

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN EN EL SERVICIO DE
PAQUETERÍA EMPLEANDO UNA TECNOLOGÍA EMERGENTE**

POR

EMANUEL JESÚS ULIN HERNÁNDEZ

**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



**OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN EN EL SERVICIO DE
PAQUETERÍA EMPLEANDO UNA TECNOLOGÍA EMERGENTE**

POR

EMANUEL JESÚS ULIN HERNÁNDEZ

**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 «Optimización de la red de distribución en el servicio de paquetería empleando una tecnología emergente», realizada por el alumno Emanuel Jesús Ulin Hernández, con número de matrícula 1937485, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

El Comité de Tesis

Jania Astrid Saucedo

Dra. Jania Astrid Saucedo Martínez

Asesor

[Firma]

Dra. Edith Lucero Ozuna Espinosa

Revisor

[Firma]

MLyCS. Blanca Idalia Pérez Pérez

Revisor

Vo. Bo.

[Firma]

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios Posgrado



San Nicolás de los Garza, Nuevo León, agosto 2019

A Dios y a mis seres queridos.

*Tu esfuerzo y felicidad deben ser compartidos con dios, con tu familia y amigos,
todos ellos representan tu éxito.*

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|------------|
| Agradecimientos | XI |
| Resumen | XII |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Descripción del problema | 3 |
| 1.2. Objetivo | 4 |
| 1.2.1. Objetivos específicos | 5 |
| 1.3. Hipótesis | 5 |
| 1.4. Justificación | 5 |
| 1.5. Metodología | 7 |
| 1.6. Estructura de la tesis | 9 |
| 2. Antecedentes | 10 |
| 2.1. Marco de referencia | 10 |
| 2.2. Cadena de suministro y logística | 11 |
| 2.3. Industria 4.0 | 14 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.1. Cadena de suministro y logística 4.0 | 16 |
| 2.4. Tecnologías emergentes en la cadena de suministro | 20 |
| 2.5. Casos de éxito de UAV en la distribución | 28 |
| 2.6. Problema de Enrutamiento de Vehículos | 31 |
| 2.6.1. VRP de entregas divididas | 35 |
| 2.6.2. VRP con Ventanas de Tiempo | 37 |
| 2.6.3. Problema de enrutamiento con UAV | 38 |
| 3. Metodología | 44 |
| 3.1. Supuestos | 45 |
| 3.2. Conjuntos | 45 |
| 3.3. Parámetros | 46 |
| 3.4. Variables | 47 |
| 3.5. Modelo matemático | 47 |
| 3.5.1. Restricciones | 48 |
| 4. Caso de estudio | 50 |
| 5. Experimentación y resultados | 55 |
| 5.1. Escenario 1 | 57 |
| 5.2. Escenario 2 | 59 |
| 5.3. Escenario 3 | 60 |

| | |
|--|-----------|
| 5.4. Escenario 4 | 61 |
| 5.5. Escenario 5 | 62 |
| 5.6. Escenario 6 | 62 |
| 5.7. Escenario 7 | 63 |
| 5.8. Comparativa de los 7 escenarios | 64 |
| 6. Conclusiones | 70 |
| 6.1. Contribuciones a la logística | 71 |
| 6.2. Trabajo a futuro | 73 |
| A. Relación de costos entre escenarios | 74 |
| B. Generalidades de GAMS | 82 |
| B.1. GAMS/CPLEX | 83 |
| C. Divulgación científica | 84 |
| C.1. Memoria en congresos | 84 |
| C.2. Presentaciones | 85 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| 1.1. Cadena de suministro de las empresas de paquetería | 3 |
| 1.2. Gráfica del PIB de servicio de mensajería y paquetería | 6 |
| 1.3. Diagrama de flujo para construcción del modelo | 8 |
| 2.1. Eslabones de la cadena de suministro | 12 |
| 2.2. Costos logísticos | 13 |
| 2.3. De la primera revolución industrial a la industria 4.0 | 14 |
| 2.4. Cadena de suministro 4.0 | 16 |
| 2.5. Escenario logístico de las tecnologías emergentes | 22 |
| 2.6. Las tecnologías emergentes a lo largo de la cadena de suministro . . . | 27 |
| 4.1. Campus de Ciudad Universitaria | 51 |
| 4.2. Porcentaje de peso de los productos | 53 |
| 4.3. Transporte de carga | 54 |
| 5.1. Modos de transporte para entregas de paquetes | 56 |
| 5.2. Ruta tradicional vs ruta con 4 drones en el escenario 1 | 58 |

| | |
|---|----|
| 5.3. Ruta tradicional vs ruta mixta en el escenario 2 | 59 |
| 5.4. Ruta tradicional vs ruta mixta en el escenario 3 | 60 |
| 5.5. Ruta tradicional vs ruta mixta en el escenario 4 | 61 |
| 5.6. Ruta tradicional vs ruta mixta en el escenario 5 | 62 |
| 5.7. Ruta tradicional vs ruta mixta en el escenario 6 | 63 |
| 5.8. Ruta tradicional vs ruta mixta en el escenario 7 | 64 |
| 5.9. Resultados de los escenarios | 67 |
| 5.10. Ruta tradicional vs ruta diferenciada de CO2 | 68 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| 2.1. Enfoque logísticos | 17 |
| 5.1. Generación de escenarios por categorías de paquetes | 56 |
| 5.2. Comparación entre escenarios | 65 |
| A.1. Relación de costos en el escenario 1 | 75 |
| A.2. Relación de costos en el escenario 2 | 76 |
| A.3. Relación de costos en el escenario 3 | 77 |
| A.4. Relación de costos en el escenario 4 | 78 |
| A.5. Relación de costos en el escenario 5 | 79 |
| A.6. Relación de costos en el escenario 6 | 80 |
| A.7. Relación de costos en el escenario 7 | 81 |

AGRADECIMIENTOS

A Dios - Por darme vida, metas y una gran familia.

A mis padres José Candelario y María del Carmen - Por su apoyo incondicional, y principalmente por su inmenso amor hacia mí.

A mi hermano, Eduardo - Por acompañarme en momentos importantes y por quererme mucho.

A mis abuelos - Por creer en mí y por amarme demasiado.

A Gaby Márquez - Por tener paciencia, por apoyarme siempre e inspirarme en ser mejor cada día.

A mis amigos y familia - Por sus ánimos, aportaciones y por regalarme grandes momentos. **A la Lic. Aracely** - Por guiarme a nuevos retos académicos.

A la Dra. Jania - Por su apoyo y mando en la realización de este trabajo. Al comité de tesis y a todos los profesores por ser pilares de conocimiento, al brindarme las bases necesarias para mejorar la investigación mediante sus contribuciones.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) de la Universidad Autónoma de Nuevo León- Por ser parte de mi formación académica, y que me brindaron todo lo necesario para la realización de esta meta.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología- Por el apoyo brindado.

Gracias!

RESUMEN

Emanuel Jesús Ulin Hernández.

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: OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN EN EL SERVICIO
DE PAQUETERÍA EMPLEANDO UNA TECNOLOGÍA EMERGENTE.

Número de páginas: 94.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: La Industria 4.0 ofrece tecnologías emergentes que facilitan los procesos en la cadena de suministro, en este caso, se propone una tecnología (drones) para mejorar el proceso de distribución en la UANL.

El presente estudio contiene conceptos relacionados a la I4.0, a las tecnologías emergentes en la cadena de suministro y al uso de herramientas cuantitativas en la distribución.

Para la resolución del problema planteado se propuso un modelo matemático basado en el “Problema del Agente Viajero” para el diseño de una ruta al considerar Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV).

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: el proceso de distribución representa el mayor costo logístico, actualmente se buscan nuevos modos de transporte que puedan beneficiar a este proceso y que a su vez, puedan disminuir los problemas que se tienen, como es la congestión y la contaminación.

Por ende, se presentan las contribuciones a la logística:

- Diseño de una ruta que facilite la toma de decisiones: se obtuvo una mejora en costos logrando un ruteo eficiente en la universidad al incluir una tecnología de la I4.0.
- Disminución del congestionamiento vehicular: se disminuyó la participación del camión debido que los drones realizaban entregas, mejorando la fluidez del medio terrestre.
- Impacto ambiental: se reduce el dióxido de carbono al no usar solo camiones para cumplir con las entregas a los clientes, esto se logró combinando otro modo de transporte.
- El uso de un nuevo canal de distribución alineado a las nuevas tendencias de la industria 4.0 usando drones: la I4.0 ofrece tecnologías que pueden mejorar la logística, el uso de drones es una alternativa que funciona de gran manera en la distribución para disminuir las desventajas que ofrece el medio terrestre en la actualidad.
- Optimización del transporte al enviar paquetería mediante un ruteo mixto (camión y UAV) en las facultades: se redujo los recursos utilizados al combinar drones con el método tradicional.

Firma del asesor: Janía Astrid Saucedo
Dra. Janía Astrid Saucedo Martínez

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la cadena de suministro ha presentado cambios importantes en sus eslabones, esto se debe a la incursión de la nueva revolución industrial, conocida como Industria 4.0.

La industria 4.0 esta enfocada en la automatización y digitalización en la cadena de suministro, generando nuevas soluciones que puedan ser de beneficio en los procesos operacionales, esta investigación se centra en el uso de las tecnologías emergentes en la cadena de suministro, haciendo hincapié en el proceso de distribución.

La distribución de mercancías es uno de los procesos que genera grandes costos logísticos, Rodrigue *et al.* (2016) señalan que al alrededor del 50.3% del costo logístico de una empresa es derivado de este proceso.

Hemos observado que las empresas de paquetería han tenido una evolución de crecimiento debido al *e-commerce*, existe una mayor demanda y esto logra que el proceso de distribución sea más complejo.

Castelltort (2018) menciona que el negocio del ventas online crecerá un 17% en el 2021 convirtiendo a México en uno de los mercados con *e-commerce* más afianzados en América Latina. Por lo cuál, es de suma importancia contar con un proceso logístico adecuado para lograr un nivel de servicio.

Debido a la complejidad del congestionamiento vehicular, se recomienda que las organizaciones de *e-commerce* consideren el uso de nuevas alternativas de transporte, un ejemplo de ello, son los Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV), que de manera indistinta trataremos a un UAV como un Sistema Aéreo no Tripulado (UAS), estos lograrán satisfacer las entregas del producto en tiempo y forma con el menor costo posible para obtener mayores utilidades en el negocio.

La ONU (2017) considera que la población aumentará alrededor de mil millones de personas en los próximos 13 años, llegando a 8.6 mil millones en 2030, por ello, se debe de planificar los sistemas de transporte para evitar el congestionamiento, contaminación y los retrasos en el mismo.

Aunado a eso en México el 78 % de la población vive en localidades urbanas; por lo que, la planificación del transporte, debe ir a la par de la urbanización, para ello, se debe buscar modos alternos de transporte para satisfacer la creciente demanda.

Los UAV pueden mejorar a corto plazo los problemas de transporte en áreas urbanas, siempre y cuando los productos a entregar sean propios para drones.

En la cadena de suministro esta tecnología puede reducir un porcentaje de los costos logísticos, como puede ser el costo de mano de obra, esto se debe a la autonomía de los drones para cumplir con las entregas y representan una mejor opción que en lugar de usar solo vehículos de entregas tradicionales.

En este trabajo se propone combinar los métodos de distribución actuales con una tecnología emergente como son los UAV, para lograr una combinación de transporte que optimice los costos operaciones en las entregas de paquetes. Se realizará un modelo matemático que considere una ruta óptima empleando dos tipos de transporte (UAV y el tradicional) para mejorar de forma eficiente los servicios de entrega.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La situación de las empresas de paquetería es interesante, actualmente están en crecimiento gracias al *e-commerce*, Palomera (2017) indica que la demanda por parte de los jóvenes están guiando el futuro del comercio electrónico y de la logística de este tipo de empresas. El *e-commerce* es parte fundamental del éxito de las empresas de paquetería, pero también cabe destacar que existen problemas logísticos.

En la figura 1.1, se observa que el proceso logístico de estas empresas inicia desde el envío de materia prima al almacén central, para posteriormente enviarse a un almacén regional y de ahí a las sucursales; es ahí donde suelen presentarse diversos problemas relacionados con el tráfico vehicular.

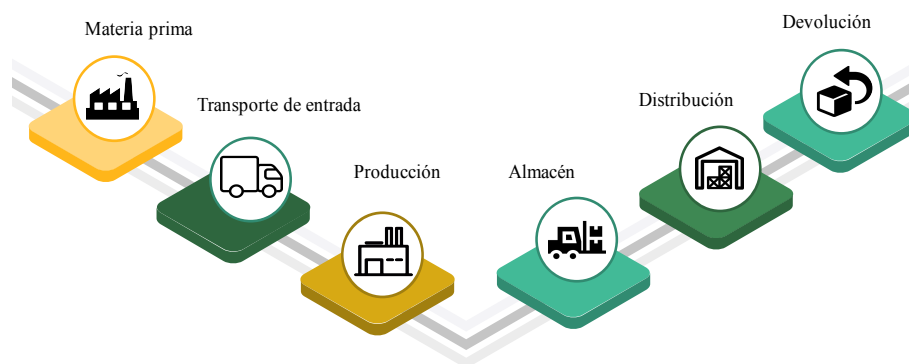


Figura 1.1: Cadena de suministro de las empresas de paquetería

Fuente: Rueda Durán *et al.* (2014)

Los tiempos de entrega es un factor importante para estas empresas, el proceso de producción apoya a la fabricación de los productos, de ahí se alista para su entrega al momento de recibirse en el almacén, en la penúltima etapa se entrega a su destinatario donde puede ser una entrega directa al cliente o por medio de un centro de distribución y por último, el retorno del mismo esto sucede cuando el producto está dañado, no cumplía con la necesidad del cliente, entre otras muchas razones.

