actividades de distribución. Dentro de las restricciones adicionales pueden considerarse el uso de diferentes tipos de vehículos, vehículos con limitaciones de capacidad, ventanas de tiempo para servir a cada cliente, múltiples depósitos, entre otros factores y características.

El Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) es el estudio de alternativas para la distribución física de productos desde uno o muchos depósitos a uno o muchos clientes, y que constituyen una red. El VRP puede representarse como un grafo  $G = (V, A)$ , donde  $V = \{0, 1, \dots, n\}$  es el conjunto de vértices o nodos que representan los clientes (donde el nodo 0 representa el depósito) y  $A = \{1, 2, \dots, m\}$  es el conjunto de arcos o caminos que conectan los nodos. Cada nodo  $i$  tiene una demanda no negativa de productos (representada en unidades de material, kilogramos, libras u otra) representada por  $d_i$  y un costo  $c_{ij}$  asociado al arco  $(i, j)$  (cuantificado en dólares, tiempo, distancia u otra).

Teniendo en cuenta las restricciones y particularidades de los elementos que componen dicha red, así como los clientes, vehículos, depósitos y condiciones de operación como vías, itinerarios, entre otras, se encuentran en la literatura muchas variantes del VRP propuesto inicialmente por Dantzig y Ramser en 1959, que serán revisadas a continuación.

### 3.1.1 El Problema de Ruteo de Vehículos con restricciones de Capacidad (CVRP)

El CVRP es el modelo clásico y su objetivo es hallar un conjunto de rutas que minimicen el costo (distancia) total, teniendo en cuenta las siguientes restricciones:

- Cada ruta inicia y termina en el depósito ( $i = 0$ ).
- Cada nodo  $j \in V \setminus \{0\}$  debe ser visitado solo una vez.
- La longitud de ruta no puede exceder cierto límite (distancia total o tiempo total viajado).
- La suma de la demanda de los clientes visitados en la misma ruta no puede exceder la capacidad  $Q$  del vehículo.

Algunos autores incluyen pequeñas variaciones al modelo estándar, [1] añaden un parámetro de tiempo descarga en cada nodo y una restricción de que ninguna ruta no puede tardar más de cierto tiempo definido en el modelo. [66], [74], [6] y [56] pueden consultarse para mayor detalle respecto de métodos de solución exactos y heurísticos para resolver el CVRP. [10], así como [38] basados en la formulación “set partitioning” y [7]-[8]-[9] basados en algoritmos del tipo “branch-and-cut” proponen métodos exactos.

### 3.1.2 El Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRPTW)

Para este tipo de problema, se incluye una ventana de tiempo  $[a_i, b_i]$  para la distribución de los productos, donde  $a_i$  y  $b_i$  representan los límites inferior y superior de dicha ventana de tiempo para el  $i$ -ésimo nodo visitado. Si el vehículo llega al nodo antes del tiempo  $a_i$  tiene que esperar a que el cliente abra, mientras

que si el vehículo llega después de  $b_i$  habrá una falla en la distribución y el problema no será resuelto (para ventanas de tiempo estrictas) o se incurrirá en una penalización por llegada tarde (para ventanas de tiempo flexibles).

Algunas consideraciones adicionales en la formulación matemática se deben considerar:

- Existe un tiempo de servicio  $s_i$  para todo  $i \in V$  (para  $i = 0$ ,  $s_i = 0$ ).
- $a_0 = 0$  y  $b_0 = \infty$ .
- Existe un tiempo de viaje  $t_{ij}$  desde  $i$  hasta  $j$ .

Se refiere al lector a consultar [17] y [53] para profundizar en métodos de solución exactos para el VRPTW, [35] para algoritmos de relajación Lagrangiana, [10] para el método de generación de columnas y [11] para métodos del tipo “branch-and-cut”.

Salomon (1987) [72] presentó la primera heurística de inserción secuencial y posteriormente algunos autores mejoraron el método, tanto en calidad de las soluciones presentadas como en eficiencia computacional. [71] y [65] fueron quienes inicialmente propusieron soluciones del tipo metaheurístico para el VRPTW a través del método de Búsqueda Tabú, luego [51] y [12] a través de Algoritmos Genéticos, entre muchos otros que trataron de resolver los problemas de complejidad cada vez mayor tomando ventaja de las capacidades computacionales desarrolladas recientemente.

Otra variación relacionada con tiempo es el Problema de Ruteo de Vehículos Dependiente del Tiempo o “Time Dependent Vehicle Routing Problem” (TDVRP) en el cual dependiendo de cierto intervalo de tiempo en el cual el vehículo se está movilizand, el tiempo de viaje será mayor o menor, dado a la congestión

vehicular en áreas urbanas, inicialmente considerado por [60]. Para mayor detalle respecto del TDVRP se recomienda leer [33].

### **3.1.3 El Problema de Ruteo de Vehículos con Recolección (VRPB)**

En este tipo de problemas es requerido que los productos hayan sido distribuidos a los clientes antes de iniciar actividades de recolección (los vehículos deben estar vacíos), yendo a aquel nodo que requiera regresar algo al depósito (por ejemplo estibas). Otra variante del problema es el Problema de Ruteo de Vehículos con Recolección y Distribución (VRPPD) que desarrolla actividades mixtas de recolección y despacho, permitiendo el modelamiento de depósitos intermedios para el cargue de nuevos productos o para re-abastecer el depósito principal.

### **3.1.4 El Problema de Ruteo de Vehículos con Fraccionamiento de la Demanda (SDVRP)**

Esta variante del problema permite que más de un vehículo satisfaga la demanda de un cliente, así como un vehículo puede servir diferentes clientes ya atendidos. Este es una de los diferentes enfoques que mayores ahorros producen en la función objetivo (número de rutas/vehículos empleados o distancia total recorrida) dado que optimiza el uso de la capacidad de los vehículos. [28] formularon el primer modelo. [47] hizo una revisión relacionada con el SDVRP y propuso un modelo que incluye una mínima cantidad de abastecimiento (SDVRP-MDA), dado a que un cliente no estará dispuesto a atender muchos vehículos con pequeñas cantidades y por otra parte, para el distribuidor no es rentable generar rutas para visitar a los clientes con una pequeña cantidad de producto. Para mayor información sobre los métodos de solución propuestos para este tipo de VRP se recomienda leer [49].

### **3.1.5 El Problema de Ruteo de Vehículos con carga en 3 Dimensiones (3L-VRP)**

Respondiendo a la distribución de productos con diferentes volúmenes y con el objetivo de aprovechar al máximo el espacio disponible en los vehículos, los investigadores han desarrollado métodos de optimización que combinan el Problema de Ruteo de Vehículos con restricciones de Capacidad (CVRP) y el Problema de Empaquetado en 3 Dimensiones (3BPP), que generaliza el Problema de Ruteo de Vehículos con carga en 2 Dimensiones (2L-VRP) usado para la distribución de productos que no pueden apilarse uno sobre otro, por ejemplo estibas tan altas como el contenedor del vehículo, refrigeradores u otro tipo de electrodomésticos o muebles. El 3L-VRP toma especial relevancia para el transporte de bienes delicados, bienes de alto costo y bienes de diferentes formas que pueden ser dañados durante la operación de transporte, por lo que se requiere de un cuidado especial al apilarlo dentro del vehículo y teniendo en cuenta su orden de distribución. Para mayor profundidad en información relacionada con el 3L-VRP se recomienda consultar [37] y [68].

### **3.1.6 Otras variantes del VRP**

Las demás variantes del problema son principalmente producto de la combinación de los tipos de problemas previamente expuestos, los cuales contemplan mayores niveles de complejidad, por ejemplo el Problema de Ruteo de Vehículos con Recolección y Distribución y Ventanas de Tiempo (VRPPDTW), trabajado por [58]; el Problema de Ruteo de Vehículos con Flota de Vehículos Mixta (FSMVRP) que considera vehículos de diferente capacidad y diferentes costos de operación, para el cual se remite con [59], el Problema de Ruteo de Vehículos con restricciones en la Secuencia de Cargue, en el cual cada tipo de producto debe ser cargado en un

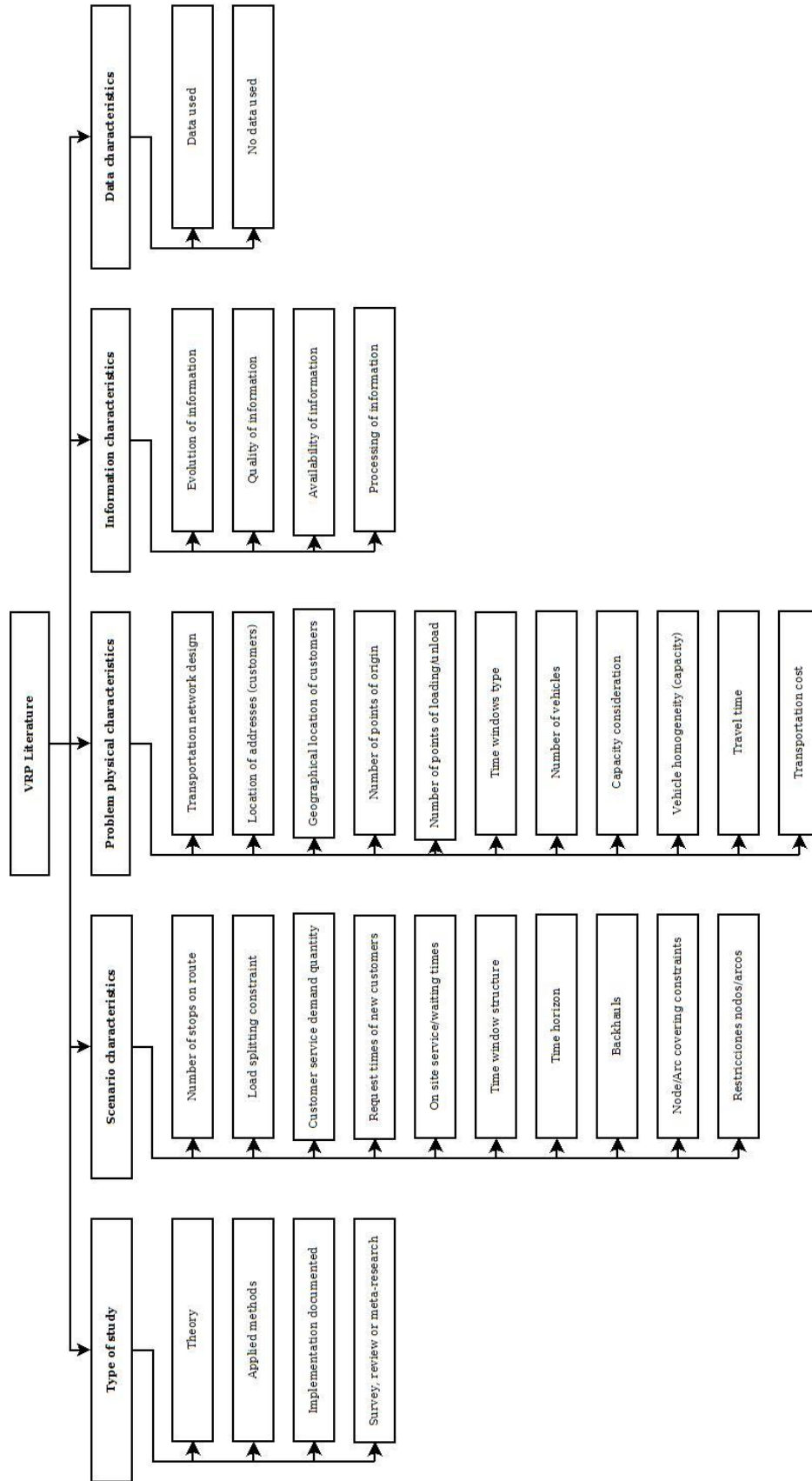
orden definido dentro del vehículo, así como la secuencia de visita a los clientes depende de dicho orden inicial, éste último desarrollado por [30], entre otras variantes y específicas aplicaciones que pueden encontrarse en la literatura.

### **3.2 Clasificación del VRP**

Una de las alternativas para la consolidación del conocimiento es a través de una revisión taxonómica que permite visualizar un tema de una manera fácil de entender, desplegando mediante una clara y sistemática forma todas las contribuciones hechas en la ciencia sobre tal tema. Varios han sido los esfuerzos para clasificar y consolidar el conocimiento del VRP, incluyendo a [14], [15], [25], [57] y recientemente [31].

[31] presenta una taxonomía que categoriza la literatura del VRP de forma arbórea compuesta por cinco grupos principales: 1) Tipos de estudio, 2) Características del escenario, 3) Características físicas, 4) Características de la información y 5) Características de los datos. Ver figura 3-2.

Figura 3-2. Diagrama arbóreo de la taxonomía del VRP propuesta por [31]

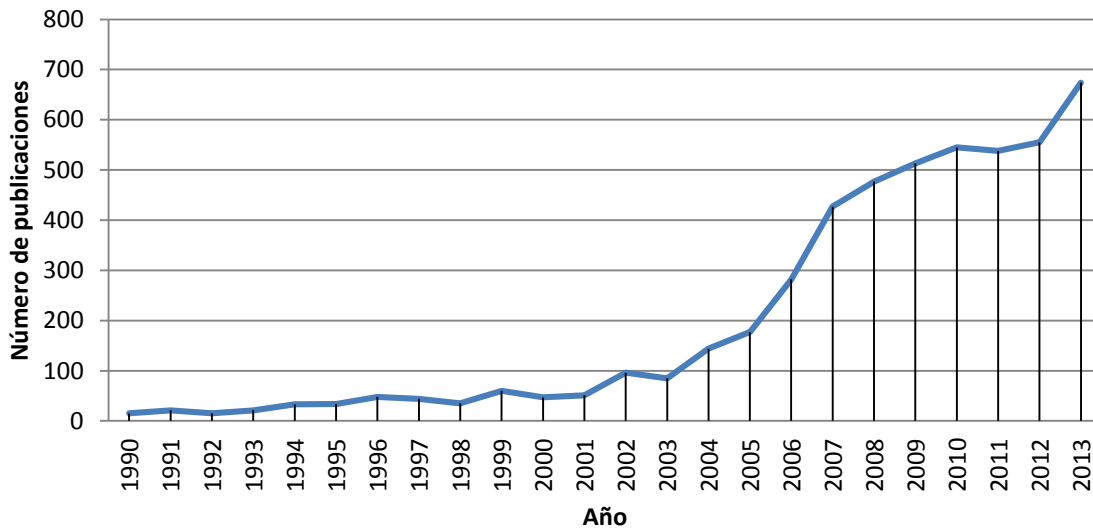




### 3.3 Dinámica de publicación del VRP

Una búsqueda usando Scopus® filtrando aquellos artículos publicados entre 1971 y 2013, con la ecuación de búsqueda “vehicle routing” en el título, resumen y palabras clave arrojaron un resultado de 5301 artículos. En la figura 3-1 un crecimiento exponencial de las publicaciones puede observarse desde 1990 hasta 2013, evidenciando el creciente atractivo en la literatura por este tema, especialmente en la última década. Asimismo, China y Estados Unidos son los líderes en número de publicaciones, la Universidad de Montreal es la principal institución en publicaciones, y Laporte, G. y Gendreau, M. son los autores más presentes en la literatura.

**Figura 3-2.** Publicaciones por año con la palabra “vehicle routing”



Fuente: Creación propia

## 3.4 Métodos cuantitativos para el VRP

Para resolver los enfoques actuales del *VRP* que son problemas de toma de decisiones del tipo complejo polinomial no determinista “*NP-hard*”, se encuentran a la fecha tres tipos de métodos cuantitativos de solución: Métodos exactos, Algoritmos de aproximación y heurísticos y Simulación.

### 3.4.1 Métodos exactos

Este tipo de métodos de solución garantizan la obtención de la solución óptima si se permite todo el tiempo necesario para su ejecución. De acuerdo con [32], hay tres tipos de métodos principales:

- Programación dinámica. Basados en la división recursiva de un problema en subproblemas más simples, obteniendo un resultado a través de una secuencia de decisiones parciales.
- El algoritmo de rama y corte “branch and bound algorithm”. El espacio de búsqueda es explorado dinámicamente construyendo un árbol cuyo nodo raíz representa el problema a resolverse y su espacio completo de búsqueda asociado. Los nodos de las hojas representan las soluciones potenciales y los nodos internos componen subproblemas de todo el espacio de solución. La búsqueda funciona cortando aquellos sub árboles que no contienen ninguna solución óptima.
- Programación de restricciones. Los problemas de optimización en programación de restricciones son modelados como se infiere por un conjunto de variables relacionadas por un conjunto de restricciones. Las restricciones pueden ser de forma matemática o simbólica.

### 3.4.2 Algoritmos aproximados y heurísticos

Los métodos heurísticos son relativamente rápidos y confiables para la obtención de soluciones en grandes instancias. Los métodos heurísticos más ampliamente conocidos se categorizan en tres grupos:

- Las heurísticas de construcción que gradualmente construyen una solución factible teniendo en cuenta el costo total de dicha solución. Estos están divididos en heurísticas de inserción, que añaden un cliente a una ruta a la vez o en paralelo; heurísticas de ahorros inicialmente propuesto por [16] que inicialmente construye tantas rutas como clientes e iterativamente une dos rutas teniendo en cuenta las restricciones del modelo; y las heurísticas de agrupación que inicialmente agrupan los clientes en subconjuntos (clusters) y entonces crea rutas para cada subconjunto.
- Las heurísticas de mejoramiento son métodos que empiezan con una solución inicial, a partir de allí mediante diferentes operaciones proporcionan una nueva solución mejorada y repiten nuevamente el proceso de mejoramiento hasta que se detiene por un parámetro límite, dando una solución mejorada en cada iteración (estos algoritmos nunca permiten la selección de soluciones subóptimas que faciliten la exploración de otras combinaciones en el espacio de solución que pueda representar mayores mejoramientos).
- Las metaheurísticas permiten abordar instancias de gran tamaño obteniendo soluciones de calidad en un corto periodo de tiempo, a diferencia de los métodos exactos, pero no garantizan (al igual que los métodos heurísticos) la obtención de una solución óptima. Debido a su eficiencia para resolver grandes problemas en diferentes áreas del conocimiento (no solo en ruteo de vehículos), como diseño,

electrónica, robótica, automática, química, física, biología, procesamiento de imágenes, entre otros, por lo que ha recibido gran popularidad desde los últimos 20 años. Las metaheurísticas consideran dos criterios contradictorios en sus métodos de solución, la exploración del espacio de búsqueda (diversificación) a través de búsquedas aleatorias y la explotación de las mejores soluciones encontradas (intensificación) a través de búsquedas locales.

Los algoritmos de aproximación específicamente encuentran una solución aproximada para el problema con un grado de precisión deseado y proveen una garantía de margen de error. Hay dos tipos, el esquema de aproximación de tiempo polinomial y el esquema de aproximación completamente polinomial, para mayor información puede consultarse [75].

