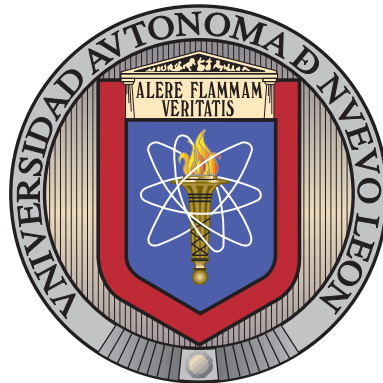


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



HERRAMIENTAS CUANTITATIVAS PARA MEJORAR
LA EFICIENCIA DE LA CADENA DE SUMINISTRO
DE UNA PYME

POR

ALLAN CUBILLO ARTAVIA

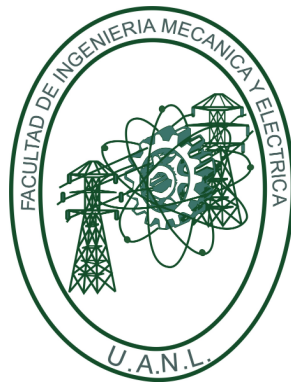
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

AGOSTO 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



HERRAMIENTAS CUANTITATIVAS PARA MEJORAR
LA EFICIENCIA DE LA CADENA DE SUMINISTRO
DE UNA PYME

POR

ALLAN CUBILLO ARTAVIA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

AGOSTO 2019

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Herramientas cuantitativas para mejorar la eficiencia de la cadena de suministro de una PYME», realizada por el alumno Allan Cubillo Artavia, con número de matrícula 1937490, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

El Comité de Tesis



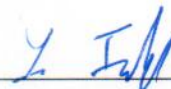
Dra. María Angélica Salazar Aguilar

Asesor



Dra. Jania Astrid Saucedo Martínez

Revisor



Dr. Luis Alfonso Infante Rivera

Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado



*A mi familia por su apoyo incondicional,
durante todo este tiempo.*

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	x
Resumen	xI
1. Introducción	1
1.1. Caso de estudio	2
1.2. Descripción del problema	2
1.3. Objetivo	2
1.4. Hipótesis	3
1.5. Justificación	3
1.6. Metodología	4
1.7. Estructura de la tesis	4
2. Antecedentes	6
2.1. Cadena de suministro y logística	6
2.2. Logística de salida	8
2.2.1. La distribución y su importancia	8

2.2.2. Optimización y modelación matemática	9
2.3. Logística interna	19
2.3.1. Pronóstico de la demanda	20
2.3.2. Tipos de pronóstico	21
2.3.3. Modelos de series de tiempo	23
2.4. Conclusión del capítulo	25
3. Metodología	26
3.1. Procedimiento para realizar la distribución de productos	27
3.1.1. Análisis del problema	27
3.1.2. Modelo matemático	28
3.1.3. Heurístico implementado en VBA	31
3.2. Procedimiento para realizar el pronóstico de producción	35
3.2.1. Análisis del problema	36
3.2.2. Series de tiempo	41
3.2.3. Medidas de desempeño de los pronósticos	43
3.3. Conclusión del capítulo	45
4. Análisis de resultados	46
4.1. Distribución de productos	46
4.1.1. Determinación de rutas	47
4.2. Planeación de la producción	54

4.2.1. Recolección de datos	54
4.2.2. Identificación del patrón de los datos	56
4.2.3. Selección del método de pronóstico	59
4.2.4. Métricas de desempeño	62
4.3. Conclusión del capítulo	63
5. Conclusiones	64
5.1. Conclusiones finales	64
5.2. Contribuciones	65

ÍNDICE DE FIGURAS

3.1. Ubicación geográfica de los clientes	28
3.2. Hoja de trabajo principal	32
3.3. Hoja que muestra la solución al ruteo	33
3.4. Hoja de trabajo principal modificada	35
3.5. Secuencia para el pronóstico	37
3.6. Formulario para captura de datos	38
3.7. Venta total por producto	38
3.8. Ventas mensuales de los principales productos	39
4.1. Ruta de la instancia VRPTWS4M	51
4.2. Ruta de la instancia VRPTWS3M	53
4.3. Correlograma para la leche	58

ÍNDICE DE TABLAS

4.1. Comparación entre los valores de la función objetivo (tiempos totales de recorrido)	48
4.2. Resultados de instancia VRPTWS4M	50
4.3. Comparación entre los valores de la función objetivo (distancias totales de recorrido)	52
4.4. Resultados de instancia S3M	53
4.5. Ventas mensuales de los principales productos	55
4.6. Ventas de leche durante el período 2016-2017	56
4.7. Cálculo del coeficiente de autocorrelación para retraso de un período .	57
4.8. Coeficientes de correlación	58
4.9. Promedio móvil para el queso	60
4.10. Promedio móvil ponderado para el queso	61
4.11. Suavización exponencial simple para el queso	62
4.12. Resultados MAPE para pronósticos	63

AGRADECIMIENTOS

Al comité de tesis, a mis profesores, a la Universidad Autónoma de Nuevo León, a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, al Proyecto UANL-PAICYT CE863-19 y muy especialmente a la Dra. María Angélica Salazar Aguilar, por el tiempo y colaboración brindada a lo largo de este proceso.

A todas las personas que de alguna forma me han colaborado para salir adelante con este proyecto y a mis amigos, los que estuvieron a mi lado durante el proceso y a quienes desde lejos me dieron su apoyo, infinitas gracias.

Esta tesis corresponde a los estudios realizados con una beca de excelencia otorgada por el Gobierno de México, a través de la Secretaría de Relaciones Exteriores.

RESUMEN

Allan Cubillo Artavia.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: **HERRAMIENTAS CUANTITATIVAS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE UNA PYME.**

Número de páginas: 73.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: La presente investigación surge a partir de la necesidad que presentan las Pymes de hacer eficientes sus procesos en la cadena de suministro, ya que tienen muchas falencias y eso provoca que a largo plazo no sean rentables e inclusive, eso conlleva al cierre de sus operaciones. Entonces, el objetivo de este estudio es proponer e implementar herramientas cuantitativas que se acoplen a las necesidades que tienen este tipo de empresas y que a su vez no requieran una inversión en equipo, software o capacitación para sus colaboradores, sino que a partir de alternativas básicas puedan realizar el análisis de sus operaciones e implementar mejoras que les ayuden a ser más eficientes y aprovechar las ventajas que ofrece el mercado.

No se debe obviar el hecho que más del 90% de las empresas constituidas en

Costa Rica son Pymes y la importancia que las mismas presentan para la economía, dado que aportan una cuarta parte del empleo total y una tercera parte del Producto Interno Bruto, siendo de vital importancia dotarles de herramientas para que continúen dinamizando la economía nacional.

En virtud de lo indicado en los párrafos supra citados y dadas las necesidades y características de la Pyme objeto de estudio, se desarrolla un modelo matemático que permite determinar cuál es la ruta óptima que debe seguir la empresa para hacer la distribución de los productos a sus clientes, por otra parte, se hace la modificación del código de *Visual Basic* (Erdoğan, 2017) para facilitar una herramienta desarrollada en Microsoft Excel y que la Pyme pueda hacer su programación de ruta, minimizando los tiempos de traslado o las distancias recorridas. Adicionalmente, se realiza un análisis de las ventas de la empresa y conforme el patrón de los datos, se determina cuál es el método de pronóstico adecuado para los seis principales productos que vende la empresa.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: Mediante la aplicación de la metodología descrita en los párrafos precedentes se logra encontrar rutas óptimas que permiten disminuir los tiempos que la Pyme tarda en hacer la distribución de productos a sus clientes, con lo cual se puede aprovechar más tiempo para trabajar en planta, asimismo, al reducirse los tiempos de traslado, se reducirá el consumo de combustible y la cantidad de horas que se debe mantener al chofer en carretera. Por otro lado, se adapta una herramienta implementada en Microsoft Excel, lo que permite que sea de fácil uso para la Pyme en cuestión y que no requiera inversión, ni capacitación especializada.

Adicionalmente, en cuanto al tema de planeación de producción, se logra realizar un análisis de los seis principales productos que vende la empresa, lo que permite realizar un pronóstico de ventas, de conformidad con el comportamiento (patrón) que tienen los datos, lo que a su vez permite producir aquello que realmente requiere el mercado y con eso se evitar generar mermas de producto que no se vende

y aumentar la satisfacción del cliente, al encontrar el producto que requiere, en su establecimiento de confianza.

Firma del asesor:



Dra. María Angélica Salazar Aguilar

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La cadena de suministro se encuentra conformada por diferentes eslabones, cada uno de los cuales tiene una función muy importante para la movilización de cualquier producto, desde que este es una materia prima, hasta que se convierte en un producto final, con lo cual se podría establecer que el primer eslabón de la cadena es el proveedor y el último sería el consumidor final o cliente. Cada uno de estos integrantes es importante dentro de la cadena, pues todos aportan valor al producto y hacen posible la transformación y movilización de las mercancías hasta las manos del consumidor o viceversa, cuando se habla de logística inversa.

Es por ello que la cadena de suministro de una empresa requiere que se realicen cambios de forma constante, a fin de lograr una mayor eficiencia y sinergia en todos los procesos que la componen. Estos cambios pueden efectuarse, por ejemplo, en la producción de la empresa, en aras de fabricar exclusivamente aquello que requiere el mercado (logística interna), o bien, en la logística de salida, como lo es la distribución, en la cual se han aplicado diferentes herramientas cuantitativas para obtener un desempeño positivo y mejorar las ventajas competitivas y ser más eficientes en toda la gestión de la cadena.

1.1 CASO DE ESTUDIO

En el caso de estudio se atiende a una micro empresa del mercado costarricense, que se dedica a la venta de productos lácteos, principalmente a base de leche de cabra. Dicha empresa cuenta con cuatro colaboradores para realizar las diferentes actividades.

La Pyme tiene 64 clientes, los cuales se encuentran ubicados a una distancia entre 10 y 280 kilómetros de la planta de producción, a quienes les distribuye un total de 25 productos en diferentes presentaciones y realiza la entrega del producto con un camión que tiene una capacidad de una tonelada. Los pedidos no son procesados mediante órdenes de compra, sino que el colaborador hace la visita al cliente y verifica la disponibilidad de producto y el gerente del punto de venta es quien decide las cantidades de producto que comprará en ese momento.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La Pyme identificada en este trabajo no cuenta con herramientas de toma de decisiones para dar soporte a sus procesos: elaboración de órdenes de compra, análisis de demanda, planes de producción, ruteo, así como otras tecnologías que le permitan dar agilidad y eficiencia a su cadena de suministro.

1.3 OBJETIVO

Proponer herramientas cuantitativas para mejorar la eficiencia de los procesos de distribución de productos y planeación de producción de una Pyme.

1.4 HIPÓTESIS

Por medio de la aplicación de herramientas cuantitativas se logrará hacer más eficientes los procesos de distribución de productos y planeación de producción de una Pyme.

1.5 JUSTIFICACIÓN

El parque empresarial costarricense se encuentra conformado aproximadamente por 36,000 empresas, de las cuales el 93.3 % corresponde a Pymes. Cabe mencionar, de conformidad con la legislación de Costa Rica, que una Pyme es definida en razón de la cantidad de personas que emplea y dentro de esta categoría se agrupa a todas aquellas empresas con menos de 101 empleados.

Por otra parte, según el informe elaborado por MEIC (2017) (Ministerio de Economía, Industria y Comercio), las Pymes aportan el 25 % del empleo total, asimismo, contribuyen en un 15 % a las exportaciones, en términos FOB (libre a bordo, por sus siglas en inglés). Finalmente, como muestra de su importancia, las Pymes contribuyen en un 30 % del Producto Interno Bruto (PIB) de Costa Rica.

Por las razones expuestas es importante poder atacar los problemas a los cuales se enfrentan las Pymes de Costa Rica, como es el caso en cuestión, se debe recordar que cualquier inconsistencia en la cadena de suministro afectará de forma negativa la capacidad de crecer y mantener la competitividad en un mercado para cualquier empresa. Por ejemplo, producir una cantidad mayor de lo que requiere el mercado implica mermas y producir menos, implica baja satisfacción del cliente. Del mismo modo, hacer una inadecuada asignación de rutas involucra pérdida de dinero y tiempo e incapacidad de satisfacer nuevos mercados.

1.6 METODOLOGÍA

Como primer paso, para realizar el presente trabajo se analizó el sector Pymes de Costa Rica, logrando identificar algunos factores que se podrían mejorar con una investigación aplicada. A partir de este momento, se contacta con diferentes Pymes que pudiesen estar interesadas en formar parte del estudio y de la misma forma se empieza a hacer una revisión de la literatura disponible, en aras de poder observar métodos que permitan solucionar alguno de los problemas que enfrentan este tipo de empresas.

Seguidamente, gracias a la colaboración de la Pyme objeto de estudio, se observan dos posibilidades de mejora, la primera relacionada con la distribución de mercancías; y la segunda, con respecto a la planeación de la producción.

En el tema de distribución de mercancías, se pretende desarrollar un modelo matemático, que permita obtener las rutas óptimas que debe seguir la empresa para realizar la entrega de producto a sus clientes. Además, mediante hojas de cálculo, lo que haría muy factible su implementación y uso por parte de la empresa.

En relación al tema de planeación de la producción, se deberán obtener los datos de ventas de un determinado período y con ello poder hacer una estimación de las ventas futuras que pueda tener la empresa, la idea es analizar el comportamiento de los datos y poder proponer técnicas de pronóstico que mejor se acoplen a las necesidades de la Pyme objeto de estudio.

1.7 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente documento se compone de cinco capítulos. En el primero de ellos se aborda la introducción a la problemática a tratar, el objetivo, la hipótesis, la justificación y la metodología de la investigación.

El segundo capítulo se muestra la revisión de literatura que sustenta la investigación, propiamente aspectos de logística de salida y logística interna, temas base del estudio en cuestión, así como aspectos generales sobre la cadena de suministro.

En el tercer capítulo se analiza el método que explica la investigación, así como las herramientas y procedimientos de distribución y pronóstico de demanda.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología descrita en el capítulo anterior, es decir, el modelo matemático para disminuir tiempos de traslado y pronóstico de demanda mediante series de tiempo.

Finalmente, en el capítulo último se plasman las conclusiones que se logran obtener de la presente investigación y las contribuciones alcanzadas.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

En este capítulo se presenta una breve introducción a los temas de cadena de suministro y logística, lo cual servirá de base para plantear la solución al problema que se aborda en la investigación, asimismo, se analizarán temas de distribución, pronósticos y modelación matemática.

2.1 CADENA DE SUMINISTRO Y LOGÍSTICA

En las últimas tres décadas, el proceso de globalización ha incrementado el comercio internacional y con ello se ha aumentado la importancia de la Cadena de Suministro. Se han presentado cambios evidentes en el transporte que han permitido una disminución de costos unitarios, producto de las economías de escala, así como también, una mayor fiabilidad en las entregas por la creciente eficiencia del sector y la incorporación de tecnologías de información y comunicación.

Bajo este esquema, la cadena de suministro puede ser entendida como el conjunto de enfoques utilizados para integrar de manera eficiente proveedores, fabricantes, almacenes y tiendas, de modo que la mercancía se produzca y distribuya en las cantidades correctas, en los lugares correctos y en el momento adecuado, a fin de minimizar los costos del sistema, mientras se satisface el nivel servicio (Simchi-Levi

et al., 2008).

En contraste con el concepto anterior, la logística es el trabajo requerido para mover y colocar el inventario por toda la cadena de suministro. Como tal, la logística es un subconjunto de la cadena de suministro y ocurre en esta; es el proceso que crea un valor por la oportunidad y el posicionamiento del inventario, básicamente versa sobre el flujo de productos y servicios dentro de esta (Bowersox *et al.*, 2007).

El término «logística» se origina de la antigua palabra griega «logos» (razón, palabra, cálculo, discurso, oración) y se ha utilizado durante más tiempo que el concepto actual de logística empresarial. La palabra logística en sí misma proviene de la disciplina militar, donde existían divisiones en el ejército que eran responsables del suministro de armas, municiones y raciones necesarias cuando se necesitaban, por ejemplo, cuando tenían que ir de su propia base a una posición avanzada (Islam *et al.*, 2013).

La logística entonces se ha convertido en una ventaja competitiva en el entorno actual, ya que involucra todas las actividades requeridas para desplazar productos e información desde y entre los integrantes de una cadena de suministro y entre más eficiente sea la integración que existe entre los eslabones, mayor será la ventaja que se posea en comparación con la competencia (otras cadenas de suministro).

Según Correa y Gómez (2009), se pueden identificar tres tipos de logística, a saber: logística de entrada, interna y de salida. No obstante, a efectos de la presente investigación el análisis será focalizado en la logística de salida y la logística interna, exclusivamente en torno a los aspectos del transporte, distribución de mercancías y producción.

2.2 LOGÍSTICA DE SALIDA

La logística de salida se centra en la planificación y gestión de flujo de materiales y productos entre la empresa y clientes; las materias primas y los componentes se mueven de proveedores a fabricantes, mientras que los productos terminados se mueven del fabricante al consumidor final (Chopra y Meindl, 2008, p. 75). Conviene señalar la importancia del movimiento de carga en una cadena de suministro, pues este rubro puede llegar a absorber entre uno y dos tercios de los costos totales de logística (Ballou, 2004, p. 164). Por lo que, uno de los campos que se ha optimizado a través de los últimos años está relacionado con la distribución, en el cual se han aplicado diferentes herramientas cuantitativas para obtener un desempeño positivo, mejorar las ventajas competitivas y ser más eficientes en toda la gestión de la cadena.