Actualmente se ha dado un crecimiento del comercio electrónico los cuáles usualmente entregan sus productos mediante estas empresas de paquetería. Una probable causante del retraso en la entrega de paquetes es la mala administración entre las sucursales, aumentando el costo logístico para evitar incurrir en una insatisfacción por parte del cliente.

Las empresas de paquetería poseen complicaciones cuando existe un congestionamiento vehicular en las ciudades urbanas, lo cuál pueden provocar retrasos en la entrega de sus productos. Si bien, estos problemas son externos, la empresa debe de proponer alternativas para impedir que le afecte. Es por ello, que se presenta el siguiente objetivo.

1.2 OBJETIVO

Diseñar un ruteo óptimo mediante un modelo matemático que minimice los costos de entrega en Ciudad Universitaria contemplando Vehículos Aéreos No Tripulados (drones).

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Categorizar las tecnologías emergentes de la industria 4.0 en la cadena de suministro.
- Analizar los problemas de investigación de operaciones para Sistemas Aéreos no Tripulados (UAS o drones) enfocados al proceso de distribución.
- Determinar un método cuantitativo para el diseño de una ruta óptima que permita la distribución de determinados paquetes de un punto a otro.

Entendiendo el problema presentado y los objetivos que se pretenden alcanzar, la siguiente sección presenta la justificación de la investigación.

1.3 HIPÓTESIS

Mediante una tecnología emergente se puede crear un canal alternativo para la distribución de paquetes en empresas de paquetería si se diseña un ruteo óptimo a través de un modelo matemático.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El principal objetivo de una cadena de suministro en empresas de servicios es cumplir con los requerimientos que le solicita sus clientes, en el caso de una empresa de mensajería y paquetería es fundamental cumplir con los tiempos establecidos, contemplando la calidad en el servicio.

Los tiempos de entrega y los costos entre las sucursales marcan la diferencia entre los logros de las empresas en este sector, porque se debe de trabajar de forma sincronizada desde el almacén central a las diversas sucursales.

Actualmente la tecnología ha influido en muchos factores dentro de la cadena de suministro. La tecnología es un medio donde las empresas pueden sacar ventaja para la mejora de varios procesos, entre ellos, el de distribución, en este caso la tecnología que ha tomado un nivel importante en este proceso es el uso de UAV en empresas como DHL, UPS y Amazon han realizado pruebas y lo han llevado a la práctica para dar un servicio personalizado a sus clientes, con el objetivo de cumplir con los tiempos de entrega generando ahorros e incluso dando una mayor flexibilidad a sus unidades (camiones).

Amador (2017) señala que el sector de servicios de mensajería y paquetería de México ha ido creciendo en los últimos años, destacando que la facturación del comercio electrónico se multiplicó un 10 % entre los años de 2009 y 2015.

En la figura 1.2, se puede observar el crecimiento de la producción de servicios de mensajería y paquetería en comparación de la producción total de la economía, donde existe un mayor avance en este sector de empresas, esto indica que proyectos relacionados a este tipo de empresas serán beneficiosos para su expansión en el mercado.

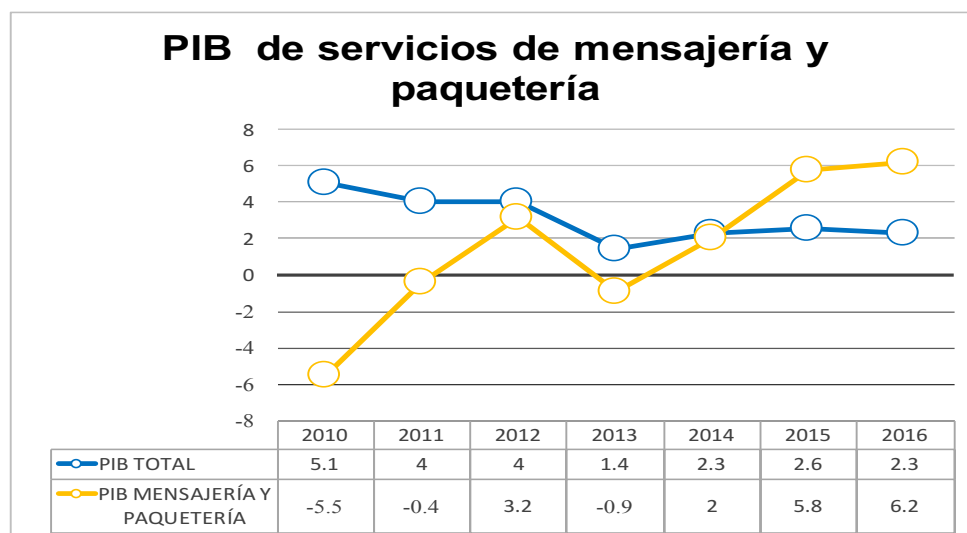


Figura 1.2: Gráfica del PIB de servicio de mensajería y paquetería

Fuente:(Amador, 2017)

Actualmente empresas reconocidas en el servicio de paquetería están implementando nuevos centros de distribución para soportar sus operaciones de tal manera que puedan cumplir con sus clientes, es un hecho que en el futuro seguirá con un crecimiento impresionante donde la tecnología será pieza importante para este tipo de negocios.

El proceso de distribución de estas empresas tienen un grado de nivel alto, porque al no cumplir con los tiempos establecidos incurren a un nivel de servicio de mala calidad, provocando descontentos con sus clientes finales, estos procesos deben cumplirse de la forma correcta como se tenga establecido, cada empresa tiene un plus en su servicio como la capacidad de entrega, costos, calidad, devolución, entre otros.

1.5 METODOLOGÍA

El proyecto se efectúa en cinco fases (RSDAC) que logran el entendimiento del campo de estudio, cumplimiento del objetivo y el modelo propuesto, a continuación se detalla de manera breve:

- Revisión de literatura: es la analogía de trabajos recopilados en revistas especializadas que hablan de los avances de las tecnologías emergentes en la cadena de suministro y su incursión en la distribución de paquetes y se conoce a profundidad las herramientas de distribución.
- Selección y adaptación de la herramienta: la idea es apoyarse de la literatura para encontrar modelos matemáticos semejantes al problema que se piensa solucionar, con la finalidad de poder formular las bases del modelo matemático, es importante saber cuáles serán los supuestos, conjuntos, parámetros y variables, por ende, se deben considerar características específicas para el ruteo con drones, de tal forma que sea funcional al momento de incluir esta tecnología al ruteo tradicional.

Para obtener la modelación matemática ideal, en la figura 1.3, se definen una serie de pasos que facilitará la toma de decisiones cuando este no llegue a cumplir sus funciones.

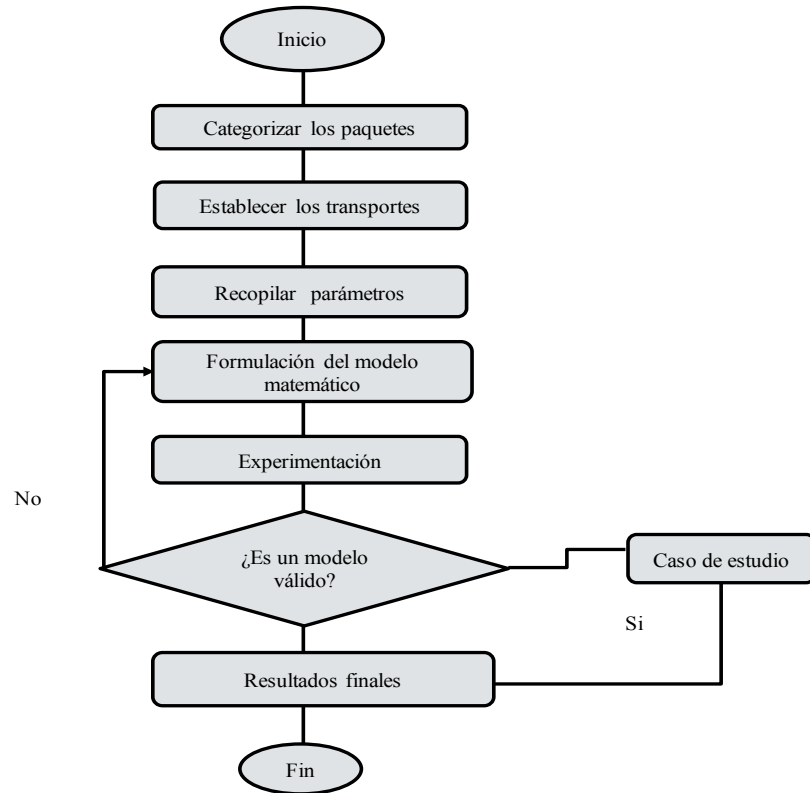


Figura 1.3: Diagrama de flujo para construcción del modelo

La formulación matemática estará basado en en el Problema del Agente Viajero (TSP), que creará una ruta óptima de entrega de paquetes para satisfacer toda la demanda en el mercado, con el objetivo de minimizar los costos considerando tiempos.

- Diseño de experimentos: al definir la estructura del modelo, se pasa al siguiente paso que es ejecutarlo en un lenguaje de programación para analizar los resultados previos con sus condiciones establecidas, posteriormente se hará la pregunta ¿Es un modelo válido?, será importante interpretar si el modelo cumple con toda la información que se estableció en su construcción, si en dado

caso el modelo no cumple con las necesidades o no da los resultados esperados se retrocede al paso anterior y si es válido, pasamos a la siguiente fase.

- Análisis de resultados: el modelo matemático debe analizar distintos escenarios, se podrá observar hasta donde es capaz de soportar computacionalmente, para realizar estos diseños se crearán nuevos datos para crear diferentes ambientes matemáticos.
- Conclusiones: de acuerdo a los resultados, se describe todo el contexto del estudio, donde se explica sus beneficios en el proceso de distribución para la mejora de la logística de este sector de empresas.

1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis está organizada en el siguiente orden: el capítulo dos explica el tema de la cadena de suministro y de la logística en la era de la industria 4.0, la incursión de las tecnologías emergentes en la cadena de suministro, la distribución *e-commerce* y los casos de éxito de los UAV en la distribución, en el capítulo tres se presenta la estructuración del modelo matemático. En el capítulo cuatro se presenta el caso de estudio, en el capítulo cinco se presenta la experimentación y los resultados finales del estudio, por último el capítulo seis muestra las conclusiones a partir del trabajo presentado.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

Este capítulo describe la cadena de suministro y la logística en la era de la industria 4.0, el papel de las tecnologías emergentes en la cadena de suministro, así como la importancia del *e-commerce* en las empresas de paquetería en el proceso de distribución y por último, se detalla las herramientas de este proceso que apoyan a la toma de decisiones.

2.1 MARCO DE REFERENCIA

El marco de referencia presenta dos puntos importantes enfocados a las tecnologías emergentes en la cadena de suministro y los problemas de enrutamiento en Sistemas Aéreos no Tripulados (UAS).

La búsqueda se realizó a partir de la base de datos de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Google Académico y en CONRICyT, las fuentes consultadas se pueden mencionar las siguientes:

- Science Direct (www.sciencedirect.com)
- Springer (<http://www.springer.com>)
- IEEE Xplore (<http://ieeexplore.ieee.org>)

- Emerald (www.emeraldinsight.com)
- EBSCOHost (www.ebscohost.com)

Las palabras clave incluidas en el proceso de búsqueda son «*Supply chain*», «*Smart logistics*», «*Emerging technologies*», «*UAV*», «*Vehicle Routing Problem*», estas se mezclaron entre sí utilizando los operadores booleanos:

- OR
- AND
- XOR
- NOT

De manera general el rango de búsqueda fue de 1997 al 2019, pero los años relacionados a los problemas de enrutamiento implementando drones comenzó desde el 2015, donde se observó un crecimiento exponencial en el 2018, en este año se encontraron la mayor parte de revisión de literatura.

2.2 CADENA DE SUMINISTRO Y LOGÍSTICA

La cadena de suministro se puede definir como un conjunto de entidades y procesos interconectados, que se coordinan a lo largo de la cadena de valor para convertir colectivamente un bien o un servicio a las necesidades de los clientes cumpliendo con su entrega en el momento adecuado y en el lugar correcto de manera eficiente (Harrison y Van Hoek, 2008; Copacino, 1997), es clave en cualquier organización porque es responsable de equilibrar la demanda y la oferta a lo largo de toda la cadena de valor (Ivanov *et al.*, 2017).

En la figura 2.1, los procesos de la cadena de suministro, comienzan desde la obtención de la materia prima hasta la entrega del producto o el servicio al consumidor, cada parte interesada debe de cumplir de manera integral, permitiendo una cadena de suministro más ágil y flexible.