### **3.4.3 Simulación**

Se han desarrollado muchos modelos de simulación para resolver el VRP con el propósito de que provea resultados para la toma de decisiones controlando factores clave del VRP. Este tipo de enfoque permite añadirle variables como flujos de tránsito aleatorio que afecten el proceso de distribución y el modelamiento de VRPs estocásticos, facilitando el análisis del impacto que generan ciertas decisiones sobre las operaciones de distribución. La información proporcionada por las herramientas de simulación es útil para la programación y el ruteo de vehículos.

### 3.5 Métodos cuantitativos para el VRP en PYMEs

Luego de ejecutar una revisión sobre métodos cuantitativos para el VRP en PYMEs, muy pocos artículos relacionados fueron encontrados.

[2] analizan una formulación para el VRPTW basado en el planteamiento del flujo de tres índices de [34] incluyendo un cuarto índice  $r$  para las rutas, sin embargo los autores usaron el software Logware® 5.0 basado en un algoritmo de los ahorros de Clarke & Wright [16] para resolver el problema de ruteo de vehículos para la distribución de commodities en el subsector de insumos de panadería en Palmira, Valle del Cauca-Colombia usando motocicletas con tráiler y bicicletas, comparando tres escenarios: 1) usando solo bicicletas, 2) usando solo motocicletas con tráiler (como resultado las más económica) y 3) combinado. En este artículo los autores presentan la caracterización de la cadena de distribución del subsector y la definición de los parámetros a partir de información recolectada en trabajo de campo, concluyendo finalmente el estudio con los beneficios de usar métodos cuantitativos para la toma de decisiones.

[52] y [46] reflexionan sobre el rol de la “computación distribuida”, especialmente para las PYMEs debido a que individualmente estas no podrían acceder fácilmente a recursos altamente tecnológicos ni a la experticia requerida para resolver los VRP complejos de la vida real, por lo que a través de la agrupación de las PYMEs se puede construir una plataforma colaborativa tomando ventaja de las capacidades tecnológicas de todas, generando soluciones de calidad para el VRP implementando los algoritmos complejos y robustos usados por las grandes compañías.

A pesar de las ventajas tecnológicas conseguidas mediante la integración, los algoritmos propuestos tienen enfoques que responden a los problemas de las

grandes compañías y dado a las características administrativas específicas de las PYMEs y de sus procesos de distribución, puede no ser el enfoque más adecuado. Por otra parte, estos esfuerzos de integración requieren el liderazgo y el apoyo (financiero y técnico) de instituciones gubernamentales o sin ánimo de lucro.

[45] aplican la heurística de [34] que contempla un método del tipo “cluster first – route second”, para resolver el problema de ruteo de vehículos de una PYME que distribuye insumos de oficina, atendiendo 26 clientes en tres ciudades con solo un vehículo en un horizonte de tiempo de 5 días. Este artículo solo presenta la aplicación exitosa de la heurística mencionada en dicho caso de estudio.

[63] construyeron un método heurístico para el VRPTW teniendo en cuenta las características específicas de las PYMEs, relacionadas con sus capacidades tecnológicas, económicas y humanas, por lo que el algoritmo propuesto no requiere largos tiempos de ejecución (usando tecnología de gama baja-media). El algoritmo presentado reporta soluciones de calidad para las instancias de [72] comparado con las mejores heurísticas desarrolladas en la actualidad.

## **4. Metodología**

Esta investigación es de tipo exploratoria basada en un caso de estudio de una empresa ubicada en Bogotá–Colombia. Las fuentes de información son cualitativas y cuantitativas. La información cualitativa fue recolectada usando bases de datos científicas, información de entidades gubernamentales y artículos de conferencias. La información cuantitativa fue recolectada usando instrumentos de recolección de información (encuestas) aplicado a empresarios clientes de la PYME que componían el caso de estudio.

### **4.1 Revisión de la literatura**

Usando bases de datos científicas a través del Sistema Nacional de Bibliotecas de la Universidad Nacional de Colombia (SINAB) y búsquedas estructuradas en la web, se consultaron artículos y otros documentos técnicos sobre el problema de ruteo de vehículos (VRP), con el ánimo de analizar todos los diferentes enfoques usados para resolver los problemas de distribución en las empresas. También se buscó documentación técnica sobre el VRP en Pequeñas y Medianas Empresas (PYMEs) para identificar características, restricciones, parámetros y métodos de solución implementados en este tipo de empresas para evaluar su aplicación en el caso de estudio.

### **4.2 Caracterización-Parametrización del caso de estudio**

La empresa de comercio al por menor de productos perecederos e insumos localizada en el barrio “La Candelaria” de la ciudad de Bogotá, seleccionada para la investigación desarrollada por el grupo de investigación “SEPRO – Logística” de la Universidad Nacional de Colombia, abastece principalmente restaurantes,

cafeterías, fruterías y hoteles. De acuerdo a la investigación mencionada, dicha empresa buscaba maximizar el uso de transportes alternativos, reducir el impacto ambiental y social de sus actividades de distribución, mejorar sus debilidades en el ordenamiento y uso del espacio de almacenamiento así como en unitarización de la carga, entre otras.

La fase de recolección de información en campo desarrollada por los miembros del grupo fue la siguiente:

1. Delimitación del espacio geográfico para la fase de campo de recolección de datos, que comprendió el barrio de “La Candelaria”, limitado por el Norte por la troncal del “Eje ambiental” del sistema de transporte Transmilenio®, por el Sur por la Calle Séptima, por el Oriente por la Avenida “Circunvalar” y por el Occidente por la Carrera Décima.
2. Diseño de los instrumentos de recolección para la caracterización de las vías dentro del área delimitada. La caracterización comprende para cada segmento vial la identificación de los siguientes seis parámetros: 1) Tipo de vía (peatonal o vehicular), 2) Ancho de la vía [m], 3) Sentido de la vía (Una sola vía o Doble vía), 4) Orientación de la vía (Norte-Sur, Sur-Norte, Oriente-Occidente, Occidente-Oriente), 5) Aceras (lado y ancho [m]) y 6) Observaciones (Restricciones de tráfico, entre otros).
3. Diseño de instrumentos de recolección de información para los hábitos de compra de los clientes (restaurante, hoteles y hostales) de la PYME seleccionada. Ver apéndice 5.
4. Aplicación de los instrumentos de recolección de información.
5. Creación de un Sistema de Información Geográfica usando un software especializado (TransCAD®).



6. Tabulación y análisis estadístico de la información recolectada sobre los hábitos de compra de los clientes.

Para esta investigación, se indagó por información relacionada con los hábitos de compra de los clientes potenciales encuestados, obteniendo datos cuantitativos de volumen de demanda, frecuencia de pedidos, tipos de insumos, entre otros; así como aquellos aspectos relacionados con su capacidad instalada, infraestructura de servicio y demás, que permitiera caracterizar a los clientes de la PYME seleccionada. La información cuantitativa recolectada se analizó con estadística descriptiva para la caracterización y parametrización del caso de estudio.

Por otra parte, a partir de reportes y estudios de instituciones gubernamentales sobre tráfico y movilidad en la ciudad, y en el exterior, se obtuvieron algunos datos para parametrizar el modelo y por medio de Google® Maps se reunieron los datos que describen la ubicación geográfica de cada uno de los puntos de demanda que se usaron en el modelo de ruteo que se desarrolló.

### **4.3 Formulación y despliegue del método desarrollado**

A partir del análisis de todos los tipos de problemas de ruteo de vehículos, de sus métodos de solución reportados en la literatura y las condiciones económicas, tecnológicas y administrativas específicas de las actividades de distribución de las PYMEs, un método de solución del tipo heurística de inserción fue desarrollado con propósitos experimentales para este estudio en una plataforma de uso común, con el objetivo de evaluar que el tipo de problema seleccionado se ajusta a los requerimientos de las PYMEs y que a través del uso de métodos cuantitativos la toma de decisiones en materia de distribución es confiable.

#### **4.4 Resolución del problema**

Usando el método de solución desarrollado en Microsoft® Excel™ usando hojas de cálculo y programación básica en Visual Basic, la heurística fue probada en las instancias de 100 clientes de Salomon (1987) [72] para efectos de comparación. Posteriormente el modelo fue usado en la instancia de la vida real, construida a partir de la parametrización del caso de estudio en tres diferentes escenarios para compararlos y generar conclusiones.

#### **4.5 Medición del impacto**

Usando los indicadores de número de vehículos usados, distancia recorrida y tiempo de cómputo se evaluaron la eficiencia y el impacto del método de solución desarrollado para el ruteo de vehículos de la PYME seleccionada, comparando por una parte las soluciones generadas para las instancias de Salomon (1987) [72] y los resultados reportados por los mejores métodos de solución en la literatura, y por otra, sobre los tres escenarios desarrollados de la instancia real.

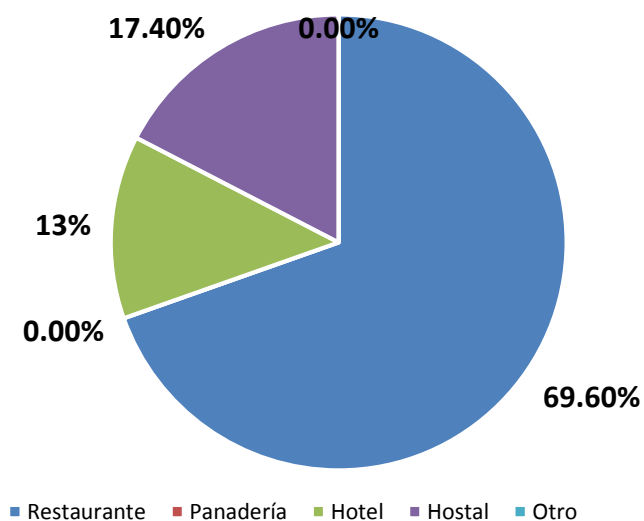
## 5. Resultados y discusión

### 5.1 Caso de estudio

#### 5.1.1 Caracterización del caso de estudio

Empleando el método de muestreo por conveniencia, dada la accesibilidad y cooperación de los clientes, se seleccionó una muestra representativa de puntos de demanda a partir de una base de datos proporcionada por dos asociaciones de empresas del barrio “La Candelaria”. De una población de 73 puntos de demanda se pudo caracterizar el 31,5% (23 puntos).

**Figura 5-1.** Distribución de la muestra por tipo de establecimiento

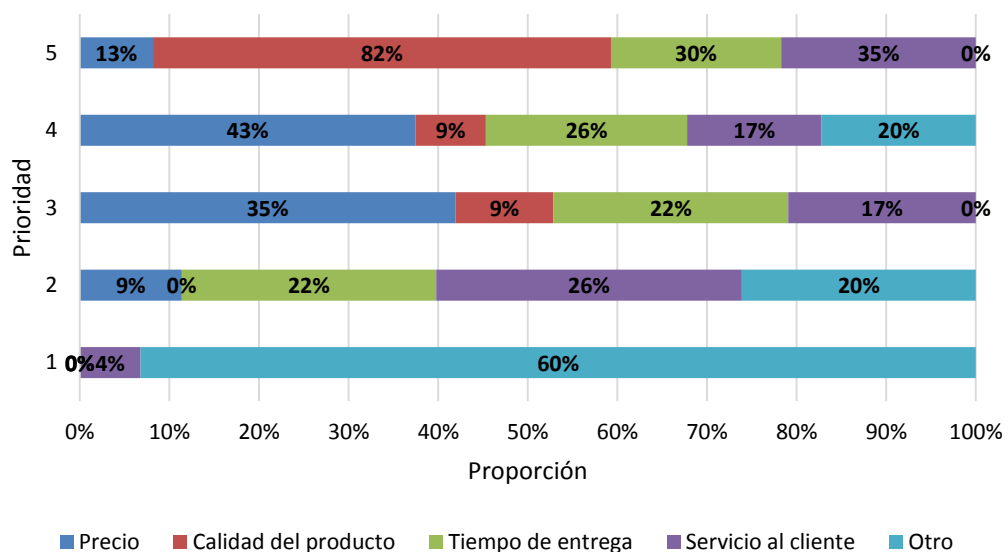


Fuente: Elaboración propia a partir de los datos recolectados por SEPRO

Con la aplicación de la encuesta realizada por los miembros del grupo de investigación SEPRO en la fase de levantamiento de información en campo, se obtuvo información relativa con los hábitos de compra, características de

infraestructura y capacidad de los diferentes puntos de demanda, entre otras, que originaron los resultados que se presentan en las gráficas de esta sección.

**Figura 5-2.** Prioridad de criterios para la selección de proveedores

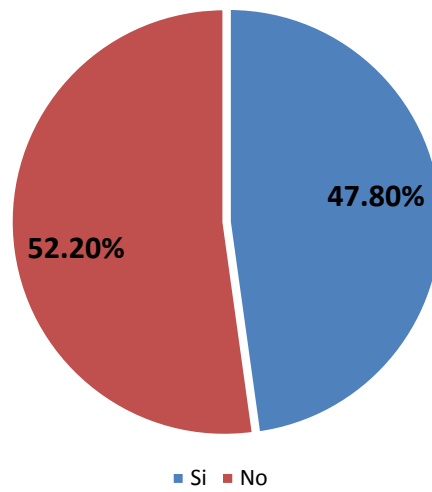


Fuente: Elaboración propia a partir de los datos recolectados por SEPRO

Según los resultados obtenidos el 82% de los empresarios entrevistados consideran que la calidad de los productos tiene la mayor prioridad a la hora de seleccionar un proveedor, así como el 43% considera que el precio es el siguiente atributo a tener en cuenta a la hora de seleccionarlo.

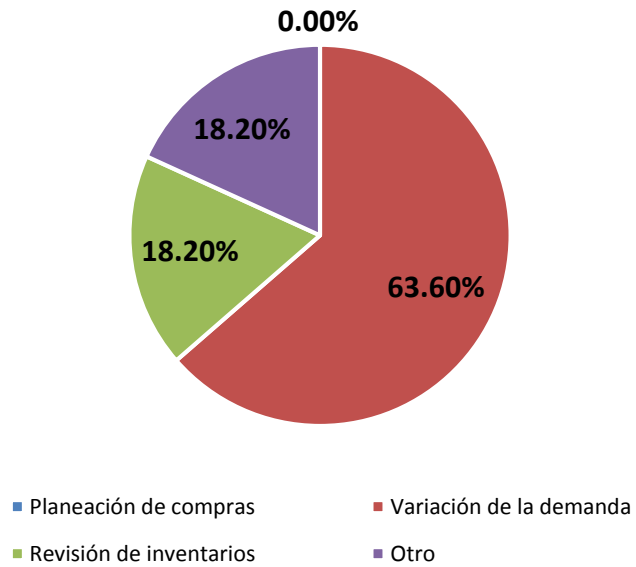
Un poco menos del 50% de los empresarios entrevistados reportan que presentan agotamiento de materias primas o insumos de modo imprevisto y de ellos, el 63,6% considera que responde a variaciones imprevistas de la demanda.

**Figura 5-3.** Proporción de empresarios con agotamiento imprevisto de insumos



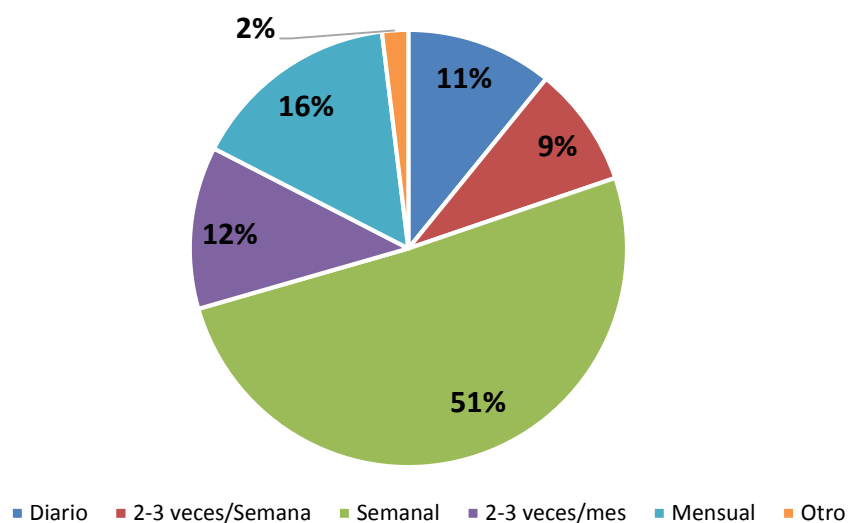
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos recolectados por SEPRO

**Figura 5-4.** Causas de agotamiento imprevisto de insumos



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos recolectados por SEPRO

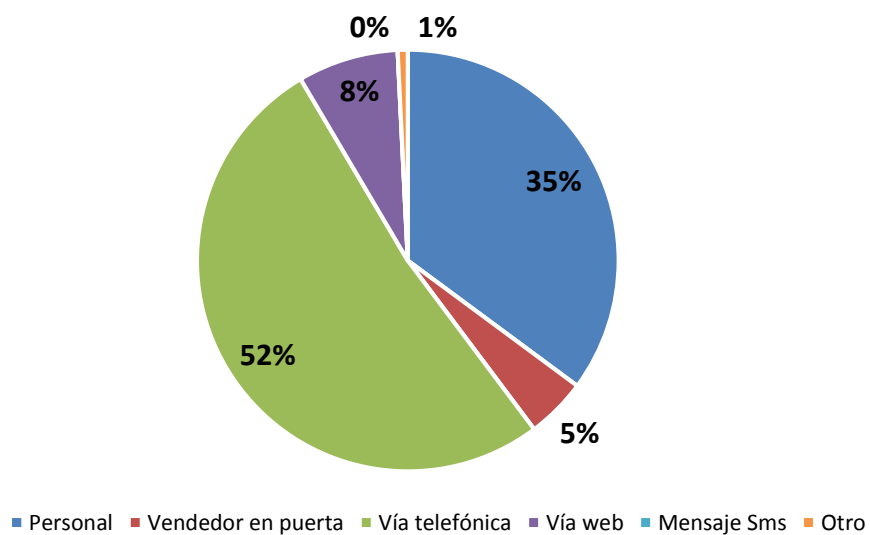
**Figura 5-5.** Frecuencia de compra de productos alimenticios



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos recolectados por SEPRO

El 49.7% de los empresarios entrevistados compran los productos relacionados con aseo y limpieza mensualmente.

**Figura 5-6.** Medios de compra de los productos alimenticios



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos recolectados por SEPRO

Aproximadamente el 51% de los empresarios entrevistados compra productos alimenticios de forma semanal, mientras que aproximadamente el 16% compra sus materias primas de forma diaria.

Entre otros aspectos relevantes identificados en el levantamiento de información, se hallan:

- Los puntos de demanda caracterizados tienen una capacidad de atención promedio de 58 personas.
- El punto de demanda con menor capacidad atiende hasta 24 personas, mientras que el punto de demanda con mayor capacidad atiende 150 personas.
- El 60.9% de los establecimientos son alquilados, mientras que el 39.1% son propios.
- Alrededor del 50% de los puntos de demanda intercambian información con el proveedor en una relación de colaboración. De dicho 50%, el 81.8% comparte información relacionada con el inventario y el 18.2% comparten información basada en las ventas, por lo que puede inferirse que los proveedores aplican estrategias de Administración de Inventario por el Proveedor (VMI).
- En promedio cada punto de demanda tiene 1.8 congeladores, 1.95 refrigeradores y 2.88 estantes.
- El Lead Time promedio para el abastecimiento de productos es de 1.13 días.