2.2.1 LA DISTRIBUCIÓN Y SU IMPORTANCIA

La distribución, según Chopra y Meindl (2008), es una directriz clave de la rentabilidad total de la compañía, debido a que afecta de manera directa tanto los costos de la cadena como la experiencia del cliente y son estas las dimensiones desde las cuales se evalúa una red de distribución: las necesidades del cliente que se satisfacen y el costo de satisfacer dichas necesidades.

La importancia del proceso de distribución se centra entonces en todos los procedimientos y requerimientos necesarios para asegurarnos que el cliente reciba el producto de acuerdo con sus necesidades. Lo ideal es utilizar las mejores prácticas en procesos logísticos de distribución para que sus beneficios se vean recompensados en menores tiempos de entrega, mayor satisfacción de los clientes y que las devoluciones de productos defectuosos sean mínimas (Díaz *et al.*, 2008). No obstante, un problema frecuente asociado a la distribución se encuentra en reducir los costos de transportación y mejorar el servicio al cliente, lo cual puede tener solución al encon-

trar los mejores caminos que debería seguir un vehículo en una red de carreteras que minimice el tiempo o la distancia total recorrida (Ballou, 2004, p. 225).

En situaciones como la descrita en el párrafo precedente es donde interviene la investigación de operaciones que, de conformidad con lo señalado por Winston (2005), es «un enfoque científico en la toma de decisiones que busca el mejor diseño y operar un sistema, por lo regular en condiciones que requieren la asignación de recursos escasos» y Shabani y Sowlati (2013) indican que al respecto se puede desarrollar un modelo de cadena de suministro para ayudar a los gestores en sus decisiones y administrar la cadena de suministro de manera más eficiente, asimismo, señalan que la modelación matemática se ha utilizado en temas tan diversos como planificación, gestión, diseño de producción y distribución.

2.2.2 OPTIMIZACIÓN Y MODELACIÓN MATEMÁTICA

Se puede entender un modelo matemático como aquel que «busca representar una realidad mediante el uso de relaciones matemáticas, a través de la lógica, con el objetivo de ayudar en el proceso de toma de decisiones», el cual estará compuesto por ecuaciones y/o desigualdades algebraicas (Martínez *et al.*, 2014, p. 3). La aplicación de técnicas matemáticas en la optimización de las operaciones garantiza satisfacer la mayoría de los pedidos de los clientes en el tiempo requerido y a un costo más bajo, con lo cual se toman decisiones más rápidas y eficientes (González y Garza, 2004). Por su parte, la optimización es una herramienta simple para utilizar el poder de las formulaciones lineales y no lineales para resolver los grandes problemas de manera concisa y analizar las soluciones. Ayuda a encontrar la respuesta que produce el mejor resultado; alcanza el mayor beneficio, salida o felicidad; o logra el menor costo, desperdicio o incomodidad. A menudo, estos problemas implican hacer el uso más eficiente de los recursos disponibles, incluyendo dinero, tiempo, maquinaria, personal, inventario y tierra y agua (Singh, 2012).

Existen dos problemas clásicos ampliamente estudiados en investigación de operaciones, los cuales se conocen con el nombre del problema del agente viajero (TSP, por sus siglas en inglés) y problema de enrutamiento de vehículos (VRP, por sus siglas en inglés). El primer caso aplica cuando se tiene que visitar una serie de clientes una única vez y se desea hacerlo en el menor tiempo posible, luego de realizar todas las visitas, se debe regresar al punto de origen. Xu *et al.* (2018) establecen que su objetivo es «determinar el camino más corto a través de un conjunto de ciudades ubicadas al azar, cada una de ellas solo una vez (con la excepción del punto de partida)».

En segundo lugar, se tiene al VRP, el cual es definido por Laporte (2009) como el problema de diseñar rutas de entrega de menor costo desde un depósito a un grupo de clientes geográficamente dispersos, sujeto a restricciones adicionales. Este problema es fundamental para la administración de la distribución y debe ser resuelto rutinariamente por los operadores. En la práctica, existen varias variantes del problema debido a la diversidad de reglas de operación y restricciones encontradas en las aplicaciones de la vida real.

2.2.2.1 PROBLEMA DEL AGENTE VIAJERO

Según lo señalado por Dantzig *et al.* (1954) el TSP tiene un origen algo oscuro, dado que fue discutido en las reuniones de matemáticos, sin embargo, poco se ha referenciado en su literatura. Su origen se podría atribuir al llamado juego hamiltoniano, que se ocupa de encontrar el número de diferentes recorridos posibles en una red determinada. A Merrill Flood se debe acreditar el interés en el problema del agente viajero, pues en 1937 trató de obtener soluciones casi óptimas en referencia a la asignación de ruta para autobuses escolares. Tanto Flood como A. W. Tucker recuerdan que escucharon sobre el problema por primera vez en un seminario de Hassler Whitney, en Princeton, en 1934. Las relaciones entre el problema del agente viajero y el problema de transporte de la programación lineal parecen haber sido ex-

plorados por primera vez por M. Flood, J. Robinson, T. C. Koopmans, M. Beckmann (1951) y más tarde por I. Heller (1953) y H. Kuhn. En el problema de Dantzig se busca obtener la ruta más corta para recorrer un grupo determinado de 49 ciudades de Estados Unidos; en su momento era considerado un problema de gran escala.

De acuerdo a la literatura (Punnen, 2002) existen muchas variantes del TSP, que se originaron a partir de aplicaciones de la vida real, entre estos se pueden mencionar: el MAX TSP, TSP de cuello de botella, TSP con múltiples visitas (TSPM, por sus siglas en inglés), TSP generalizado (GTSP, por sus siglas en inglés), entre muchos otros. Las aplicaciones que tienen el TSP y sus variantes no solamente comprende el problema de planificación de rutas, sino que abarca múltiples áreas del conocimiento como matemáticas, informática, investigación de operaciones, genética, ingeniería y electrónica.

El problema puede ser utilizado para la secuenciación y programación de máquinas, en la fabricación de celulares, en la estructuración de matrices, en el análisis de datos en psicología y para cristalografía de rayos X, por ejemplo (Punnen, 2002, pp. 9-15). No obstante, el interés particular de esta investigación radica en la planificación de rutas y por ello también se abordará el VRP con mayor detalle en la siguiente sección, dado que contiene una serie de restricciones adicionales, propias del problema objeto de estudio.

2.2.2.2 PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS

El VRP es uno de los problemas de optimización más estudiados y está relacionado con el diseño óptimo de las rutas que utilizará una flota de vehículos para atender a un conjunto de clientes. De acuerdo a Laporte (2009) el primer artículo publicado al respecto, data de 1959, en donde los autores Dantzig y Ramser desarrollan un heurístico para una aplicación de distribución de combustible. A partir de entonces, han aparecido múltiples variantes, pero recientemente se ha prestado

mayor atención a las variantes más complejas del VRP, a veces denominadas VRPs «ricos», que están más cerca de los problemas prácticos de distribución. En particular, estas variantes se caracterizan por múltiples depósitos, múltiples viajes que realizarán los vehículos, múltiples tipos de vehículos u otros problemas operativos tales como restricciones de carga (Sharda *et al.*, 2008).

Existen diferentes métodos que ayudan a resolver todas estas variantes del VRP, los cuales se podrían agrupar en tres grandes categorías, a saber: algoritmos exactos, heurísticos y metaheurísticos (Laporte, 2009). Los métodos exactos a menudo tienen un desempeño deficiente (en algunos casos les puede tomar días encontrar soluciones, incluso para casos bastante pequeños) (El-Sherbeny, 2010); por su parte, los heurísticos son técnicas que buscan buenas soluciones a un costo computacional razonable, pero sin poder garantizar la optimalidad. Finalmente, las metaheurísticas son algoritmos diseñados para resolver aproximadamente una amplia gama de problemas difíciles de optimización sin tener que adaptarlos profundamente a cada problema. De hecho, el prefijo griego «meta», presente en el nombre, se utiliza para indicar que estos algoritmos son heurísticos de «nivel superior», en contraste con las heurísticas específicas del problema. Las metaheurísticas se aplican generalmente a problemas para los cuales no existe un algoritmo específico para resolverlos. Se utilizan ampliamente para resolver problemas complejos en la industria y los servicios, en áreas que van desde finanzas a la gestión de producción e ingeniería (Boussaïd *et al.*, 2013).

En la literatura existe una multiplicidad de métodos para resolver las diferentes variantes del VRP; no obstante, se pudo constatar que muchos autores coinciden en el uso de la heurística de búsqueda adaptativa de grandes vecindarios (ALNS, por sus siglas en inglés), dado que permite resolver muchas variantes del VRP. Dos de los mayores precursores del ALNS son Pisinger y Ropke (2007), quienes propusieron una heurística unificada que puede resolver cinco variantes diferentes del VRP: el problema de enrutamiento de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW), el problema de enrutamiento de vehículos capacitados, el problema de enrutamiento del

vehículos con múltiples depósitos, el problema de enrutamiento de vehículos dependiente del sitio y el problema de enrutamiento de vehículos abierto. Todos los tipos de problemas señalados se transforman en un problema rico de recolección y entrega con ventanas de tiempo (RPDPTW, por sus siglas en inglés), los cuales son resueltos mediante un ALNS.

El ALNS es un marco de búsqueda local en el que varios algoritmos simples compiten para modificar la solución actual. En cada iteración, se elige un algoritmo para destruir la solución actual y se elige un algoritmo para reparar la solución. La nueva solución se acepta si se satisfacen algunos criterios definidos por el marco de búsqueda local aplicado en el nivel maestro (Pisinger y Ropke, 2007). El ALNS fue previamente sugerido por Ropke y Pisinger (2006) para resolver un problema de recolección y entrega con ventanas de tiempo (PDPTW, por sus siglas en inglés), el cual consiste en atender una serie de solicitudes de transporte utilizando una cantidad limitada de vehículos, cada solicitud implica mover una cantidad de productos de un lugar de recolección a un lugar de entrega, respetando las ventanas de tiempo.

Más tarde, el ALNS también fue propuesto para resolver el problema de recolección y entrega con ventanas de tiempo, beneficios y solicitudes reservadas (PDPTWPR, por sus siglas en inglés), en dicho problema se asume que varios transportistas forman una alianza y se pretende maximizar el beneficio total para generar más beneficio para cada operador, lo cual se logra intercambiando parte de sus solicitudes de transporte (Li *et al.*, 2016). De hecho, el ALNS de este problema está inspirado en Ropke y Pisinger (2006), pero contiene algunas diferencias: el diseño de operadores específicos de destrucción/reparación, que actúan tanto en la secuencia de las rutas como en la selección de las solicitudes atendidas; otro cambio es reiniciar el ALNS desde varias soluciones iniciales; la tercera modificación es organizar la búsqueda en lo que llama segmentos sucesivos, pues el comportamiento de los operadores se modifica en cada nuevo segmento; una cuarta modificación es respecto a una técnica de diversificación llamada meta destrucción; y los últimos dos cambios ya se han usado en implementaciones recientes del ALNS.

Entre los más recientes artículos que se encontraron en la literatura se pueden citar a Liu *et al.* (2019) y Sacramento *et al.* (2019). El primero de ellos está relacionado con el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y visitas sincronizadas (VRPTWSyn, por sus siglas en inglés), en el cual muchos vehículos parten de un depósito y van a atender a un conjunto de clientes geográficamente dispersos, de modo que cada cliente es visitado solo una vez dentro de un intervalo de tiempo determinado, pero algunos clientes necesitan servicios sincronizados, es decir, que deben ser atendidos por dos o más vehículos simultáneamente a la misma hora de inicio de la ventana de tiempo.

En Liu *et al.* (2019), el ALNS comienza a partir de una solución inicial; luego, se selecciona un método de remoción para eliminar q clientes de la solución actual y se elige un método de inserción para volver a insertarlos en la solución actual. Los métodos de remoción e inserción se seleccionan dinámicamente mediante un mecanismo de ruleta, de acuerdo con sus actuaciones anteriores. La nueva solución producida por estos métodos se acepta como la nueva solución actual para la próxima iteración del ALNS, si cumple con un criterio de aceptación simulado.

El segundo caso, se trata de un problema de enrutamiento de vehículos con drones (VRP-D, por sus siglas en inglés), en el que se estudia una extensión del VRP donde cada camión está colaborando con un único vehículo aéreo no tripulado (UAV, por sus siglas en inglés). La tarea es entregar paquetes a un conjunto dado de clientes, cada uno de los cuales debe recibir el servicio exactamente una vez, ya sea por el camión de reparto operado por el conductor o el UAV que opera en coordinación con el camión.

Cada camión con el UAV a bordo debe partir y regresar a un solo depósito. Los dos vehículos pueden partir (o regresar) independientemente al depósito. Cuando el dron no esté operativo, será transportado por el camión, ahorrando energía de la batería. Los aviones no tripulados pueden enviarse desde el camión y ser recogidos nuevamente por el mismo camión en una ubicación diferente a lo largo de la ruta

del camión. Sin embargo, el avión no tripulado puede visitar a un solo cliente cada vez, debido a la capacidad de carga útil limitada y existe una resistencia de vuelo máxima debido a la capacidad de la batería. Se asocia un tiempo con el lanzamiento y la recuperación del avión no tripulado, así como un tiempo de servicio para los clientes cuando entregan los paquetes. Los camiones tienen una capacidad limitada que debe respetarse y la ruta de los camiones no debe exceder un cierto límite de tiempo durante el día de operación. El objetivo es minimizar el costo general de la operación de usar la flota de vehículos, respetando la capacidad y la limitación de tiempo, y al mismo tiempo satisfacer la demanda de los clientes (Sacramento *et al.*, 2019).

Para ilustrar con mayor detalle, a continuación se presentará una lista no exhaustiva de algunas variantes del VRP y una breve descripción de sus características.

EL PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS DEPENDIENTE DEL TIEMPO: Este problema (TDVRP, por sus siglas en inglés) tiene en consideración «una flota de vehículos con capacidad limitada que debe recoger o entregar cargas a clientes desde un depósito central. Los clientes deben ser designados a los vehículos que realizan rutas, de modo que el tiempo total gastado sea minimizado» (Valente y de Alvarenga, 2016). En las palabras de Donati *et al.* (2008) consiste en enrutar de manera óptima una flota de vehículos de capacidad fija cuando los tiempos de viaje dependen del tiempo, en el sentido de que el tiempo empleado para recorrer cada arco dado, depende de la hora del día en que comienza el viaje desde su nodo de origen. El método de optimización consiste en encontrar soluciones que minimicen dos objetivos jerárquicos: el número de recorridos y el tiempo total de viaje.

PROBLEMA PERIÓDICO DE ENRUTAMIENTO CON MÚLTIPLES DEPÓSITOS, FECHAS DE VENCIMIENTO Y VENTANAS DE TIEMPO: Este VRP (MDPVRP, por sus siglas en inglés) es abordado por Cantu-Funes *et al.* (2017), cuyo planteamiento consiste en optimizar el ruteo de vehículos cuando se tienen diferentes plantas de producción, así

como centros de distribución (CD's), se realiza una asignación semanal de vehículos a plantas y los vehículos solo pueden ir a un CD en un mismo viaje, dado que deben recoger producto (envases vacíos) para llevarlo a la planta de producción, en este caso se cuenta con vehículos privados y también es necesario acudir al arrendamiento.

PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS CAPACITADOS: Este problema diseña rutas de entrega óptimas donde cada vehículo solo recorre una ruta, cada vehículo tiene las mismas características y solo hay un depósito central. El objetivo de este problema (CVRP, por sus siglas en inglés) es encontrar un conjunto de rutas de vehículos de menor costo, de manera que cada cliente sea visitado exactamente una vez por vehículo, cada vehículo comienza y termina su ruta en el depósito y no se excede la capacidad de los vehículos (Braekers *et al.*, 2016).

PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS PARA UNA FLOTA HETEROGÉNEA: Aquí se trata de una flota heterogénea de vehículos (HVRP, por sus siglas en inglés) que tienen varias capacidades, costos fijos y costos variables. Por lo tanto, el HVRP implica el diseño de un conjunto de rutas de vehículos, cada una de ellas que comienza y termina en el depósito, para una flota heterogénea de vehículos que atiende a un conjunto de clientes con demandas conocidas. Cada cliente es visitado exactamente una vez y la demanda total de una ruta no excede la capacidad del tipo de vehículo que se le asigna. El costo de enrutamiento de un vehículo es la suma de su costo fijo y un costo variable incurrido proporcionalmente a la distancia de viaje. El objetivo es minimizar el total de dichos costos de enrutamiento. El número de vehículos disponibles de cada tipo se supone ilimitado (Choi y Tcha, 2007).

EL PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS CON RECOLECCIÓN Y ENTREGA: En el caso de este VRP (VRPPD, por sus siglas en inglés), los vehículos no solo están obligados a entregar mercancías a los clientes, sino también a recoger algunas mercancías de los mismos. Los clientes que reciben productos se denominan transportes de línea y los clientes que envían productos se llaman transportes de

vuelta (Çatay, 2010). Según Nagy y Salhi (2005), el VRPPD puede ser clasificado en tres categorías.

1. Entrega primero, recoge segundo: la mayoría de los investigadores asumen que los clientes se pueden dividir en *linehauls* (clientes que reciben productos) y *backhauls* (clientes que envían productos). Los vehículos solo pueden recoger mercancías después de que hayan terminado de entregar toda su carga.
2. Entrega y recolección mixtas: esto sucede cuando la secuencia puede ocurrir en cualquier momento a lo largo de la ruta. Los problemas de VRPPD donde se hace la recolección primero a la entrega y mixtos, se conocen conjuntamente como el problema de enrutamiento del vehículo con *backhauling* (VRPB, por sus siglas en inglés).
3. Recolección y entrega simultánea: en este modelo, los clientes pueden recibir y enviar productos simultáneamente.

PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS CON MÚLTIPLES DEPÓSITOS: En este caso se considera que existe más de un depósito (MDVRP, por sus siglas en inglés). Debido a que existen almacenes adicionales para los productos, los encargados de la toma de decisiones también tienen que determinar qué clientes reciben servicio de cada depósito, es decir, el problema de agrupación antes de los problemas de enrutamiento y programación (Ho *et al.*, 2008).

PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CON VENTANAS DE TIEMPO: Un último ejemplo corresponde al VRP con ventanas de tiempo (VRPTW, por sus siglas en inglés), en el que se consideran vehículos con capacidad limitada y cada uno de los clientes demandan cierta cantidad de producto, el cual debe ser entregado dentro de una ventana de tiempo dada. De ahí que el vehículo puede llegar antes de que se abra la ventana de tiempo, pero el cliente no puede recibir servicio hasta que se abran las ventanas de tiempo (El-Sherbeny, 2010).

Ahora bien, existen otros autores como Bernal-García *et al.* (2013) y Martínez *et al.* (2005) que exploran posibilidades de optimización implementadas mediante herramientas como el Solver de la hoja de cálculo de Excel y lo describen como soluciones funcionales para su aplicación en la pequeña y mediana empresa. Los casos analizados por los autores muestran una optimización en cuanto a la minimización de los costos totales, así como un modelo de red para determinar la ruta más corta para hacer la distribución de los productos de la empresa. Por su parte, autores como Restrepo *et al.* (2008) y Erdoğan (2017) proponen la implementación del algoritmo en VBA (Visual Basic para Aplicaciones) para Excel.

Erdoğan (2017) resuelve el VRP con restricciones adicionales, en una hoja de cálculo que supera problemas de costo y disponibilidad, a través de la familiaridad de su interfaz, facilidad de uso, flexibilidad y accesibilidad. Se puede decir que Microsoft Excel es el software estándar para el análisis cuantitativo a pequeña y mediana escala para empresas. Muchos paquetes de software tienen la funcionalidad incorporada para intercambiar información con Excel, lo que facilita la integración del solucionador. El código es abierto y puede ser comprendido y modificado por programadores de nivel medio. La propuesta de Erdoğan, adicionalmente cuenta con funciones integradas para consultar un servicio web GIS (Sistema de Información Geográfica), desde el cual se pueden recuperar las distancias, los tiempos de traslado y los mapas.

En este sentido es de vital importancia la herramienta mencionada en el párrafo anterior, siendo que las Pymes son empresas que no cuentan con herramientas suficientes para establecer una estructura financiera y de costos que faciliten los procesos de toma de decisiones, tímidamente promueven estrategias logísticas enfocadas a controlar la cadena de abastecimiento, objeto de su razón social y debido a esas características es que se limita su desarrollo, tales como la baja capacidad de innovación, escaso uso de tecnologías de información y comunicación y el limitado acceso a recursos financieros (Díaz *et al.*, 2008).

2.3 LOGÍSTICA INTERNA

La logística interna comprende actividades de logística dentro de los muros de una organización, por ejemplo transportes internos, manejo de materiales, almacenaje y producción. Para de Lima *et al.* (2017) la logística interna es «la planificación, la ejecución y el control del flujo físico y de informaciones internas de la empresa, buscando la optimización de los recursos, procesos y servicios con la mayor economía posible» y con su estudio se identificaron sus componentes: Recibimiento, traslado, *picking/packing*/embalaje, almacenaje, gestión de *stocks*, abastecimiento, PCM (planificación y control de materiales), PCP (planificación y control de la producción), WIP (*working in process*), procesamiento de pedidos, transportes internos, atención al cliente y tecnología de la información.

Los gestores logísticos están tratando de usar mediciones para ayudarse a proyectar y gestionar sistemas de logística más eficientes y eficaces para el cliente. Identificar el valor de la logística interna y sus criterios de desempeño críticos puede ser una manera de ayudar a este sentido, puesto que un sistema de logística interna bien concebido y correctamente utilizado aumenta la eficiencia de una organización (de Lima *et al.*, 2017). El mayor inconveniente que se tiene se presenta en las Pymes, en las cuales debido a su tamaño y escasez de recursos económicos es común que los empleados realicen varias actividades para muchas de las cuales no son especialistas; suele observarse que las mismas personas que dirigen sean quienes también ejecuten funciones de planeación financiera, producción, administración de personal y comercialización, entre otras (Cano *et al.*, 2015).

Según lo indica Eppen *et al.* (2000), ya sea en el sector privado o público, la necesidad de manejar el futuro es parte implícita o explícita de toda acción y decisión administrativas. Debido a esto, administrar la creación de pronósticos es una parte crítica de la responsabilidad de un administrador. Un administrador debe decidir los recursos que habrá de dedicar a un pronóstico particular y el método que utilizará

para obtenerlo.

2.3.1 PRONÓSTICO DE LA DEMANDA

Las empresas deberían fabricar exclusivamente aquello que requiere el mercado, pues cualquier extremo de producción es perjudicial para los intereses de una empresa, dado que producir una cantidad mayor de lo que requiere el mercado, necesariamente implicará mermas de producto, máxime cuando se tienen productos perecederos en los que su caducidad es por debajo de los dos meses. Por otra parte, producir menos de lo que requiere el mercado, inevitablemente provocará que haya una baja satisfacción del cliente y en estos casos, los costos derivados de ventas perdidas son de cierta forma incuantificables, puesto que pueden crecer como una bola de nieve, acarreando disminución del prestigio de la marca, elección de otras alternativas de mercado, etc.

Todo ello hace imperioso que se deba producir de conformidad con las necesidades del cliente y esto se puede lograr a través de la implementación de sistemas de pronóstico de demanda, basados en los históricos que tenga la empresa, pues para sobrevivir toda empresa debe tomar decisiones con anticipación a los cambios del mercado y esas decisiones se toman con base a información histórica, así como con inferencias acerca del futuro (Acosta-Cervantes *et al.*, 2013). Es común que las empresas realicen pronósticos de ventas para poder planificar su producción y la elección del método no siempre resulta una decisión sencilla. Un error en el pronóstico de ventas podría dejar a una empresa sin la materia prima o insumos necesarios para su producción, o podría generarle un inventario muy grande, cualquiera de estas dos situaciones plantea un inconveniente para la empresa (Nojek *et al.*, 2003).

2.3.2 TIPOS DE PRONÓSTICO

Hay muchas maneras de clasificar los modelos de pronóstico y la terminología varía según la clasificación. Por ejemplo, se podría referir a modelos de largo plazo, de plazo medio y de corto plazo. Existen modelos de regresión, modelos de extrapolación y modelos condicionales o basados en precedentes, así como modelos del vecino más próximo (Eppen *et al.*, 2000, p. 606). Por su parte, Chopra y Meindl (2008, p. 190) los clasifican en cuatro tipos diferentes:

1. Cualitativos: son principalmente subjetivos y se apoyan en el juicio humano. Son apropiados sobre todo cuando la información histórica no está disponible o existen muy pocos datos; o bien, cuando los expertos cuentan con resultados de investigación del mercado que pueden afectar el pronóstico.
2. Series de tiempo: utilizan la demanda histórica para hacer pronósticos. Se basan en la suposición de que la historia de la demanda pasada es un buen indicador de la demanda futura. Estos métodos son más apropiados cuando el patrón de la demanda básica no varía significativamente de un año al siguiente.
3. Causal: suponen que el pronóstico de la demanda está altamente correlacionado con ciertos factores en el ambiente (el estado de la economía, las tasas de interés, etc.). Estos métodos encuentran esta correlación entre la demanda y los factores ambientales y recurren a estimados de lo que serán los factores ambientales para pronosticar la demanda futura.
4. Simulación: imitan las elecciones del cliente que dan origen a la demanda para llegar a un pronóstico.

Ahora bien, las series de tiempo (métodos estadísticos) pretenden determinar un patrón básico en su comportamiento que posibilita la proyección futura (Nojek *et al.*, 2003). Dentro de esta categoría se pueden mencionar el método ingenuo, el promedio, el promedio móvil, el promedio móvil autorregresivo integrado (ARIMA, por

sus siglas en inglés), el suavizado exponencial simple, la regresión lineal, el suavizado exponencial doble y otros.

Algo que no debe dejarse de lado, es la disponibilidad de información con la que debe contar la empresa que desee realizar un pronóstico de ventas, es decir, contar con un histórico de las ventas que se han realizado en años previos, con especificación de productos, cantidades, clientes y fechas, pues esto ayudará a relacionar los datos y poder observar, por ejemplo, estacionalidades, picos de demanda, tendencias de consumo, entre otros aspectos, que no serían posibles si la información no existe o si la misma no es confiable.

Para Jain (2017, p. 118) antes de hacer cualquier modelado es importante conocer los datos, dado que cada conjunto de datos tiene sus propios problemas y por ello se debe tener cuidado antes de pronosticar. Los datos pueden tener variaciones a causa de estacionalidad, actividades promocionales, cierre o venta de tiendas y demanda intermitente. Una vez identificada cualquier situación, se sabrá cómo tratar al conjunto de datos y esto permitirá saber cuál modelo es el apropiado.

A simple vista podría resultar difícil decidir cuál método es el más apropiado para pronosticar. Inclusive, varios estudios han indicado que emplear múltiples métodos de pronóstico para crear un pronóstico combinado es más efectivo que emplear cualquier otro solo, lo cual dependerá de las características de los datos y la información que posea la empresa objeto de estudio. De acuerdo a datos del *Institute of Business Forecasting and Planning* (2009), el método mayormente utilizado son las series de tiempo (62%), el 16% de las empresas utilizan los modelos de causa y efecto, el 13% usan modelos cualitativos y los otros métodos son utilizados un 8%. A su vez, el método de series de tiempo más utilizado son los promedios (56%), la suavización exponencial es el segundo método con un 36%, los modelos de media móvil integrada autoregresiva un 7% y la descomposición un 2% (Jain, 2017, p. 133).

2.3.3 MODELOS DE SERIES DE TIEMPO

Este tipo de métodos asumen que los patrones de comportamiento de la demanda ocurridos en el pasado, se repetirán en el futuro y de conformidad con los datos del *Institute of Business Forecasting and Planning*, se analizarán únicamente los tres principales métodos.

PROMEDIOS: Los modelos de series de tiempos son modelos univariados. Requieren solo los datos de una serie para ser pronosticados. Si desea pronosticar ventas, solo necesita los datos de ventas. Si desea pronosticar flujo de caja, entonces el dato requerido es el flujo de caja, únicamente. La ventaja de estos modelos es que son fáciles de comprender. Por otra parte, su simplicidad no debe interpretarse como menos efectivos, debido a que en muchas situaciones trabajan muy bien (Jain, 2017).

SUAVIZACIÓN EXPONENCIAL: Estos métodos se diferencian de los anteriores porque se le asigna un peso mayor a las observaciones más recientes y el peso decrece exponencialmente a medida que retrocedemos en el tiempo, en el caso de los promedios, la asignación del peso es por igual para todas las observaciones (Jain, 2017).

ARIMA: Los modelos Box-Jenkins también llamados ARIMA son más utilizados para pronósticos a corto plazo (días, semanas, meses). Este método se basa principalmente en dos suposiciones: una, la serie de datos es estacionaria o se puede convertir en una. Dos, el patrón de comportamiento de las variables explicativas subyacentes que no están incluidas en los modelos no cambia drásticamente con respecto al pasado (Jain, 2017).

Según Hanke *et al.* (2006, p. 5) la consideración primordial en la elección de un método de pronóstico es que los resultados deben facilitar el proceso de la toma de decisiones y para seleccionar el método de pronóstico debe considerarse el tipo de productos, los objetivos perseguidos y las limitantes que tiene la empresa. La

técnica elegida debe proporcionar un pronóstico adecuado, oportuno y entendible para los administradores, de tal forma que ayude en el proceso de mejora en la toma de decisiones. Por ello es que no puede establecerse cuál es el mejor método de pronóstico sin conocer las características de la empresa en particular a la que se aplicará.

Un factor importante que influye en la selección de una técnica de pronóstico es identificar y entender los patrones históricos de los datos, como lo son la tendencia, el componente cíclico o estacional y la aleatoriedad. En el caso de datos estacionarios (no cambia a lo largo del tiempo) simplemente se toma el valor medio de la serie histórica para pronosticar el valor futuro, en cuyo caso se recomienda el promedio simple, promedio móvil y modelos autorregresivos de promedio móvil y modelos Box-Jenkins. Cuando los datos siguen una tendencia (creciente o decreciente) se utiliza el promedio móvil, suavizado exponencial lineal de Holt, regresión simple, curvas de crecimiento, exponenciales y modelos ARIMA. En el caso de datos estacionales, las técnicas que deben emplearse son los modelos de descomposición clásica, censo X-12, suavización exponencial de Winter, regresión múltiple y ARIMA. Finalmente, en casos de datos cíclicos, se deben utilizar métodos de descomposición clásica, indicadores económicos, econométricos, regresión múltiple y ARIMA (Hanke *et al.*, 2006).

Otro elemento a considerar está relacionado con el horizonte de tiempo para un pronóstico. Por ejemplo, los modelos de regresión son adecuados para plazos cortos, medianos y largos; las medias, promedios móviles, descomposición clásica y proyecciones de tendencias son útiles para horizontes de tiempo cortos e intermedios; y técnicas complejas como Box-Jenkins y econométricos son adecuados para términos de corto y mediano plazo (Hanke *et al.*, 2006, p. 77).

2.4 CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

Como se ha visto a lo largo de este capítulo, con la utilización de herramientas cuantitativas se pueden obtener diferentes soluciones para la optimización de la cadena de suministro, lo cual dependerá de las necesidades propias de cada empresa. Al final del día se espera mejorar la eficiencia de la cadena de suministro y con ello alcanzar ventajas competitivas en el mercado que se atiende. En razón de lo anterior y con base en la literatura analizada, se pretende desarrollar un modelo de optimización basado en el del problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW), dada las características que presenta el caso de estudio, asimismo, se analizarán los datos de sus ventas para determinar cuál es método de pronóstico que mejor se acopla a sus necesidades; situación que se detallada en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

En el presente capítulo se hace un análisis detallado de la metodología que se empleará para resolver la problemática que enfrenta la Pyme objeto de estudio. Cabe mencionar que debido a los problemas que se desean resolver, se emplearán dos metodologías diferentes para mejorar la eficiencia de la cadena de suministro.

Por un lado, se trabajará con un modelo matemático para resolver el problema del ruteo de vehículos y hacer la distribución de la empresa de una manera eficiente, asimismo, se hará una adaptación del heurístico implementado en VBA por Erdoğan (2017); por otra parte, se hará un análisis de las ventas efectuadas por la empresa durante el período fiscal¹ 2016-2017, es decir, se utilizarán series de tiempo para realizar un pronóstico de ventas y con ello determinar la producción de los principales artículos que fabrica la empresa.

¹En Costa Rica, corresponde al período que inicia el 1 de octubre de un año y concluye el 30 de setiembre del año siguiente y los contribuyentes deben hacer declaración de las utilidades generadas por cualquier actividad o negocio de carácter lucrativo.

3.1 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LA DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTOS

En esta sección se aborda el modelo matemático propuesto para resolver la problemática que enfrenta la empresa en cuestión, básicamente se trata de un problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo, dado que se debe satisfacer la demanda de los clientes en un horario asignado al efecto; antes o después de dicho horario no se podrá realizar la entrega de la mercancía, por lo que se afirma que las ventanas de tiempo son duras. Adicionalmente, se propondrá la utilización de un heurístico implementado en VBA para Excel, según Erdoğan (2017), lo que facilitaría el uso por parte de una Pyme, sin necesidad de incurrir en costos asociados a licencias de software o capacitación para los colaboradores de la empresa, en el entendido que dicho tipo de empresas carecen de recursos necesarios para llevar a la práctica estas soluciones.

3.1.1 ANÁLISIS DEL PROBLEMA

La empresa es una Pyme comercializadora y fabricante de productos lácteos, que cuenta con 64 clientes distribuidos alrededor de Costa Rica, a quienes les debe hacer entregas de producto de forma semanal, quincenal o mensual, de acuerdo a los contratos contraídos con ellos. La empresa cuenta únicamente con un vehículo para realizar la entrega de dichos productos, por lo que han realizado rutas diarias para hacer la distribución de productos. Cabe mencionar que la entrega de productos no se realiza todos los días, puesto que se designa uno o dos días por semana para hacer actividades en la planta de producción. La Figura 3.1 muestra la ubicación de los clientes.