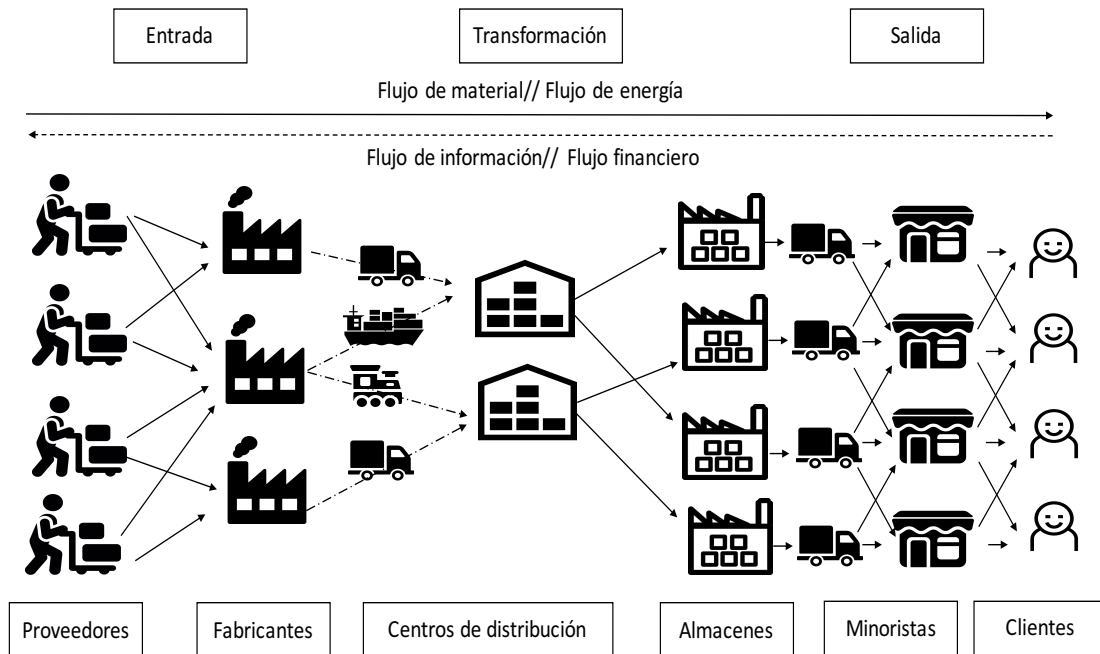


Figura 2.1: Eslabones de la cadena de suministro

Fuente: Elaboración propia basado en Ivanov *et al.* (2017)

Esta se adapta conforme al giro de la empresa (procesos, tipo de producto, y servicio), cabe destacar que en la actualidad las empresas compiten entre cadena de suministro y estas deben ser flexibles y robustas, para competir en el mercado.

Para tener una planificación en la cadena de suministro se debe contar con una logística adaptada a los objetivos de la organización. Esta se define como el proceso de administrar estratégicamente el flujo y almacenamiento de las materias primas, de un punto de origen al de consumo (Lamb *et al.*, 2002).

La logística da coordinación en los procesos dentro de la cadena de suministro. Existen diversos costos relacionados con la logística, estos se presentan en diferentes eslabones de la cadena de suministro como, por ejemplo el del transporte, que es uno de los procesos que más genera repercusiones económicas.

En la figura 2.2, Rodrigue *et al.* (2016) indican que el 50.3% de los costos logísticos de una empresa es derivado de este proceso, esto se debe a la relación de conectividad en cada fase de la cadena de suministro.

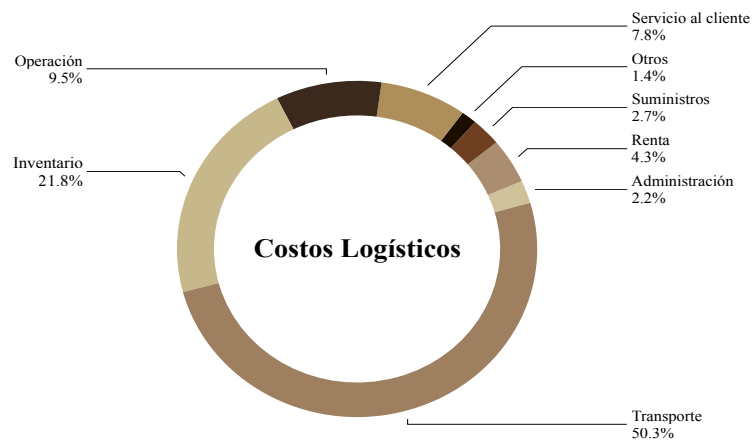


Figura 2.2: Costos logísticos

Fuente:Elaboración propia basado en Rodrigue *et al.* (2016)

La distribución, tiene una interacción constante en todos los actores de la cadena de suministro, por ello, su costo es el más elevado dentro de la logística, la distribución une elementos, procesos y actividades propias de las cadenas de suministro. De acuerdo a Chopra y Meindl (2008) es el responsable de trasladar y almacenar un producto desde la etapa del proveedor a una etapa de cliente en la cadena de suministro. Su importancia incrementa cuando este se conecta con el proceso de almacenamiento, debido que ambos suelen ser procesos claves en la logística.

Nuestra finalidad es contribuir en el proceso de distribución, al contemplar un nuevo canal de entrega y así, reducir los costos logísticos.

2.3 INDUSTRIA 4.0

A lo largo de la historia hemos contemplado cuatro etapas de revolución industrial, de las cuáles daremos énfasis a la industria 4.0 también conocida como I4.0, sus tecnologías integradas en esta nueva era pueden ser de gran beneficio a la cadena de suministro.

Bunse *et al.* (2014) comparten una descripción breve de las etapas de la revolución industrial, en la figura 2.3 mostrando el enfoque principal de cada una y su grado de complejidad.

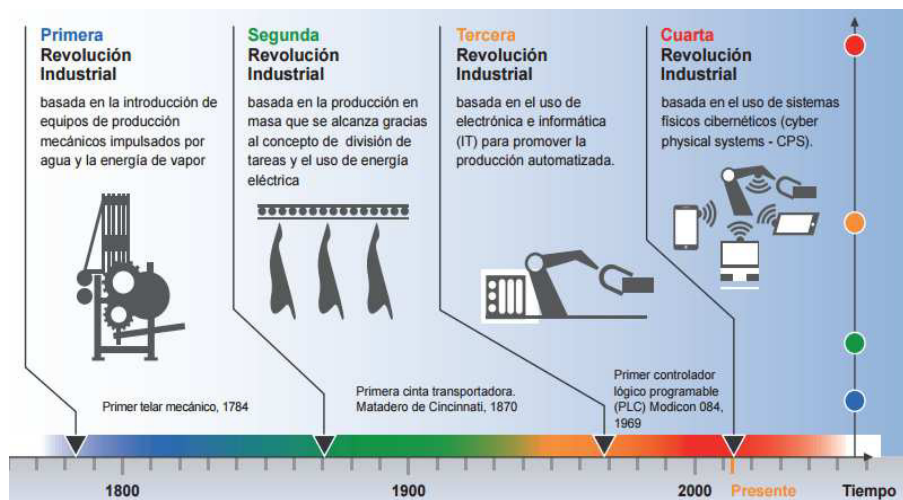


Figura 2.3: De la primera revolución industrial a la industria 4.0

Fuente: Bunse *et al.* (2014)

La primera revolución industrial se basó en la mecanización, la segunda revolución se enfocó en una producción en masa, en la tercera revolución industrial fue la automatización de las tecnologías de la información.

Actualmente estamos en una nueva revolución industrial conocida como «Industria 4.0», donde las empresas deben adoptar nuevas tecnologías para mejorar sus procesos y toma de decisiones.

La I4.0 se enfoca en la automatización de los procesos, en sí es un un marco de referencia que da valor a las entidades de la cadena de suministro, esta no es ajena a la disrupción tecnológica y a los cambios en los modelos de producción, compra y consumo, García (2017) sugiere que las empresas deben optar:

1. Proporcionar a los clientes una logística personalizada, flexible y barata.
2. Incorporarse al mundo 4.0 y digitalizarse.
3. Innovar en el modelo de negocio y definir el mercado meta.
4. Aprovechar el potencial de los modelos colaborativos para crecer.

Saucedo-Martínez *et al.* (2017) describen nuevas tecnologías prominentes alineadas a las I4.0, como son: el internet de las cosas, la realidad aumentada, ciber seguridad, *cloud*, sistema de integración vertical y horizontal, simulación, manufactura adictiva, *Big Data*, y los robots autónomos, este último incluye a los UAVs.

Peña *et al.* (2018) describen que la I4.0 no es sólo transformaciones en la tecnología, sino que es un cambio de plataforma de pensamiento y de estructura económica que incide definitivamente en las relaciones sociales en todo el mundo. Dando un cambio radical en la sociedad: en la economía, la comunicación, el transporte entre otras esferas.

Su introducción en la cadena de suministro es crucial para una mejor transparencia en el proceso del producto. Un término muy actual es el de fábrica inteligente que hace referencia al uso de nuevos desarrollos en tecnología y herramientas para incrementar la calidad en los servicios de entrega al implementar la robótica en los procesos, todas estas incorporaciones en la cadena de suministro añaden valor agregado en el mercado, logrando una mayor globalización (Tjahjono *et al.*, 2017).

Se hará una retrospectiva de la industria 4.0 en el campo de la logística y de la cadena de suministro.

2.3.1 CADENA DE SUMINISTRO Y LOGÍSTICA 4.0

La cadena de suministro ha evolucionado conforme a las innovaciones, ahora se tiene una perspectiva diferente en la toma de decisiones en los procesos de la organización, en esta sección se explicará de forma objetiva el concepto de la cadena de suministro y su entorno en la nueva revolución industrial: «Industria 4.0».

La innovación impacta de gran medida a las empresas de acuerdo a las nuevas exigencias de los mercados y a los nuevos entornos económicos, señalan Zimmermann *et al.* (2018) que las entidades de la cadena de suministro desempeñan un papel importante para impulsar la innovación, desde el inicio de la fase del concepto del producto hasta el lanzamiento del producto en el mercado.

En la figura 2.4, el autor García (2017) describe la cadena de suministro 4.0, se puede observar que hay una mejor interacción entre los procesos de la cadena de suministro y como se sumergen en la transformación digital, esto logra una mayor trazabilidad, personalidad, agilidad y seguridad en los productos.

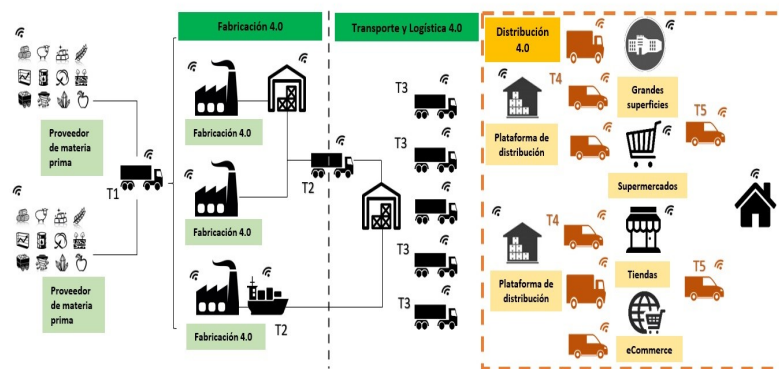


Figura 2.4: Cadena de suministro 4.0

Fuente:Elaboración propia basado en García (2017)

La I4.0 mejora los entornos logísticos, al brindar una mayor flexibilidad a lo largo de la cadena de suministro, facilitando, a su vez, la toma de decisiones.

La logística 4.0 contempla el uso de herramientas tecnológicas para ofrecer servicios de acuerdo a sistemas logísticos inteligentes que puedan recopilar e intercambiar datos para la evolución de los procesos, este nuevo enfoque en la logística esta alineada a la I4.0.

Desde la incursión de la 4ta revolución industrial, se habla de la logística inteligente que se refiere a diferentes operaciones como es el inventario, transporte o gestión de pedidos que se planifican, gestionan o controlan de una manera más inteligente en comparación con las soluciones convencionales. McFarlane *et al.* (2016) consideran que hay varios enfoques que buscan mejorar los sistemas logísticos haciéndolos más inteligentes, como se puede observar en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Enfoque logísticos

| Enfoques | Descripción |
|-----------------------------|--|
| Logística autónoma | En sistemas logísticos, se caracteriza por la capacidad de los objetos logísticos para procesar información y ejecutar decisiones por cuenta propia. |
| Internet físico | Es un medio que mejora la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas logísticos. |
| Producto inteligente | Es un sistema logístico global abierto basado en la interconexión física, digital y operativa. |
| Transportación inteligente | Proporcionan servicios innovadores que se relacionan con diferentes modos de transporte y gestión del tráfico. |
| Carga inteligente | Sus capacidades son la auto identificación, detección de contexto, acceso a servicios, monitoreo y registro de estado, comportamiento independiente y toma de decisiones autónoma. |
| Logística auto organizativa | Cuando un sistema de logística se auto organiza, puede funcionar sin una gran intervención de los gerentes, ingenieros o el control del software. |

Fuente:McFarlane *et al.* (2016)

Los enfoques logísticos ayudan a mejorar la productividad en las empresas, debido que se automatiza algunos procesos, al hacer esto se reduce el factor humano, empresas de clase mundial cuentan o entienden el rol que puede jugar en sus procesos y actividades de su compañía. Nos centraremos en la transportación inteligente que se encarga de brindar servicios innovadores en las entregas, actualmente hay tendencias con caso de éxitos que ayudan a mejorar los servicios de transportación.

La incursión de la innovación en la logística no es un tema nuevo, ha servido de mucho para mejorar los flujos logísticos, por ello, un proceso que recurrentemente esta en la innovación es el sistema del transporte, dicho proceso ha crecido exponencialmente por el comercio electrónico, su incremento se ha visto reflejado en las transacciones globales, y en el PIB mundial (Schöder *et al.*, 2016).