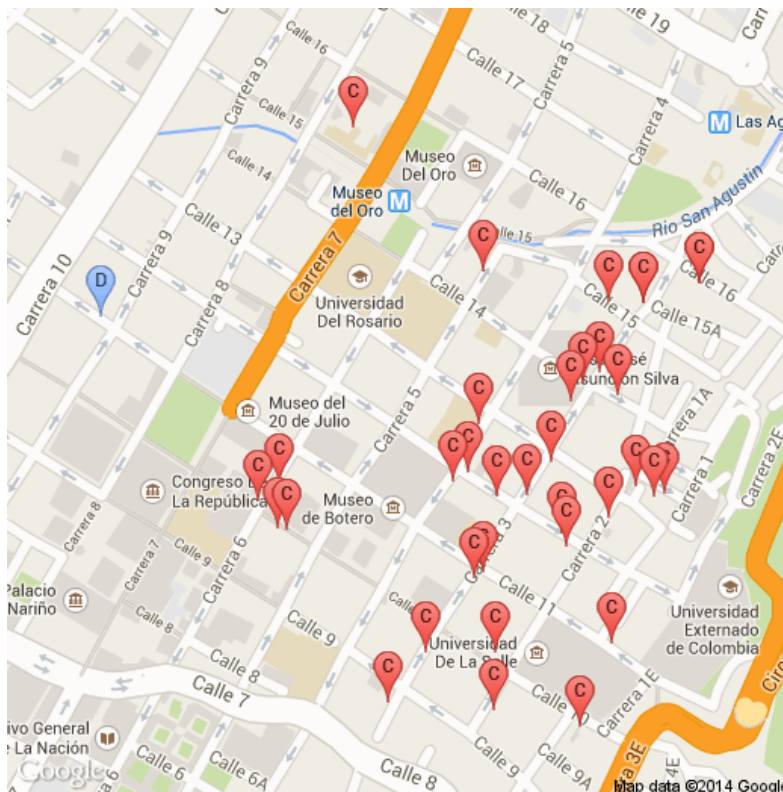
### **5.1.2 Datos del caso de estudio**

La información recolectada relacionada con hábitos de compra correspondiente con volumen de pedidos fue analizada estadísticamente para definir algunos parámetros del modelo de ruteo de vehículos desarrollado en este estudio. La

demanda promedio para la muestra fue de 67.4 Kg con una desviación estándar de 58.9.

Con la información recolectada por SEPRO pudo parametrizarse 35 puntos de demanda en el barrio “La Candelaria”. Con los parámetros definidos, el modelo fue ejecutado en una computadora portátil de 1.3 GHz de 32-bits, con los siguientes parámetros generales:

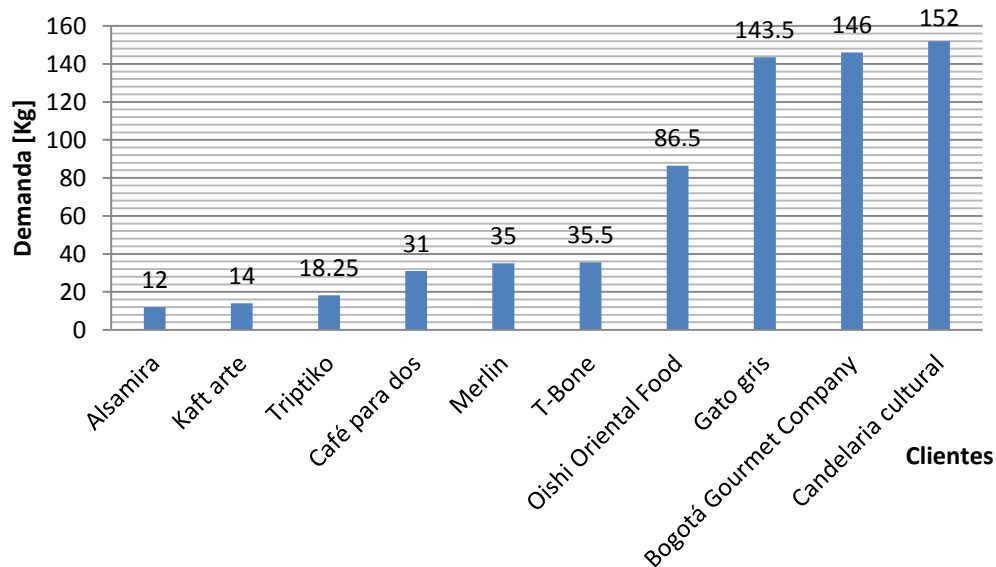
**Figura 5-7.** Ubicación del depósito y de la muestra de los clientes



Fuente: Preparado por el autor usando Google® Maps

- Velocidad de los vehículos: 6.7 Km/h (velocidad de bicicletas de doble rack en áreas pobladas).
- Capacidad de los vehículos: 100 Kg (capacidad de bicicletas de doble rack).
- Tiempo de servicio: 6 minutos.



**Figura 5-8.** Demanda de la muestra de clientes [Kg]

Fuente: Creación propia a partir de la información recolectada

## 5.2 Características del VRP en PYMEs y el SDVRPTW

De manera opuesta a la realidad de muchas organizaciones y específicamente para las PYMEs, de acuerdo con [3] en muchos de los VRPs se considera un hecho que la demanda de los clientes es menor o igual a la capacidad de los vehículos y que la demanda de cada cliente debe ser satisfecha por solo un vehículo, por lo que hay un supuesto de una única visita. En estudios desarrollados por [2] y otros autores, es perceptible que las PYMEs (específicamente en aquellas que se dedican al comercio al por menor de commodities) usan vehículos de baja capacidad, incluyendo bicicletas y motocicletas, por lo que puede ocurrir que la capacidad del vehículo pueda no satisfacer la demanda de algún cliente en una única visita.

Debido a lo anterior, las PYMEs deberían poder fraccionar la demanda de un cliente en varios vehículos con el propósito de satisfacer los requerimientos de los clientes, así como para reducir el número de rutas y la distancia recorrida por los vehículos, esto último apoyado por [76] quienes sostienen que la primera motivación para fraccionar la demanda de un cliente en múltiples rutas es reducir el número de vehículos empleados y la distancia recorrida total. De acuerdo con la discusión desarrollada hasta el momento, el problema de ruteo de vehículos para las PYMEs corresponde a un típico Problema de Ruteo de Vehículos con Fraccionamiento de Carga (SDVRP); sin embargo, las actividades de distribución de las PYMEs así como en las grandes empresas deben abastecer a sus clientes solo dentro de cierta ventana de tiempo definida por sus clientes, por lo tanto el modelo de VRP que corresponde a las PYMEs es el Problema de Ruteo de Vehículos con Fraccionamiento de Carga y Ventanas de Tiempo (SDVRPTW).

El SDVRPTW no ha sido un problema suficientemente estudiado en la literatura. [5] reportan que [50] desarrollaron la única solución heurística para el SDVRPTW, así como muy pocos artículos han sido publicados hasta la fecha. Heurísticas de construcción y de mejoramiento han sido desarrolladas por [36] y [62], tres métodos exactos basados en el método “branch-and-price” por [41], “branch-and-price-and-cut” por [23] y un método “branch-and-price-and-cut” mejorado por [4], así como un algoritmo adicional para el Problema de Ruteo de Vehículos con Fraccionamiento Discreto y Ventanas de Tiempo (DSDVRPTW) basado en el método “branch-and-price” por [69], quienes resaltan que en trabajos previos la demanda del cliente es fraccionada sin tener en cuenta que los productos están discretizados.

El SDVRPTW se define de la siguiente manera:

Dado:

- Un número ilimitado de vehículos con capacidad disponible

localizados en el depósito central.

- Un conjunto de clientes con demanda de productos (incluso superior a la capacidad del vehículo).
- Una ventana de tiempo para visitar cada cliente.

Hallar las rutas que:

- Satisfagan la demanda los clientes (la demanda de un cliente puede ser fraccionada en muchos vehículos, por lo que un cliente puede ser visitado más de una vez).
- Cada ruta inicie y termine en el depósito.
- La carga distribuida en cada ruta no exceda la capacidad del vehículo.
- Cada ruta cumpla las restricciones de ventanas de tiempo.
- El costo total sea minimizado.

Actualmente, los métodos de solución exactos más estudiados están basados en la descomposición de Dantzig-Wolfe y resueltos por algoritmos del tipo “Branch-X”. [41] resuelven el problema resultante de la descomposición usando un algoritmo del tipo “branch-and-price”, a través de la generación de columnas para resolver el problema maestro en el cual se definen las cantidades a distribuir y en el subproblema las rutas son seleccionadas.

[23] cambia el propósito del problema maestro y del subproblema, estableciendo el subproblema como un problema de ruta crítica elemental con restricciones de recursos, obteniendo mejores resultados que [41]. [4] propone mejoramientos al algoritmo de [23] reemplazando el problema de ruta crítica en el subproblema por una búsqueda tabú y algunas inecuaciones.

La heurística de [50] para el SDVRPTW consiste en tres etapas. La primera etapa genera una solución inicial factible construyendo rutas a través de la inserción del cliente más cercano al último insertado en la ruta, teniendo en cuenta que el tiempo de recorrido más el tiempo de espera para atender el siguiente cliente sea

mínimo, como puede verse en la ecuación (1). Si la demanda del último cliente añadido excede la capacidad del vehículo, la demanda es fraccionada. En la segunda etapa el algoritmo ejecuta una búsqueda tabú a partir de la solución inicial y en la tercera etapa se efectúa un proceso de post-optimización.

$$\hat{j} \in \underset{j \in C'}{\operatorname{argmin}} \{t_{ij} + \max\{a_j - \theta_i - t_{ij}, 0\}\} \quad (1)$$

Donde:

- $\hat{j}$ : es el j-ésimo cliente no ruteado más cercano al i-ésimo cliente.
- $t_{ij}$ : es el tiempo de viaje desde el i-ésimo hasta el j-ésimo cliente.
- $a_j$ : es el inicio de la ventana de tiempo del i-ésimo cliente.
- $\theta_i$ : es el inicio del tiempo de servicio del vehículo en el i-ésimo cliente
- $C'$ : es el conjunto de clientes no ruteados.

Sin embargo, los métodos de solución desarrollados para el SDVRPTW son algo complejos para las habilidades y el conocimiento del personal de las PYMEs, así como su robustez no es necesaria para los requerimientos de las PYMEs, por consiguiente, un algoritmo sencillo y fácil de implementar puede satisfacer las necesidades de ruteo de las PYMEs.

### 5.3 Formulación matemática

Abajo se presenta la formulación matemática propuesta por [35], quien expuso por primera vez el SDVRPTW, a partir de las contribuciones sobre el SDVRP por [28]-[29] y sobre el VRPTW por [24]:

$$\text{minimizar} \quad \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^v d_{ij} x_{ijk} \quad (2)$$

$$\text{sujeto a} \quad \sum_{k=1}^v \sum_{i=0}^n x_{ijk} \geq 1 \quad \text{for } j \in N \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ihk} - \sum_{j=0}^n x_{hjk} = 0 \quad \text{for } h \in N, k \in V \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^v f_{ik} = 1 \quad \text{for } i \in N \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^v w_i f_{ik} \leq m_k \quad \text{for } k \in V \quad (6)$$

$$x_{ijk} = 1 \rightarrow D_{ik} + t_{ij} \leq D_{jk} \quad \text{for } (i, j) \in N, k \in N \quad (7)$$

$$e_i \leq D_{ik} \leq l_i \quad \text{for } i \in N, k \in V \quad (8)$$

$$f_{ik} \leq \sum_{j=1}^n x_{ijk} \quad \text{for } i \in N, k \in V \quad (9)$$

$$x_{ijk} \in S \quad (10)$$

$$x_{ijk} = 0 \vee 1 \quad \text{for } (i, j) \in N, k \in N \quad (11)$$

$$f_{ik} \geq 0 \quad \text{for } i \in N, k \in V \quad (12)$$

Donde:

$d_{ij}$ : es el costo de viajar desde el  $i$ -ésimo hasta el  $j$ -ésimo cliente.

$w_i$ : es la demanda del  $i$ -ésimo cliente.

$m_k$ : es la capacidad del  $k$ -ésimo vehículo.

$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{si el } k - \text{ésimo vehículo viaja directamente del cliente } i \text{ al } j \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$

$f_{ik}$ : es la fracción de demanda despachada por el vehículo  $k$  al cliente  $i$ .

$V = \{1, 2, \dots, v\}$ : es el conjunto de vehículos de la flota.

$N = \{1, 2, \dots, n\}$ : es el conjunto de todos los clientes.

$D_{ik}$ : es el tiempo en que el  $k$ -ésimo vehículo deja el  $i$ -ésimo cliente.

$e_i$ : es el inicio de la ventana de tiempo de del  $i$ -ésimo cliente.

$l_i$ : es el fin de la ventana de tiempo del  $i$ -ésimo cliente.

$S$ : es el conjunto de restricciones para evitar subtours.

A partir de la formulación de arriba y teniendo en cuenta las contribuciones de [76] y [50], la siguiente formulación mejorada es analizada:

$$\min \mathbf{z}(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m c_{ij} x_{ijk} \quad (13)$$

$$\mathbf{s.a.} \quad \sum_{i=1}^n x_{ihk} - \sum_{j=1}^n x_{hjk} = 0 \quad \forall h = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m \quad (14)$$

$$\sum_{k=1}^m y_{ik} = d_i \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{ik} \leq Q \quad \forall k = 1, \dots, m \quad (16)$$

$$d_i \sum_{j=1}^n x_{ijk} \geq y_{ik} \quad \forall i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m \quad (17)$$

$$s_{ik} + t_{ij} - B(1 - x_{ijk}) \leq s_{jk} \quad \forall i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m \quad (18)$$

$$s_{ik} + t_{i0} - B(1 - x_{i0k}) \leq b_0 \quad \forall i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m \quad (19)$$

$$e_i \leq s_{ik} \leq l_i \quad \forall i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m \quad (20)$$

$$y_{ik} \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m \quad (21)$$

$$s_{0k} = e_0 \quad \forall k = 1, \dots, m \quad (22)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m \quad (23)$$

Donde:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{si el cliente } j \text{ es visitado después del cliente } i \text{ en la ruta } k \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$c_{ij}$ : es el costo (distancia) de viajar del cliente  $i$  al cliente  $j$

$y_{ik}$ : es la cantidad de demanda satisfecha del  $i$ -ésimo cliente por la ruta  $k$

$d_i$ : es la demanda del  $i$ -ésimo cliente

$s_{ik}$ : es el tiempo de servicio del  $k$ -ésimo vehículo en el cliente  $j$

$t_{ij}$ : es el tiempo de viaje desde el  $i$ -ésimo cliente hasta el  $j$ -ésimo cliente

$e_i$ : es el inicio de la ventana de tiempo del  $i$ -ésimo cliente

$l_i$ : es el fin de la ventana de tiempo del  $i$ -ésimo cliente

$Q$ : es la capacidad de los vehículos

$B$ : es un número muy grande

La función objetivo está descrita en la eq. (13) que busca minimizar la el costo total satisfaciendo las necesidades de los clientes. La eq. (14) permite la conservación del flujo; la eq. (15) garantiza que la demanda de cada cliente sea satisfecha; la eq. (16) define que la cantidad de productos despachados no excedan la capacidad del vehículo; la eq. (17) establece que un cliente que sea visitado por un vehículo es satisfecho por éste; las inecuaciones (18)-(20) establecen que los vehículos deben llegar a cada punto de demanda dentro de su

ventana de tiempo, no antes o después de dicho intervalo de tiempo. La eq. (21) define la no negatividad de la variable descrita y la eq. (22) establece el tiempo de servicio en el cliente 0 (el depósito) como el inicio de la ventana de tiempo del cliente 0, y como el punto de inicio de cada ruta.

La formulación descrita arriba halla los valores óptimos para las variables de decisión que resuelven la pregunta: ¿Cuánto despachar a qué cliente y por medio de qué vehículo?, que cumple todas las restricciones del SDVRPTW.

Para el caso de las PYMEs, considerando el caso de estudio y en términos de desarrollar un método de solución fácil de interpretar, fácil de mantener y económico de implementar algunos supuestos se harán sobre la formulación matemática original:

- Solo hay un tipo de vehículos (p.e. bicicletas).
- Pueden crearse un número ilimitado de rutas con el objetivo de satisfacer los requerimientos de los clientes.
- Un cliente puede ser visitado hasta dos veces, por lo tanto su demanda debe ser satisfecha hasta por dos vehículos diferentes. Este último supuesto tiene en cuenta que un cliente no estará dispuesto a atender más de dos vehículos para satisfacer sus necesidades.

#### **5.4 Algoritmo desarrollado**

Para resolver el SDVRPTW para PYMEs analizado en este trabajo, fue desarrollada una heurística de inserción compuesta por un algoritmo de solución inicial, un algoritmo básico de post-optimización integrado y un algoritmo de asignación de vehículos. El método fue evaluado con las instancias de Salomon (1987) [72] y a partir de sus resultados, dados los reducidos tiempos de ejecución,

se incorporó una sencilla mejora al algoritmo, simplemente aleatorizando el listado inicial de clientes. Los algoritmos desarrollados en este estudio fueron modelados y programados con fines experimentales para validar que el SDVRPTW es el tipo de problema que se ajusta a los requerimientos de las PYMEs y para evidenciar el potencial de los métodos cuantitativos como herramientas para la toma de decisiones. Los algoritmos que se presentan a continuación se describen en pseudocódigo.

#### 5.4.1 Algoritmo de solución inicial

El algoritmo desarrollado tiene en cuenta el criterio de selección  $\hat{j}$  de [50] para las inserciones de vecinos en la solución inicial del algoritmo que propone. Adicionalmente para la inserción de un nuevo cliente en una ruta en construcción es evaluado que el vehículo pueda regresar al depósito dentro de la ventana de tiempo del depósito y que si el cliente que será servido ya había sido visitado por otro vehículo y tiene un remanente de demanda, la cantidad de demanda a despachar a dicho cliente en el proceso de inserción en la actual ruta en construcción debe satisfacer el total de la demanda remanente, con el ánimo de usar toda la capacidad disponible de los vehículos y para satisfacer los requerimientos de los clientes con hasta dos vehículos.

#### Algoritmo 5-1. Algoritmo de solución inicial

##### **Start**

Solicitar al usuario el ingreso de los parámetros:  $Q$ ,  $V^4$  y  $ST^5$

Calcular la matriz de distancias entre todos los clientes

Cargar en un arreglo las ventanas de tiempo de cada cliente

Cargar en un arreglo las demanda de cada cliente

---

<sup>4</sup> Velocidad de los vehículos: Permite calcular el tiempo requerido para viajar cierta distancia entre dos nodos.