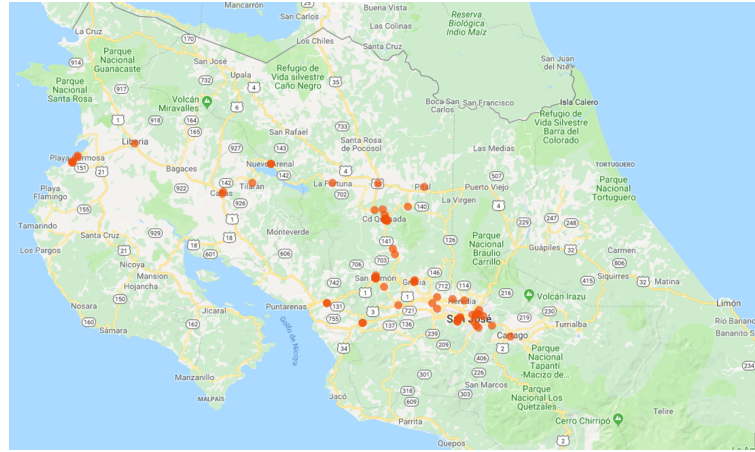


Figura 3.1: Ubicación geográfica de los clientes

3.1.2 MODELO MATEMÁTICO

La formulación matemática del problema de optimización, estudiado en El-Sherbeny (2010), asume que el vehículo cuenta con capacidad suficiente para transportar toda la demanda diaria de los clientes, por lo que no se consideran restricciones de capacidad y además, es válida para múltiples vehículos. Cabe señalar que en nuestro caso de estudio se dispone únicamente de un vehículo. La notación usada en la formulación se detalla a continuación:

Conjuntos

I : Clientes ($i, j \in I$)

K : Vehículos ($k \in K$)

Parámetros

t_{ij} Tiempo de ir de un cliente i a un cliente j

a_i Tiempo de inicio de la ventana de tiempo del cliente i

b_i Tiempo final de la ventana de tiempo del cliente i

s_i Tiempo de servicio al cliente i .

Variables

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{Si se realiza el recorrido del punto } i \text{ a un punto } j \text{ en el vehículo } k \\ 0, & \text{si no.} \end{cases}$$

w_{ik} Especifica el inicio de tiempo de servicio en el cliente i cuando es servido por el vehículo k .

Modelo²:

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} t_{ij} x_{ijk} \quad (3.1)$$

$$s.a : \sum_{j \in I} x_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3.2)$$

$$\sum_{i \neq h \in I} x_{ihk} - \sum_{j \neq h \in I} x_{hjk} = 0 \quad \forall h \in I, k \in K \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \neq i \in I} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in I, k \in K \quad (3.4)$$

$$\sum_{j \in I} x_{j0k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3.5)$$

$$w_{ik} + s_i + t_{ij} - w_{jk} \leq (1 - x_{ijk})M \quad \forall i \neq j \in I, k \in K \quad (3.6)$$

$$w_{ik} \geq a_i \quad \forall i \in I, k \in K \quad (3.7)$$

$$w_{ik} \leq b_i - s_i \quad \forall i \in I, k \in K \quad (3.8)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in I, k \in K \quad (3.9)$$

$$w_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in I, k \in K \quad (3.10)$$

La ecuación (3.1) es la función objetivo que minimiza el tiempo total de recorrido, las restricciones (3.2) aseguran que cada vehículo salga de la planta al inicio del recorrido, las restricciones (3.3) garantizan la conservación de flujo, las restricciones

²Fuente: basado en El-Sherbeny (2010).

(3.4) aseguran que se visite a cada cliente una única vez y las restricciones (3.5) garantizan que el vehículo retorne a la planta al finalizar el recorrido. Adicionalmente, las restricciones (3.6) imponen consistencia en los tiempos de llegada; aquí M es un número suficientemente grande. Las restricciones (3.7) y (3.8) garantizan que el servicio a cada cliente se realice dentro de las ventanas de tiempo y la naturaleza de las variables se define por las restricciones (3.9) y (3.10).

El modelo descrito será implementado en GAMS y se resolverá una instancia del problema para cada día de la semana, haciendo uso de CPLEX, mediante el método de ramificación y acotamiento (B&B, por sus siglas en inglés). Esto permitirá a la empresa, contar con las rutas óptimas de distribución. Asimismo, se realizó una pequeña modificación al modelo descrito, con la finalidad de obtener las rutas óptimas por distancias, para lo cual únicamente se cambia la función objetivo y se incorpora un parámetro adicional que contempla las distancias de traslado entre el cliente i y un cliente j .

Es importante mencionar que el método B&B se presentó por primera vez como una técnica para resolver problemas MILP (problemas de programación lineal entera mixta) por Land and Doig en 1960 (Kronqvist *et al.*, 2019). B&B es un método genérico bien conocido para calcular una solución óptima de un problema de optimización de un solo objetivo y se basa en la idea de dividir para conquistar, consiste en un principio de enumeración implícita, visto como una búsqueda de árbol (Przybylski y Gandibleux, 2017). Por otra parte, conviene explicar que ramificar y cortar³ implica ejecutar un algoritmo de ramificación y acotamiento y usar planos de corte para ajustar la relajación de la programación lineal con la finalidad, según lo señalan Przybylski y Gandibleux, de evitar grandes árboles de búsqueda.

³Para más detalle puede visitar la página web: https://www.gams.com/latest/docs/S_CPLEX.html

3.1.3 HEURÍSTICO IMPLEMENTADO EN VBA

Como se indicó al inicio del presente capítulo, se pretende facilitar la hoja de Excel propuesta por Erdoğan (2017) a efectos que la empresa pueda realizar la ejecución de su ruteo cuando exista una variación en el conjunto de clientes a visitar, mediante una herramienta científica. El heurístico desarrollado por Güneş presenta diferentes facilidades, entre las que se puede citar la posibilidad de ejecutar el modelo desde una computadora que generalmente es usada en la práctica, es decir, no requiere de características especiales. Asimismo, brinda soluciones en tiempos relativamente cortos y se pueden trazar rutas hasta para 200 clientes.

Conviene mencionar que el heurístico implementado en VBA tiene como función objetivo maximizar el total de ganancia colectada, menos el costo de viaje de los vehículos, el costo fijo de usar los vehículos y la penalidad por violar las ventanas de tiempo. Cuando no se tienen beneficios, ni costos asociados a las rutas y vehículos; entonces, el heurístico realizará una minimización de la distancia total del recorrido (Erdoğan, 2017). En el caso de estudio, la Pyme no tiene asignado ningún costo o beneficio para las rutas y los vehículos, por lo cual no se considera este aspecto dentro de la modificación planteada al heurístico.

En el trabajo de Erdoğan (2017) se introduce una hoja de cálculo de Excel que presenta facilidad de uso, flexibilidad y accesibilidad, dado que Excel es un software estándar para el análisis cuantitativo a pequeña y mediana escala para empresas, esta hoja además tiene incorporada funciones para consulta de un servicio web GIS para recuperar las distancias, los tiempos de traslado y los mapas.

3.1.3.1 ESTRUCTURA DE LAS HOJAS DE CÁLCULO

La información que se introduce en el *VRP Spreadsheet Solver* se almacena en hojas de trabajo separadas. La hoja principal se llama *VRP Solver Console* y a partir

de esta se van generando las hojas restantes (1.*Locations*, 2.*Distances*, 3.*Vehicles*, 4.*Solution* y 5.*Visualization*).

Cada hoja presenta una serie de colores que no fueron asignados al azar, sino que obedecen a ciertas indicaciones: las celdas con fondo negro no deben modificarse; las celdas con fondo verde son parámetros que establece el usuario; las celdas con fondo amarillo son datos que se generan de forma automática, pero pueden ser modificadas por el usuario si se desea conocer *qué pasaría si*; las celdas con fondo naranja son advertencias, por ejemplo, que se llegó donde el cliente antes del inicio de la ventana de tiempo; y las celdas con fondo rojo señalan un error, por ejemplo, cuando se viola la capacidad del vehículo.

VRP Solver Console: La Figura 3.2 muestra la hoja de trabajo principal, la cual almacena y proporciona información al resto de las hojas de trabajo y contiene datos en cuanto al número de clientes, vehículos y depósitos, tipo de ventanas de tiempo, entre otros elementos.

Sequence	Parameter	Value	Remarks
0.Optional - GIS License	Bing Maps Key		You can get a free trial key at https://www.bingmapsportal.com/
1.Locations	Number of depots	1	[1,20]
	Number of customers	14	[5,200]
2.Distances	Distance / duration computation	Bing Maps driving distance	Recommendation: Use 'postcode, country' format for addresses
	Bing Maps route type	Fastest	Recommendation: Use 'Fastest'
	Average vehicle speed		Not used for the 'Bing Maps driving distances' options
3.Vehicles	Number of vehicle types	1	Heterogeneous VRP if greater than 1
4.Solution	Vehicles must return to the depot?	Yes	Open VRP if no return
	Time window type	Hard	
	Backhauls?	No	If activated, delivery locations must be visited before pickup locations
5.Optional - Visualization	Visualization background	Bing Maps	
	Location labels	Location IDs	
6.Solver	Warm start?	Yes	
	Show progress on the status bar?	No	May slow down the optimization algorithm
	CPU time limit (seconds)	60	Recommendation: At least 60 seconds

Figura 3.2: Hoja de trabajo principal

Locations: Se indican los datos sobre direcciones, coordenadas, ventanas de tiempo y requisitos de recolección y entrega de los clientes. Las coordenadas se pueden ingresar manualmente, se pueden copiar y pegar desde una fuente externa, o se

pueden completar usando el servicio web GIS.

Distances: En esta hoja se ingresa la información sobre las distancias y las duraciones de viaje entre cada dos puntos que se especifican en la hoja de ubicaciones, lo cual se puede realizar mediante el servicio web GIS.

Vehicles: Los datos que se incluyen en esta hoja están relacionados con parámetros de costos, tales como el costo por unidad de distancia y el costo por viaje, así como los parámetros de capacidad, el límite de tiempo de manejo y el límite de distancia del vehículo, entre otros.

Solution: En esta hoja de trabajo se muestra la distancia total recorrida, el tiempo total de viaje, hora de salida y llegada para cada vehículo, así como el tiempo total de trabajo y ganancia recolectada. Para mayor detalle puede observar la Figura 3.3.

Total net profit:		0,00						
Vehicle:	V1	Stops:	15	Net profit:	0,00			
Stop count	Location name	Distance travelled	Driving time	Arrival time	Departure time	Working time	Profit collected	Load
0	Depot	0,00	0:00		06:00	0:00	0	0
1	D11	10,23	0:45	06:45	07:10	1:10	0	0
2	D7	11,22	0:50	07:15	07:25	1:25	0	0
3	D6	11,72	0:53	07:28	07:38	1:38	0	0
4	D8					2:23	0	0
5	D5					2:35	0	0
6	D17					3:36	0	0
7	D20					4:32	0	0
8	D14					5:43	0	0
9	D16					6:08	0	0
10	D15					6:28	0	0
11	D12	90,55	2:44	12:39	12:49	6:49	0	0
12	D3	91,21	2:46	12:51	13:01	7:01	0	0
13	D4	91,81	2:48	13:03	13:13	7:13	0	0
14	D13	92,22	2:50	13:15	13:25	7:25	0	0
15	Depot	102,30	3:35	14:10		8:10	0	0
Detected reasons of infeasibility								

Figura 3.3: Hoja que muestra la solución al ruteo

Visualization: Esta hoja de trabajo simplemente contiene un gráfico de dispersión con el mapa de la región recuperado del servicio web GIS y puede mostrar varios

detalles sobre las ubicaciones, incluidos los montos de recolección, entrega o los tiempos de servicio.

3.1.3.2 CARACTERÍSTICAS DE LA HEURÍSTICA

Como ya se indicó, algunos párrafos atrás, la función objetivo del algoritmo es maximizar el total de beneficio al realizar el ruteo, lo cual se encuentra sujeto a diferentes restricciones, según palabras del autor (Erdoğan, 2017), no se había presentado ningún intento de formular un VRP con todas las restricciones que contempla su algoritmo, asimismo, señala que la formulación se puede resolver de manera óptima en casos pequeños. Por otra parte, presenta un algoritmo para resolver el problema, el cual implementa una variante del ALNS propuesto por Pisinger y Ropke (2007).

Se utiliza el ALNS debido a su flexibilidad para adaptarse a muchas variantes del VRP. El algoritmo diversifica la búsqueda mediante la eliminación aleatoria de clientes de la solución en cuestión y se intensifica mediante la re inserción de los clientes y la búsqueda local.

El heurístico fue comparado con dos de las principales variantes del VRP, el VRP capacitado y el VRP restringido por distancia y se demostró que funciona muy bien para hasta 100 clientes y devuelve resultados aceptables para instancias más grandes. El rendimiento del algoritmo es mejor para los casos con una restricción de distancia, debido a la reducción del espacio de búsqueda (Erdoğan, 2017). Cabe indicar que la empresa objeto de estudio realiza la distribución de producto a no más de 15 clientes de forma diaria, por lo que se acopla perfectamente a las necesidades prácticas de la Pyme.

3.1.3.3 ADAPTACIÓN DE LA HERRAMIENTA

Con el fin de resolver el problema de estudio usando la herramienta propuesta por Erdoğan, en este trabajo, se realiza una modificación que permite minimizar los tiempos o las distancias del recorrido (situación que dependerá de los intereses que tenga la Pyme), lo cual se puede traducir en reducción de costos, asociados a combustible y salario de los colaboradores de la empresa. La Figura 3.4 muestra la hoja de trabajo principal con las modificaciones señaladas en este párrafo.

Sequence	Parameter	Value	Remarks
0.Optional - GIS License	Bing Maps Key		You can get a free trial key at https://www.bingmapsportal.com/
1.Locations	Number of depots	1	[1,20]
	Number of customers	14	[5,200]
2.Distances	Distance / duration computation	Bing Maps driving distance	Recommendation: Use 'postcode, country' format for addresses
	Bing Maps route type	Fastest	Recommendation: Use 'Fastest'
	Average vehicle speed		Not used for the 'Bing Maps driving distances' options
3.Vehicles	Number of vehicle types	1	Heterogeneous VRP if greater than 1
4.Solution	Vehicles must return to the depot?	Yes	Open VRP if no return
	Time window type	Hard	
	Backhauls?	No	If activated, delivery locations must be visited before pickup locations
5.Optional - Visualization	Visualization background	Bing Maps	
	Location labels	Location names	
6.Solver	Warm start?	Yes	
	Show progress on the status bar?	No	May slow down the optimization algorithm
	CPU time limit (seconds)	60	Recommendation: At least 60 seconds
7.Optimization	Time or distance?	Time	

Figura 3.4: Hoja de trabajo principal modificada

3.2 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR EL PRONÓSTICO DE PRODUCCIÓN

En la segunda sección de este capítulo se hará un análisis de las ventas efectuadas por la empresa durante el año fiscal 2016-2017, con la finalidad de realizar un pronóstico de ventas, a través del análisis de series de tiempo, lo cual resulta fundamental a efectos de tomar decisiones tácticas para la planificación de la producción, o decisiones estratégicas, por ejemplo, para expandir o disminuir la capacidad de

producción de la planta. Ver Figura 3.5 con la secuencia metodológica del pronóstico.

3.2.1 ANÁLISIS DEL PROBLEMA

La empresa tiene un *stock* de 25 *SKUs* y la demanda proviene de sus 64 clientes distribuidos en todo el país, con mayor concentración en la zona centro y norte del país. No obstante, el primer inconveniente que se encontró es que no hay ningún registro digital de las ventas que se han realizado desde el surgimiento de dicha Pyme, en virtud de lo cual se implementó un formulario (ver Figura 3.6) en línea que permita conocer las ventas que se realizan a cada cliente; dicho formulario fue elaborado en la plataforma de *CognitoForms*⁴, que permite gestionar hasta 500 entradas mensuales de forma gratuita y cuenta inclusive con opciones para facturar, a cambio de una comisión por cada venta.

Adicionalmente, se procedió a realizar el escaneo de aproximadamente 1000 facturas físicas de las ventas realizadas por parte de la empresa (lo que representa aproximadamente 3500 líneas de producto), que abarcan desde el 01 de octubre de 2016 hasta el 30 de septiembre de 2017 y con dichos documentos se ha realizado la digitalización de la información correspondiente a cada uno de los productos vendidos de forma diaria, así como los clientes y montos individuales y totales de las ventas. El objetivo de dicho trabajo es poder proponer una herramienta para el pronóstico de demanda que no implique la contratación de un experto en estadística o que se deba adquirir algún software con prestaciones adicionales a las que ofrece Microsoft Excel. A raíz de este trabajo se procedió a identificar el comportamiento de las ventas de cada producto, para lo cual en la Figura 3.7, se logra apreciar que el 24% de los productos generan el 74% de las ventas totales de la empresa para el período en cuestión.