El *e-commerce* esta en auge con el desarrollo de nuevos modelos de negocio y se verá impulsado de manera continua en los próximos años, por lo tanto, su rápido desarrollo e influencia han provocado un cambio en la logística (Yu *et al.*, 2016). La demanda de las empresas de paquetería ha ido en aumento, esto ha dado una saturación en diversos procesos, como son el de distribución y almacenamiento.

Alicke *et al.* (2017) creen que los costos de transporte, almacenamiento y la configuración de la red, pueden reducirse hasta un 30 %, el 15 % se puede mejorar de acuerdo a la aplicación de métodos avanzados para calcular los costos relacionados a estos procesos teniendo como objetivo el mínimo de puntos de entregas. El otro 15 % se alcanzaría aprovechando los enfoques de enrutamiento dinámico, la optimización del transporte, el uso de vehículos autónomos e impresión 3D.

El proceso de las empresas del comercio electrónico, inicia en el recibo de compra (por lo regular son paquetes pequeños) mediante algún medio electrónico, luego se envía la solicitud y posteriormente, los clientes requieren una respuesta rápida (Bartholdi y Hackman, 2014).

En estos últimos años han cambiado los modos de transportación, debido que vivimos en un entorno innovador que propone tecnologías más sostenibles, por ello, diversas empresas que conocen que la distribución posee un alto costo logístico optan por las siguientes soluciones en la última milla según Björsell y Hedman (2018):

- Bicicletas: entrega productos muy ligeros, donde los conductores toman rutas cortas para ser efectiva la entrega con respecto al tiempo.
- UAV: son aparatos funcionales para la cadena de suministro, especialmente en la distribución de mercancías, son controlados de forma remota o automática, teniendo la característica de enviar productos que son de alta urgencia.

Según (Hoffmann y Prause, 2018) el 50 % esta destinado a robots empresariales, que comprenden la automatización industrial para la fabricación, la industria pesada y la entrega de paquetes.

- Robots de entrega: los robots de entrega de conducción autónoma se desarrollan en todo el mundo y los primeros prototipos ya se han probado en las entregas de paquetes de última milla (Hoffmann y Prause, 2018).

DHL pretende el uso de robots que se puede utilizar para la entrega de paquetes y cartas en la “última milla”, de igual manera el uso de carros de compras compartido, de envío colectivo, para las entregas de “última milla” de compras en línea o como vehículos de manejo automático del tamaño del paquete (paquetes de manejo automático) con determinaciones y controles individuales (Slabinac *et al.*, 2015).

- Autos eléctricos: esta modalidad de estos vehículos ofrecen mejores alternativas ecológicas al medio ambiente, y su uso esta siendo mayor en países desarrollados, cabe señalar que se debe de contar con infraestructura para cargarlos, de igual forma, no será necesario el uso de combustible.

El proceso de distribución es uno de lo más beneficiados en cuanto a la I4.0, esto se debe a los problemas que se tienen en cuanto al ruteo, contaminación y costos, provocando el uso de nuevas tecnologías.

A continuación se describe la incursión de las tecnologías dentro de la cadena de suministro, dando énfasis al uso de los UAVs y sus casos de éxito en el ámbito logístico.

2.4 TECNOLOGÍAS EMERGENTES EN LA CADENA DE SUMINISTRO

Las nuevas tecnologías aumentarán la efectividad operativa de la cadena de suministro al hacerlas más ágiles. Alicke *et al.* (2017) opinan que el impacto potencial de la cadena de suministro 4.0 dentro de los próximos será enorme, debido que el nivel de servicio crecerá dramáticamente cuando la cadena de suministro mejore significativamente las interacciones con los clientes.

La gestión de la cadena de suministro es un factor clave de éxito para resolver problemas complejos en el entorno empresarial. En la actualidad ya no son lineales, sino que se caracterizan por estructuras de red con miembros autónomos y heterogéneos (Cannella *et al.*, 2018).

La tecnología da flexibilidad en la cadena de suministro al implementarse en diferentes etapas, las empresas consideran que es importante innovar en sus herramientas, por ejemplo, en el tema de la distribución donde esta dirigido este estudio,

la incursión es elevado en dados casos, pero da buenos resultados en los procesos, las compañías hacen un análisis detallado para elegir la más idónea de acuerdo a sus necesidades empresariales.

Las empresas que no implementan tecnología se les dificulta su estancia en el mercado, muchas organizaciones aún no comprenden las mejoras que ofrece o simplemente no les interesa conocer como puede ser funcional en su organización.

El surgimiento de nuevas tecnologías como: la impresión 3D, realidad virtual, vehículos autónomos, UAV, *blockchain* y el internet de las cosas, darán una nueva forma de trabajar en la cadena de suministro. Cada vez están teniendo más participación en los procesos y esto se debe a que son una alternativa que brinda mejores soluciones que las actuales.

Según Saucedo-Martínez *et al.* (2017) el internet de las cosas, *Big Data*, los robots autónomos y los UAV tienen un gran potencial en la cadena de suministro.

Dentro de cinco a diez años cambiará el escenario logístico, por ello, es importante conocer estos enfoques para adaptar las tecnologías en los procesos adecuados, en la figura 2.5 se describe cuatro escenarios logísticos donde la tecnología juega un papel importante en cada uno de ellos.

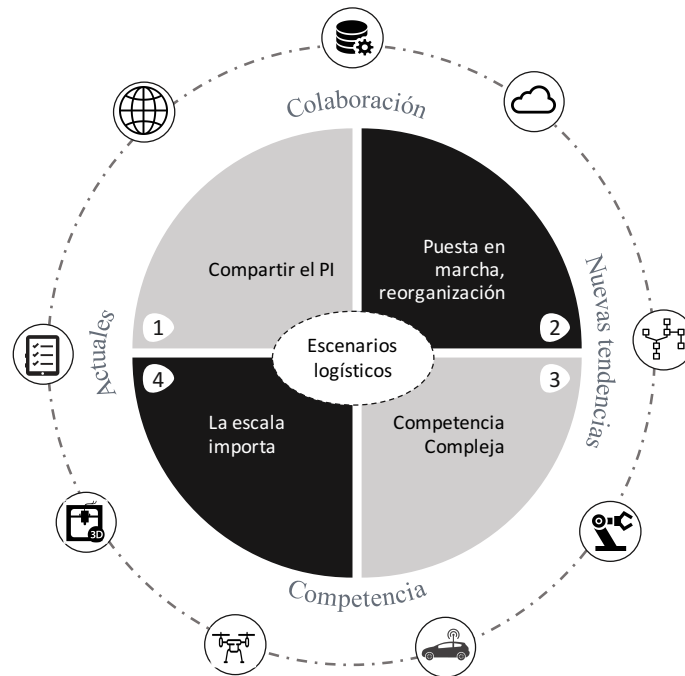


Figura 2.5: Escenario logístico de las tecnologías emergentes

Fuente: Elaboración propia basado en Tipping y Kauschke (2016)

1. **Compartir el internet físico (PI):** incrementa la eficiencia a través de la colaboración de los nuevos modelos neogocios en entorno al internet físico, de igual, mejora la comunicación entre los procesos en una organización.
2. **Puesta en marcha, reorganización:** utilizan nuevos modelos de negocios basados en tecnologías disruptivas como *blockchain* y *Big Data*.
3. **Competencia compleja:** los grandes minoristas participan como nuevos participantes, expandiendo la oferta de logística existente más allá de sus propias necesidades, con el objetivo de optimizar la cadena de suministro.
4. **La escala importa:** se aumenta la eficiencia al agilizar las operaciones aprovechando nuevas tecnologías.

Estos escenarios logísticos dan una referencia al nivel actual de estas tecnologías dentro de la logística, donde se puede observar que en el caso de los drones, se encuentra en un nivel que se centra en la optimización de las operaciones, el panorama es competitivo en cuanto a los cambios en los procesos y buscan solucionar sus problemas mediante nuevas incursiones tecnológicas.

Las tecnologías emergentes representan una forma diferente de realizar tareas mediante vínculos tecnológicos. Estas permiten crear nuevas opciones estratégicas que dan grandes beneficios en procesos funcionales tanto en la logística como en la cadena de suministro.

Por ello, se están desarrollando e implementando diversas tecnologías que son interesantes para mejorar la cadena de suministro, las tecnologías que ofrecen una mejor competitividad son las siguientes:

- **La impresión 3D:** es una tecnología de fabricación emergente que posee ventajas en el proceso de producción al reducir tiempos y costos, igual ofrece la oportunidad de crear productos personalizados, en términos logísticos impactará en el transporte al producir productos instantáneos, los bienes transportados serían principalmente en materias primas.

Según Grudpan *et al.* (2017) la impresión 3D tiene el potencial de poder cambiar la estructura de la cadena de suministro y el sistema de transporte, debido que pueden producir productos básicos en el sitio y bajo demanda.

La implementación de esta tecnología emergente lograría una reducción en los espacios de almacenaje, transporte e incluso ahorros económicos. Una característica de la impresión 3D, es que puede realizar productos muy personalizados de acuerdo al requerimiento de los clientes, el usuario puede proponer especificaciones.

Amazon contempla el uso de impresión 3D para el reparto de pedidos utilizando camiones de mensajería equipados con estas impresoras durante su ruta imprimen productos según las exigencias de los clientes. Otro ejemplo, es la naviera *Maersk Line* que utiliza esta tecnología para producir a bordo piezas de recambio para cualquier emergencia (Parada, 2018).

- **Big Data:** se centra en fuentes de datos o información grandes y de rápido crecimiento, que presentan una compleja gama de problemas de análisis y uso, al mismo tiempo estos son difíciles de procesar usando aplicaciones tradicionales (Villars *et al.*, 2011; Jacobs, 2009).

El *Big Data* puede ser una solución para la cadena de suministro que contemple una variedad grande de datos, el análisis debe ser profundo para poder implementarlo de la mejor manera, actualmente se está produciendo grandes mejoras en las operaciones.

Esta tecnología capta los datos necesarios para optimizar la información que se recolecta durante la cadena de suministro, es muy funcional para la realización de pronósticos, para conocer costos de transporte, identificar necesidades de los clientes, para mejorar las ventas, entre otras.

- **Blockchain:** es una de las innovaciones más disruptivas en los últimos años, una de sus principales virtudes es la transparencia de la información.

Esta tecnología permite conocer de extremo a extremo la cadena de suministro, aveces no se conoce todos los eslabones que unen la cadena, un ejemplo de ellos, son los proveedores de segundo y tercer nivel, por lo tanto, es importante tener un panorama global para tener mejores resultados logísticos.

Los casos más comunes de esta tecnología dentro de la cadena de suministro son para la resolución de problemas comerciales con falta de visibilidad en los datos de envío para la información del producto o componente a medida que el envío avanza por la cadena de suministro.

Miller (2018) comenta que el *blockchain* y el internet de las cosas (IoT) permitirán la prevención y predicción de fallas en la fabricación de equipos de planta, debido que los sensores del equipo detectarían condiciones tales como vibración excesiva o calor, lo que podría ocasionar fallas o lesiones al operador.

- **Internet de las cosas (IoT):** el Internet de las cosas (IoT) describe la digitalización y personalización de la entrega de bienes y servicios mediante la recopilación, análisis y la actuación de los datos adquiridos a través de una red de dispositivos semiautónomos interconectados (Druehl *et al.*, 2018).
- **Realidad Virtual (VR):** Hong y Mao (2018) propusieron el uso de la realidad virtual para simular un centro logístico, con el propósito de capacitar al personal de operaciones para mejorar aspectos de seguridad, esta tecnología fue alimentada con diversos datos para generar diferentes escenarios de emergencia en caso de desastre.
- **Vehículos autónomos:** en dos o tres años el uso de estos vehículos será una realidad, las empresas automotrices se enfocan en esta propuesta que suele ser atractiva para el mercado, y para aumentar la seguridad en la transportación de bienes de un punto a otro.

Para el uso de los autos autónomos se deberán contar con sensores que capturen en *blockchain* datos oportunos y visibles, si estos sensores detectan que se necesita una reparación, el vehículo programa una cita de manera automática al taller (Miller, 2018).

- **Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV):** son pequeños aparatos aéreos que pueden distribuir paquetes de distintos tamaños, esto depende de su capacidad de carga.

La primera aplicación de estos pequeños aparatos fue en la época militar, actualmente son funcionales en todas las etapas de la cadena de suministro, siendo una tecnología emergente que ofrece ventajas competitivas en la distribución de paquetes, una variedad de empresas han realizado pruebas piloto porque encuentran un gran potencial para optimizar los costos y tiempos de distribución.

Los drones proporcionan los medios preferibles para entregar paquetes en el negocio del comercio electrónico. Permiten un transporte rápido a destinos predefinidos y específicos sin necesidad de un gran apoyo humano para mejorar la experiencia del cliente (Kalashnikova *et al.*, 2018).

Los UAV son funcionales para la entrega de mercancías en cualquier punto de la cadena de suministro, cabe señalar que la mayoría de las compañías le han dado un enfoque a la última milla, por ejemplo la empresa china de comercio electrónico JD.com desarrolla UAVs más grandes que pueden transportar cargas de hasta una tonelada y están destinados a transportar mercancías entre etapas anteriores en la cadena de suministro.

La entrega con UAV es un tema innovador en el ambiente logístico, debido que es una alternativa que se está considerando para la entrega de paquetes, empresas como DHL, AMAZON, SF Express, UPS, Jingdong, entre otras. Cabe destacar que hay otros tipos de entregas donde se ha utilizado estos vehículos aéreos no tripulados.