<sup>5</sup> Tiempo de servicio: Valor constante para todos los clientes. Se refiere a aquel tiempo empleado para servir un cliente.



Verificar  $e_0 + t_{0j} < l_j$   
 $e_0 + t_{0j} + \max\{e_j - s_{0k} - t_{0j}, 0\} + ST + t_{j0} < l_0$   
 $d_j < 2Q$

**Do**

$k = k + 1$

Iniciar la ruta  $k$  desde el depósito. Definir  $s_{0k} = e_0$

Definir  $q(k) = Q$

Hallar el cliente  $j$  no ruteado más cerca a  $i$  de acuerdo a la eq. (1) que cumpla con las restricciones de ventanas de tiempo e incluyendo

$(s_{ik} + t_{ij} + \max\{e_j - s_{ik} - t_{ij}, 0\}) + t_{j0} \leq l_0$  y  $Route_j = \text{true}$

Añadir  $j$  a la ruta  $k$ , y definir  $s_{jk} = s_{ik} + t_{ij} + \max\{e_j - s_{ik} - t_{ij}, 0\}$

**Do**

**If**  $q_k > 0$  **then**

**For** cada cliente no ruteado, verificar

1)  $s_{ik} + t_{ij} < l_j$

2)  $s_{ik} + t_{ij} + \max\{e_j - s_{ik} - t_{ij}, 0\} + ST + t_{ij} < l_j$

3) **If**  $Holg_j = \text{True}$ <sup>6</sup> **then**

$q_k - d_j > 0$

**Else**  $q_k - d_j < 0$

**End if**

**Next** cliente

**End if**

Añadir el cliente más cercano que satisfaga los 3 criterios

**While**  $q_k < 0$

**Call** Algoritmo\_de\_Postoptimización (Ver 5.4.2)

Verificar que todos los clientes hayan sido ruteados

**While** AllRouted = False

---

<sup>6</sup>Si la demanda de un cliente ya ha sido fraccionada,  $Holg(j) = \text{True}$ . La demanda de un cliente puede ser satisfecha por hasta 2 vehículos.

**Call Algoritmo\_de\_asignación\_de\_vehículos (Ver 5.4.3)****End****5.4.2 Algoritmo de Post-optimización**

Ya construidas todas las rutas necesarias para satisfacer los requisitos de los clientes cumpliendo con todas las restricciones, en esta parte el método combina aleatoriamente cada posición en cada ruta construida buscando una mejor solución que minimice la distancia recorrida total en dicha ruta.

**Algoritmo 5-2. Algoritmo de Post-optimización****Start**

Cargar en un arreglo todos los clientes asignados a la ruta actual

Calcular la distancia total recorrida en la ruta actual

**Do**

Aleatorizar la secuencia de visita de la ruta actual

Calcular la nueva distancia total recorrida

**If** nueva distancia recorrida total < distancia recorrida total actual **then****For** todos los clientes en la nueva ruta, verificar el cumplimiento de:

$$s_{ik} + t_{ij} < l_j \text{ y}$$

$$s_{ik} + t_{ij} + \max\{e_j - s_{ik} - t_{ij}, 0\} + ST + t_{ij} < l_j$$

**Next** siguiente cliente en la ruta**If** las restricciones de ventanas de tiempo se cumplen **then**

Reorganizar la secuencia de visita

Actual secuencia de visita = nueva secuencia de visita

**End if****End if** $i = i + 1$ **While**  $i <> i^2$

**End**

### 5.4.3 Algoritmo de asignación de vehículos

Finalmente la heurística desarrollada asigna cada ruta creada a un vehículo teniendo en cuenta que el tiempo de servicio total empleado para viajar cada ruta asignada no puede tomar más que el fin de la ventana de tiempo del depósito y las ventanas de tiempo de los clientes visitados en la ruta añadida deben ser satisfechos. El criterio de selección de la eq. 1 es tenido en cuenta en el algoritmo de asignación de vehículos al añadir una nueva ruta con el mínimo tiempo de espera, sino, un nuevo vehículo debe ser usado hasta que todas las rutas han sido asignadas.

#### **Algoritmo 5-3.** Algoritmo de asignación de vehículos

**Start**

**Do**

Iniciar un vehículo desde el depósito

Tiempo de viaje = Inicio de la ventana de tiempo del depósito

**Do**

**For** todas las rutas no asignadas

Evaluar los siguientes criterios:

- 1) Seleccionar la ruta que el menor tiempo de espera implique para el vehículo actual
- 2) Verificar el cumplimiento de las ventanas de tiempo de la ruta añadida al vehículo actual
- 3) Calcular el nuevo tiempo total de viaje. Validar si el vehículo puede regresar al depósito antes del fin de la ventana de tiempo del depósito

**If** los 3 criterios anteriores son verdaderos **then**

Añadir la ruta al vehículo actual

```

                Actualizar variables
            Else
                New vehicle = True
            Exit for
            End if
        Next ruta no asignada
    While New vehicle = False
        Verificar que todas las rutas hayan sido asignadas
While todas las rutas no hayan sido asignadas
End

```

#### 5.4.4 Algoritmo mejorado

Tras analizar los resultados obtenidos por el algoritmo para las instancias de Salomon (1987) [72] con el primer método desarrollado (*Sepúlveda, J. (a)*) (Ver Tabla 5.1) y dados los bajos tiempos computacionales requeridos para generar soluciones para el SDVRPTW, un algoritmo mejorado se desarrolló. El algoritmo mejorado intenta romper la convergencia del algoritmo original hacia óptimos locales solo con la aleatorización del orden de los clientes en el listado inicial. El algoritmo completo itera  $a/10$  veces<sup>7</sup> buscando mejores soluciones.

#### **Algoritmo 5-4.** Algoritmo mejorado

##### **Start**

Distancia total recorrida mínima = Número muy grande

**For**  $x = 1$  to  $a/10$  (itera  $a/10$  veces)

**Call** **Algoritmo\_de\_solución\_inicial**

    Calcular nueva distancia total recorrida

**If** nueva distancia total recorrida < distancia total recorrida mínima **then**

---

<sup>7</sup>a: Es el número total de clientes.

Actualizar rutas y variables de vehículos

**End if**

Aleatorizar la lista de clientes en la hoja de cálculo de Microsoft® Excel™

**Next x**

**End**

## 5.5 Resultados computacionales

El algoritmo descrito fue desarrollado en VBA Excel® con una amigable y sencilla interfaz de usuario (Ver Apéndice 4), con el propósito de que pudiera ser empleada por el personal administrativo de las PYMEs en equipos portátiles de gama baja y sin la adquisición de nuevo software para la generación de soluciones en cortos periodos de tiempos y con cierto grado de eficacia. Esta herramienta podrá ser usada por personas con conocimientos generales de computadoras y sus soluciones podrán ser interpretadas fácilmente por dichos usuarios.

En la sección 5.5.1 pueden verificarse los resultados del algoritmo probado con las instancias de Salomon (1987) para efectos de comparaciones de su rendimiento y en la sección 5.5.2 se encontrarán los resultados sobre una instancia de la vida real (caso de estudio) en tres escenarios con ventanas de tiempo: 1) SIN fraccionamiento de la demanda cuando la demanda NO excede la capacidad del vehículo (VRPTW) (sección 5.5.2.1), 2) CON fraccionamiento de la demanda cuando la demanda NO excede la capacidad del vehículo (SDVRPTW) (sección 5.5.2.2), 3) CON fraccionamiento de la demanda cuando la demanda EXCEDE la capacidad del vehículo (que es el enfoque sugerido para las PYMEs). Este último escenario (cuando la demanda excede la capacidad del vehículo) no pudo haber sido resuelto sin fraccionar la demanda (sección 5.5.2.3).

### 5.5.1 Instancias de Salomon (1987)

La heurística fue probada con el conjunto clásico de 56 problemas de comparación del VRPTW de Salomon (1987) [72] que considera instancias de 100 clientes y está compuesto por 6 diferentes tipos de problemas: C1, C2, R1, R2, RC1, RC2. Los problemas del tipo “C” tienen un conjunto de clientes agrupados cuyas ventanas de tiempo fueron generadas basadas en una solución conocida. Los problemas del tipo “R” tienen clientes ubicados aleatoriamente así como agrupados. Los conjuntos de tipo 1 tienen vehículos de baja capacidad y estrechas ventanas de tiempo y los conjuntos del tipo 2 tienen vehículos de gran capacidad y amplias ventanas de tiempo.

Los experimentos fueron realizados en una computadora portátil de 1.3 GHz y 32-bits y sus resultados fueron comparados con los mejores resultados registrados en la literatura para métodos tanto heurísticos como metaheurísticos para el VRPTW para los 6 conjuntos de problemas. Los métodos evaluados con los mejores resultados son: Gambardella et. al. (1999) (nombrado *GTA* in las Tablas), Rochat & Taillard (1995) (*RT*), Kilby et. al. (1999) (*KPS*), Taillard et. al. (1997) (*TB*), Gehring & Homberger (1999) (*GH*) y Berger, Barkaoui & Bräysy (2001) (*BBB*). En las tablas 5-1 a 5-3 se presentan los indicadores de desempeño del método. En las tablas, Sepulveda, J. (a) presenta los resultados del algoritmo desarrollado inicialmente y Sepulveda, J. (b) presenta los resultados del algoritmo mejorado.

Las tablas 5-1 y 5-2 presentan los resultados del algoritmo frente a las mejores soluciones reportadas en la literatura para cada conjunto de problemas. El promedio para cada conjunto de problemas fue calculado sobre todos los resultados de cada una de las instancias ejecutadas independientemente. Para cada conjunto, la primera columna presenta el número promedio de vehículos necesarios, la segunda columna presenta el promedio de la distancia recorrida

total y la tercera columna presenta el promedio del tiempo computacional total requerido para obtener las soluciones.

La Tabla 5-3 presenta la diferencia en desempeño de la heurística desarrollada para cada indicador en cada conjunto de problemas frente al mejor resultado reportado en la literatura. Para instancias del tipo “1” la heurística obtiene mejores resultados que en instancias del tipo “2”. En general, para todas las instancias, el tiempo requerido por la heurística desarrollada para obtener las soluciones al problema es alrededor de un 77% menor que el tiempo requerido para obtener la mejor solución reportada, la diferencia en número de vehículos es de un 26% mayor y la diferencia en la distancia recorrida total es de un 45% mayor.

La heurística desarrollada obtiene mejores resultados en problemas de localización de clientes de tipo “agrupados” que en problemas de tipo “aleatorio”. La heurística desarrollada igualó el mejor resultado para la instancia “C201” y lo obtuvo en 4.69 segundos. Ver tabla 5-4.

**Tabla 5-1.** Comparación del desempeño promedio de los algoritmos para VRPTW para las instancias del tipo 1

Autor	R1			C1			RC1		
	#	Distancia	Tiempo	#	Distancia	Tiempo	#	Distancia	Tiempo
GTA	12.38	1210.83	1800.00	10.00	828.38	1800.00	11.92	1388.13	1800.00
RT	12.58	1197.42	2700.00	10.00	828.45	3200.00	12.33	1269.48	2600.00
KPS	12.67	1200.33	2900.00	10.00	830.75	2900.00	12.12	1388.15	2900.00
TB	12.33	1220.35	13774.00	10.00	828.45	14630.00	11.90	1381.31	11264.00
GH	12.41	1201.00	300.00	10.00	829.00	300.00	12.00	1356.00	300.00
BBB	12.17	1251.40	1800.00	10.00	828.50	1800.00	11.88	1414.86	1800.00
Sepúlveda, J (a)	15.67	1672.56	10.62	10.44	1118.91	7.94	15.50	1846.01	10.36
Sepúlveda, J (b)	15.58	1630.94	101.28	10.44	1076.15	73.03	15.50	1832.55	100.25

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados

**Tabla 5-2.** Comparación del desempeño promedio de los algoritmos para VRPTW para las instancias del tipo 2

Autor	R2			C2			RC2		
	#	Distancia	Tiempo	#	Distancia	Tiempo	#	Distancia	Tiempo
GTA	3.00	960.31	1800.00	3.00	591.85	1800.00	3.33	1149.28	1800.00
RT	3.09	954.36	9800.00	3.00	590.32	7200.00	3.62	1139.79	7800.00
KPS	3.00	966.56	2900.00	3.00	592.29	2900.00	3.38	1133.42	2900.00
TB	3.00	1013.35	20232.00	3.00	590.91	16375.00	3.38	1198.63	11596.00
GH	2.91	945.00	300.00	3.00	590.00	300.00	3.25	1140.00	300.00
BBB	2.73	1056.59	1800.00	3.00	590.06	1800.00	3.25	1258.15	1800.00
Sepúlveda, J (a)	3.82	1517.64	5.17	3.50	871.06	4.96	4.50	1830.62	5.33
Sepúlveda, J (b)	3.73	1443.61	48.71	3.50	870.44	47.01	4.50	1830.62	51.26

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados



**Tabla 5-3.** Diferencias en el desempeño de la heurística desarrollada respecto del mejor resultado para cada conjunto de instancias

Tipo de problema	Sepúlveda, Juan (a)			Sepúlveda, Juan (b)		
	NV	Distancia	Tiempo	NV	Distancia	Tiempo
R1	29%	40%	-96%	28%	36%	-66%
C1	4%	35%	-97%	4%	30%	-76%
RC1	30%	45%	-97%	30%	44%	-67%
R2	40%	61%	-98%	37%	53%	-84%
C2	17%	48%	-98%	17%	48%	-84%
RC2	38%	62%	-98%	38%	62%	-83%

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados

**Tabla 5-4.** Mejor solución igualada por el método desarrollado

Problema	Mejor conocida			Sepulveda, Juan (a)		
	# Vehic.	Distancia	Autores	# Vehic.	Distancia	Tiempo
C201	3	591.56	RT	3	591.56	4.69

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados

### 5.5.2 Resultados del caso de estudio

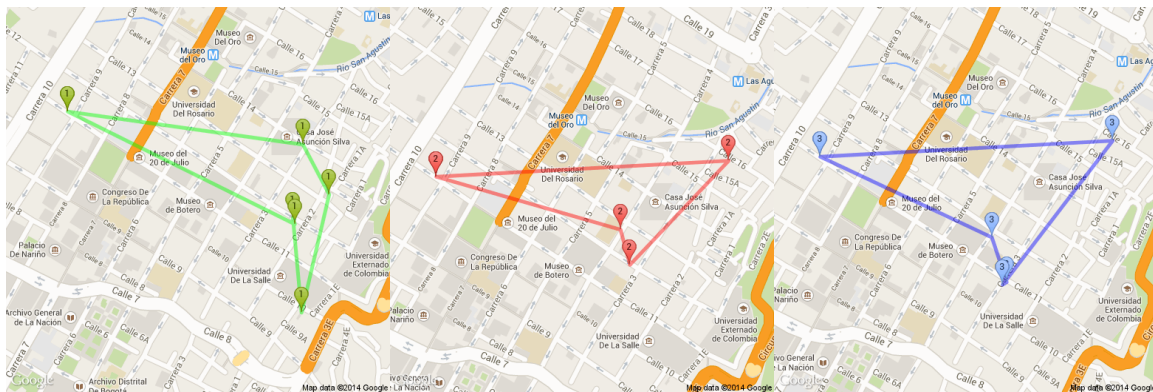
La heurística desarrollada fue ejecutada en una computadora portátil con procesador de 1.3 GHz y Sistema Operativo de 32-bits con los datos de la instancia real, compuesta por 35 clientes (hoteles, hostales, restaurantes y cafeterías) todos localizados en el barrio “*La Candelaria*” (Ver Apéndice 2). Se ejecutaron tres escenarios con la heurística para evaluar la validez que el SDVRPTW se ajusta mejor que el VRPTW a las necesidades de las PYMEs para el ruteo de vehículos. Las ventanas de tiempo fueron generadas aleatoriamente para cada uno de los clientes del conjunto de datos. El horizonte de planeación fue de un día.

5.5.2.1 Escenario VRPTW ( $d^8 < Q^9$ )

En este escenario la demanda de los clientes fue reducida a la mitad y el fraccionamiento de la demanda no estuvo habilitado.

Al algoritmo le tomó 2.328 segundos obtener la solución, 2 vehículos fueron necesarios para satisfacer las necesidades de los cliente. 11 rutas fueron creadas y la distancia recorrida fue de 22.269 kilómetros.

**Figura 5-9.** Rutas resultantes para el escenario VRPTW ( $d < Q$ ) (Ver Apéndice 3)



Fuente: Generado por la herramienta desarrollada empleando de Google® Maps

La siguiente tabla presenta la asignación de rutas y la secuencia de ruteo de los vehículos usados.

**Tabla 5-5.** Asignación de rutas y secuencia de visita para el escenario VRPTW ( $d < Q$ )

Vehículo	Ruta	Vehículo	Ruta
1	1	2	2
	6		4
	8		5
	9		3

<sup>8</sup> Demanda del cliente  
<sup>9</sup> Capacidad del vehículo

	11		7
	10		

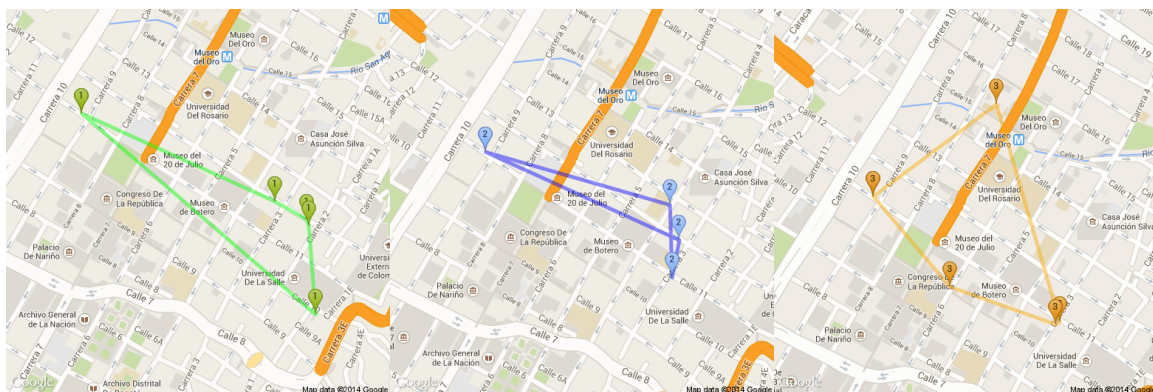
Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados

5.5.2.2 Escenario SDVRPTW (d<Q)

En este escenario la demanda fue reducida a la mitad y el fraccionamiento de la demanda estaba habilitado. Este escenario permite comparar el VRPTW con el SDVRPTW cuando la demanda no excede la capacidad de los vehículos.

El algoritmo tardó 2.086 segundos en obtener una solución y solo un vehículo fue necesario para satisfacer todos los requerimientos de los clientes. 10 rutas fueron creadas y la distancia recorrida fue de 22.383 kilómetros.