⁴Para más detalle puede visitar la página web: <https://www.cognitoforms.com/>

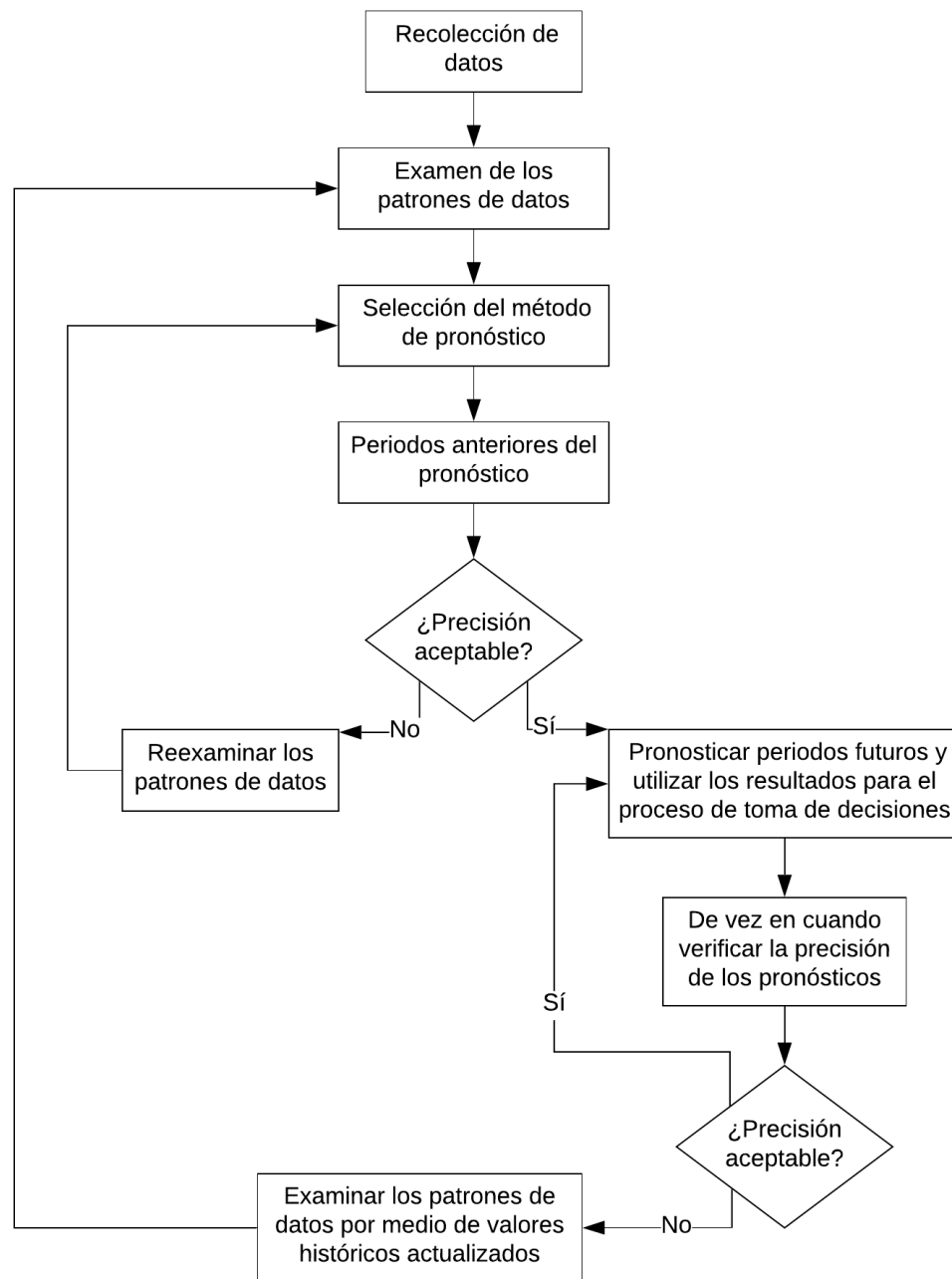


Figura 3.5: Secuencia para el pronóstico

Fuente: Hanke *et al.* (2006)

Control de órdenes de compra
Elaborado por Cubillo Artavia y Salazar Aguilar, 2018

Fecha de venta*

Cientes*

Visita sin entrega
 No

Compra
Favor seleccione todos los productos que adquirió el cliente

x Producto 1

Productos*

Cantidad*

Descuento del producto

Subtotal
 ₡0,00

+Añadir Producto

Figura 3.6: Formulario para captura de datos

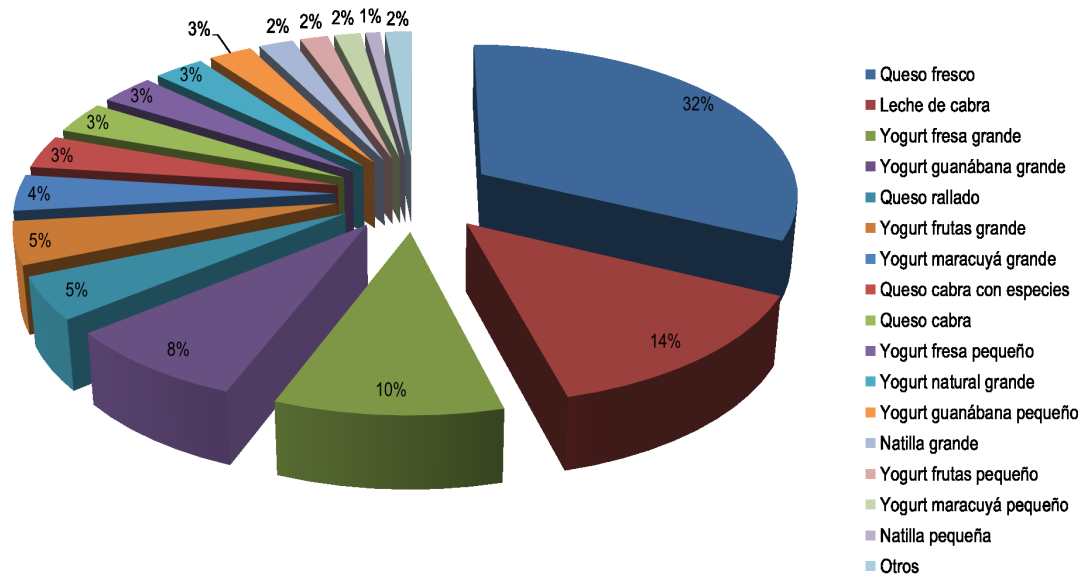


Figura 3.7: Venta total por producto

Conviene mencionar que debe llegarse a un equilibrio entre un método de pronóstico sofisticado y uno simple, que se entienda con facilidad y obtenga el apoyo de quienes toman las decisiones en la empresa (Hanke *et al.*, 2006). Por otra parte, como ya se mencionó en el capítulo 2, para determinar el modelo correcto, lo primero que se debe realizar es determinar el patrón que existe en los datos y por lo tanto, se debe encontrar el modelo que capture mejor el patrón en el conjunto de datos disponibles (Jain, 2017). Una de las formas para poder observar el patrón de los datos es cuando se presenta la información de forma gráfica, razón por la que se muestra la Figura 3.8.

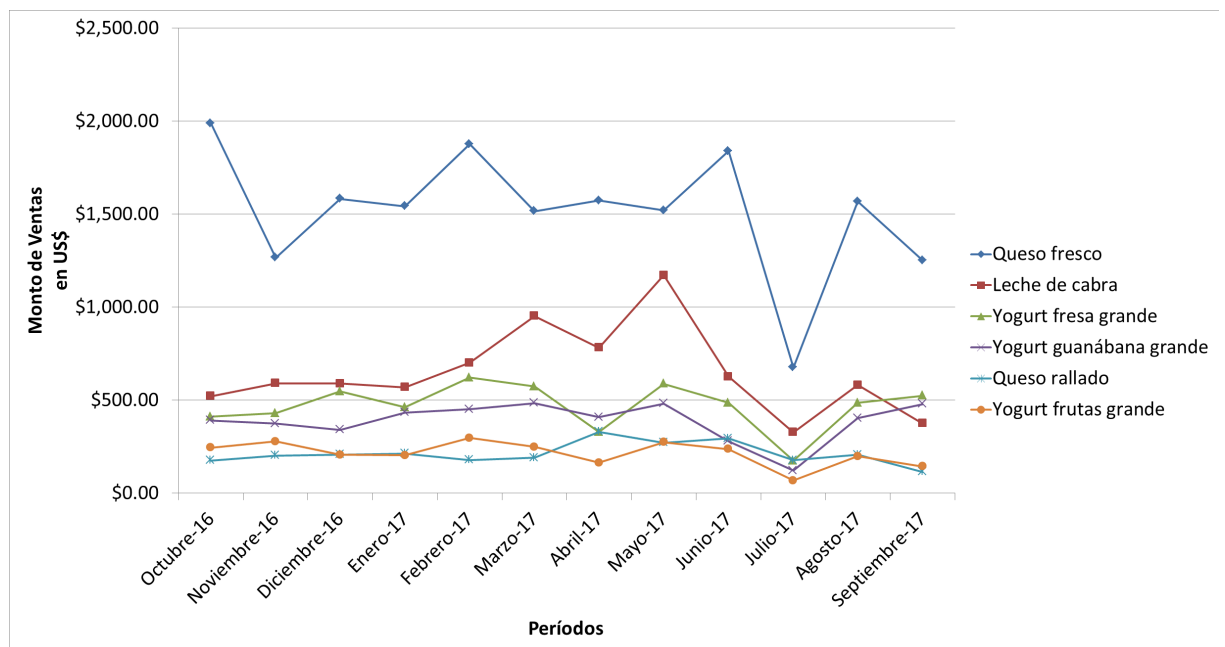


Figura 3.8: Ventas mensuales de los principales productos

Con base en la información que muestra el gráfico anterior no es posible identificar un comportamiento cíclico, debido a que los ciclos son fluctuaciones de largo plazo (más de un año) y en esta serie de tiempo, únicamente se dispone de doce observaciones. Por otra parte, no se puede determinar una estacionalidad (influencia de un factor temporal) en los datos, entendida esta como las fluctuaciones trimestrales, mensuales o semanales en los datos y que se repiten con cierta periodicidad (Hanke *et al.*, 2006).

La tendencia es un comportamiento de crecimiento o decrecimiento en una serie de tiempo, se dice que una serie de tiempo tiene tendencia si su valor promedio cambia a lo largo del tiempo, entonces se espera que aumente o disminuya durante el período para el que se desea hacer el pronóstico y en los datos en cuestión realmente no hay una tendencia o es casi nula. Finalmente, se podría afirmar, con base en la observación, que los datos tienen un comportamiento estacionario, ya que su valor medio no cambia a lo largo de tiempo (Hanke *et al.*, 2006).

Ahora bien, para poder afirmar que los datos tienen un patrón estacionario u horizontal, se hará uso del coeficiente de autocorrelación, la cual se entiende como «la correlación que existe entre una variable retrasada uno o más períodos consigo misma», lo que se encuentra definido mediante la Ecuación (3.11) (Hanke *et al.*, 2006).

$$r_k = \frac{\sum_{t=k+1}^n (Y_t - \bar{Y})(Y_{t-k} - \bar{Y})}{\sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y})^2} \quad (3.11)$$

donde

r_k = coeficiente de autocorrelación para un retraso de k períodos

\bar{Y} = media de los valores de la serie

Y_t = observación en el período t

Y_{t-k} = observación de k períodos anteriores o durante un período $t - k$.

Entonces, con $k=1$ se decide retrasar la serie un período, con $k=2$ se decide retrasar la serie dos períodos y así de forma consecutiva. Entre más cercano sea r de 0, se confirma que la serie presenta un comportamiento estacionario. Cuando existe tendencia, los coeficientes de correlación son bastante diferentes de 0 para los primeros retrasos de tiempo y de forma gradual caen hacia 0, conforme aumenta el número de retrasos (Hanke *et al.*, 2006).

3.2.2 SERIES DE TIEMPO

De conformidad con la información presentada en el capítulo 2 y con el análisis previamente realizado, los métodos de series de tiempo que mejor se acoplan al comportamiento de los datos de la Pyme objeto de estudio son: el promedio simple, promedio móvil y modelos autorregresivos de promedio móvil y modelos Box-Jenkins. Cabe mencionar que los datos también fueron modelados en el Software de SPSS (paquete estadístico para ciencias sociales) y el programa sugirió aplicar métodos de pronóstico ARIMA para los seis productos principales. No obstante, siguiendo las recomendaciones de Eppen *et al.* (2000), Hanke *et al.* (2006) y Jain (2017), se hará uso del promedio móvil, promedio ponderado y suavización exponencial, principalmente por tres razones:

1. La empresa objeto de estudio es una Pyme y no cuenta con posibilidades económicas para hacer frente a los costos de licencia que tiene un modelador como SPSS
2. Ante la situación anterior, se podría plantear el acceso a un software libre como *R*, el inconveniente en este caso es que la Pyme no tiene personal calificado para que haga uso de dicha herramienta
3. Los autores coinciden en que se debe facilitar un método de pronóstico que sea sencillo de manipular y comprender para los encargados de la toma de decisiones, lo cual sería posible si se utiliza cualquiera de los métodos mencionados.

3.2.2.1 PROMEDIO MÓVIL SIMPLE

Cuando se tiene este tipo de promedios, lo que se pretende es asignar un mayor peso para las observaciones recientes y conforme se tienen nuevas observaciones, se calcula una nueva media al sumar el valor más reciente y eliminar el más antiguo. El promedio móvil simple tiene la forma de la Ecuación (3.12) (Hanke *et al.*, 2006).

$$\hat{Y}_{t+1} = \frac{(Y_t + Y_{t-1} + \dots + Y_{t-k+1})}{k} \quad (3.12)$$

donde

\hat{Y}_{t+1} = valor pronosticado para el siguiente período

Y_t = valor real en el período t

k = número de términos en el promedio móvil.

3.2.2.2 PROMEDIO MÓVIL PONDERADO DE n -PERÍODOS

Para este método, los datos recientes son más importantes que los datos más antiguos y en razón de ello otorga un coeficiente de ponderación a cada período, el cual se conoce como α y son números no negativos, escogidos de forma que los coeficientes más pequeños sean asignados a los datos más antiguos y que todos los coeficientes sumen 1 (Eppen *et al.*, 2000). Este promedio tiene la forma de Ecuación (3.13).

$$\hat{Y}_7 = \alpha_0 Y_6 + \alpha_1 Y_5 + \alpha_2 Y_4 \quad (3.13)$$

3.2.2.3 SUAVIZAMIENTO EXPONENCIAL SIMPLE

Este método proporciona un promedio móvil con un peso exponencial de todos los valores observados con anterioridad, de igual forma, indica Hanke *et al.* (2006) que es apropiado para los datos que no tienen una tendencia predecible hacia arriba o hacia abajo. Este método se basa en promediar los valores pasados de una serie en una forma exponencialmente decreciente. La representación de la Ecuación (3.14) del método de suavizado exponencial está dada de la siguiente forma.

$$\hat{Y}_{t+1} = \alpha Y_t + (1 - \alpha)\hat{Y}_t \quad (3.14)$$

donde

\hat{Y}_{t+1} = nuevo valor suavizado o el valor del pronóstico para el siguiente período

α = constante de suavizamiento ($0 < \alpha < 1$)

Y_t = nueva observación o valor real de una serie en el período t

\hat{Y}_t = antiguo valor suavizado o pronóstico para el período t .

3.2.3 MEDIDAS DE DESEMPEÑO DE LOS PRONÓSTICOS

En este apartado se hará una breve explicación sobre las diferentes medidas de desempeño que se utilizan para evaluar el rendimiento de un determinado método y se mostrarán las fórmulas para poder hacer el cálculo (Hanke *et al.*, 2006). Valga destacar que existe una gran cantidad de métricas, no obstante, acá se discutirán solo algunas de ellas y que son más ampliamente mencionadas en la literatura de pronósticos. En primer lugar, conviene mencionar el error de pronóstico o residual, que básicamente es la diferencia entre el valor real del período t menos el valor del pronóstico del período t y su Ecuación (3.15) está dada por:

$$e_t = Y_t - \bar{Y}_t \quad (3.15)$$

donde

e_t = error de pronóstico en el período t

Y_t = valor real en el período t

\hat{Y}_t = valor de pronóstico para el período t .

La desviación absoluta media (MAD, por sus siglas en inglés) es otro método para evaluar las técnicas de pronóstico y lo que hace es promediar las magnitudes de los errores de pronóstico (valores absolutos de cada error), es útil cuando se quiere

medir el error en las mismas unidades que la serie original (Hanke *et al.*, 2006). Acá y en las métricas siguientes n corresponde al número de observaciones. Su Ecuación (3.16) se representa de la siguiente forma:

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |Y_t - \hat{Y}_t| \quad (3.16)$$

Otro indicador de desempeño es el error cuadrático medio (MSE, por sus siglas en inglés) y se obtiene al elevar al cuadrado cada residual, luego se suman y se dividen entre el número de observaciones. Este tipo de error lo que hace es penalizar los errores grandes de pronóstico, debido a que los errores se elevan al cuadrado (Hanke *et al.*, 2006). La Ecuación (3.17) se encuentra dada por:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{Y}_t)^2 \quad (3.17)$$

Otra métrica de rendimiento es el error porcentual medio (MPE, por sus siglas en inglés), que se puede definir como la media de los errores porcentuales (Jain, 2017). Si el resultado es un alto valor negativo, entonces se puede afirmar que el método sobreestima de forma consistente y si por el contrario, el resultado en un alto valor positivo, el método subestima consistentemente (Hanke *et al.*, 2006). La Ecuación (3.18) se representa como:

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{(Y_t - \hat{Y}_t)}{Y_t} \quad (3.18)$$

Finalmente, el error en el que se concentra la mayor atención a los efectos de este análisis, se llama error porcentual absoluto medio (MAPE, por sus siglas en inglés), y proporciona una indicación de cuán grandes son los errores de pronóstico en comparación con los valores reales de la serie de datos. Además, se puede utilizar

para comparar la precisión de dos técnicas completamente diferentes (Hanke *et al.*, 2006). Su formulación (3.19) se encuentra dada por:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|Y_t - \hat{Y}_t|}{Y_t} \quad (3.19)$$

Es importante mencionar que el objetivo del pronóstico no es eliminar el error, es minimizarlo; lo cual depende del costo de hacerlo. Situación que arroja una pregunta, ¿cuánto error se puede tolerar? y eso depende de la capacidad de reacción que se tenga ante el error, pues entre más rápido se pueda reaccionar, mayor tolerancia al error se puede tener. Finalmente, también depende del costo del error, porque un costo alto, implicará un error más pequeño para tolerar y viceversa (Jain, 2017).