Los drones se han utilizado para transportar cultivos en China de una manera más conveniente que los métodos tradicionales para limitar el deterioro (Baskin, 2017).

Actualmente los UAV tienen un impulso muy fuerte para entrega de productos, empresas que ofrecen servicios de paquetería se han dado la tarea de investigar y realizar pruebas para entregar productos al cliente final. Esto se debe porque los consideran como una alternativa de entrega, donde se planea grandes ventajas económicas, en el futuro se planea una participación masiva de estos

dispositivos aéreos, por ello, diversas instituciones buscan mejorar la infraestructura para que exista una armonía aérea entre aviones, drones, helicópteros, entre otros. Todo esto con la finalidad de mejorar y dar un mayor rendimiento de los procesos de distribución.

Todas tienen el potencial para mejorar la cadena de suministro, pero requerirán cambios en la infraestructura pública o corporativa, como fábricas, redes, autopistas o redes de comunicación. Entre mayor sea la integración con los sistemas de la cadena de suministro mayor será el impacto, cabe señalar que el personal debe capacitarse o acostumbrarse a estas nuevas ideas disruptivas ya que no reemplazan a las anteriores.

Druehl *et al.* (2018) visualizan a todas estas tecnologías emergentes en procesos que son importantes a nivel organizacional. De acuerdo a la figura 2.6, se puede mostrar como es la participación de las tecnologías emergentes a largo de la cadena de suministro, en este trabajo se eligió los UAV porque tienen la capacidad para mejorar las entregas, en el proceso de distribución.

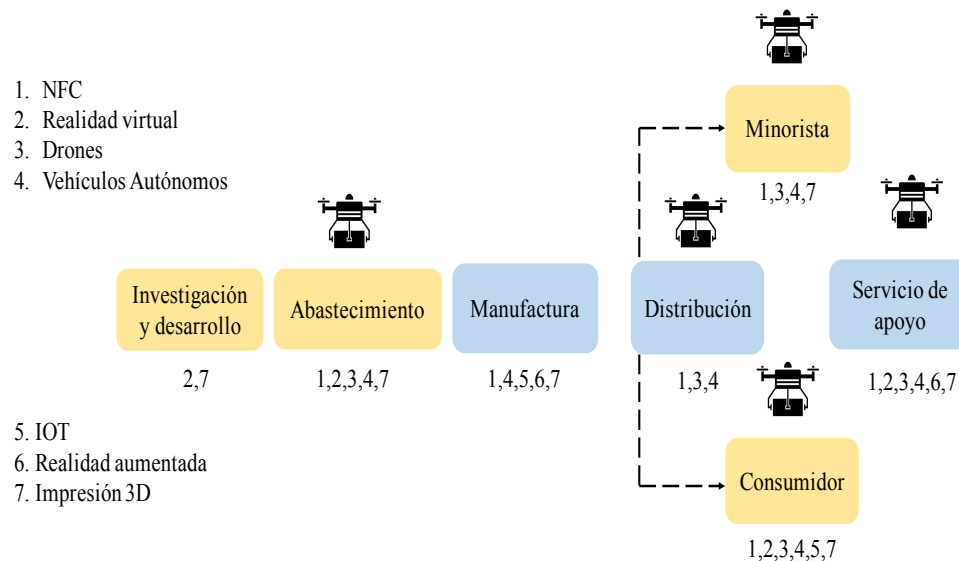


Figura 2.6: Las tecnologías emergentes a lo largo de la cadena de suministro

Fuente: Elaboración propia basado en Druehl *et al.* (2018)

Diversas empresas se enfocan en estos aparatos voladores como una gran opción para sus operaciones de entrega. La cadena de suministro se han beneficiado de las tecnologías a lo largo de los años, referente al transporte han mejorado la velocidad y la eficiencia necesaria para transportar mercancías en cada rincón, en la siguiente sección se describe a detalle el uso de los drones en el proceso de distribución.

2.5 CASOS DE ÉXITO DE UAV EN LA DISTRIBUCIÓN

En el mundo logístico, existen muchas empresas que buscan la incorporación de los UAV para entregar productos a sus clientes, debido a que comprenden las ventajas que ofrecen los drones, en esta sección se revisó algunos casos destacados sobre la tendencia del uso de esta tecnología emergente en la cadena de suministro cumpliendo tareas logísticas.

Las organizaciones a nivel mundial imaginan el uso de una tecnología emergente para sus entregas, algunos ejemplos recientes son el de Amazon, Google (Project Wing), DHL, Mercedes-Benz, Domino's, entre otras que han comenzado a invertir muchos recursos en la entrega por drones y han estado persistente para hacer de este servicio una realidad. Numerosas empresas emergentes y operadores postales están lanzando servicios de entrega con drones en todo el mundo, en particular en Asia y África, probando el mercado y los marcos legislativos con este novedoso enfoque (Nentwich y Horváth, 2018).

A continuación se describen algunos casos de éxito de empresas, que han realizado pruebas pilotos en diferentes procesos logísticos.

Zookal es una empresa de alquiler de libros de textos para estudiantes que se vinculó con la compañía Flirtey, para entregar paquetes directamente a los clientes, donde los clientes recibían una notificación al teléfono para rastrear el producto a través de GPS y posteriormente recibir el paquete en un lugar al aire libre, como resultado fue la disminución de los tiempos de espera de dos a tres días, a tan solo dos o tres minutos (Heutger y Kückelhaus, 2014).

Un caso de estudio muy interesante fue el de Fancher (2017) que se centra en la demostración de viabilidad de la entrega de suministros médicos a áreas remotas de China a través de drones. El autor describe que se realizó un diseño de una carga útil biocompatible y un dron modificado con la finalidad de dar asistencia médica a las personas al entregar pastillas, vacunas, sangre, entre otros suministros médicos. El resultado fue que ambos prototipos muestran viabilidad, pero que al considerar entre estos dos, se elige el segundo porque produjo mejores resultados en correlación con el costo de producción.

Otro caso de éxito es la compañía Zipline con sede en Estados Unidos, la cual se centra en la creación de dispositivos médicos, desde años anteriores han incorporado el uso de drones, convirtiéndola en una de las empresas más importantes del mundo dedicada a la transportación de medicinas y productos sanguíneos.

En 2016 la empresa comenzó a transportar sangre y plaquetas al hospital de Kabgayi en Ruanda, hasta la fecha han entregado más de 2,600 unidades de sangre en doce puntos de centros de salud ruandesas realizando más de 1,400 vuelos (Luzuriaga Romero, 2017). El dron puede transportar hasta 1.5 kilogramos (3 bolsas de sangre) con una velocidad de 100 kilómetros por hora, cuando se acerca al tejado del hospital de kabgayi, este deja caer el paquete a una distancia de 20 metros del suelo mediante un paracaídas de papel.

En el 2016, la tienda en línea Shop Mall que opera en Polonia, Eslovaquia, Hungría, Eslovenia y Croacia, informó el éxito de su programa piloto utilizando UAV, dicha empresa transportó un paquete a una distancia de 2 kilómetros, lo cual

fue la primera operación de este tipo en Europa central y del este, que duró 2 minutos (Woźniakowski *et al.*, 2018). Los autores comentan que la operación fue trabajada con personal del Centro de Inteligencia Artificial de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica Checa de Praga, lo importante de destacar que el dron permitió el transporte de paquetes de unidades de hasta 2 kilogramos a una distancia máxima de 60 km.

Prototipos de drones están funcionando como ambulancias para la entrega de desfibriladores en los Países Bajos, logrando viajar a una velocidad de 60 millas por hora, estos llegan a los pacientes dentro de un radio de 4.6 millas cuadradas en un minuto en comparación con el promedio de 10 minutos de los servicios de emergencias tradicionales (Scott y Scott, 2017). La respuesta de los drones permiten el aumento de las posibilidades de supervivencia al 80% comparando el 8% de los servicios de emergencia tradicional. El autor señala que los UAV rastrean llamadas móviles de emergencias y al mismo tiempo usan GPS para navegar, se espera que estos puedan transportar a futuro otros artefactos de atención médica, como máscaras de oxígeno o inyecciones de insulina, etc.

Nokia es una empresa multinacional finlandesa de telecomunicaciones, que actualmente están enfocadas a las tendencias tecnológicas, por ello, desarrollaron un proyecto denominado “*Nokia Saving Lives*” que tiene como objetivo aumentar la eficiencia durante las operaciones de rescate en situaciones de desastre.

Utilizan drones que están conectados con la tecnología de comunicación móvil para tener una respuesta rápida, de tal manera que ayuden a las personas en caso de desastres. En los desastres un problema muy común es la conectividad de red, por ello, se decide la incorporación de los drones que puedan hacer una transmisión de video, que proporcione datos en tiempo real. En 2017, *Nokia Saving Lives* ganó la competencia internacional del Premio “*Drone for Good Award*” de los Emiratos Árabes Unidos. La empresa mostró varios drones volando juntos y buscando personas en un área de desastre (Kalashnikova *et al.*, 2018).

Un caso muy conocido es el de Amazon empresa estadounidense dedicada al comercio electrónico, ellos consideran que el uso de drones les permitirá ahorros en los servicios de entrega mediante su prototipo Prime Air, el dron de la compañía puede volar hasta 15 millas con una velocidad máxima de 50 millas por hora y llevar paquetes que pesen menos de 2.27 kilogramos (Choi y Schonfeld, 2017). Los autores destacan la afirmación de Amazon que el 86 % por ciento de sus artículos pueden ser entregados por drones.

Estudios realizados por Welch (2015) referente al costo-beneficio sobre Amazon Prime Air, estima que la empresa puede obtener diversas ventajas competitivas siempre y cuando se vuelva operativo en un lapso cercano, ellos consideran que los beneficios y los ingresos potenciales de la entrega con UAV superan los costos operativos y la implementación del programa.

Domino's New Zealand realiza entregas de pizza mediante drones, estos vuelan a 30 kilómetros por hora a una distancia de 1.5 kilómetros esperando que se aumente hasta 10, solo llevan pedidos hasta 2.5 kilogramos (Kelly, 2017).

El uso de drones en la logística es evidente, por ello, se planea grandes cosas para la distribución masiva de paquetes mediante estos vehículos. Para que esto se pueda dar en un futuro cercano, se debe de apoyar de herramientas cuantitativas para planificar rutas idóneas desde el centro de distribución hasta los clientes, por ende, en la siguiente sección se analiza investigaciones acerca de enrutamiento de vehículos con UAS.

2.6 PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS

Uno de los modelos matemáticos dedicados a la optimización de rutas es el Problema del Agente Viajero (TSP), este consiste en un viajero que visita cada uno de los nodos i (ciudades) exactamente una vez, iniciando y finalizando en el mismo nodo, minimizando la distancia total del viajero (Pullan, 2003). Según Sathya y

Muthukumaravel (2015) la estructura matemática del TSP es una gráfica en la que los nodos, bordes, vértices, se denominan atributos, estos pueden representarse de la siguiente manera:

- Los nodos son las ciudades disponibles en el problema.
- Los bordes son los vectores que conectan el par de ciudades y cada borde tiene un costo asociado que puede ser distancia, tiempo u otro atributo.
- Si n es el número de entrada de vértices que representan ciudades, para un gráfico G ponderado.
- El problema de TSP es encontrar el ciclo de costos mínimos que visitan cada vértice exactamente una vez.

El Problema del Enrutamiento de Vehículos es un problema de optimización combinatoria que ha sido uno de los más estudiados en la investigación operaciones. Ticha *et al.* (2017) consideran que el motivo procede del gran número e interés de sus aplicaciones en la logística, gestión de la cadena de suministro, sistemas de distribución, sistemas de navegación para automóviles, entre otras.

Una variante de este modelo, es el Problema de Enrutamiento de Vehículos (VRP), este se centra en los campos de transporte, distribución y logística, comentan Benavente y Bustos (2012) que los enfoques de este modelo son los siguientes:

- Minimizar el costo total de operación
- Minimizar el tiempo total de transporte
- Minimizar la distancia total recorrida
- Minimizar el tiempo de espera
- Maximizar el beneficio

- Maximizar el servicio al cliente
- Minimizar la utilización de vehículos

Este se compone de grafos, estos son un término matemático utilizado para designar a un conjunto de puntos unidos entre sí por segmentos, que pueden representar un proceso o relación funcional de cualquier tipo (Cardozo *et al.*, 2009).

Según Polanco (2006), en un grafo cada relación es un par no ordenado de nodos $rk = (n_i, n_j)$. Una relación es no ordenada cuando la relación entre los nodos n_i y n_j es parecida a la relación entre los nodos n_j y n_i , es decir, $(n_i, n_j) = (n_j, n_i)$. Estas relaciones son llamadas aristas. El autor define que una arista es un par no ordenado de nodos y registra simplemente la presencia de un enlace entre dos nodos. Sea R el conjunto de aristas, y N el número de nodos, puesto que una arista es un par no ordenado de nodos, hay $N(N - 1)/2$ posibles aristas en R .

Los VRP son representados de manera gráfica, donde cada nodo corresponde a una visita, su duración de la visita es el peso del nodo. Los bordes representan el viaje entre visitas, y el peso de los bordes representa el tiempo requerido para el viaje (Beck *et al.*, 2002).

La teoría de grafos permite esquematizar problemas para darle una solución mediante un dibujo que visualiza el resultado final del estudio, estos se han modelado en diversos campos pero han sido muy eficientes en problemas relacionados al transporte.