**Figura 5-10.** Rutas resultantes para el escenario SDVRPTW (d<Q) (Ver Apéndice 3)



Fuente: Generado por la herramienta desarrollada empleando Google® Maps

La tabla 5-6 presenta la secuencia de ruteo y del vehículo usado y la tabla 5-7 muestra aquellos clientes a quienes les fue fraccionada la demanda y qué rutas satisficieron dichas demandas.

**Tabla 5-6.** Asignación de rutas y secuencia de visita para el escenario SDVRPTW (d<Q)

Vehículo	Ruta	Vehículo	Ruta
1	1	1	6
	2		7
	3		8
	4		9
	5		10

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados

**Tabla 5-7.** Clientes con demanda fraccionada para el escenario SDVRPTW (d<Q)

Cliente	Rutas
Quinoa y amaranto	2 y 3
Hostal la quinta	5 y 6
Hotel platypus	3 y 4
La bruja	1 y 2
Hostel Sue Candelaria	4 y 5

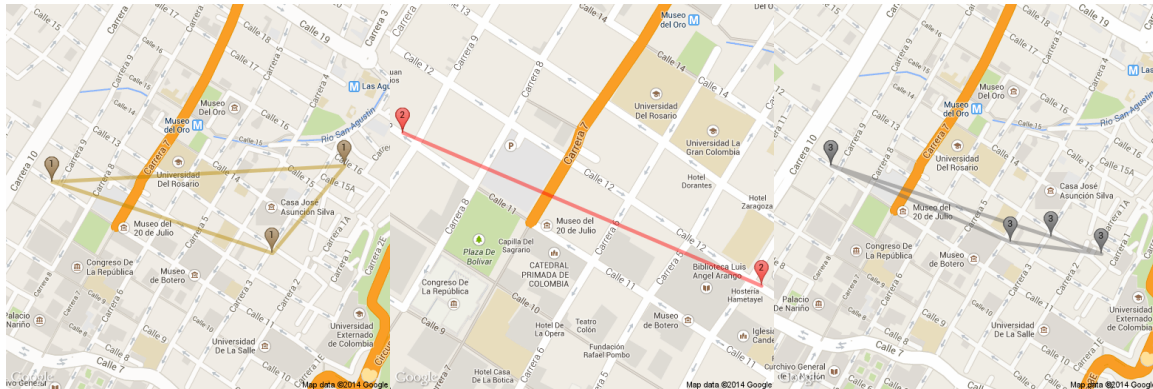
Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados

### 5.5.2.3 Escenario SDVRPTW (d>Q)

En este escenario la demanda se mantuvo completa y el fraccionamiento de la demanda estuvo habilitado. Debido a que la demanda se mantuvo completa y esta excedía la capacidad de los vehículos, sin el fraccionamiento de la demanda el problema hubiese sido infactible.

El algoritmo tardó 135.606 segundos en obtener una solución, solo 1 vehículo fue necesario para satisfacer las necesidades clientes. 20 rutas fueron creadas y la distancia recorrida fue de 37.154 kilómetros.

**Figura 5-11.** Rutas resultantes para el escenario SDVRPTW (d>Q) (Ver Apéndice 3)



Fuente: Generado por la herramienta desarrollada empleando Google® Maps

La tabla 5-8 presenta la secuencia de visita del vehículo usado y la tabla 5-9 muestra aquellos clientes a quienes les fue fraccionada la demanda y las rutas que satisficieron dichas demandas.

**Tabla 5-8.** Asignación de rutas y secuencia de visita para el escenario SDVRPTW (d>Q)

Vehículo	Ruta	Vehículo	Ruta
1	1	1	13
	2		14
	3		15
	5		12
	7		21
	6		16
	8		17
	4		20
	9		19
	10		18
	11		

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados

**Tabla 5-9.** Clientes con demanda fraccionada para el escenario SDVRPTW (d>Q)

Cliente	Ruta	Cliente	Ruta
Hostal Destino Nomada	17 y 18	El Carnero	2 y 3
Hotel Internacional	9 y 10	Hotel Platypus	7 y 8
Quinoa y amaranto	6 y 8	La bruja	16 y 17
Andante ma non tropo	14 y 15	Hostal el baluarte	8 y 9
La scala	19 y 20	Hostal martinik	13 y 14
Hostal la quinta	11 y 13	Hotel muisca	5 y 6
Hostal aventureros	1 y 3	Hotel sue candelaria	15 y 16
Café de la peña	12 y 13	El gato gris	3 y 4
Fulanitos	18 y 19	Enchiladas	4 y 5
Hostal CrankyCroc	10 y 11		

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados

## 5.6 Discusión de resultados

A pesar de que el problema de ruteo de vehículos ha sido un tema ampliamente estudiado desde alrededor de 20 años, éste se ha venido enfocando incrementalmente en problemas y características de las compañías en crecimiento que requieren de técnicas para la planeación de grandes procesos de distribución, con muchas instancias y muchos vehículos. Actualmente existen diversas variantes del VRP así como métodos de solución para resolverlos, pero con el cambio permanente de los mercados y de las condiciones de comercio en la última década, los nuevos métodos de solución se ajustan mejor a las necesidades de las grandes compañías, que cuentan con suficientes recursos para invertir en aplicaciones y sistemas de apoyo a la toma de decisiones de distribución, así como en personal experto para manipular y administrar dichas plataformas.

De otra parte, las MiPYMEs están expuestas a la misma dinámica de los mercados como las grandes empresas, así como sujetas a la agresiva competencia local, regional e incluso internacional con la incursión de

multinacionales, grandes cadenas y economías de escala. Muchas de las MiPYMEs aún emplean bicicletas y pequeños vehículos motorizados para sus actividades de distribución, su planta de personal en la mayor proporción es menor a 50 empleados y cuentan con habilidades analíticas y computacionales básicas, entre otras debilidades. Las MiPYMEs no tienen suficientes métodos y herramientas para solucionar los problemas de ruteo de vehículos o para resolver otros problemas de toma de decisiones operativas a su alcance (y de su dominio), que tengan en cuenta sus características particulares y restricciones que les permitan sobrevivir y fortalecer sus capacidades e incrementar su competitividad.

Con el uso de métodos cuantitativos y otras herramientas ampliamente difundidas para la toma de decisiones, no solo para las actividades de distribución, las PYMEs podrán reaccionar rápida y apropiadamente a cualquier cambio en el entorno que pueda afectar el desempeño sus organizaciones y las faculte para usar de una mejor manera cada recurso con el que cuentan.

Desarrollando y brindándole a las PYMEs herramientas técnicas de apoyo a las actividades de distribución, comerciales, operacionales y financieras, éstas podrán mejorar sus márgenes de rentabilidad y generar mayor empleo, desarrollo y bienestar para las ciudades y regiones de los países en vías de desarrollo.

**Tabla 5-10.** Resumen de resultados para los tres escenarios evaluados del caso de estudio

<b>Escenario</b>	<b>Vehículos</b>	<b>Distancia recorrida</b>	<b>Tiempo</b>
VRPTW ( $d < Q$ )	2	22.269	2.328
SDVRPTW ( $d < Q$ )	1	22.383	2.086
SDVRPTW ( $d > Q$ )	1	37.154	135.606

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados

El considerar el problema de ruteo de vehículos para PYMEs como un SDVRPTW les proporciona beneficios en términos de uso de recursos, como puede verse en

la tabla 6-1. Usando el enfoque del SDVRPTW se reduce el número de vehículos usados para satisfacer la demanda de los clientes (primera función objetivo) y habilita el uso de vehículos con menor capacidad que la demanda de los clientes a través de su fraccionamiento. El método desarrollado en este estudio procura resolver el problema de ruteo de vehículos en PYMEs con un enfoque no considerado a través del modelo del SDVRPTW, fraccionando la demanda de los clientes hasta en dos lotes, usando una heurística de inserción con un algoritmo de post-optimización primitivo (aleatorizando el orden inicial del conjunto de clientes) y empleando una plataforma tecnológica de uso común (Microsoft® Excel™) para el despliegue de la herramienta, fácil de entender, fácil de mantener, fácil de mejorar y económica de implementar. La heurística desarrollada, basada en el SDVRPTW y su despliegue en Microsoft® Excel™ con una interfaz amigable, constituyen la clase de herramientas que deberían usar las PYMEs para la toma de decisiones, que les ayuden a resolver problemas combinatoriales o analíticos en segundos, respondiendo a los problemas de la vida real de las empresas en un corto periodo de tiempo, con cierto grado de precisión y confiabilidad.



## 6. CONCLUSIONES

### 6.1 Conclusiones principales

- De acuerdo con la revisión de la literatura realizada, hay muy pocos estudios relacionados con logística de distribución (alrededor de 50 artículos) y ruteo de vehículos (menos de 5 artículos) en PYMEs.
- A partir de la información recolectada por SEPRO relacionada con los hábitos de compra de los clientes potenciales de la PYME seleccionada, de los estudios realizados por diferentes instituciones gubernamentales y artículos de estudio de caso, se definieron los parámetros de modelo de ruteo de vehículos desarrollado en este estudio.
- Analizando los diferentes enfoques disponibles en la literatura para el ruteo de vehículos y teniendo en cuenta las características de las actividades de distribución física de las PYMEs, se desarrolló un método heurístico simple para el caso de estudio.
- Se ejecutó el modelo cuantitativo desarrollado sobre instancias de la literatura y sobre una instancia real para el caso de estudio, se obtuvieron resultados y se compararon los indicadores del número de vehículos, distancia recorrida y tiempo computacional empleado para medir el impacto del modelo desarrollado.
- El Problema de Ruteo de Vehículos con Fraccionamiento de la Demanda y Ventanas de Tiempo (SDVRPTW) o cualquier otro enfoque del Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) aplicado en MiPYMEs no han sido ampliamente estudiados en la literatura, así como los diferentes enfoques del VRP no consideran las características administrativas, económicas y operacionales

especiales de las MiPYMEs, por lo que se requiere mayor investigación a este respecto para proponer herramientas y técnicas que se ajuste a las necesidades de las MiPYMEs.

- El enfoque del SDVRPTW con fraccionamiento de la demanda hasta en dos lotes ofrece una solución económica y viable para el VRP en MiPYMEs, dado que permite aprovechar mejor cada uno de los medios disponibles para las actividades de distribución.
- El caso de estudio ubicado en el barrio “*La Candelaria*”, Bogotá - Colombia tiene gran relevancia en los procesos de ruteo de vehículos en áreas pequeñas, bajas velocidades de los vehículos dado a los atascamientos de los vehículos sobre las vías en horas pico, vehículos para la distribución de los productos con baja capacidad, vías estrechas y adoquinadas y clientes con demanda variable y frecuencia de pedidos incierta. Dicho caso puede replicarse en centro históricos, áreas de conservación arquitectónica y de calles estrechas en cualquier parte del mundo.
- Las MiPYMEs de comercio al por menor atienden necesidades específicas de sus clientes ubicados localmente, quienes cuentan con una frecuencia de pedidos incierta en parte dado a su baja capacidad de almacenamiento de productos e insumos.
- De acuerdo con [3] en la mayoría de los VRPs es un hecho que la demanda del cliente es menor o igual que la capacidad del vehículo y que cada cliente debe ser satisfecho por solo un vehículo. Para las MiPYMEs de comercio al por menor dicha restricción debe ser relajada debido a la capacidad limitada de los vehículos. Por lo anterior, en este estudio se validó el enfoque SDVRPTW.

- Las aplicaciones de ruteo de vehículos que permiten el fraccionamiento de la demanda se ajustan a los requerimientos de las MiPYMEs, las cuales tienen una reducida flota de vehículos de baja capacidad.
- Una aplicación o herramienta computacional con una simple y amigable interfaz de usuario desarrollada en una plataforma tecnológica de uso común permitiría a los administradores de las PYMEs realizar toma de decisiones usando métodos cuantitativos de una manera sencilla.
- La heurística desarrollada y desplegada en Microsoft® Excel™ proporciona soluciones con cierto grado de precisión y confianza en un muy corto periodo de tiempo.
- La aplicación desarrollada experimentalmente en Microsoft® Excel™ para este trabajo, puede ser usada por una persona sin habilidades en el manejo de hojas de cálculo u otras aplicaciones más complejas. Solo es requerido saber digitar información usando el teclado de una computadora.
- La heurística desarrollada, de acuerdo con los resultados para las instancias de Salomon (1987), obtiene mejores resultados en problemas de clientes agrupados que en problemas de clientes distribuidos aleatoriamente.
- En el modelo tradicional (sin fraccionamiento de la demanda), si la demanda excede la capacidad disponible de los vehículos, el problema es infactible. Por lo anterior, es necesario un enfoque del SDVRPTW para resolver este tipo de situaciones.
- De acuerdo con los resultados, comparando el enfoque del VRPTW y el enfoque del SDVRPTW, donde la demanda no excede la capacidad del

vehículo, el enfoque del SDVRTPW (permitiendo el fraccionamiento de la demanda hasta en dos lotes) reduce el número de vehículos necesarios para satisfacer las necesidades de los clientes.

## **6.2 Estudios futuros**

Partiendo de los resultados obtenidos en este estudio, en futuros estudios se podría analizar el empleo de otros métodos de solución (exactos o metaheurísticos) y algoritmos más confiables y eficientes que satisfagan las restricciones de las MiPYMEs para el ruteo de vehículos en un alcance local y regional, manteniendo simplicidad en su formulación y mejorando su flexibilidad y adaptabilidad a otras condiciones y variables que puedan identificarse en posteriores investigaciones. Las aplicaciones que puedan llegar a desarrollarse deben programarse y desplegarse en plataformas o sistemas operativos de fácil acceso para las MiPYMEs, así como debe preponderarse su usabilidad y funcionalidad sobre otros aspectos.

## 7. Referencias

- [1] Alba, E., & Dorronsoro, B. 2006. Computing nine new best-so-far solutions for Capacitated VRP with a cellular Genetic Algorithm. *Information Processing Letters*, 98(6). 225–230.
  
- [2] Arango, M. D., Adarme, W., & Zapata, J. A. 2010. Distribución de commodities, usando medios alternativos de transporte. Caso Colombia pymes panificadoras]. *DYNA*, 77(163). 222–233
  
- [3] Archetti, Claudia, Savelsbergh, Martin W.P., & Speranza, M. Grazia. 2008. An optimization-based heuristic for the split delivery vehicle routing problem. *Transportation Science* 42(1). 22-31.
  
- [4] Archetti, C., Bouchart, M., & Desaulniers, G. 2011. Enhanced Branch-and-Price-and-Cut for vehicle routing with split deliveries and time windows. *Transportation Science* 45(3). 285-298.
  
- [5] Archetti, C., & Speranza, M.G. 2012. Vehicle routing problems with split deliveries. *International Transactions in Operational Research* 19. 3-22.
  
- [6] Augerat, P., Belenguer, J.M., Benavent, E., Corberán, A., Naddef, D., & Rinaldi, G. 1995. Computational results with a branch and cut code for the capacitated vehicle routing problem. Tech. Rep. 1 RR949-M, ARTEMIS-IMAG. Grenoble France.
  
- [7] Baldacci, R., Christofides, N., & Mingozzi, A. 2008. An exact algorithm for the vehicle routing problem based on the set partitioning formulation with additional cuts. *Mathematical Programming Series A* 115 (2). 351–385.
  
- [8] Baldacci, R., Hadjiconstantinou, E., & Mingozzi, A. 2004. An exact algorithm for

the capacitated vehicle routing problem based on a two-commodity network flow formulation. *Operations Research* 52. 723–738.

- [9] Baldacci, R., Maniezzo, V., & Mingozzi, A. 2004. An Exact Method for the Car Pooling Problem Based on Lagrangean Column Generation. *Operations Research*, 52(3). 422–439.
- [10] Balinski, M., & Quandt, R. 1964. On an integer program for a delivery problem. *Operations Research* 12. 300–304.
- [11] Bard, J.F., Kontoravdis, G., & Yu, G. 2002. A branch-and-cut procedure for the vehicle routing problem with time windows. *Transportation Science* 36. 250–269.
- [12] Berger, J., Barkaoui, M., & Bräysy, O. 2003. A route-directed hybrid genetic approach for the vehicle routing problem with time windows. *INFOR* 41. 179–194.
- [13] Berger, J., Barkaoui, M., & Bräysy, O. 2004. A Parallel Hybrid Genetic Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Computers & Operations Research*, Volume 31, Issue 12, Oct. 2004. 2037-2053.
- [14] Bodin, L. 1975. A taxonomic structure for vehicle routing and scheduling problems. *Computers and Urban Society*, 1. 11–29.
- [15] Bodin, L., & Golden, B. 1981. Classification in vehicle routing and scheduling. *Networks*, 11. 97–108.
- [16] Clarke, G., & Wright, J.W. 1964. Scheduling of vehicles from a central depot

to a number of delivery points. *Operations Research* 12. 568–581.

- [17] Cordeau, J.-F., Desaulniers, G., Desrosiers, J., Solomon, M., & Soumis, F. 2002. The vrp with time windows. In: Toth, P., Vigo, D. (Eds.), *The Vehicle Routing Problem*, vol. 9. SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications, Philadelphia. 157–193.
- [18] Cordeau, J.-F., Gendreau, M., Hertz, A., Laporte, G., & Sormany, J.-S. 2005. New heuristics for the vehicle routing problem. In: Langevin, A., Riopel, D. (Eds.), *Logistics Systems: Design and Optimization*. Springer-Verlag, New York. 279–297.
- [19] Christofides, N., Mingozzi, A., & Toth, P. (Eds.). 1979. *Combinatorial Optimization*, John Wiley, 1979. 315–338 (Ch. The Vehicle Routing Problem)
- [20] Council of Supply Chain Management Professionals. Definitions. <http://cscmp.org/about-us/supply-chain-management-definitions>
- [21] Dantzig, G., & Ramser, R. 1959. The truck dispatching problem, *Management Science* 6. 80–91.
- [22] Deloitte Touche Tohmatsu India. 2008. Bringing value to the changing Indian landscape. Conference paper. ICICI SME Expo-Logistics & Material handling. India.
- [23] Desaulniers, Guy. 2010. Branch-and-Price-and-Cut for the split delivery vehicle routing problem with time windows. *Operations Research* 58. 179-192.
- [24] Desrochers, M., Lenstra, J.K., Savelsbergh, M., & Soumis, F. 1988. Vehicle

routing with time windows: optimization and approximation. *Vehicle routing: Methods and studies*. Elsevier, New York.