3.3 CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

Como se ha mostrado a lo largo del presente capítulo, se hará uso de dos diferentes técnicas para aprobar o rechazar la hipótesis de la investigación, lo cual quedará demostrado mediante el análisis de resultados que se mostrará en el siguiente capítulo. Primero, se mostrarán los datos que arroja el modelo matemático y la respectiva comparación con la heurística, y seguido, se hará la evaluación del método de pronóstico a través de diferentes indicadores de desempeño.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

De conformidad con lo desarrollado en el capítulo anterior, en este apartado se mostrarán los resultados obtenidos aplicando la metodología propuesta, tanto para el tema de distribución, como para la planeación de la producción mediante pronósticos. Cabe mencionar que el capítulo se dividirá en dos secciones, una para cada uno de los temas previamente mencionados.

4.1 DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTOS

En esta sección se abordarán y analizarán los resultados que se obtienen mediante el modelo matemático desarrollado para obtener las rutas óptimas, para hacer la entrega de producto a cada uno de los clientes de la Pyme objeto de estudio, asimismo, las soluciones óptimas serán comparadas con las soluciones heurísticas obtenidas con la herramienta propuesta por Erdoğan (2017) y modificada por medio de la presente investigación. Los datos indicados se comparan con las rutas que actualmente tiene diseñadas la empresa, con el objeto de determinar diferencias y beneficios que permitan demostrar el mejoramiento de la eficiencia de cadena de suministro de la empresa.

4.1.1 DETERMINACIÓN DE RUTAS

En primera instancia, conviene recordar que la empresa tiene un total de 64 clientes, los cuales se encuentran agrupados por regiones geográficas. La visita a los clientes es de forma intermitente, dado que la mayor cantidad deben ser visitados solo una vez por mes (53%), otros requieren una visita tres veces al mes (16%), unos se visitan una vez cada 15 días (28%) y finalmente, únicamente dos clientes son a los que se les hace entrega de producto de forma semanal.

Por otra parte, el orden de visita a cada cliente no permanece en el tiempo, es decir, la secuencia de visita a un grupo de clientes puede variar cada vez que se deba visitar a ese determinado grupo de clientes. En razón de lo anterior, la empresa lo que facilitó fue el rol de visita que se hizo en un mes y con ello se procedió a ubicar la localización geográfica de todos los clientes y así poder obtener los tiempos y las distancias de los recorridos para cada uno de los trayectos. Cada instancia se encuentra conformada por un máximo de 14 nodos y un mínimo de cinco, lo cual genera un total de 11 configuraciones (instancias) de visita.

Con las distancias y los tiempos de traslado obtenidos en la etapa anterior, se procedió a implementar el modelo matemático en GAMS y obtener las soluciones óptimas para cada una de las 11 instancias, usando el B&B de CPLEX. En primer lugar, se resolvió el modelo minimizando el tiempo total de recorrido y en segundo lugar, se minimizó la distancia total para cada una de las rutas. Las soluciones para instancias que cuentan con cinco o seis clientes fueron obtenidas mediante una computadora portátil, con una CPU Intel Pentium Dual-Core que funciona a 1.87 GHz con 2 GB de RAM; para aquellos casos donde las instancias tienen 11 o más clientes, se utilizó el servidor de NEOS¹.

Finalmente, la herramienta implementada por Erdoğan (2017) fue modificada

¹Para más detalle puede visitar la página web: <https://neos-server.org/neos/solvers/milp:CPLEX/GAMS.html>

para que permita seleccionar libremente si se desea minimizar la distancia o el tiempo. En este sentido, es indispensable indicar que la herramienta permite incorporar costos fijos de viaje, costo por unidad de distancia y ganancia asociada a cada nodo, sin embargo, para los efectos prácticos de la investigación y dado que la Pyme no cuenta con el registro, ni contempla costos y beneficios para su distribución, entonces no se hace uso de dicha información.

Los resultados de cada elemento contemplado en los párrafos precedentes son mostrados en la Tabla 4.1, donde se puede observar una comparación entre el valor objetivo reportado por el método exacto, con el heurístico y con la información aportada por la empresa. Además, en la Tabla 4.3 se hace la misma comparación, pero acá lo que se compara son las distancias de realizar cada recorrido.

		Tiempos de traslado en minutos			
Nombre de la instancia	Cantidad de clientes	Óptimo (O)	Heurístico (H)	Empresa (E)	Mejora (E/O)
VRPTWS1J-S3J	14	215	215	229	6.11 %
VRPTWS2J-S4J	13	230	230	242	4.96 %
VRPTWS1V	5	309	309	316	2.22 %
VRPTWS2V	5	327	327	331	1.21 %
VRPTWS3V	6	308	308	311	0.96 %
VRPTWS4V	5	315	315	317	0.63 %
VRPTWS2K	11	562	562	568	1.06 %
VRPTWS1M	11	322	322	333	3.30 %
VRPTWS2M	6	287	287	290	1.03 %
VRPTWS3M	11	323	324	344	6.10 %
VRPTWS4M	5	360	362	417	13.67 %

Tabla 4.1: Comparación entre los valores de la función objetivo (tiempos totales de recorrido)

Como se puede apreciar en la Tabla 4.1, se muestran los 11 recorridos que tiene la empresa para hacer la distribución de productos y en la tercera, cuarta y quinta columna se presenta el tiempo que tarda el vehículo desde que sale de la planta de producción, visita a los respectivos clientes y regresa a su punto de salida. En la última columna se presenta la diferencia porcentual entre el tiempo que tarda el vehículo en hacer el recorrido con una ruta óptima y el tiempo que tardó la empresa en hacer ese mismo recorrido, pero basados únicamente en la experiencia del encargado de logística, sin hacer uso de ninguna herramienta o metodología científica.

Entonces, se puede afirmar que el mejor caso lo representa la instancia VRPTWS4M, dado que hay una diferencia de 57 minutos, lo que representa en términos relativos un total de 13.67%. La instancia VRPTWS4V tiene la reducción más pobre del caso de estudio, porque tiene una disminución del 0.63%, es decir, la ruta se podría realizar con una reducción de dos minutos. El promedio de tiempo que se reduciría al implementar las rutas óptimas corresponde a 3.75%.

En términos generales se puede establecer que hay una reducción anual de los tiempos en 3.98%, lo cual equivale aproximadamente a 33 horas menos de manejo. Se debe indicar que las instancias VRPTWS1J-S3J y VRPTWS2J-S4J se realizan dos veces por mes, es decir, cada 15 días se efectúa la visita a todos los clientes agrupados en dichas instancias. Por otra parte, si se analizan las distancias recorridas al buscar una minimización del tiempo en la función objetivo, se tiene que se puede lograr una reducción anual de 1331 kilómetros, en paralelo con la reducción de las horas de manejo.

Adicionalmente, si se comparan los resultados obtenidos con la herramienta implementada en Microsoft Excel y los datos que arroja CPLEX, se puede apreciar que un 82% de las instancias coinciden con el valor óptimo y únicamente, un 18% de los casos es donde los valores difieren, pero las diferencias son entre uno y dos minutos como máximo. Haciendo uso de la Ecuación (4.1) se logra determinar que la

brecha máxima es de 0.56 %, la mínima de 0.31 % y el promedio de brecha es 0.43 %.

$$GAP = \frac{\text{Óptimo} - \text{Heurístico}}{\text{Óptimo}} \times 100 \quad (4.1)$$

Para mayor detalle se procederá a realizar un análisis minucioso de la instancia que presentó mayor mejora con la ruta óptima, la cual corresponde a VRPTWS4M. De primera entrada se muestra la Tabla 4.2, en la que se puede observar una comparación entre la ruta óptima y la ruta usada por la empresa.

	Empresa	Óptimo
Secuencia	0-5-2-3-4-1-0	0-1-2-3-4-5-0
Tiempo	417 min	360 min
Distancia	322.81 Km	258.23 Km
Diferencia	64.58 Km y 57 min	

Tabla 4.2: Resultados de instancia VRPTWS4M

Es notorio que la ruta óptima genera mejoras tanto en tiempo como en la distancia recorrida, siendo que reduce 13.67 % el tiempo para hacer la ruta, y a la vez, disminuye 20.01 % la distancia total, con lo cual se puede demostrar fehacientemente la eficiencia de aplicar herramientas cuantitativas para mejorar el proceso de distribución de mercancías. En segundo lugar, se ilustran las rutas mediante la Figura 4.1, en donde se observa que la variación de la ruta es mínima, dado que la empresa inicia el recorrido donde finaliza la ruta óptima y lo concluye donde la ruta óptima indica que debe iniciar, no obstante, esta pequeña variación provoca que la empresa realice un recorrido ineficiente. La ruta que sigue la empresa está representada por las líneas punteadas de color rojo y la ruta óptima son las líneas de color verde.

A continuación se presenta la Tabla 4.3, en la que se hace una comparación de las distancias en kilómetros, que se requiere para visitar a todos los nodos de cada instancia, para ello se hizo uso de un modelo matemático que busca la minimización de la distancia total del recorrido, junto con los datos explicados en párrafos

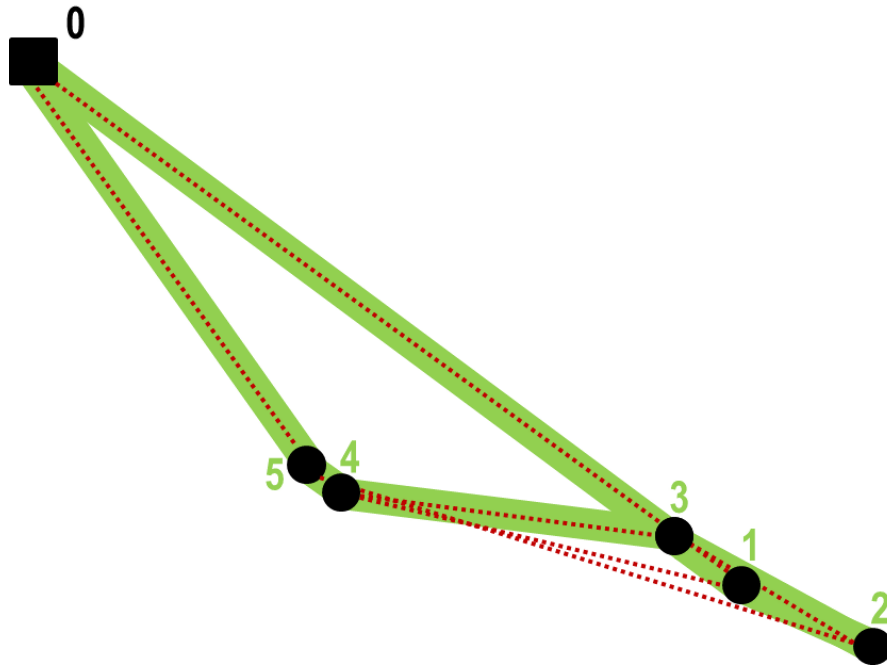


Figura 4.1: Ruta de la instancia VRPTWS4M

precedentes.

De la tabla 4.3, se puede extraer que el mejor caso está representado nuevamente por la instancia VRPTWS4M, siendo que tiene una reducción del 22.10 %, al comparar la distancia de la ruta óptima con la distancia que sigue la empresa. Asimismo, la instancia VRPTWS2K es la que tiene la menor mejora, porque únicamente presenta una reducción del 0.80 %. En caso de que se decidiera implementar las rutas óptimas por distancia, se podrían obtener mejoras en un 4.12 % en promedio.

En términos generales, la implementación de las rutas óptimas puede traer mejoras de un 4.48 %, lo que corresponde a una disminución de 1486 kilómetros de forma anual para todos los recorridos. Paralelamente, se podrían reducir los tiempos de manejo en aproximadamente 26 horas.

También se compararon los resultados obtenidos con la herramienta implementada en Microsoft Excel y las soluciones óptimas, con lo que se puede apreciar que un 91 % de las instancias coinciden con el valor óptimo y únicamente, un 9 % de los

Nombre de la instancia	Cantidad de clientes	Distancia recorrida en Km			
		Óptimo (O)	Heurístico (H)	Empresa (E)	Mejora (E/O)
VRPTWS1J-S3J	14	102.21	102.21	107.17	4.63 %
VRPTWS2J-S4J	13	118.92	118.92	122.07	2.58 %
VRPTWS1V	5	203.75	203.75	208.58	2.32 %
VRPTWS2V	5	220.28	220.28	224.60	1.92 %
VRPTWS3V	6	206.39	206.39	208.18	0.86 %
VRPTWS4V	5	209.92	209.92	214.01	1.91 %
VRPTWS2K	11	494.43	494.43	496.86	0.49 %
VRPTWS1M	11	211.74	211.74	215.10	1.56 %
VRPTWS2M	6	187.61	187.61	189.11	0.80 %
VRPTWS3M	11	211.36	211.36	225.36	6.21 %
VRPTWS4M	5	251.46	257.15	322.81	22.10 %

Tabla 4.3: Comparación entre los valores de la función objetivo (distancias totales de recorrido)

casos es donde el valor difiere y la diferencia es de 5.69 kilómetros. Con la Ecuación (4.1) se logra determinar que la brecha es de 2.26 %, dado que únicamente una instancia es donde hay diferencia entre el valor óptimo y el heurístico.

Seguidamente, a modo de ejemplo, se presenta el análisis de la segunda instancia donde se obtuvo mejor desempeño. En primer lugar se detalla una comparación de los datos, mediante la Tabla 4.4 y posteriormente, se muestra la Figura 4.2 de la ruta en cuestión.

Como se puede observar, la instancia en cuestión presenta una reducción tanto en las distancias, como en los tiempos de traslado de la ruta, los cuales disminuyen 6.21 % y 3.78 %, respectivamente. Por otro lado, mediante Figura 4.2 se visualiza el recorrido de la ruta óptima, que corresponde a las líneas de color verde y el recorrido

	Empresa	Óptimo
Secuencia	0-11-10-1-3-7-6-5-4-8-2-9-0	0-1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-0
Tiempo	344 min	331 min
Distancia	225.36 Km	211.36 Km
Diferencia	14 Km y 13 min	

Tabla 4.4: Resultados de instancia S3M

que hace la empresa, marcado con una línea punteada de color rojo. A diferencia del caso anterior, acá si se aprecia que las rutas difieren enormemente.

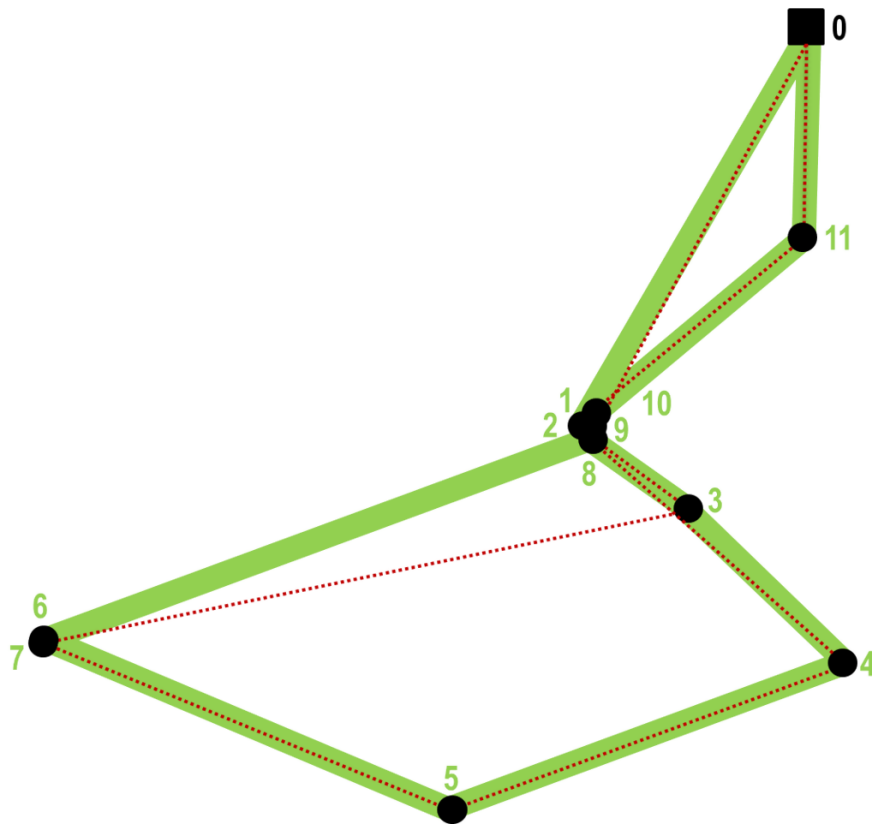


Figura 4.2: Ruta de la instancia VRPTWS3M

Finalmente, como se ha podido evidenciar en esta sección, sea cual sea la decisión que la empresa quiera adoptar, con cualquiera de las dos opciones se podrá obtener mejoras en la cadena de suministro. En caso de adoptar las rutas óptimas

por tiempo, de conformidad con el salario mínimo² que debería percibir un chofer de vehículo de carga, el costo por hora es de US\$2.48 (al tipo de cambio vigente al 04 de julio de 2019), con lo cual los ahorros, tratándose de una jornada ordinaria, obedecen a un monto aproximado de US\$82 anuales, sin contemplar cargas sociales, viáticos y otros costos asociados. El monto mencionado podría aumentar a US\$123 si se tratara de una jornada extraordinaria. Aunado a este monto, se debe contemplar que una reducción de 1330 kilómetros anuales, solo en temas de combustible, sin contemplar depreciación de vehículo, mantenimiento y demás cargos vinculados, podría permitir ahorros de hasta US\$210³. Entonces, un simple análisis como este demuestra que los ahorros podrían ascender cuando mínimo a US\$300 anuales.