El modelo del VRP consiste en determinar un conjunto de rutas para una flota de vehículos que parten de uno o más depósitos o almacenes para satisfacer la demanda de varios clientes dispersos geográficamente (Daza *et al.*, 2009).

Uno de los primeros modelos es el Problema de Enrutamiento de Vehículos Capacitado (CVRP), este implica el diseño de rutas de entrega de menor costo para atender a un conjunto de clientes geográficamente dispersos, es considerado un problema de optimización NP-complejo, este asigna cargas a vehículos capacitados (Cardoz *et al.*, 2016).

El modelo CVRP, se describe a continuación:

$$\text{mín} \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} \quad (2.1)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V \setminus \{0\} \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \quad (2.3)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i0} = K \quad (2.4)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0j} = K \quad (2.5)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \geq r(S) \quad \forall S \subset V \setminus \{0\}, S \neq \emptyset \quad (2.6)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V \quad (2.7)$$

La función objetivo es minimizar la distancia total recorrida (2.1), la restricción (2.2) y (2.3), garantizan que solo pueda entrar y salir de cada nodo, las (2.4) y (2.5) imponen los requerimientos para el vértice del depósito; es decir, los mismos vehículos que salen del depósito, regresan al depósito, la restricción (2.6) indica que no se sobrepase la capacidad máxima del camión y la (2.7) establecen la eliminación de sub-rutas y los valores admisibles para las variables de decisión (Daza *et al.*, 2009).

El CVRP es el modelo clásico del VRP, según León Villalba (2018) el objetivo principal de este modelo es minimizar el costo total de la operación, en función de las rutas y duración del tiempo total de recorrido, el CVRP considera la capacidad del vehículo en las restricciones donde la demanda no sobrepase la capacidad del transporte.

Es un modelo básico del VRP, la flota de sus vehículos es homogénea, existe un único depósito, las demandas son conocidas y los clientes corresponden a entregas (Galarcio *et al.*, 2017).

Se utiliza este modelo cuando la demanda es conocida, por lo tanto, la suma de las demandas no deben exceder la capacidad del transporte.

El VRP es un modelo muy utilizado en el proceso de distribución, porque logra resultados positivos al crear rutas óptimas para la entrega de productos, a continuación se describe algunas variaciones más comunes de este modelo para entender sus enfoques en los problemas de ruteo.

2.6.1 VRP DE ENTREGAS DIVIDIDAS

El Problema de Enrutamiento de Vehículo de Entrega Dividida (SDVRP) es derivado del Problema de Enrutamiento de Vehículo Capacitado clásico (CVRP) en el que los clientes solo pueden ser visitados por un solo vehículo, su diferencia consiste en cumplir con la demanda por más de un transporte.

La demanda de cada uno de los clientes se divide en varios vehículos, su objetivo es encontrar rutas que minimicen el costo total del viaje y cumplan con todas las restricciones, el SDVRP se puede resolver cuando la demanda del cliente es mayor que la capacidad del transporte (Chen *et al.*, 2017).

El problema consiste en encontrar un conjunto de rutas de vehículos que sirvan a todos los clientes, de modo que la suma de las cantidades entregadas en cada recorrido no exceda la capacidad de un vehículo y se minimice la distancia total recorrida (Golden *et al.*, 2008).

La diferencia entre este modelo con el VRP, es que se permite que el cliente pueda ser atendido por más de un vehículo, aquí podemos observar algunas restricciones del SDVRP:

$$\sum_i \sum_v x_{ijv} \geq 1 \quad j = 0, \dots, n \quad (2.8)$$

$$\sum_i x_{ipv} - \sum_j x_{pjh} = 0, \quad p = 0, \dots, n; v = 1, \dots, m. \quad (2.9)$$

$$y_{iv} = d_i \sum_j x_{ijv} \quad i = 1, \dots, m \quad (2.10)$$

$$\sum_i y_{iv} \leq d_i \quad i = 1, \dots, n \quad (2.11)$$

En este caso la restricción (2.8) establece que al menos un vehículo debe visitar a cada cliente, la (2.9) indica la conservación de flujos, la restricción (2.10) asegura la demanda de cada cliente, la restricción (2.11) garantizan la cantidad entregada por cada vehículo no exceda la capacidad máxima del camión (Archetti *et al.*, 2006).

Estos problemas tienen un patrón de entrega donde la cantidad de entrega es menor o igual a la capacidad del vehículo y llega a ser factible (Zhang *et al.*, 2015).

Estos problemas pueden reducir hasta un 50% de los costos de distribución, es un modelo más general porque las demandas de los clientes que son mayores que la capacidad del vehículo están permitidas (Khmelev y Kochetov, 2015).

2.6.2 VRP CON VENTANAS DE TIEMPO

El Problema de Enrutamiento de Vehículos con Ventana de Tiempo (VRPTW), cuenta con la restricción adicional de una ventana de tiempo asociada a cada clientes, donde se define un intervalo dentro del cual el consumidor debe ser atendido en el depósito (Medina *et al.*, 2011).

A continuación se presentan algunas restricciones de este modelo que no contempla el VRP clásico:

$$x_{ijk} (w_{ik} + s_i + t_{ij} - w_{jk}) \leq 0 \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in A \quad (2.12)$$

$$a_i \left(\sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} \right) \leq w_{ik} \leq b_i \left(\sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} \right) \quad \forall k \in K, \forall i \in N \quad (2.13)$$

$$E \leq w_{ik} \leq L \quad \forall k \in K, \forall i \in \{0, n+1\} \quad (2.14)$$

$$\sum_{i \in N} d_i \left(\sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} \right) \leq C \quad \forall k \in K \quad (2.15)$$

La restricción 2.12, 2.14 y 2.15, garantizan la factibilidad de la secuencia con respecto a condiciones de tiempo y capacidad, la restricción 2.13 indican la ventana de tiempo inicial y final del recorrido con los clientes (Cordeau y Soumis, 2000).

Es muy utilizado en la investigación de operaciones, porque se ha aplicado en diversas prácticas, por lo regular busca minimizar el tiempo de recorrido o el número de vehículos a utilizar en la operación.

El VRPTW es aplicado para entregas a supermercados, entregas bancarias, postales, recolección de basura industrial, enrutamiento de autobuses escolares, servicios de patrullas de seguridad y distribución de periódicos urbanos (Kallehauge *et al.*, 2005).

El objetivo de estos problemas es atender a todos los cliente sin violar las restricciones de capacidad del transporte y reducir las restricciones de ruta con un número mínimo de vehículos, para el mismo número de rutas con la distancia de viaje mínima, seguido por el mínimo tiempo total (Li y Lim, 2003).

2.6.3 PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO CON UAV

El modelo descrito por Ghadiri Nejad y Banar (2018) resuelve un problema de logística humanitaria, lo particular del estudio es la utilización de un transporte aéreo, en este caso es un helicóptero y un transporte terrestre, ambos cumplen con la demanda, donde procuran que la asignación sea estratégica con estos modos, por ello, es un modelo que se puede modificar para resolver el problema planteado en este trabajo de investigación, tal vez no aporte algunas características de drones pero es interesante como restringen el uso del transporte aéreo con algunos clientes.

Para el estudio de caso que menciona el artículo, generaron una red de 1,000 nodos que muestra la ubicación de los accidentes o la demanda de atención médica, y 50 ubicaciones que representan los hospitales con MATLAB, teniendo como resultado que la distancia de viaje total óptima es igual a 82180.55 unidades de distancia, incluyendo 44,925.34 para los helicópteros y el resto, que es 37,255.21 para las ambulancias. El tiempo de ejecución para este problema fue igual a 13.39 segundos.

Aboharba y Arikan (2017) propusieron un sistema de colaboración entre UAV y un Vehículo de Tierra no Tripulado (UGV). Utilizaron un VRP solucionándolo con el uso del algoritmo heurístico del vecino más cercano apoyándose con el software MATLAB. Como resultado final del estudio se determinó que el uso de drones es más rápido en tiempo promedio en comparación de un camión, donde dicha tecnología es más apropiada para el sistema de entrega que el camión regular.

Un enfoque homogéneo fue el de Dorling *et al.* (2017) ellos propusieron dos VRP de viajes múltiples para la entrega con esta tecnología emergente, uno minimizando los costos sujetos a un límite de tiempo de entrega y el segundo, minimiza el tiempo de entrega total sujeto a una restricción presupuestaria. Los autores recalcan que los VRP clásicos necesitan configuraciones de acuerdo a las características de los drones para que sean funcionales con este modo de transporte, la diferencia radica que no toma en cuenta con parámetros relacionados al camión debido que su ruta solo se centra en drones.

Wang *et al.* (2017), presentan un VRP, teniendo como objetivo minimizar la duración máxima de rutas. La variante utilizada es entrega y recolección (VRPD), ellos consideran que el uso de drones y camiones sería una práctica común, por lo tanto, empresas de Estados Unidos y de Europa consideran esta alternativa. En el estudio se presentan diversos teoremas donde cada uno contempla los ahorros que pueden obtener las organizaciones al implementar esta tecnología.

Poikonen *et al.* (2017) presentaron una mejoría al utilizar el modelo VRP basado en la variante del VRPD. Como objetivo de este estudio fue ampliar y fortalecer los resultados previos en su artículo haciendo énfasis en la importancia de los drones en industrias como Amazon, Google, DHL y Walmart. Demuestran el máximo beneficio teórico del modelo presentado en circunstancias ideales, tomando en cuenta una cantidad de drones con una velocidad a veces mayor a la de un camión, presentando ventajas prácticas importantes. Los autores exponen que los UAV regresan a la parte superior del camión para recargar o intercambiar sus baterías de forma instantánea, su objetivo principal es minimizar tiempos de entregas en la última milla.

Pugliese y Guerriero (2017) utilizaron el Problema de Enrutamiento de Vehículos (VRP) con ventanas de tiempos contemplando la entrega de paquetes entre drones y camiones, concluyendo que esta nueva modalidad da ventajas competitivas a las empresas, y el beneficio del uso de drones es relevante, estas restricciones de ventana de tiempos, son útiles para la formulación matemática que se plantea en este estudio,

lo importante es la consideración de las ventanas de tiempo para el servicio a los clientes, otros trabajos no los añaden y proponen un modelo exacto.

Dayarian y Savelsbergh (2017) proponen una nueva forma de explotar más esta tecnología en los sistemas de entrega donde proponen que los drones puedan reabastecer a los camiones de reparto en la última milla, por medio de un VRP y algoritmos. Este trabajo es muy diferente a los anteriores, debido que los drones cumplen con otras tareas de distribución, en este caso, al CEDIS móvil. Ellos encontraron como ventajas el ahorro de costos y viajes más rápidos que los vehículos tradicionales, debido que no están limitados por la red de carreteras y el congestionamiento del tráfico.

Mourello Ferrandez *et al.* (2016) en comparación con otros artículos, propusieron un algoritmo llamado “*K-means clustering*” para determinar la cantidad óptima de sitios de lanzamiento y ubicaciones que cuenten con los requisitos de entrega con UAVs y camiones. Redujeron los tiempos de envíos y determinaron que esta tecnología supera a los camiones en eficiencias energéticas cuando se entregan a 100 clientes en una distancia de 100 km^2 . El objetivo es diferente al trabajo que se está realizando, pero nos brinda otros enfoques que se le puede dar a estos vehículos para la entrega con paquetes.

El problema de enrutamiento con UAV puede ser visto con un TSP, como se ha descrito anteriormente, Mathew *et al.* (2015), aplicaron el TSP para optimizar las rutas de entrega mediante drones y un vehículo terrestre en áreas urbanas, el resultado fue la adaptación de un sistema heterogéneo de vehículos para entregas cooperativas en entornos urbanos como objetivo del estudio era optimizar las rutas de entrega mediante drones y un vehículo terrestre, utilizaron un TSP el resultado fue la adaptación de un sistema heterogéneo de vehículos para entregas cooperativas en entornos urbanos.

El trabajo de Murray y Chu (2015), es muy mencionado en problemas de este tipo, debido que ellos fueron uno de los primeros en enfocarse a rutas de entrega con transporte heterogéneo para entregas cooperativas en entornos urbanos, al introducirse nuevas variantes del TSP, la primera fue el FSTSP (problema del agente viajero volador) y la segunda, la programación en paralelo con drones TSP (PDS-TSP). Mejoraron los tiempos de entrega, se apoyaron de heurísticas para llegar a buenos resultados, donde el ruteo lo realizan con camiones y van integrando drones para mejorar las entregas, ellos no consideraron ventanas de tiempo.

Ponza (2016) se basó en el trabajo de Murray y Chu (2015), el aporte fue al momento de los recuentos de tiempos, de igual manera, la gestión del tiempo es más consistente y realista en comparación del trabajo anterior, el autor demuestra que el uso de drones permitirá ahorrar una cantidad considerable de tiempo al recorrer un conjunto de nodos, de tal forma que es viable para mejorar y optimizar la entrega de paquetes. Estos dos trabajos son diferentes al enfoque de la investigación debido que no consideran aspectos de distancia y se basan en el uso de heurísticas.

Ceña Arévalo (2017), ofrece un trabajo muy distinto a los que se analizaron previamente, porque no se enfoca en modelos matemáticos, presenta la viabilidad del uso de los drones en el sector logístico, haciendo el hincapié en la importancia del comercio electrónico y como esta tecnología puede ser útil para mejorar en temas de distribución. Este artículo contempla la relación costo-beneficio al implementar los drones en la logística de distribución, los cuáles son rentables para en el envío en empresas paqueteras.