- [25] Desrochers, M., Lenstra, J. K., & Savelsbergh, M. W. P. 1990. A classification scheme for vehicle routing and scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 46. 322–332.
- [26] Desrochers, M., & Verhoog, T.W. 1989. A matching based savings algorithm for the vehicle routing problem. *Les Cahiers du GERAD G-89-04*, HEC Montréal.
- [27] Dias, E. 2010. Bicycle sharing in developing countries: A proposal towards sustainable transportation in Brazilian median cities. Master of Science thesis in Industrial Ecology. Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden.
- [28] Dror, M., & Trudeau, P. 1989. Savings by split delivery routing. *Transportation Science* 23 (2). 141–145.
- [29] Dror, M., & Trudeau, P. 1990. Split delivery routing. *Naval Res. Logistics* 37. 383-402.
- [30] Eglese, R. W., Mercer, A., & Sohrabi, B. 2005. The Grocery Superstore Vehicle Scheduling Problem. *The Journal of the Operational Research Society*, 56(8). 902–911.
- [31] Eksioglu, B., Vural, A. V., & Reisman, A. 2009. The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering*, 57(4). 1472–1483.



- [32] El-Ghazali, Talbi. 2009. *Metaheuristics, from design to implementation*. ISBN 9780470278581. Wiley & Sons.
- [33] Figliozzi, M. A. 2012. The time dependent vehicle routing problem with time windows: Benchmark problems, an efficient solution algorithm, and solution characteristics. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(3). 616–636.
- [34] Fisher, M.L., & Jaikumar, R. 1981. A generalized assignment heuristic for the vehicle routing problem. *Networks* 11. 109–124.
- [35] Fisher, M.L., Jörnsten, K.O., & Madsen, O.B.G. 1997. Vehicle routing with time windows – two optimization algorithms. *Operations Research* 45. 488–492.
- [36] Frizzel, P.W., & Giffin, J.W. 1995. The split delivery vehicle scheduling problem with time windows and grid network distances, *Computers and Operation Research*, 22. 655-667.
- [37] Fuellerer, G., Doerner, K. F., Hartl, R. F., & Lori, M. 2010. Metaheuristics for vehicle routing problems with three-dimensional loading constraints. *European Journal of Operational Research*, 201(3). 751–759.
- [38] Fukasawa, R., Longo, H., Lysgaard, J., Poggi de Aragão, M., Reis, M., Uchoa, E., & Werneck, R. 2006. Robust branch-and-cut-and-price for the capacitated vehicle routing problem. *Mathematical Programming Series A* 106. 491–511.
- [39] Gambardella, L. M., Taillard, E. & Agazzi, G. 1999. MACS-VRPTW: A Multiple Ant Colony System for Vehicle Routing Problems with Time Windows.

- New Ideas in Optimization, D. Corne, M. Dorigo and F. Glover (eds). 63–76. McGraw-Hill, London.
- [40] Gehring, H. & Homberger, J. 1999. A Parallel Hybrid Evolutionary Metaheuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. Proceedings of EUROGEN99 - Short Course on Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer Science, Reports of the Department of Mathematical Information Technology Series. No. A 2/1999, University of Jyväskylä, Finland, K. Miettinen, M. Mäkelä and J. Toivanen (eds). 57–64.
- [41] Gendreau, M., Dejax, P., Feillet, D., Guegen, C. 2006. Vehicle routing with time windows and split deliveries. Technical Report. 2006-851, Laboratoire Informatique d' Avignon.
- [42] Gendreau, M., Laporte, G., & Potvin, J.Y. 2002. Metaheuristics for the capacitated VRP. In: Toth, P., Vigo, D. (Eds.), The Vehicle Routing Problem. SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications. SIAM, Philadelphia. 129–154.
- [43] Golden, B.L., Magnanti, T.L., & Nguyen, H.Q. 1977. Implementing vehicle routing algorithms. Networks 7. 113–148.
- [44] Gergely G. 2012. Logistics practice of small and medium-sized enterprises. Ph. D thesis. Corvinus University of Budapest. Doctoral School of Business Administration.
- [45] Guerrero-Campanur, A., Pérez-Loaiza, R.E., & Olivares-Benitez, E. 2011. Un caso logístico del problema de ruteo vehicular múltiple m-VRP resuelto con la heurística de Fisher & Jaikumar. 4to Taller Latino Iberoamericano de

Investigación de Operaciones 16, 17 y 18 de Noviembre de 2011, Acapulco, Guerrero, México.

- [46] Guimarans, D., Herrero, R., Riera, D., Juan, Angel A., Ramos, J. 2010. Combining Constraint Programming, Lagrangian Relaxation and Probabilistic Algorithms to solve the Vehicle Routing Problem. Proceedings of the 17th International RCRA workshop (RCRA 2010): Experimental Evaluation of Algorithms for Solving Problems with Combinatorial Explosion Bologna, Italy, June 10–11, 2010
- [47] Gulczynski, D., Golden, B., & Wasil, E. 2010. The split delivery vehicle routing problem with minimum delivery amounts. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(5). 612–626.
- [48] Hagen, J., Lobo, Z., & Mendonça, C. 2013. The benefits of cargo bikes in Rio de Janeiro: A case of study. 13th World Conference on Transport Research, July 15-18, Rio de Janeiro-Brazil.
- [49] Hertz, A., Uldry, M., & Widmer, M. 2012. Integer linear programming models for a cement delivery problem. *European Journal of Operational Research*, 222(3). 623–631.
- [50] Ho, S; & Haugland, D. 2004. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and split deliveries. *Computers and Operations Research* 31. 1947-1964.
- [51] Homberger, J., & Gehring, H. 1999. Two evolutionary metaheuristics for the vehicle routing problem with time windows. *INFOR* 37. 297–318.

- [52] Juan, A. A., Marull, J. M., Jorba, J., Hester, J., Marquès, J. M., & Vilajosana, X. 2010. Using Agent-based Simulation and Distributed Computing to solve Vehicle Routing Problems. *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal* GertZülch & Patricia Stock (Hrsg.) Karlsruhe, KIT Scientific Publishing 2010
- [53] Kallehauge, B. 2008. Formulations and exact algorithms for the vehicle routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*, 35(7). 2307–2330.
- [54] Kilby, P., Prosser, P. & Shaw, P. 1999. Guided Local Search for the Vehicle Routing Problems With Time Windows. *Meta-heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization*, S. Voss, S. Martello, I.H. Osman and C. Roucairol (eds.). 473–486. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [55] Kirby C., & Brosa N. 2011. Logistics as a competitive factor for Small and Medium Enterprises in Latin America and the Caribbean. Discussion paper No. IDB-DP-191 presented at Fifth Americas Competitiveness Forum for the Inter-American Development Bank and Compete Caribbean. Inter-American Development Bank. Capital markets and financial institutions division.
- [56] Laporte, G., & Nobert, Y. 1987. Exact algorithms for the vehicle routing problem. *Annals of Discrete Mathematics* 31. 147–184.
- [57] Laporte, G., & Osman, I. H. 1995. Routing problems: A bibliography. *Annals of Operations Research*, 61. 227–262.
- [58] Lin, C. 2011. A vehicle routing problem with pickup and delivery time windows, and coordination of transportable resources. *Computers &*

- Operations Research, 38(11). 1596–1609.
- [59] Lin S.W., Yu V.F., & Chou S.Y. 2009. Solving the truck and trailer routing problem based on a simulated annealing heuristic. *Computers & Operations Research* 2009. 36:1683–92.
- [60] Malandraki, C. 1989. Time Dependent Vehicle Routing Problems: Formulations, Solution Algorithms and Computational Experiments. Ph.D. Dissertation, Northwestern University, Evanston, Illinois.
- [61] Martínez de V., B., & Aguilar, M. 2007. Movilidad, ambiente y centros históricos: Una reflexión a propósito del sector de La Candelaria, Bogotá D.C., Colombia. *Gestión y ambiente*, Vol 10, Num. 3, December 2007. 119-132. Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- [62] Mullaseril, P.A., Dror, M., & Leung, J. 1997. Split-delivery routing in livestock feed distribution. *Journal of the Operational Research Society* 48. 107-116.
- [63] Nieto de Almeida, A., García del Valle, A., & Crespo P., D. 2012. ELOCONS un algoritmo de construcción de rutas eficiente para la pequeña y mediana empresa de distribución. *DYNA*, 87(2). 222–228.
- [64] Patiño D., Pulido L., Torres P., & Mejía L. 2013. Characterization of the current state of the development process of new products from the perspective of concurrence engineering (IC) and product development process (PDDP) for metalworking manufacturing small and medium enterprises (SMEs) in Bogotá, D.C. Discussion paper.
- [65] Potvin, J.Y., Kervahut, T., Garcia, B.L., & Rousseau, J.-M. 1996. The vehicle

- routing problem with time windows – Part I: Tabu search. *INFORMS Journal on Computing* 8. 158–164.
- [66] Ralphps, T., Kopman, L., Pulleyblank, W., & Trotter, L. 2003. On the capacitated vehicle routing problem. *Mathematical Programming Series B* 94. 343–359.
- [67] Rochat, Y., & Taillard, E. 1995. Probabilistic Diversification and Intensification in Local Search for Vehicle Routing, *Journal of Heuristics* 1. 147–167.
- [68] Ruan, Q., Zhang, Z., Miao, L., & Shen, H. 2011. A hybrid approach for the vehicle routing problem with three-dimensional loading constraints. *Computers & Operations Research*.
- [69] Salani, M., & Vacca, I. 2011. Branch and Price for the vehicle routing problem with discrete split deliveries and time windows. *European Journal of Operational Research* 213. 470-477.
- [70] Secretaría de Movilidad, Alcaldía Mayor de Bogotá. 2012. Movilidad en cifras.
- [71] Semet, F., & Taillard, É.D. 1993. Solving real-life vehicle routing problems efficiently using tabu search. *Annals of Operations Research* 41. 469–488.
- [72] Solomon, M.M. 1987. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problem with time window constraints. *Operations Research* 35. 234–265.
- [73] Taillard, E., Badeau, P., Gendreau, M., Guertin, F. & Potvin, J. 1997. A Tabu

Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows. *Transportation Science* 31. 170–186.

- [74] Toth, P., & Vigo, D. 2002. Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem. *Discrete Applied Mathematics*, 123(1–3). 487–512
- [75] Vazirani, Vijay V. 2001. *Approximation algorithms*. ISBN 3540653678. Springer. 378 pages.
- [76] Wilck IV, J. H., Cavalier T. M. 2012. A construction heuristic for the split delivery vehicle routing problem, *American Journal of Operations Research* 2. 153-162.
- [77] World Bank. 2007. *Colombia Bank Financing to Small and Medium Sized Enterprises (SMEs) in Colombia*. Report No. 41610-CO. Colombia and Mexico County Management Unit, Finance and Private Sector Development, Latin America and Caribbean Region.





# APÉNDICE

## Apéndice 1. Resultados de la heurística desarrollada para las instancias de Salomon (1987)

En la siguiente tabla se presentan los mejores resultados reportados en la literatura y los resultados de la heurística desarrollada para cada conjunto de datos de los 56 problemas de comparación del VRPTW de Salomon (1987) [72].

Problema	Mejor solución conocida			Sepulveda, Juan (b)		
	NV	Distancia	Autores	NV	Distancia	Tiempo
R101	19	1645.79	H	21	2012.84	125.85
R102	17	1486.12	RT	20	1984.01	117.82
R103	13	1292.68	LLH	19	1881.47	116.94
R104	9	1007.24	M	15	1522.69	100.48
R105	14	1377.11	RT	17	1824.74	103.10
R106	12	1251.98	M	16	1681.81	104.26
R107	10	1104.66	S97	14	1482.3	102.03
R108	9	960.88	BBB	12	1337.36	89.61
R109	11	1194.73	HG	13	1477.17	89.87
R110	10	1118.59	M	14	1516.41	90.57
R111	10	1096.72	RGP	14	1543.82	94.42
R112	9	982.14	GTA	12	1306.61	80.41
R201	4	1252.37	HG	5	2116.37	57.11
R202	3	1191.7	RGP	5	1645.44	52.46
R203	3	939.54	M	4	1658.06	50.13
R204	2	825.52	BVH	4	1129.94	49.19
R205	3	994.42	RGP	4	1527.03	51.56
R206	3	906.14	SSSD	3	1434.77	44.92
R207	2	893.33	BVH	3	1251.77	46.17
R208	2	726.75	M	3	1078.45	44.96
R209	3	909.16	H	3	1418.51	45.00
R210	3	939.34	M	4	1430.84	48.8
R211	2	892.71	BVH	3	1188.53	45.52
C101	10	828.94	RT	10	855.06	54.38
C102	10	828.94	RT	11	1184.00	60.71
C103	10	828.06	RT	12	1514.48	84.67
C104	10	824.78	RT	11	1423.02	85.06
C105	10	828.94	RT	10	890.72	72.92

C106	10	828.94	RT	10	882.94	73.58
C107	10	828.94	RT	10	882.94	73.23
C108	10	828.94	RT	10	939.41	77.57
C109	10	828.94	RT	10	1112.75	75.17
C201	3	591.56	RT	3	591.56	43.16
C202	3	591.56	RT	4	1386.54	48.18
C203	3	591.17	RT	4	1211.42	47.88
C204	3	590.6	RT	4	1124.27	48.71
C205	3	588.88	RT	3	627.92	47.86
C206	3	588.49	RT	3	631.06	46.78
C207	3	588.29	RT	4	745.77	47.64
C208	3	588.32	RT	3	644.95	45.87
RC101	14	1696.94	TBGGP	18	2267.56	111.82
RC102	12	1554.75	TBGGP	17	2001.69	107.2
RC103	11	1261.67	S98	15	1865.87	97.62
RC104	10	1135.48	CLM	14	1596.58	94.32
RC105	13	1629.44	BBB	19	2076.28	118.39
RC106	11	1424.73	BBB	14	1715.06	94.21
RC107	11	1230.48	S97	14	1568.61	92.05
RC108	10	1139.82	TBGGP	13	1568.74	86.42
RC201	4	1406.91	M	5	2356.69	52.69
RC202	3	1367.09	CC	5	1892.11	52.46
RC203	3	1049.62	CC	5	1831.83	54.74
RC204	3	798.41	M	4	1357.99	49.33
RC205	4	1297.19	M	6	2390.45	58.25
RC206	3	1146.32	H	4	1716.24	49.15
RC207	3	1061.14	BVH	4	1737.11	49.03
RC208	3	828.14	IKMUJ	3	1362.52	44.41

**BVH** - R. Bent and P. Van Hentenryck, "A Two-Stage Hybrid Local Search for the Vehicle Routing Problem with Time Windows," Technical Report CS-01-06, Department of Computer Science, Brown University, 2001.

**BBB** - J. Berger, M. Barkaoui and O. Bräysy, "A Parallel Hybrid Genetic Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows," Working paper, Defense Research Establishment Valcartier, Canada, 2001.

**CC** - Z. J. Czech and P. Czarnas, "A Parallel Simulated Annealing for the Vehicle

Routing Problem with Time Windows," Proc. 10th Euromicro Workshop on Parallel, Distributed and Network-based Processing, Canary Islands, Spain, (January 9--11, 2002), 376--383.

**CLM** - J.-F. Cordeau, G. Laporte, and A. Mercier, "A Unified Tabu Search Heuristic for Vehicle Routing Problems with Time Windows," Working Paper CRT-00-03, Centre for Research on Transportation, Montreal, Canada, 2000.

**GTA** - L. M. Gambardella, E. Taillard, and G. Agazzi, "MACS-VRPTW: A Multiple Ant Colony System for Vehicle Routing Problems with Time Windows," in *New Ideas in Optimization*, D. Corne, M. Dorigo and F. Glover (eds), 63-76, McGraw-Hill, London, 1999.

**HG** - J. Homberger and H. Gehring, "Two Evolutionary Metaheuristics for the Vehicle Routing Problem with Time Windows," *INFOR*, VOL. 37, 297-318, (1999).

**H** - J. Homberger, "Verteilt-parallele Metaheuristik enzur Tourenplanung," Gaber, Wiesbaden (2000).

**IKMUY** - T. Ibaraki, M. Kubo, T. Masuda, T. Uno and M. Yagiura, "Effective Local Search Algorithms for the Vehicle Routing Problem with General Time Windows," Working Paper, Department of Applied Mathematics and Physics, Kyoto University, Japan, 2001.

**LLH** - H. Li, A. Lim, and J. Huang, "Local Search with Annealing-like Restarts to Solve the VRPTW," Working Paper, Department of Computer Science, National University of Singapore, 2001.

**M** - D. Mester, "An Evolutionary Strategies Algorithm for Large Scale Vehicle Routing Problem with Capacitate and Time Windows Restrictions," Working Paper, Institute of Evolution, University of Haifa, Israel (2002).

**RT** - Y. Rochat and E.D. Taillard, "Probabilistic Diversification and Intensification in Local Search for Vehicle Routing," *Journal of Heuristics* 1, 147-167, (1995).

**RGP** - L.M. Rousseau, M. Gendreau and G. Pesant, "Using Constraint-Based

Operators to Solve the Vehicle Routing Problem with Time Windows," *Journal of Heuristics*, forthcoming.

**SSSD** - G. Schrimpf, J. Schneider, H. Stamm-Wilbrandt and G. Dueck, "Record Breaking Optimization Results Using the Ruin and Recreate Principle," *Journal of Computational Physics* 159, 139-171, (2000).

**S97** - P. Shaw, "A New Local Search Algorithm Providing High Quality Solutions to Vehicle Routing Problems," Working Paper, University of Strathclyde, Glasgow, Scotland, 1997.

**S98** - P. Shaw, "Using Constraint Programming and Local Search Methods to Solve Vehicle Routing Problems," in Principles and Practice of Constraint Programming - CP98, Lecture Notes in Computer Science, 417-431, M. Maher and J.-F. Puget (eds), Springer-Verlag, New York, 1998.

**TBGGP** - E. Taillard, P. Badeau, M. Gendreau, F. Geurtin, and J.Y. Potvin, "A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows," *Transportation Science*, 31, 170-186, (1997).

## Apéndice 2. Conjunto de datos de la instancia real (caso de estudio)

En la siguiente tabla se presenta el conjunto de datos de la instancia real analizada con la heurística desarrollada.