4.2 PLANEACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

En esta sección se desarrollará un análisis de la información de ventas facilitada por la empresa, que abarca de septiembre 2016 a octubre 2017 y con esto se propone el método de pronóstico tradicional que mejor se ajuste para realizar la planeación de la producción de la empresa.

4.2.1 RECOLECCIÓN DE DATOS

Conforme el análisis realizado en la metodología de esta investigación, se logró determinar que seis productos son los que conforman el 74% de las ventas, razón por la cual se procederá a efectuar la evaluación de los mismos y determinar los métodos de pronóstico apropiados. Además, según lo establecido por Jain (2017) cuando se desea realizar un pronóstico, no es conveniente analizar todo el universo

²Fuente: <http://www.mtss.go.cr/temas-laborales/salarios/lista-salarios.html>

³Este dato fue obtenido a través de los datos proporcionados por la empresa, en cuanto a rendimiento vehicular y los costos actuales del diésel.

de productos, dado que esto genera desgaste en productos que inclusive no tienen una importancia significativa para las utilidades de la empresa.

En razón de lo descrito en el párrafo anterior, se presenta mediante Tabla 4.5 las ventas que realizó la empresa durante el período de estudio, específicamente de los seis principales productos; esto porque a partir de ellos es que se procederá a realizar todo el análisis siguiente.

Período	Queso fresco	Leche	Yogurt fresa	Yogurt guanábana	Queso rallado	Yogurt frutas
Octubre-16	\$1,988.75	\$521.42	\$411.03	\$391.32	\$175.95	\$244.93
Noviembre-16	\$1,267.04	\$591.21	\$430.74	\$374.43	\$202.88	\$278.71
Diciembre-16	\$1,583.26	\$589.80	\$546.95	\$341.26	\$208.68	\$206.48
Enero-17	\$1,542.93	\$570.27	\$462.50	\$434.17	\$213.78	\$203.58
Febrero-17	\$1,876.97	\$701.00	\$621.91	\$451.85	\$178.00	\$297.19
Marzo-17	\$1,516.24	\$952.53	\$573.35	\$485.02	\$191.17	\$249.24
Abril-17	\$1,573.00	\$781.94	\$329.39	\$408.74	\$330.97	\$163.55
Mayo-17	\$1,520.95	\$1,172.38	\$588.39	\$482.20	\$272.46	\$274.75
Junio-17	\$1,838.84	\$626.84	\$485.28	\$279.50	\$294.20	\$237.54
Julio-17	\$676.61	\$328.07	\$175.07	\$121.23	\$177.19	\$68.18
Agosto-17	\$1,567.77	\$581.70	\$485.63	\$403.55	\$207.27	\$198.39
Septiembre-17	\$1,251.29	\$376.10	\$524.52	\$479.56	\$115.34	\$144.55
Total general	\$18,203.66	\$7,793.25	\$5,634.75	\$4,652.84	\$2,568.31	\$2,567.08

Tabla 4.5: Ventas mensuales de los principales productos

Conviene señalar que los datos son expresados en dólares estadounidenses en aras de facilitar la comprensión de los datos y equivalencia correspondiente; no obstante, la moneda en curso legal de Costa Rica es el colón. Por otro lado, según información aportada por la empresa, a pesar de que el producto estrella o de mayor venta es que queso fresco, los productos que tienen una mayor utilidad son los yogurt.

4.2.2 IDENTIFICACIÓN DEL PATRÓN DE LOS DATOS

Una vez que se tienen los datos, estos deben ser evaluados para determinar el patrón que siguen, lo cual se realiza mediante el coeficiente de autocorrelación, como ya se detalló en la metodología. A continuación se presenta un ejemplo de cómo se debe proceder para hacer este análisis, para esto se utilizarán específicamente los datos de venta de la leche (ver Tabla 4.6).

Período	Datos originales Y_t	Y retrasada un período Y_{t-1}	Y retrasada dos períodos Y_{t-2}
Octubre-16	\$521.42		
Noviembre-16	\$591.21	\$521.42	
Diciembre-16	\$589.80	\$591.21	\$521.42
Enero-17	\$570.27	\$589.80	\$591.21
Febrero-17	\$701.00	\$570.27	\$589.80
Marzo-17	\$952.53	\$701.00	\$570.27
Abril-17	\$781.94	\$952.53	\$701.00
Mayo-17	\$1,172.38	\$781.94	\$952.53
Junio-17	\$626.84	\$1,172.38	\$781.94
Julio-17	\$328.07	\$626.84	\$1,172.38
Agosto-17	\$581.70	\$328.07	\$626.84
Septiembre-17	\$376.10	\$581.70	\$328.07

Tabla 4.6: Ventas de leche durante el período 2016-2017

El cálculo del coeficiente de autocorrelación se hace mediante la Ecuación (3.11), para ello también se utilizará la Tabla 4.7, dado que de esta forma se podría configurar en Excel todos los cálculos para obtener el resultado de una forma bastante sencilla.

Período	Y_t	Y_{t-1}	$(Y_t - \bar{Y})$	$(Y_{t-1} - \bar{Y})$	$(Y_t - \bar{Y})^2$	$(Y_t - \bar{Y})(Y_{t-1} - \bar{Y})$
Octubre-16	521.42		-128.02		16389.19	
Noviembre-16	591.21	521.42	-58.23	-128.02	3390.92	7454.82
Diciembre-16	589.80	591.21	-59.64	-58.23	3556.83	3472.88
Enero-17	570.27	589.80	-79.17	-59.64	6267.91	4721.64
Febrero-17	701.00	570.27	51.56	-79.17	2658.82	-4082.31
Marzo-17	952.53	701.00	303.09	51.56	91863.67	15628.48
Abril-17	781.94	952.53	132.50	303.09	17556.96	40160.26
Mayo-17	1172.38	781.94	522.94	132.50	273471.32	69291.60
Junio-17	626.84	1172.38	-22.60	522.94	510.80	-11819.01
Julio-17	328.07	626.84	-321.37	-22.60	103279.29	7263.26
Agosto-17	581.70	328.07	-67.73	-321.37	4587.77	21767.45
Septiembre-17	376.10	581.70	-273.34	-67.73	74712.28	18513.86
Total	7793.25		0.00		598245.75	172372.94

Tabla 4.7: Cálculo del coeficiente de autocorrelación para retraso de un período

Con los datos de la Tabla 4.7 se puede obtener:

$$\bar{Y} = \frac{7793.25}{12} = 649.44$$

$$r_1 = \frac{172372.94}{598245.75} = 0.29$$

La Tabla 4.7 simplemente muestra el ejemplo de cómo obtener un coeficiente de autocorrelación para un período, pero a efectos de analizar el patrón de los datos se requiere observar el comportamiento de los retrasos de dos y tres períodos para todos los demás productos que se están analizando, para ello se genera la Tabla 4.8, la cual contiene un resumen de los coeficientes de autocorrelación, mismos que fueron obtenidos mediante Microsoft Excel y para comprobar la exactitud de los mismos, se hizo uso del software de Minitab 19, que sirve para ejecutar funciones estadísticas básicas y avanzadas. Valga mencionar que el software cuenta con una versión de prueba de un mes, tiempo durante el cual se puede hacer uso de todas sus funciones.

Productos	r_1	r_2	r_3
Queso fresco	-0.34	0.25	-0.16
Leche	0.29	0.12	-0.12
Yogurt fresa	-0.14	-0.33	0.40
Yogurt guanábana	0.23	-0.36	-0.19
Queso rallado	0.21	0.14	-0.42
Yogurt frutas	0.00	-0.09	0.34

Tabla 4.8: Coeficientes de correlación

Según indica Hanke *et al.* (2006), una serie de datos es estacionaria cuando los coeficientes de autocorrelación caen hacia abajo bastante rápido, después del segundo o tercer retraso, tal como se muestra en la Tabla 4.8 para todos los productos objetos del estudio; los coeficientes se van a ubicar entre -1 y +1. Por otra parte, se puede identificar el patrón de datos mediante un correlograma, que es una gráfica de las autocorrelaciones para varios retrasos de una serie de tiempo y esta se puede obtener mediante el software de Minitab, tal y como se muestra en la Figura 4.3.

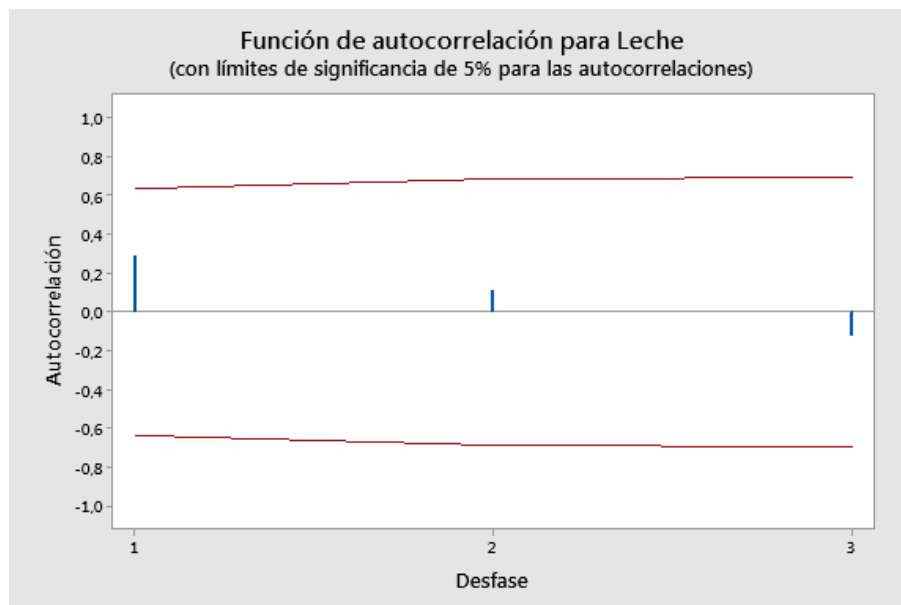


Figura 4.3: Correlograma para la leche

Según se puede apreciar en la Figura 4.3, los coeficientes de autocorrelación no son significativamente diferente de cero, dado que se ubican entre las líneas de significancia, tanto inferior, como superior. Ahora bien, con esto se ha podido determinar que efectivamente los datos tienen un patrón estacionario y lo que corresponde es seleccionar un método de pronóstico adecuado para este tipo de serie de datos y de conformidad con lo establecido en Hanke *et al.* (2006) se recomiendan los métodos informales, promedio simple, promedio móvil, modelos autorregresivos de promedio móvil y modelos Box-Jenkins.

4.2.3 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE PRONÓSTICO

Para el caso en estudio se hace el análisis del promedio móvil, promedio móvil ponderado de n -períodos y la suavización exponencial simple y para evaluar su precisión se comparan los valores reales contra los valores pronosticados, lo cual se conoce con el nombre de indicadores de desempeño y la literatura señala varias medidas: MAD, MSE y MAPE (Heizer *et al.*, 2009), para los efectos de este análisis se hará uso del MAPE, siendo que es una medida fácil de interpretar y se ajusta entonces a las necesidades de la Pyme. Todos los métodos fueron configurados en Microsoft Excel y para los métodos de promedios móviles y suavización exponencial simple se utilizó el software de Minitab para corroborar los valores, tanto de pronóstico, como de las medidas de desempeño.

4.2.3.1 PROMEDIO MÓVIL

El primer método de pronóstico analizado corresponde al de promedios móviles y se efectuó para todos los productos, no obstante, a efectos prácticos, únicamente se muestra el cálculo para uno de los productos, el queso. Para todos los demás productos se presentará la Tabla 4.12 con el valor correspondiente al MAPE. Los resultados del promedio móvil de tres períodos para el queso, se presentan en la

Tabla 4.9.

En este caso lo que se debe hacer es definir la cantidad de períodos que se tomarán para hacer el promedio, generalmente, a mayor cantidad de períodos, el pronóstico es más inexacto y mayor el error. En este análisis se tomaron tres periodos para hacer el pronóstico del siguiente período. Por otra parte, para efectos de calcular el MAPE, con la Tabla 4.9, lo que se debe hacer es dividir el total de la columna $|e_t|/Y_t$ entre la cantidad de observaciones y eso se transforma en un porcentaje.

Período	Ventas reales Y_t	Pronóstico \hat{Y}_t	Error e_t	$ e_t $	e_t^2	$ e_t /Y_t$	e_t/Y_t
Octubre-16	1988.75						
Noviembre-16	1267.04						
Diciembre-16	1583.26						
Enero-17	1542.93	1613.02	-70.08	70.08	4911.89	0.05	-0.05
Febrero-17	1876.97	1464.41	412.55	412.55	170201.07	0.22	0.22
Marzo-17	1516.24	1667.72	-151.49	151.49	22947.81	0.10	-0.10
Abril-17	1573.00	1645.38	-72.38	72.38	5238.34	0.05	-0.05
Mayo-17	1520.95	1655.40	-134.45	134.45	18075.87	0.09	-0.09
Junio-17	1838.84	1536.73	302.11	302.11	91272.39	0.16	0.16
Julio-17	676.61	1644.27	-967.65	967.65	936351.55	1.43	-1.43
Agosto-17	1567.77	1345.47	222.30	222.30	49417.69	0.14	0.14
Septiembre-17	1251.29	1361.08	-109.79	109.79	12053.68	0.09	-0.09
Total	18203.66		-568.87	2442.80	1310470.29	2.324	-1.272

Tabla 4.9: Promedio móvil para el queso

4.2.3.2 PROMEDIO MÓVIL PONDERADO DE n -PERÍODOS

Este método es bastante similar al pronóstico anterior, la diferencia radica en que acá se asigna una mayor ponderación al último período, lo cual se conoce como α , para conocer los valores de alfa se puede hacer uso del Solver de Excel y que haga el cálculo de los valores óptimos, es decir, aquellos que minimizan el MAD.

Los valores óptimos de α para el pronóstico del queso fueron: $\alpha_0 = 0.42$, α_1

$= 0.42$ y $\alpha_2 = 0.15$; es importante tener en consideración que estos valores deben sumar 1, de igual forma, se podría asignar valores aleatorios, pero en este caso no se garantiza que se minimice el valor de la desviación absoluta media. Para mayor información sobre este método se puede consultar a Eppen *et al.* (2000). Los datos obtenidos mediante esta técnica son mostrados en Tabla 4.10.

Período	Ventas reales Y_t	Pronóstico \hat{Y}_t	Error e_t	$ e_t $	e_t^2	$ e_t /Y_t$	e_t/Y_t
Octubre-16	1988.75						
Noviembre-16	1267.04						
Diciembre-16	1583.26						
Enero-17	1542.93	1526.68	16.25	16.25	264.19	0.01	0.01
Febrero-17	1876.97	1509.77	367.20	367.20	134836.26	0.20	0.20
Marzo-17	1516.24	1687.13	-170.89	170.89	29204.27	0.11	-0.11
Abril-17	1573.00	1668.92	-95.92	95.92	9200.06	0.06	-0.06
Mayo-17	1520.95	1604.49	-83.53	83.53	6977.89	0.05	-0.05
Junio-17	1838.84	1541.44	297.40	297.40	88448.96	0.16	0.16
Julio-17	676.61	1660.64	-984.03	984.03	968311.80	1.45	-1.45
Agosto-17	1,567.77	1305.15	262.62	262.62	68971.77	0.17	0.17
Septiembre-17	1,251.29	1251.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	18203.66		-390.89	2277.86	1306215.20	2.218	-1.15

Tabla 4.10: Promedio móvil ponderado para el queso

4.2.3.3 SUAVIZACIÓN EXPONENCIAL SIMPLE

En el último ejemplo, se analiza la suavización exponencial. En primer lugar, para definir el valor del pronóstico inicial existen dos posibilidades, a saber: la primera es que sea el mismo valor del primer período; y en segundo lugar, se puede hacer un promedio de las primeras seis observaciones, que es justo la acción que realiza Minitab de forma predeterminada, para los efectos de este estudio se utiliza el promedio de las primeras seis observaciones (ver Hanke *et al.* (2006)).

Otro aspecto que se debe tener en consideración con este método es la definición

del valor de α , lo cual también puede ser definido mediante el valor óptimo, obtenido mediante el Solver de Excel (Eppen *et al.*, 2000). Para el caso de estudio, el valor de α corresponde a 0.07. Los cálculos son mostrados mediante Tabla 4.11.

Período	Ventas reales Y_t	Pronóstico \hat{Y}_t	Error e_t	$ e_t $	e_t^2	$ e_t /Y_t$	e_t/Y_t
Octubre-16	1988.75	1629.20	359.55	359.55	129278.67	0.18	0.18
Noviembre-16	1267.04	1653.53	-386.49	386.49	149374.77	0.31	-0.31
Diciembre-16	1583.26	1627.38	-44.11	44.11	1945.85	0.03	-0.03
Enero-17	1542.93	1624.39	-81.46	81.46	6635.27	0.05	-0.05
Febrero-17	1876.97	1618.88	258.09	258.09	66609.47	0.14	0.14
Marzo-17	1516.24	1636.34	-120.11	120.11	14425.76	0.08	-0.08
Abril-17	1573.00	1628.21	-55.21	55.21	3048.51	0.04	-0.04
Mayo-17	1520.95	1624.48	-103.52	103.52	10717.27	0.07	-0.07
Junio-17	1838.84	1617.47	221.37	221.37	49004.90	0.12	0.12
Julio-17	676.61	1632.45	-955.84	955.84	913628.87	1.41	-1.41
Agosto-17	1,567.77	1567.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Septiembre-17	1,251.29	1567.77	-316.48	316.48	100162.40	0.25	-0.25
Total	18,203.66		-1224.22	2902.24	1444831.74	2.67	-1.79

Tabla 4.11: Suavización exponencial simple para el queso

4.2.4 MÉTRICAS DE DESEMPEÑO

Como ya se indicó previamente, mediante Tabla 4.12 se presentan los valores obtenidos del error porcentual absoluto medio y como se puede apreciar, en todos los casos, hay una disminución del error al utilizar la suavización exponencial simple, razón por la cual se recomienda utilizar dicha técnica dados los datos a los que se tuvo acceso, pudiera ser más interesante contar con mayor cantidad de datos que permitan determinar con mayor precisión si existe alguna tendencia, estacionalidad o comportamiento cíclico con los datos. No obstante, mediante este análisis se logra determinar que este método de pronóstico es el que mayormente se acopla al comportamiento de los datos.