El modelo descrito por Chang y Lee (2018) tiene como enfoque encontrar una ruta de entrega efectiva para camiones que transportan UAV, donde proponen un modelo de programación no lineal para encontrar pesos de cambio que muevan los centros de agrupamientos para lograr áreas más amplias de distribución con drones a lo largo de rutas de camiones más cortas después del agrupamiento inicial de *k-medias* y TSP (Problema del agente viajero) modelado.

La finalidad de ese estudio fue que se centraron en la búsqueda de una ruta de entrega efectiva para camiones con UAVs. Los autores concluyeron que es posible entregar paquetes de manera eficiente cuando se utilizan UAV además de camiones. Comentan que sería muy útil en áreas urbanas complejas donde ocurren envíos frecuentes, así como en áreas montañosas donde la entrega por camiones es difícil. A su vez, mencionan que es necesario desarrollar un modelo que refleje las restricciones de ventana de tiempo para cada ubicación de entrega.

Yoon (2018) presenta un TSP con Múltiples Drones, donde afirma que existe un ahorro del 30 % en escenarios realistas si se usa UAV, en este estudio se observa que se tienen restricciones de tiempo para crear una sincronización entre el UAV y el camión, la manera que se describe la función objetivo (costo en función del tiempo) es clave para nuestro trabajo porque es un enfoque muy similar al que pretendemos llegar. No añaden ventanas de tiempo pero consideran tiempos relacionados a sincronización entre ambos transportes y presentan un modelo exacto.

El problema planteado por Yoon (2018), ayuda a la estructuración del modelo, donde se planea enviar paquetes a las sucursales, donde se utilizará tanto drones y camiones. Las adaptaciones a considerar serían la limitación de la capacidad de cada transporte, definición del rango de entrega para los UAV, costos de envío, entre otros. Se contemplará la asignación de los transportes de acuerdo a sus características, la demanda específica para cada tipo de transporte y la definición de las sucursales aptas para recibir ambos medios de transporte.

Esta revisión de literatura sirve debido a que en el futuro esta tecnología puede tener un gran impacto, debido que grandes compañías hacen prueba para la entrega con UAV, al leer estos artículos se aprecia que el uso de camiones con drones favorecería de gran medida para la entrega de paquetes.

Si bien el TSP o el VRP son utilizados para las rutas se deben tomar en cuenta consideraciones específicas de esta tecnología emergente en las restricciones y parámetros, analizando todos los casos se pueden mencionar la consideración de

la distancia máxima del *tour* de los drones, la duración de las baterías, el peso máximo que pueden transportar, precio del uso de los UAVs, velocidad de los viajes de los UAVs, duración de los trayectos, entre otros. Actualmente los modelos clásicos no contemplan todas estas características, por ello, se deben adaptar para que sea funcional al incluir esta tecnología.

Al revisar cada metodología propuesta en los trabajos descritos con anterioridad, se considera el uso de un *TSP-MD*, este contempla múltiples drones para realizar las entregas, el modelo descrito por Yoon (2018), permitirá que se pueda tomar como base para proponer un modelo que cumpla con las características que queremos cumplir.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

En este capítulo se aborda la metodología para proponer una solución a los problemas de ruteo con sistemas aéreos no tripulados, con el fin de cumplir con el objetivo de minimizar el costo de trayecto por cada vehículo. Se busca encontrar los mejores resultados al momento de hacer el ruteo entre drones y camiones para entregar paquetes de un punto a otro, es importante considerar parámetros y restricciones específicas para el uso de UAVs de tal manera que pueda ser eficiente, el modelo permitirá facilitar la toma de decisiones para la entrega de productos.

Como se explicó en el capítulo de introducción, se basó en un diagrama de flujo para realizar la formulación matemática, dónde se señala paso a paso la construcción del modelo. A su vez se especifica que realizar cuando se cumple con la formulación, si llega a ser válido en las experimentaciones; se pasa al caso de estudio o resultados finales, si no es válido; se regresa a la reformulación.

El modelo minimiza el costo por trayecto en función del tiempo, logrando una ruta que tenga en cuenta múltiples UAVs. Por ende, el presente capítulo detalla la formulación del modelo matemático, explicando su funcionalidad y ventajas para su aplicación.

3.1 SUPUESTOS

Se considera que el sistema se base en los siguientes supuestos para garantizar los resultados del modelo.

- Los UAVs están limitados a un tiempo y distancia de vuelo.
- La demanda de los productos será de forma aleatoria para la experimentación en particular.
- El rubro de los costos de cada transporte son muy diferentes y están categorizados de forma distinta.
- La capacidad de carga y la distancia máxima son muy diferentes en cada uno de los drones.
- Los productos poseen una diversidad de peso.
- Hay productos muy pesados que no podrán enviarse por vía UAV.
- Los drones son autónomos (no se consideran costo de labor).
- Los tiempos y distancia recorrida de los UAVs son diferentes a la del camión.

3.2 CONJUNTOS

- I : conjunto de tipo de paquetes, $i \in I$
- L : conjunto de tipo de vehículos, $l \in L$
- K : conjunto de clientes, $k \in K$

3.3 PARÁMETROS

p_i : peso de los tipos de productos i .

d_{ik} : demanda del tipo de producto i a los clientes k .

a_{jkl} : distancia del centro de distribución j al cliente k en el vehículo l .

$dist_l$: distancia máxima permitida de los UAVs $l \{l_2...l_5\}$.

b_l : capacidad de los vehículos l .

tt_{jkl} : tiempo de viaje del centro de distribución j a cada arco de los clientes k por el transporte l .

t_l : tiempo máximo permitido de los UAVs $l \{l_2...l_5\}$.

tc_{jkl} : tiempo de viaje para cada arco del centro de distribución j al cliente k en el camión $l \{l_1\}$.

td_{jkl} : tiempo de viaje para cada arco del centro de distribución j al cliente k en los UAVs $\{l_2...l_5\}$.

s_j : tiempo duración del servicio para cada cliente j .

uu_j : tiempo de inicio del servicio en el cliente j .

v_j : tiempo de cierre del servicio en el cliente j .

c_l : costo de electricidad de los UAVs $l \{l_2...l_5\}$.

cc_l : costo de operación del camión $l \{l_1\}$.

f_l : costo fijo del transporte l .

M : representa un número muy grande.

3.4 VARIABLES

$$x_{jkl} = \begin{cases} 1, & \text{si se mueve un paquete } i \text{ de } j \text{ a } k \text{ en el vehículo } l. \\ 0, & \text{si no.} \end{cases}$$

$$y_l = \begin{cases} 1, & \text{si es asignado el vehículo } l \\ 0, & \text{si no.} \end{cases}$$

w_{ijkl} : cantidad de paquetes i que se moverán de j a k en el vehículo l .

u_{kl} : orden de visita al cliente k en el vehículo l .

r_{jl} : inicio del tiempo de servicio en el el cliente j en el vehículo l .

3.5 MODELO MATEMÁTICO

$$\text{mín} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{l=1} c_l t_{c_{jkl}} x_{ijl} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L - \{1\}} c_l t_{d_{jkl}} x_{ijl} + \sum_{l \in L} f_l y_l \quad (3.1)$$

La función objetivo minimiza el costo por trayecto de cada vehículo 3.1.

3.5.1 RESTRICCIONES

$$\sum_{j \in J} \sum_{l \in L} w_{ijkl} \geq d_{ik} \quad \forall i, \forall k \quad (3.2)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} w_{ijkl} p_i \leq b_l \quad \forall l \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} w_{ijkl} \leq M_l y_l \quad \forall l \quad (3.4)$$

$$\sum_{i \in I} w_{ijkl} \leq M_2 x_{jkl} \quad \forall j, \forall k, \forall l \quad (3.5)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{jkl} tt_{jkl} \leq t_l \quad \forall l \in L - \{l_1\} \quad (3.6)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{jkl} a_{jkl} \leq dist_l \quad \forall l \in L - \{l_1\} \quad (3.7)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{jkl} \leq y_l \quad \forall l \quad (3.8)$$

$$u_{jl} - u_{kl} + \|K\| x_{jkl} \leq \|K\| - 1 \quad \forall j, \forall k, \forall l \quad (3.9)$$

$$\sum_{j \in J} x_{jkl} \leq 1 \quad \forall k, \forall l \quad (3.10)$$

$$\sum_{k \in K} x_{jkl} \leq 1 \quad \forall j, \forall l \quad (3.11)$$

$$\sum_{k \in K} x_{kjl} = \sum_{k \in K} x_{jkl} \quad \forall j, \forall l \quad (3.12)$$

$$r_{jl} + s_j + tt_{jkl} - r_{kl} \leq (1 - x_{jkl})M_l \quad \forall j, \forall k, \forall l \quad (3.13)$$

$$r_{jl} \geq uu_j \sum_{k \in K} x_{jkl} \quad \forall j, \forall l \quad (3.14)$$

$$r_{jl} \leq v_j - s_j \sum_{k \in K} x_{jkl} \quad \forall j, \forall l \quad (3.15)$$

$$w_{ijkl}, u_{jl}, r_{kl} \geq 0 \quad \forall i, \forall j, \forall k, \forall l \quad (3.16)$$

$$y_l, x_{jkl} \in \{0, 1\} \quad \forall j, \forall k, \forall l \quad (3.17)$$

La restricción 3.2 satisface la demanda de los clientes, la restricción 3.3 asegura que no se sobrepase la capacidad de los vehículos, la restricción 3.4 asegura que no se mande un producto sino se ocupa el vehículo asignado, la restricción 3.5 indica si se utiliza el vehículo para el recorrido al enviar un producto, la restricción 3.6 asegura que el tiempo del recorrido de los UAVs no exceda de su tiempo máximo permitido, la restricción 3.7 asegura que no se sobrepase la distancia máxima permitida de los drones, la restricción 3.8 si se manda un producto, entonces se manda el vehículo asignado, la restricción 3.9 es la eliminación de *subtours*, la restricción 3.10 asegura que cada transporte solo pueda entrar una vez a cada nodo, la restricción 3.11 asegura que cada transporte solo pueda salir una vez a cada nodo, la restricción 3.12 indica la conservación de flujo, la restricción 3.13, 3.14 y la 3.15 garantizan la factibilidad de la secuencia con respecto a condiciones de tiempo, la 3.16 y 3.17 son las restricciones lógicas y de estados.

M_1 y M_2 son números grandes, por lo tanto:

$$M_1 = \text{mín} \{b_l, d_{ik}\}$$

$$M_2 = \text{máx} \{w_{ijkl}\}$$

En el siguiente capítulo se detalla a profundidad el caso de estudio empleado para validar la formulación planteada, por lo tanto, se emplea el modelo matemático para ver su comportamiento conforme a los datos del estudio.

CAPÍTULO 4

CASO DE ESTUDIO

En este capítulo se explica el caso de estudio donde se aplicó el modelo matemático propuesto, en este caso, se contempló una infraestructura educativa para realizar la entrega de productos de oficina, de tal manera se cumpliera con la demanda de sus facultades dentro del campus, la cuál su distribución es manual, donde todo se debe ir a buscar al centro de distribución.

El caso de estudio se realizó en la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) como se muestra en la figura 4.1, esta cuenta con diversos campus, en esta ocasión se eligió el campus de Ciudad Universitaria, debido que es el que contempla el mayor número de facultades.



Figura 4.1: Campus de Ciudad Universitaria

Ciudad Universitaria esta ubicada en el municipio de San Nicolás de los Garza, Nuevo León. Esta cuenta con $994,723.77 m^2$ de extensión, y cuenta con 11 facultades como son:

1. Facultad de Trabajo Social y Desarrollo Humano (FTSYDH)
2. Facultad de Contaduría Pública y Administración (FACPYA)
3. Facultad de Filosofía y Letras (FFYL)
4. Facultad de Derecho y Criminología (FACDYC)
5. Facultad de Arquitectura (FARQ)
6. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME)
7. Facultad de Ingeniería Civil (FIC)
8. Facultad de Ciencias Químicas (FCQ)

9. Facultad de Ciencias Físico Matemáticas (FCFM)
10. Facultad de Organización Deportiva (FOD)
11. Facultad de Ciencias Biológicas (FCB)

Cada facultad ocupa diversos artículos de oficina, por ende, cuentan con un almacén para recibirlos, la universidad tiene ubicado su centro de distribución a lado del centro acuático, este se encarga de abastecer cada almacén de las facultades, además se contemplaron otras 29 dependencias como fueron: Capilla Alfonsina, Rectoría, la Unidad “B” de Ciencias Biológicas, Dirección de Tecnologías de la Información (DTI), Librería Universitaria, Centro de idiomas, Departamento de becas de la UANL, Biblioteca “José Alvarado”, Gimnasio “Luis Eugenio Todd”, Polideportivo de la FIME, Biblioteca “Ing. Guadalupe Cedillo”, Dirección General de Deportes (DGD), Centro de Innovación y Diseño, Centro de Investigación de Tecnología Jurídica y Criminológica (CITEJYC), Secretaría Académica, Escolar FACPYA, Subdirección de Proyectos Especiales, Instituto de Biotecnología de la FCB, Laboratorio de Química industrial, Gimnasio “Ing. Gayetano Garza”, Edificio 4 de la FIME, Auditorio “Víctor Gómez”, CEDEEM y Posgrado FACPYA, Auditorio “C.P. Rodolfo Garza”, Centro de Internalización de la UANL, Auditorio “Gumerindo Cantú”, CAADI FACPYA, Farmacia Universitaria, y el Centro de Educación Digital y Emprendimiento.