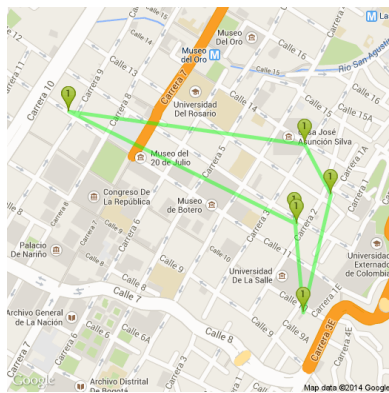
Cliente	Demanda [Kg]	Latitud (y)	Longitud (x)	Inicio [h]	Fin [h]
HARDI depot	0	4.59955	-74.07720	4	21
Hostal Casa Violeta	59	4.59630	-74.07061	7	11
Hostal crankycroc	121	4.59977	-74.06999	11	15
Hostal Casa Quevedo	1	4.59715	-74.06961	10	14
Hostal Casa Mc Georgies	7	4.59835	-74.07053	15	19
Hostal Alegria	66	4.59400	-74.07164	11	15
Hotel Platypus	103	4.60221	-74.07363	8	12
Hostal Fatima	7	4.59844	-74.06987	13	17
Hotel Casa De La Botica	45	4.60001	-74.06870	6	10
Chocolate Hostal	9	4.60001	-74.06870	9	13
Hostal Destino Nomada	87	4.59493	-74.06995	16	20
Hostal Casa Platypus	47	4.59974	-74.06951	16	20
Hostal la quinta	97	4.59705	-74.06920	11	15
Hotel Muisca	103	4.59374	-74.07041	7	11
Hostal La Vieja Suiza	3	4.59860	-74.07037	7	11
Hostal Villa Candelaria	7	4.59975	-74.06951	9	13
Hostal Aventureros	74	4.59749	-74.07080	6	10
Hostal Martinik	17	4.59722	-74.07222	12	16
El Carnero	123	4.59734	-74.07200	6	10
Hotel Internacional	83	4.60018	-74.07178	10	14
Hostal Sue	58	4.59876	-74.07012	13	17
Hostel Sue Candelaria	22	4.59703	-74.07115	13	17

Hotel Casa Deco	30	4.59648	-74.07066	8	12
Hostal El Baluarte	104	4.59802	-74.07185	9	13
Andante ma non troppo	103	4.59585	-74.07190	12	16
La condesa irina	53	4.59694	-74.07498	16	20
Café de la peña	36	4.59480	-74.07260	11	15
El olivar	89	4.59717	-74.07468	13	17
El gato gris	78	4.59700	-74.06935	7	11
El mirador	21	4.59655	-74.07469	10	14
Enchiladas	58	4.59479	-74.07161	7	11
Fulanitos	83	4.59408	-74.07314	16	20
La bruja	46	4.59701	-74.07157	15	19
La scala	73	4.59652	-74.07457	16	20
Quinoa y amaranto	67	4.59593	-74.07179	8	12
Merlin café galeria	8	4.59671	-74.07000	14	18

## Apéndice 3. Resultados del ruteo para cada escenario (3) de la instancia de la vida real

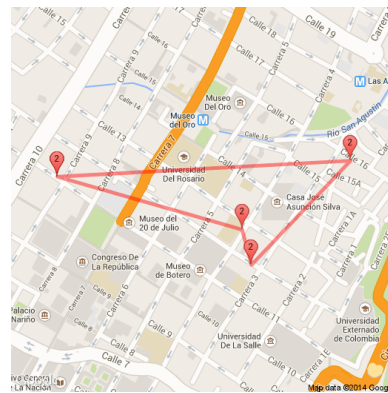
En las siguientes tablas se presentan los resultados para cada escenario estudiado con la heurística desarrollada.

### Escenario VRPTW cuando la demanda no excede la capacidad del vehículo



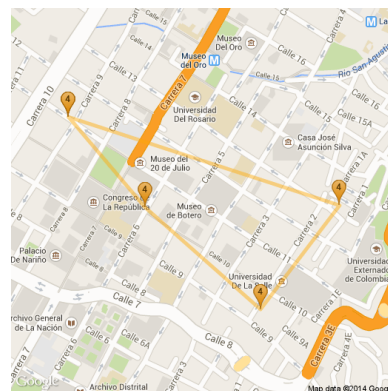
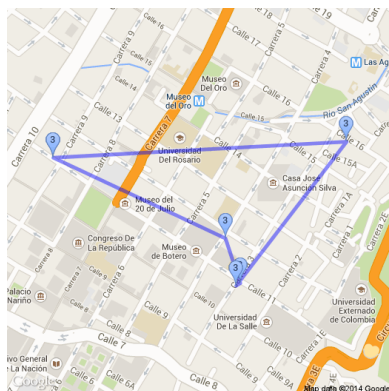
Ruta 1

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Hostal Casa Violeta	30.5
Hotel Casa Deco	15
Hotel Muisca	51.5
Hostal Casa	0.5
Hostal La Vieja	1.5
HARDI depot	0



Ruta 2

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Hostal El Baluarte	52
La bruja	23
Hotel casa de la	22.5
HARDI depot	0

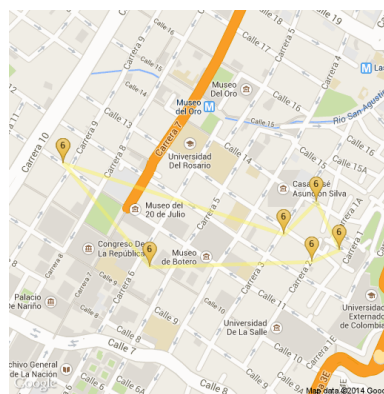
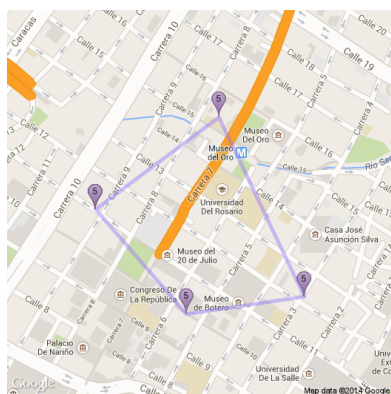


**Ruta 3**

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Chocolate Hostal	4.5
Andante ma non tropo	51.5
Quinua y amaranto	33.5
Hostal Martinik	8.5
HARDI depot	0

**Ruta 4**

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
La condesa irina	26.5
Hostal alegria	33
El gato gris	39
HARDI depot	0



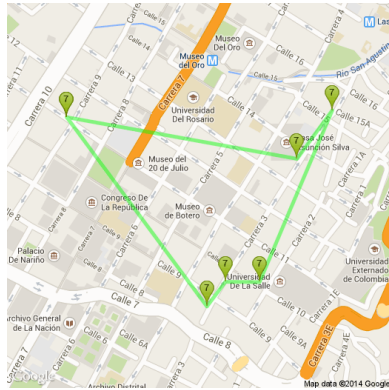
**Ruta 5**

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Hotel Platypus	51.5
Hostel sue	11
La scala	36.5
HARDI depot	0

**Ruta 6**

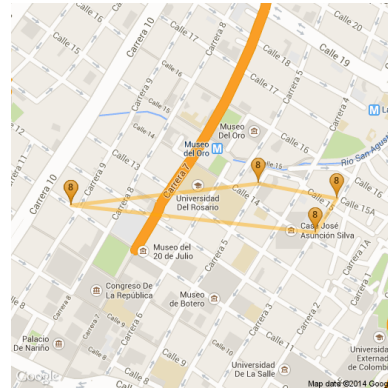
Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Hostal Aventureros	37
Hostal Fatima	3.5
Hostal la quinta	43.5
Merlin café galeria	4
El mirador	10.5
HARDI depot	0





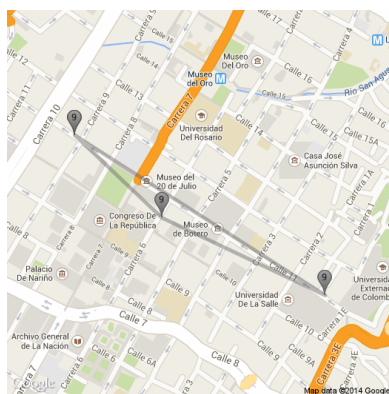
Ruta 7

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Fulanitos	41.5
Café de la peña	18
Enchiladas	29
Hostal Villa	3.5
Hostal Casa Mc	3.5
HARDI depot	0



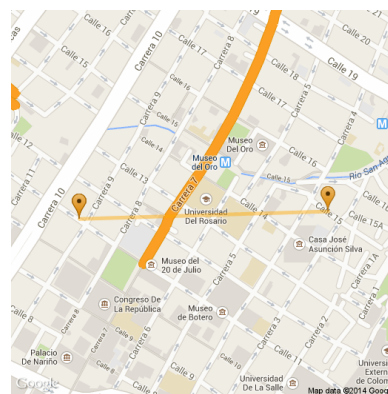
Ruta 8

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Hotel Internacional	41.5
Hostal Casa	23.5
Hostal Sue	29
HARDI depot	0



Ruta 9

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
El olivar	44.5
Hostal destino	43.5
HARDI depot	0



Ruta 10

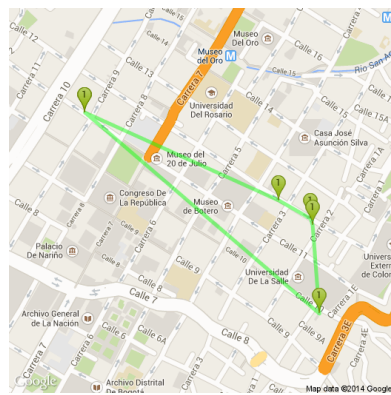
Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Hostal	60.5
HARDI depot	0



Ruta 11

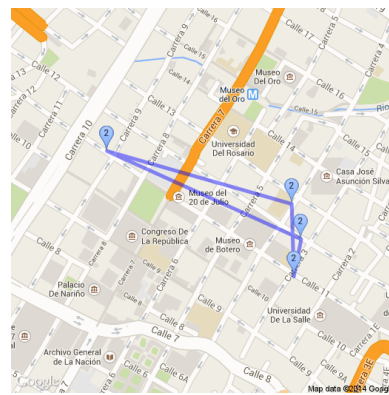
Cliente	Demanda [Kg]
HARDI depot	0
El Carnero	61.5
HARDI depot	0

Escenario SDVRPTW cuando la demanda no excede la capacidad del vehículo



Ruta 1

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
La bruja	3
Hotel casa deco	15
Hostal Casa	30.5
Hotel Muisca	51.5

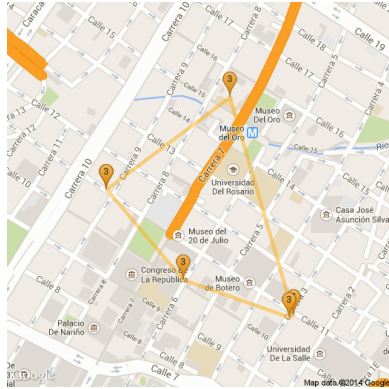


Ruta 2

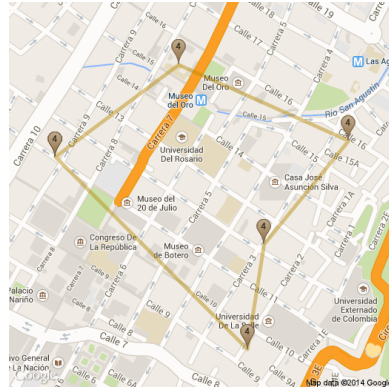
Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Hostal El Baluarte	52
Quinoa y amaranto	28
La bruja	20
HARDI depot	0

Apéndice 3. Resultados del ruteo para cada uno de los escenarios (3) de 100 la instancia de la vida real

HARDI depot	0
-------------	---



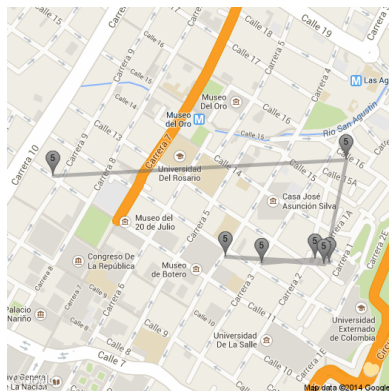
Ruta 3



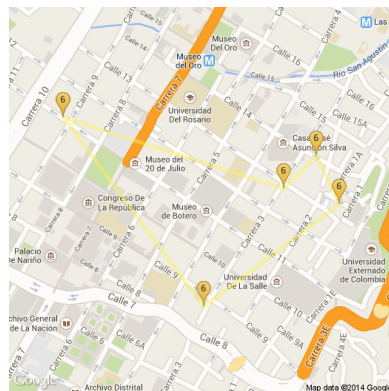
Ruta 4

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Hotel Platypus	16.5
Quinua y amaranto	5.5
Andante ma non tropo	51.5
La condesa irina	26.5
HARDI depot	0

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Hostal Alegria	33
Hostel Sue	9.5
Hotel Casa De La	22.5
Hotel Platypus	35
HARDI depot	0



Ruta 5



Ruta 6

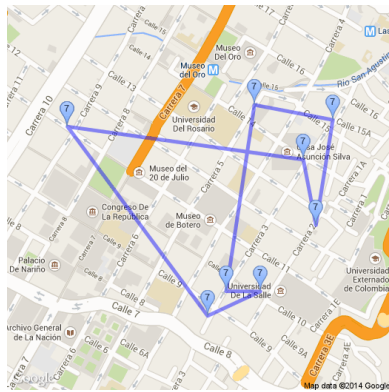
Cliente	Demanda
HARDI depot	0
La scala	36.5
Hostel sue	1.5
Hostal casa	0.5

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Fulanitos	25.5
Hostal la quinta	34
Hostal Fatima	3.5

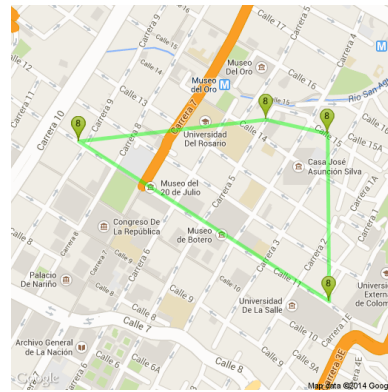
Apéndice 3. Resultados del ruteo para cada uno de los escenarios (3) de 101 la instancia de la vida real

Hostal la quinta	9.5
Hostal martinik	8.5
El gato gris	39
Chocolate Hostel	4.5
HARDI depot	0

Hostal	37
HARDI depot	0



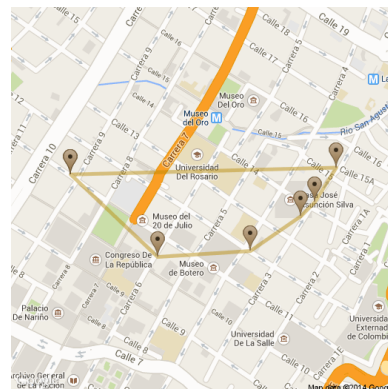
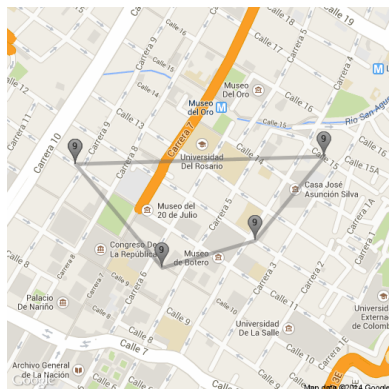
Ruta 7



Ruta 8

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Hostal La Vieja	1.5
Merlin café galeria	4
Hostal casa	23.5
Hotel internacional	8
Café de la peña	18
Enchiladas	29
Fulanitos	16
HARDI depot	0

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Hostal Destino	43.5
Hostal CrankyCroc	23
Hotel Internacional	33.5
HARDI depot	0



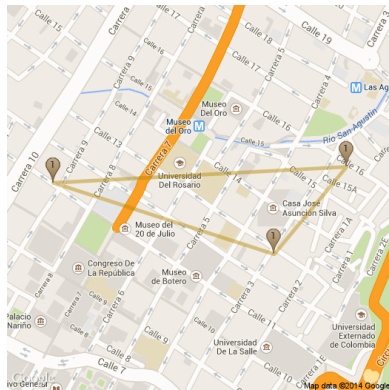
**Ruta 9**

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
El mirador	10.5
El carnero	52
Hostal	37.5
HARDI depot	0

**Ruta 10**

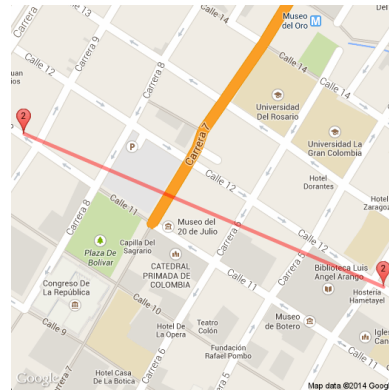
Cliente	Demanda
HARDI depot	0
El olivar	44.5
El carnero	9.5
Hostal Casa Mc	3.5
Hostal Sue	29
Hostal Villa	3.5
HARDI depot	0

**Escenario SDVRPTW cuando la demanda excede la capacidad del vehículo**



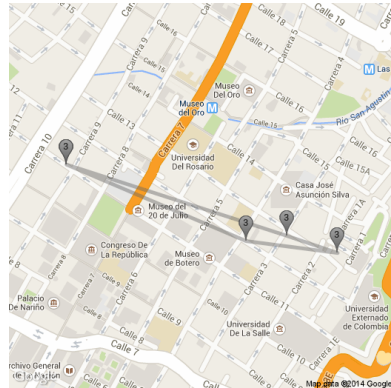
**Ruta 1**

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Hotel Casa De La	45
Hostal Aventureros	55
HARDI depot	0



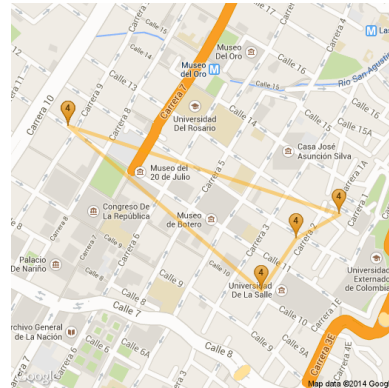
**Ruta 2**

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
El Carnero	100
HARDI depot	0



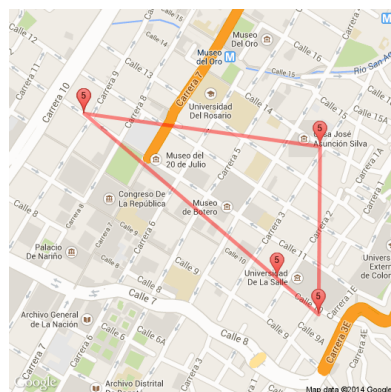
Ruta 3

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Hostal	19
El gato gris	58
El carnero	23
HARDI depot	0



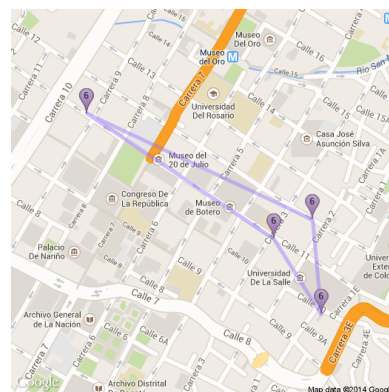
Ruta 4

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
El gato gris	20
Hostal casa violeta	59
Enchiladas	21
HARDI depot	0



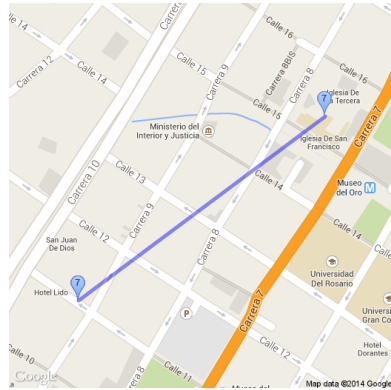
Ruta 5

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Enchiladas	37
Hotel muisca	60
Hostal La Vieja	3
HARDI depot	0