Producto	Promedio móvil	Móvil ponderado	Suavizado exponencial
Queso	26 %	25 %	22 %
Leche	40 %	37 %	31 %
Yogurt fresa	36 %	36 %	29 %
Yogurt guanábana	47 %	39 %	32 %
Queso rallado	31 %	23 %	23 %
Yogurt frutas	41 %	41 %	36 %

Tabla 4.12: Resultados MAPE para pronósticos

4.3 CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

Como se ha podido observar a lo largo de este capítulo, se analizaron los resultados obtenidos mediante la aplicación de un ruteo de vehículos óptimo, que trae como ventaja la reducción en cuanto a tiempos y distancias totales de recorrido, lo que a su vez también implica una disminución en cuanto a los costos. Por otra parte, en cuanto al tema de planeación de producción y aplicación de pronósticos, no se tiene acceso a datos actuales y más específicos sobre las ventas y devolución de productos, lo que ayudaría a cuantificar los ahorros que pueda tener la empresa al realizar una adecuada planificación de producción y llevar al mercado únicamente lo que se requiera, en las cantidades adecuadas, así como evitar, ventas perdidas porque no haya producto de la marca en las cámaras de refrigeración de los supermercados en los que distribuye sus productos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

En este capítulo se hará mención a las conclusiones finales que se obtienen mediante la investigación, así como las contribuciones que se logran plasmar para la empresa y la cadena de suministro en general.

5.1 CONCLUSIONES FINALES

En el capítulo 4 se detallaron los resultados al aplicar la metodología propuesta en el capítulo 3 y se logró comprobar que mediante la utilización de un modelo matemático y la generación de rutas óptimas, la Pyme objeto de estudio, puede reducir alrededor de un 4% los tiempos y distancias totales por año que requiere para la entrega de productos. En caso de optar por las rutas óptimas de tiempo, se pueden disminuir aproximadamente 33 horas anuales de manejo y 1331 kilómetros; si por el contrario, lo que se decide minimizar mediante el modelo matemático son las distancias, entonces se podría dar una reducción de 1486 kilómetros y 26 horas menos de manejo.

La situación descrita en el párrafo anterior tendría como resultado una reducción en los costos totales que tiene la empresa, lo que a su vez implicaría una mayor utilidad y por tanto se tendría por demostrada la hipótesis de la investigación, por-

que se lograría hacer más eficiente el proceso de distribución de productos, al utilizar una herramienta cuantitativa.

Por otra parte, en cuanto al tema de planeación de la producción, hay una limitante de validación de los métodos de pronóstico, dado que solo después de ajustar la producción a las cantidades señaladas en los pronósticos, se podría verificar la eficiencia de los métodos empleados y así demostrar una reducción de costos. No obstante, un análisis preliminar señala que la devolución de productos por parte los clientes ronda los US\$90 mensuales, es decir, más de US\$1000 anuales, lo cual obedece a producto que no pudo ser vendido y por tanto caducó. Entonces, si se hiciera un análisis detallado de los productos que no está absorbiendo el mercado, en contraposición con las cantidades que se están produciendo, se lograría determinar las cantidades en demasía que produce la empresa; no se debe obviar el hecho de producir justo lo que requiere el mercado, en aras de disminuir costos y aumentar utilidades.

Los pronósticos permiten identificar los productos que son de mayor relevancia para la empresa y quedó demostrado que el método de suavización exponencial es el que permite generar mejores estimaciones, pues se realizó una comparación entre los diferentes métodos y este es el que posibilita una disminución del error porcentual absoluto medio (MAPE). Ahora bien, de contarse con una mayor cantidad de datos sería más sencillo poder identificar un patrón en los datos, que inclusive hiciera viable la utilización de otro método de pronóstico más preciso para la empresa.

5.2 CONTRIBUCIONES

Una de las mayores contribuciones que se logra generar con esta investigación es desarrollar un modelo matemático que permitió encontrar soluciones óptimas para realizar el proceso de distribución de mercancías de una Pyme, situación que trae consigo reducción de los costos y aumento de las utilidades de la empresa.

Un segundo aspecto importante, lo brinda la herramienta propuesta por Erdoğan (2017), la cual fue modificada de manera tal que permite al usuario poder decidir si desea minimizar el tiempo o la distancia total del recorrido, en este sentido se debe mencionar que dicho cambio es posible cuando no hay costos asociados a cada ruta, ni ganancias a cada cliente. Por otro lado, esta herramienta es sumamente útil para realizar el ruteo, porque únicamente se requiere contar con acceso a Microsoft Excel y no es necesario tener conocimientos avanzados en optimización de rutas, dado que solo se deben ingresar datos en los campos habilitados al efecto y la herramienta brindará la secuencia y duración de la ruta. Finalmente, la duración de ejecución del Solver para casos menores a 15 clientes es de 60 segundos, lo que haría factible su uso en cualquier momento, ya sea porque aumenten o disminuyan la cantidad de clientes, o bien, cuando varíe el número de vehículos, ventanas de tiempo o tiempos de servicio, por ejemplo.

La contribución práctica que se genera con la investigación es poder adaptar la herramienta desarrollada por Erdoğan (2017) a la problemática real de la empresa, lo cual le permite a la Pyme contar con una hoja de cálculo de fácil uso para realizar la planeación de rutas, según sus requerimientos. El modelo matemático brinda las soluciones óptimas, pero en la práctica lo que se facilita a la empresa es la herramienta implementada en Microsoft Excel.

En relación al análisis de ventas, se implementó un formulario en línea, que permite la automatización de la captura de las órdenes de compra, lo cual tiene grandes ventajas para la empresa, puesto que se recopila la información en tiempo real y facilita la toma de decisiones con base a los datos recopilados. Dicho formulario permite capturar datos relacionados con la fecha de la venta, clientes, productos, cantidades, descuentos, impuestos e inclusive se podría facturar a través de la misma, para lo cual se cobraría un porcentaje del monto total de la venta. Otra gran ventaja que ofrece el formulario es que la información puede ser descargada mediante Excel y se pueden usar un máximo de 500 registros por mes, siendo que la empresa tiene aproximadamente 100 ventas por mes, entonces no tendría ningún inconveniente en

utilizar la versión gratuita.

Finalmente, a través de un análisis de las ventas se logra determinar el comportamiento de los datos y con ello se define el método de pronóstico adecuado, lo que ayudará a la Pyme para realizar una planeación de la producción asertiva y conforme lo requiere el mercado, disminuyendo las mermas y aumentando la satisfacción del cliente. Sobre este aspecto conviene mencionar que la principal contribución práctica está relacionada con la posibilidad de tener a disposición un método de pronóstico de fácil comprensión y que no implica costo alguno para la Pyme, dado que el análisis se puede realizar mediante Microsoft Excel.

BIBLIOGRAFÍA

- ACOSTA-CERVANTES, M., M. VILLARREAL-MARROQUÍN y M. CABRERA-RÍOS (2013), «Estudio de validación de un método para seleccionar técnicas de pronóstico de series de tiempo mediante redes neuronales artificiales», *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, **14**(1), págs. 53 – 63.
- ÇATAY, B. (2010), «A new saving-based ant algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery», *Expert Systems with Applications*, **37**(10), págs. 6809 – 6817, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417410002265>.
- BALLOU, R. (2004), *Logística: administración de la cadena de suministro*, Pearson Educación.
- BERNAL-GARCÍA, J. J., E. HONTORIA-HERNÁNDEZ y D. ALEKSOVSKI (2013), «El problema del enrutamiento de vehículos. Propuestas para la búsqueda del camino más corto. Aplicación al entorno docente y Pymes», *Rect@*, (4), págs. 25 – 41.
- BOUSSAÏD, I., J. LEPAGNOT y P. SIARRY (2013), «A survey on optimization metaheuristics», *Information Sciences*, **237**, págs. 82 – 117.
- BOWERSOX, D., D. CLOSS y M. COOPER (2007), *Administración y logística en la cadena de suministros*, McGraw-Hill.
- BRAEKERS, K., K. RAMAEKERS y I. V. NIEUWENHUYSE (2016), «The vehicle routing problem: state of the art classification and review», *Computers & Industrial Engineering*, **99**, págs. 300 – 313.

- CANO, P., F. ORUE, J. L. MARTÍNEZ, Y. MAYETT y G. LÓPEZ (2015), «Modelo de gestión logística para pequeñas y medianas empresas en México», *Contaduría y Administración*, **60**(1), págs. 181 – 203.
- CANTU-FUNES, R., M. A. SALAZAR-AGUILAR y V. BOYER (2017), «Multi-depot periodic vehicle routing problem with due dates and time windows», *Journal of the Operational Research Society*, **69**(2), págs. 296 – 306.
- CHOI, E. y D.-W. TCHA (2007), «A column generation approach to the heterogeneous fleet vehicle routing problem», *Computers & Operations Research*, **34**(7), págs. 2080 – 2095, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054805002650>.
- CHOPRA, S. y P. MEINDL (2008), *Administración de la cadena de suministro*, Pearson (México).
- CORREA, A. y R. A. GÓMEZ (2009), «Tecnologías de la información en la cadena de suministro», *Dyna*, **76**(157), págs. 37 – 48.
- DANTZIG, G., R. FULKERSON y S. JOHNSON (1954), «Solution of a large-scale traveling-salesman problem», *Journal of the Operations Research Society of America*, **2**(4), págs. 393 – 410.
- DÍAZ, H., R. GARCÍA y N. PORCELL (2008), «Las Pymes: costos en la cadena de abastecimiento», *Revista Escuela de Administración de Negocios*, (63), págs. 5 – 22.
- DE LIMA, O., S. SANTIAGO, C. TABOADA y N. FOLLMANN (2017), «Una nueva definición de la logística interna y forma de evaluar la misma», *Ingeniare : Revista Chilena de Ingeniería*, **25**(2), págs. 264 – 276.
- DONATI, A. V., R. MONTEMANNI, N. CASAGRANDE, A. E. RIZOLI y L. M. GAMBARDELLA (2008), «Time dependent vehicle routing problem with a multi ant colony system», *European*

- Journal of Operational Research*, **185**(3), págs. 1174 – 1191, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221706006345>.
- EL-SHERBENY, N. A. (2010), «Vehicle routing with time windows: An overview of exact, heuristic and metaheuristic methods», *Journal of King Saud University - Science*, **22**(3), págs. 123 – 131.
- EPPEN, G., Á. RUIZ y G. GARCÍA (2000), *Investigación de operaciones en la ciencia administrativa: construcción de modelos para la toma de decisiones con hojas de cálculo electrónicas*, Pearson Educación.
- ERDOĞAN, G. (2017), «An open source Spreadsheet Solver for Vehicle Routing Problems», *Computers and Operations Research*, **84**, págs. 62 – 72, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054817300552>.
- GONZÁLEZ, C. y R. GARZA (2004), «Modelo matemático para la planificación de la producción en la cadena de suministro», *Ingeniería Industrial*, **25**(2), págs. 26 – 29.
- HANKE, J., D. WICHERN y A. ZEPEDA (2006), *Pronósticos en los negocios*, 8ª edición, Pearson Educación, México.
- HEIZER, J., B. RENDER y J. MURRIETA (2009), *Principios de administración de operaciones*, 7ª edición, Pearson Educación, México.
- HO, W., G. T. HO, P. JI y H. C. LAU (2008), «A hybrid genetic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem», *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **21**(4), págs. 548 – 557, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197607000887>.
- ISLAM, D. M. Z., J. F. MEIER, P. T. ADITJANDRA, T. H. ZUNDER y G. PACE (2013), «Logistics and supply chain management», *Research in Transportation Economics*, **41**(1), págs. 3 – 16.
- JAIN, C. L. (2017), *Fundamentals of demand planning & forecasting*, Graceway Publishing Company, Inc, New York, NY.

- KRONQVIST, J., D. E. BERNAL, A. LUNDELL y I. E. GROSSMANN (2019), «A review and comparison of solvers for convex MINLP», *Optimization and Engineering*, **20**(2), págs. 397 – 455, URL <https://doi.org/10.1007/s11081-018-9411-8>.
- LAPORTE, G. (2009), «Fifty years of vehicle routing.», *Transportation Science*, **43**(4), págs. 408 – 416.
- LI, Y., H. CHEN y C. PRINS (2016), «Adaptive large neighborhood search for the pickup and delivery problem with time windows, profits, and reserved requests», *European Journal of Operational Research*, **252**(1), págs. 27 – 38.
- LIU, R., Y. TAO y X. XIE (2019), «An adaptive large neighborhood search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and synchronized visits», *Computers & Operations Research*, **101**, págs. 250 – 262, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030505481830220X>.
- MARTÍNEZ, I., F. LÓPEZ y G. VERTIZ (2014), *Investigación de operaciones: Serie Universitaria Patria*, Serie Universitaria Patria, Grupo Editorial Patria.
- MARTÍNEZ, S. M., J. J. BERNAL y J. F. SÁNCHEZ (2005), «Optimización con modelos de red en hoja de cálculo», *Rect@*, (1).
- MEIC (2017), «Estado de situación de las Pyme en Costa Rica», Disponible en <http://reventazon.meic.go.cr/informacion/pyme/2017/informe.pdf>.
- NAGY, G. y S. SALHI (2005), «Heuristic algorithms for single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries», *European Journal of Operational Research*, **162**(1), págs. 126 – 141, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221703008361>.
- NOJEK, S., P. BRITOS, B. ROSSI y R. GARCÍA (2003), «Pronóstico de ventas: comparación de predicción entre redes neuronales y método estadístico», *Revista Eletrônica de Ciência Administrativa*, **2**(1), págs. 1 – 18.

- PISINGER, D. y S. ROPKE (2007), «A general heuristic for vehicle routing problems», *Computers & Operations Research*, **34**(8), págs. 2403 – 2435.
- PRZYBYLSKI, A. y X. GANDIBLEUX (2017), «Multi-objective branch and bound», *European Journal of Operational Research*, **260**(3), págs. 856 – 872, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037722171730067X>.
- PUNNEN, A. P. (2002), *The traveling salesman problem and its variations*, Springer.
- RESTREPO, J. H., P. D. MEDINA y E. A. CRUZ (2008), «Un problema logístico de programación de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW)», *Scientia et Technica*, **2**(39), págs. 229 – 234.
- ROPKE, S. y D. PISINGER (2006), «An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows», *Transportation Science*, **40**(4), págs. 455 – 472.
- SACRAMENTO, D., D. PISINGER y S. ROPKE (2019), «An adaptive large neighborhood search metaheuristic for the vehicle routing problem with drones», *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **102**, págs. 289 – 315, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X18303218>.
- SHABANI, N. y T. SOWLATI (2013), «A mixed integer non-linear programming model for tactical value chain optimization of a wood biomass power plant», *Applied Energy*, **104**, págs. 353 – 361.
- SHARDA, R., B. GOLDEN, S. RAGHAVAN, S. VOSS y E. WASIL (2008), *The vehicle routing problem: latest advances and new challenges*, tomo 43, primera edición, Springer-Verlag, New York, NY.
- SIMCHI-LEVI, D., P. KAMINSKY y E. SIMCHI-LEVI (2008), *Designing and managing the supply chain: concepts, strategies, and case studies*, McGraw-Hill Companies, Nueva York.
- SINGH, A. (2012), «An overview of the optimization modelling applications», *Journal of Hydrology*, **466-467**, págs. 167 – 182.

VALENTE, B. y R. DE ALVARENGA (2016), «Modelos matemáticos basados no time dependent vehicle routing problem para planejamento da logística urbana sob a ótica ambiental», *Transportes*, **24**(3), págs. 55–63.

WINSTON, W. (2005), *Investigación de operaciones: aplicaciones y algoritmos*, Thomson.

XU, X., H. YUAN, M. LIPTROTT y M. TROVATI (2018), «Two phase heuristic algorithm for the multiple-travelling salesman problem», *Soft Computing*, **22**(19), págs. 6567 – 6581.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Allan Cubillo Artavia

Candidato para obtener el grado de
Maestría en Logística y Cadena de Suministro

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

HERRAMIENTAS CUANTITATIVAS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA
DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE UNA PYME

Nacido el 04 de diciembre de 1986 en la provincia de Limón, Costa Rica. Hijo de la señora Felicia Cubillo Artavia y graduado de la Licenciatura en la carrera de Administración Aduanera y Comercio Exterior, Escuela de Administración Pública, Universidad de Costa Rica.

Cuenta con más de siete años de experiencia en la Administración Pública de Costa Rica, trabajando en diferentes áreas de la Dirección General de Aduanas, Ministerio de Hacienda. Además, se desempeñó como docente en la Universidad de Costa Rica durante más de tres años, así como coordinador de carrera en una de las sedes de dicha institución. Miembro activo del Colegio de Ciencias Económicas de Costa Rica.