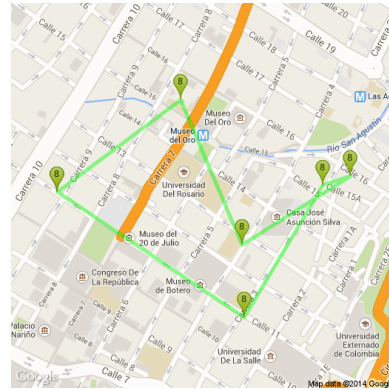
Ruta 6

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Quinua y amaranto	27
Hotel muisca	43
Hotel Casa Deco	30
HARDI depot	0



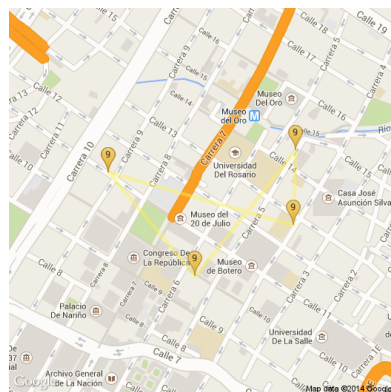
Ruta 7

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Hotel Platypus	100
HARDI depot	0



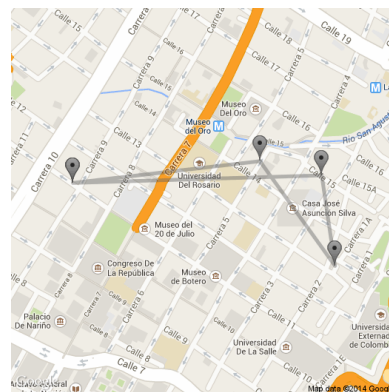
Ruta 8

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Quinoa y amaranto	40
Hostal villa	7
Chocolate Hostal	9
Hostal El Baluarte	41
Hotel Platypus	3
HARDI depot	0



Ruta 9

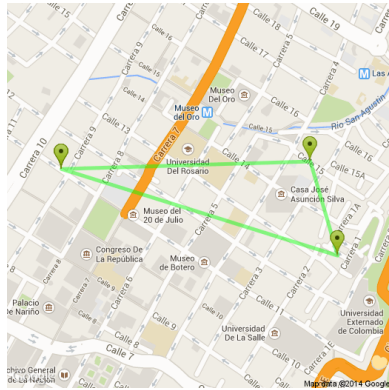
Cliente	Demanda
HARDI depot	0
El mirador	21
Hotel internacional	16
Hostal El Baluarte	63
HARDI depot	0



Ruta 10

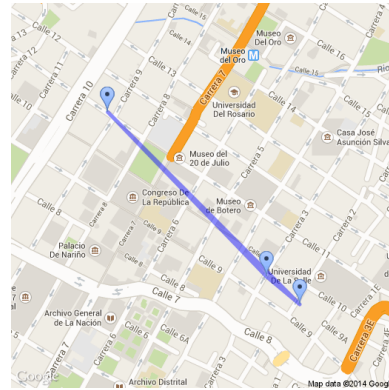
Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Hostal CrankyCroc	32
Hostal Casa	1
Hotel Internacional	67
HARDI depot	0

Apéndice 3. Resultados del ruteo para cada uno de los escenarios (3) de 105 la instancia de la vida real



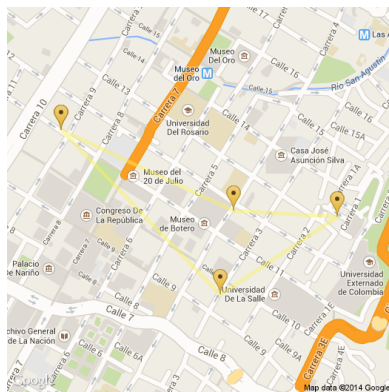
**Ruta 11**

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Hostal	89
Hostal la quinta	11
HARDI depot	0



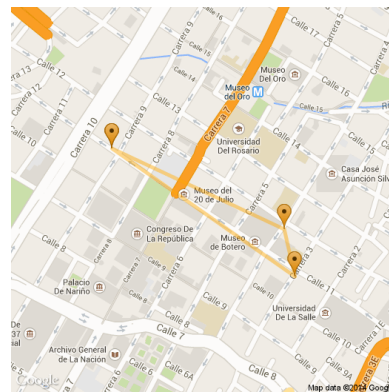
**Ruta 12**

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Hostal alegria	66
Café de la peña	34
HARDI depot	0



**Ruta 13**

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Hostal Martinik	12
Hostal la quinta	86
Café de la peña	2
HARDI depot	0

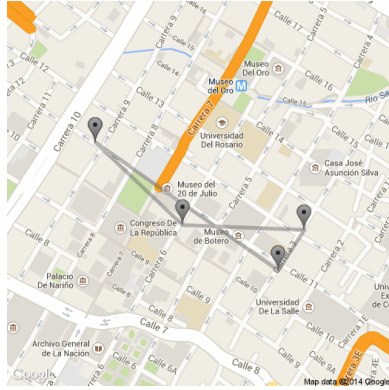


**Ruta 14**

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Hostal martinik	5
Andante ma non tropo	95
HARDI depot	0

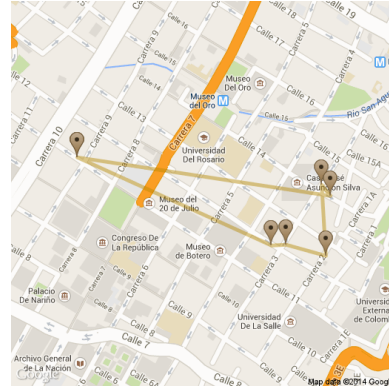


Apéndice 3. Resultados del ruteo para cada uno de los escenarios (3) de 106  
la instancia de la vida real



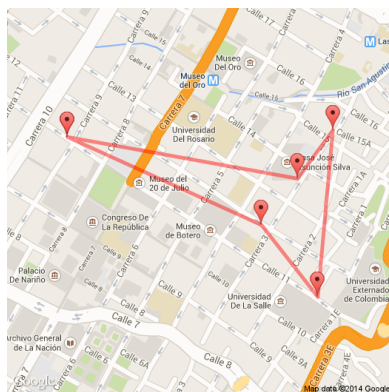
**Ruta 15**

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
El olivar	89
Hostel sue candelaria	3
Andante ma non troppo	8
HARDI depot	0



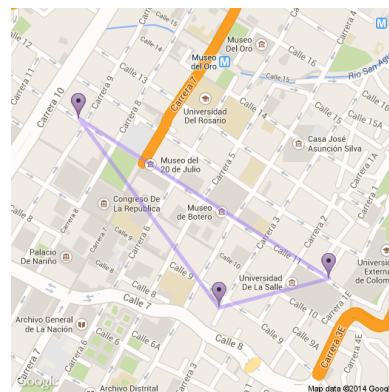
**Ruta 16**

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
La bruja	8
Hostel sue	19
Merlin café galeria	8
Hostal Sue	58
Hostal Fatima	7
HARDI depot	0



**Ruta 17**

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Hostal Casa Mc	7
Hostal Casa	47
Hostal destino	8
La bruja	38

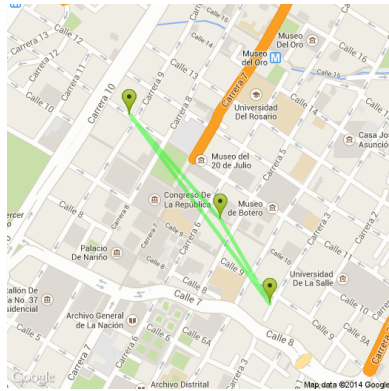


**Ruta 18**

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Hostal destino	79
Fulanitos	21
HARDI depot	0

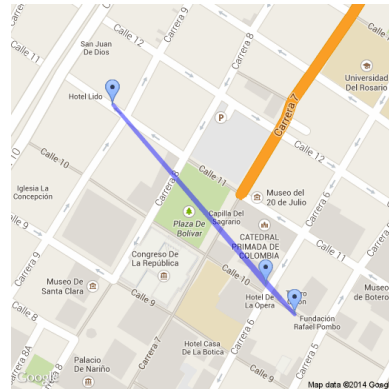
Apéndice 3. Resultados del ruteo para cada uno de los escenarios (3) de 107  
 la instancia de la vida real

HARDI depot	0
-------------	---



**Ruta 19**

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
Fulanitos	62
La scala	38
HARDI depot	0



**Ruta 20**

Cliente	Demanda
HARDI depot	0
La condesa irina	53
La scala	35
HARDI depot	0

## Apéndice 4. Interfaz de usuario de la aplicación en Microsoft® Excel™

Las siguientes pantallas muestran la interfaz de usuario de la aplicación desarrollada en Microsoft® Excel™ para uso y mejoramiento de las PYMEs.

**Hoja principal**

1	2	3	4	5	6	7
Cliente	Demanda [K <sup>-1</sup> ]	Latitud (°)	Longitud (°)	Inicio ventana tiempo [h]	Fin ventana tiempo [h]	
CD	0	4.602862	-74.091553	4	22	
2	1	4.61501	-74.089665	7	8	
15	72	4.619715	-74.081854	5	7	
39	50	4.604145	-74.070868	11	13	
95	182	4.568896	-74.220307	13	14	
11	238	4.60346	-74.078335	14	16	
18	9	4.618774	-74.065889	5	6	
38	19	4.589087	-74.078421	6	8	
27	61	4.599525	-74.074129	11	12	
96	63	4.566842	-74.236786	17	19	
85	92	4.579847	-74.157135	8	10	
80	146	4.623651	-74.135849	12	15	
3	52	4.598327	-74.091724	15	16	
17	19	4.592937	-74.077047	17	19	
81	234	4.612016	-74.171555	11	13	
34	17	4.587975	-74.08975	7	9	
74	52	4.644867	-74.101517	13	15	
68	240	4.700301	-74.152329	15	18	
41	37	4.606883	-74.056362	11	12	
33	214	4.593279	-74.082026	17	19	
99	10	4.520297	-74.088471	14	15	
79	161	4.632548	-74.160569	5	6	
66	58	4.783785	-74.074738	10	13	
97	197	4.492916	-74.11525	11	14	
78	21	4.629811	-74.175675	12	15	
12	6	4.603974	-74.104771	13	14	
31	199	4.590456	-74.122366	14	15	
63	178	4.748203	-74.056199	10	12	

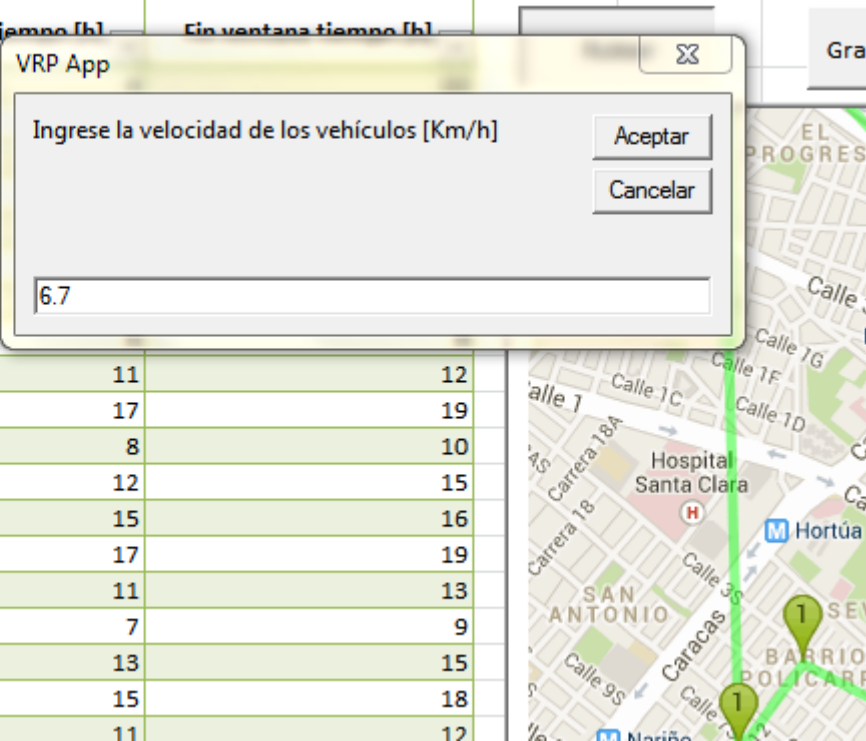
Rutear
Graficar Rutas

## Leyenda:

- 1: Nombre del cliente/punto de demanda
- 2: Demanda del cliente/punto de demanda
- 3: Coordenadas de Longitud y Latitud del cliente/punto de demanda
- 4: Ventana de tiempo del cliente/punto de demanda
- 5: Botón que ejecuta el modelo
- 6: Botón que grafica las rutas en un componente de Google® Maps (requiere conexión a la internet)
- 7: Botón de giro para cambiar la gráfica a la ruta siguiente o a la anterior
- 8: Componente de Google® Maps para la visualización de las gráficas de las rutas

## Ventana emergente que solicita el parámetro de la velocidad de los vehículos

(p <sup>a</sup> )	Inicio ventana tiempo [h]	Fin ventana tiempo [h]	
1553			
3665			
1854			
0868			
0307			
3335			
5889			
3421			
4129	11	12	
5786	17	19	
7135	8	10	
5849	12	15	
1724	15	16	
7047	17	19	
1555	11	13	
3975	7	9	
1517	13	15	
2329	15	18	
5362	11	12	



### Ventana emergente que solicita el parámetro de la capacidad de los vehículos

The screenshot shows the VRP App interface. A dialog box titled "VRP App" is open, asking for the vehicle capacity in kilograms. The input field contains the value "100". The dialog has "Aceptar" and "Cancelar" buttons. In the background, there is a map of Caracas, Venezuela, with a green route and two yellow location markers. To the left of the map is a table with columns for "Inicio ventana tiempo [h]" and "Fin ventana tiempo [h]".

	Inicio ventana tiempo [h]	Fin ventana tiempo [h]
1553		
9665		
1854		
0868		
0307		
8335		
5889		
8421		
4129	11	12
6786	17	19
7135	8	10
5849	12	15
1724	15	16
7047	17	19
1555	11	13
8975	7	9
1517	13	15
2329	15	18
6362	11	12
2026	17	19

### Ventana emergente que solicita el parámetro de tiempo de servicio (descarga de productos)

The screenshot shows the VRP App interface. A dialog box titled "VRP App" is open, asking for the standard service time per client in hours. The input field contains the value "0.1". The dialog has "Aceptar" and "Cancelar" buttons. In the background, there is a map of Caracas, Venezuela, with a green route and two yellow location markers. To the left of the map is a table with columns for "Inicio ventana tiempo [h]" and "Fin ventana tiempo [h]".

	Inicio ventana tiempo [h]	Fin ventana tiempo [h]
1553		
9665		
1854		
0868		
0307		
8335		
5889		
8421		
4129	11	12
6786	17	19
7135	8	10
5849	12	15
1724	15	16
7047	17	19
1555	11	13
8975	7	9
1517	13	15
2329	15	18
6362	11	12
2026	17	19



## Apéndice 5. Instrumento de recolección de información para la caracterización de los hábitos de compra



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SEDE BOGOTÁ  
FACULTAD DE INGENIERÍA

1. INFORMACION DEL ESTABLECIMIENTO						
1.1 Tipo de Establecimiento	<input type="checkbox"/> Restaurante <input type="checkbox"/> Panadería <input type="checkbox"/> Hotel <input type="checkbox"/> Hostal <input type="checkbox"/> Otro ¿Cuál? _____	1.2 Coordenadas GPS del establecimiento				
1.3 Nombre del establecimiento		1.4 Dirección del sitio				
1.5 ¿Cuál es el rango de precios que maneja en el establecimiento?	Desde _____ Hasta _____	1.6 Capacidad del establecimiento	_____ Personas			
1.7 ¿Cuánto tiempo lleva el establecimiento en el mercado?	_____ Meses	1.8 ¿Las instalaciones del establecimiento son?	Propias <input type="checkbox"/> Alquiladas <input type="checkbox"/>			
1.9 Números telefónicos de contacto		1.10 Correos electrónicos de contacto				
2. INFORMACION DE COMPRAS E INVENTARIO						
2.1 ¿Quién realiza el proceso de compras y que cargo desempeña?		<input type="checkbox"/> Propietario <input type="checkbox"/> Administrador <input type="checkbox"/> Empleado <input type="checkbox"/> Otro				
		<input type="checkbox"/> Propietario <input type="checkbox"/> Administrador <input type="checkbox"/> Empleado <input type="checkbox"/> Otro				
2.2 ¿Existe un mecanismo de colaboración relacionado con el intercambio de información con el/los proveedor/es? <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> O	Si la respuesta es SI, el proveedor tiene información acerca de: <input type="checkbox"/> Nivel de inventarios <input type="checkbox"/> Ventas <input type="checkbox"/> Otro ¿Cuál? _____					
2.4 Califique de mayor a menor los siguientes criterios con respecto a la prioridad de selección de proveedores (Califique 1 al de menor importancia y 5 al de mayor importancia)	Precio	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>
	Calidad del producto	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>
	Tiempo de entrega	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>
	Servicio al cliente	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>
	Otro _____	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>





Apéndice 5. Instrumento de recolección de información para la 114  
 caracterización de hábitos de compra (encuesta)

4.4 ¿En dónde realiza la compra de los siguientes tipos de producto?								
Tipos de producto	1. Fabricante	2. Mayorista	3. Minorista	4. Central de Abastos	5. Plaza de Mercado	6. Tienda de Barrio	7. Otro	8. Nombre del establecimiento
1. Arroz	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
2. Pastas	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
3. Granos	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
4. Aceites	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
5. Harinas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
6. Azúcar	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
7. Café	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
8. Sal	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
9. Frutas	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
10. Verduras	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
11. Carnicos	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
12. Tuberculos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
13. Lacteos	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

4.5 ¿Qué medio de compra utiliza para los siguientes tipos de producto?							
Tipos de producto	1. Personal	2. Vendedor a domicilio	3. Via telefónica	4. Via WEB	5. Mensaje SMS	9. Otro	
1. Arroz	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
2. Pastas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
3. Granos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
4. Aceites	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
5. Harinas	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
6. Azúcar	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
7. Café	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
8. Sal	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
9. Frutas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
10. Verduras	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
11. Carnicos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
12. Tuberculos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
13. Lacteos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

4.6 ¿Cuál es el tiempo de entrega (Lead Time) de los siguientes tipos de producto?		
Tipos de producto	1. Lead Time (en)	2. N/A
1. Arroz		<input checked="" type="radio"/>
2. Pastas		<input checked="" type="radio"/>
3. Granos		<input checked="" type="radio"/>
4. Aceites		<input type="radio"/>
5. Harinas		<input type="radio"/>
6. Azúcar		<input checked="" type="radio"/>
7. Café		<input checked="" type="radio"/>
8. Sal		<input type="radio"/>
9. Frutas		<input type="radio"/>
10. Verduras		<input type="radio"/>
11. Carnicos		<input checked="" type="radio"/>
12. Tuberculos		<input checked="" type="radio"/>
13. Lacteos		<input type="radio"/>