A continuación se presentan datos relevantes del caso de estudio:

- Facultades: cada facultad se considera como clientes, estos se le deben de satisfacer conforme a su demanda en el campus de ciudad universitaria, por ello, se tomó en cuenta sus ubicaciones dentro de la universidad, sumando en total 40 clientes al incluir las instancias antes señaladas, de igual manera hay un centro de distribución que queda a un lado del Centro Acuático de la Universidad.
- Productos: se maneja un gran variedad de productos de oficina, estos son requeridos en cada facultad, la demanda de estos productos para este caso en

particular se manejará de forma aleatoria para abastecer a los clientes, los pesos relacionados a estas mercancías están entre los 0.1 kg hasta los 23 kg, cabe señalar que los productos son aptos para ser transportados por camión o UAV, así sea el caso.

Según el catálogo de la universidad se contempla 120 artículos de oficina, en la gráfica 4.2 se observa que el porcentaje más alto en cuanto a peso es para los productos chicos con un 95% con pesos netos de 0.1 kg hasta 3 kg, se consideran pequeños porque son los más aptos para enviarse por drones, luego los medianos con un 3.3% con un peso neto de 4.71 kg hasta 12 kg y los grandes con un 1.7% con un peso neto de 14 kg hasta 23 kg.

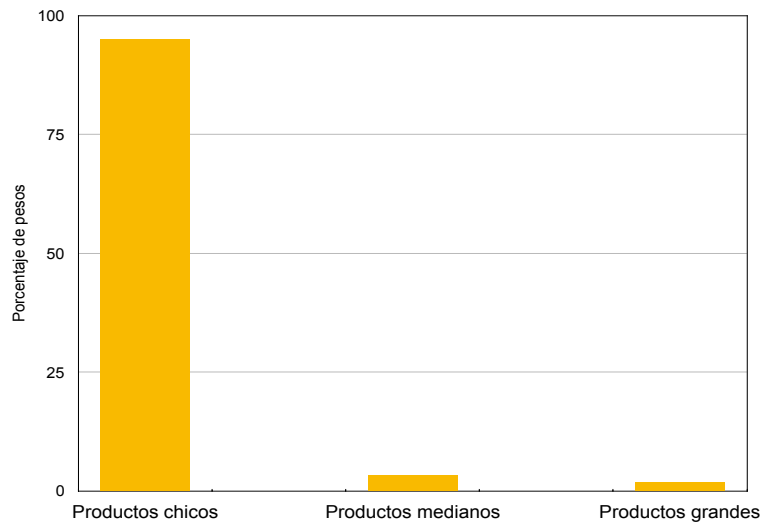


Figura 4.2: Porcentaje de peso de los productos

- Transporte: se contemplaron 5 vehículos, en este caso fue un camión que en el modelo matemático está denominado como (l_1) y 4 drones categorizados como (l_2-l_5) , la elección de estos UAVs se basó en la revisión de literatura, debido que son los más frecuentes y los más capaces para realizar tareas de distribución, de igual forma, estos cuentan con una previa autorización de la Administración Federal de Aviación, que es el entidad encargada para el uso de los UAVs.

Las características de cada uno la podemos en la figura 4.3, dónde cada transporte posee diferente cantidad de peso de carga para enviar un producto.

| Vehículos | | Carga máxima | Distancia máxima |
|---------------|------------------|--------------|------------------|
| Drones | Matternet M2 | 2 kg | 20 km |
| | Amazon dron | 2.3 kg | 16 km |
| | Geodrone | 3 kg | 20 km |
| | DHL parcelcopter | 2kg | 8.3 km |
| | Jingdong dron | 15 kg | 25 km |
| Camión | Renault Kangoo | 750 kg | - |

Figura 4.3: Transporte de carga

- Distancias y tiempos: para ejemplificar el caso se realizó el cálculo de las distancias y de los tiempos del centro de distribución a los clientes y entre cada uno de los nodos, se utilizó una herramienta de *Google Maps* llamada “*Calc-Maps*” para calcular la distancia y los tiempos relacionados a los UAVs, para el camión se utilizó “*Google Maps*” para ambos parámetros, se destaca que el tiempo y distancia entre los camiones y los drones son muy diferentes, por ello, el cálculo de estos dos parámetros es variado entre ambos vehículos.

La distancia que máxima permitida de los 4 drones (16 km, 20 km, 20 km y 25 km) con un tiempo permitido de vuelo de 30 minutos (Ceña Arévalo, 2017).

Se pretende cumplir con la distribución de estos artículos para satisfacer de forma adecuada el servicio entre almacenes. Una cierta parte de los paquetes podrán ser enviados por UAVs y otras por medio de camiones, la asignación de los artículos será estratégica para cumplir con la demanda de las facultades en la UANL.

CAPÍTULO 5

EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

En este capítulo se detalla el análisis de los experimentos y los resultados del modelo matemático ejecutado en el software GAMS usando CPLEX, los resultados finales constan de una comparativa de acuerdo a la entrega tradicional para observar las ventajas de una tecnología emergente en la cadena de suministro y su aporte en el proceso de distribución.

Los experimentos se realizaron en el paquete informático CPLEX GAMS con la versión 25.1.3 en una Mac Air con un procesador Intel Core i5 1.4 GHz y una memoria de 4 GB.

El modelo matemático se experimentó bajo diversas pruebas para ver su comportamiento en distintos escenarios.

Para realizar los experimentos se tomaron en cuenta los datos de la demanda, en este caso fueron generadas por Excel de forma aleatoria siguiendo una probabilidad uniforme, se consideró una demanda aleatoria generada por Excel (probabilidad uniforme), se crearon 7 escenarios que fueron conformados por diferentes categorías de paquetes, como se observa en la tabla 5.1.













| Escenarios | Tamaño de paquetes | | |
|-------------|---|---|--|
| | Chicos | Medianos | Grandes |
| Escenario 1 |  | | |
| Escenario 2 | |  | |
| Escenario 3 | | |  |
| Escenario 4 |  |  |  |
| Escenario 5 | |  |  |
| Escenario 6 |  | |  |
| Escenario 7 |  |  | |

Tabla 5.1: Generación de escenarios por categorías de paquetes

Después de haber definido cada escenario, se consideraron 6 tamaños de instancias (4, 8, 12, 20, 30 y 40 clientes) estos fueron agrupados en distintos grupos tomando en cuenta diferentes facultades y departamentos de la UANL. Por lo tanto, se realizaron combinaciones entre los 40 clientes divididos en 6 grupos para realizar los experimentos en cada instancia.

Estos tamaños se experimentaron 12 veces en cada grupo al tomar en cuenta los 3 tipos enfoques como son el: tradicional, el moderno y el moderno mixto (ver figura 5.1) respectivamente.

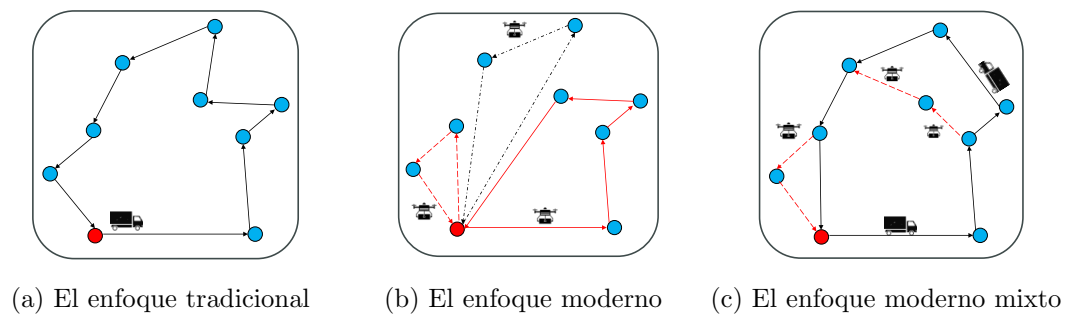


Figura 5.1: Modos de transporte para entregas de paquetes

El enfoque tradicional (5.1a) se refiere al uso de un camión para cumplir con la demanda de los clientes sin tomar en cuenta otro modo de transporte, el enfoque moderno (5.1b) es cuando se usa una tecnología emergente para realizar entregas y el último enfoque (5.1c) es una combinación de ambos modos de transporte.

Estos grupos fueron tomados en cuenta para ver el comportamiento de los escenarios, donde en cada uno se obtuvieron distintos resultados, debido que se fueron cambiando la cantidad y tipos de clientes.

Se definieron 2 tipos de costos, el primero denominado función objetivo “A” hace énfasis al costo si se utiliza solo el camión para la entrega, y el “B” es aquel donde se implementa el uso de drones para la entrega de paquetes.

5.1 ESCENARIO 1

El escenario 1, se experimentó con los 36 grupos antes señalados, tomando en cuenta las 6 instancias de clientes, se analizaron 2 tipos de costos, un costo con el enfoque tradicional (el uso del camión) y un costo relacionado a los otros dos enfoques (moderno y el mixto) posteriormente se calculó el porcentaje de ahorro.

Uno de los resultados de ruteo se puede ver en la figura 5.2, de manera visual se observa la diferencia que se obtuvo en el grupo 2 perteneciente a la instancia de 4 clientes al usar un enfoque tradicional y un enfoque moderno, en este caso, fue necesario el uso de 4 drones para cumplir con la demanda, un dato importante es que esta tecnología no necesita de una carretera para sus rutas, mientras que el camión tiene que realizar una ruta más larga que los drones debido al tráfico vehicular y a la infraestructura que necesitan para el recorrido.

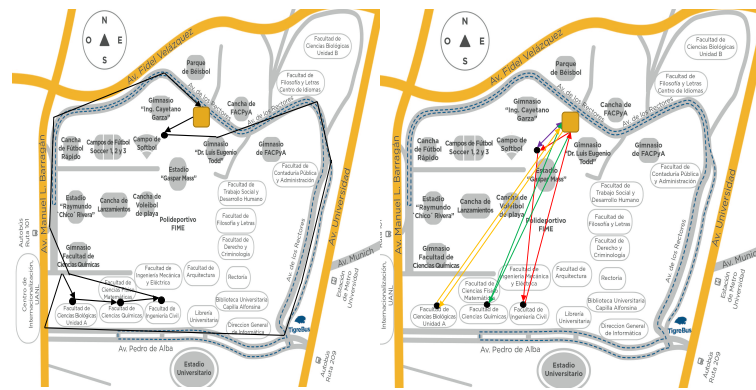


Figura 5.2: Ruta tradicional vs ruta con 4 drones en el escenario 1

Los UAVs realizaron un recorrido tipo estrella, por lo tanto, sus entregas fueron rápidas y flexibles al entregar paquetes, estos vehículos realizan rutas en línea recta siempre y cuando la infraestructura sean las idóneas, por ende, el costo de trayectoria fue mucho menor que al usar camión.

Cabe señalar que en este escenario los productos que se transportaron fueron pequeños, por ello, hubo una gran participación en el uso de drones, pero al incluir más clientes el porcentaje de ahorro disminuyó, en la tabla A.1 se muestra una comparación económica de los enfoques manejados para este caso de estudio.

El grupo 6 perteneciente a la instancia de 4 clientes presentó el mejor ahorro en su categoría con un ahorro de un 98.4%, este ahorro es alto porque se obtuvo un enfoque moderno, al compararlo con el grupo 36 de la instancia de 40 clientes el mayor porcentaje fue de 26.93%, el ahorro baja considerablemente debido que al aumentar los clientes se disminuye el uso de drones, la ruta fue mediante un enfoque moderno mixto.

El mayor ahorro se tiene en la instancias que consideran pocos clientes (de 4 a 12 clientes), cabe destacar que la mayoría de los paquetes de oficinas pueden enviarse por drones.

5.2 ESCENARIO 2

En este escenario se manejaron productos medianos, estos representan el 3.3% de su categoría, cabe señalar que todos los productos pueden enviarse solo en el dron (l_5), pero solo uno podía enviarse máximo 3 veces, mientras los otros productos solo una vez.

En la figura 5.3, se observa la diferencia entre el enfoque tradicional y el enfoque moderno mixto, donde hubo un ahorro de \$110.76 pesos, y el dron entregó productos a FACPYA, FCFM y FIC.

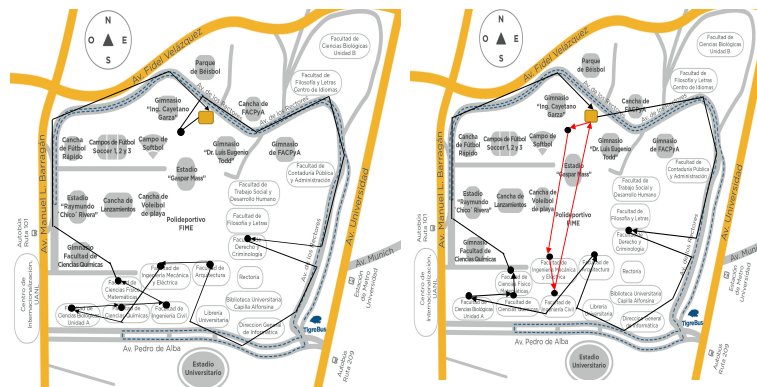


Figura 5.3: Ruta tradicional vs ruta mixta en el escenario 2

El ruteo que realizó el dron facilitó la trazabilidad del camión, debido que el UAV fue asignado a 3 clientes y por lo tanto, no fue necesario ir a tal punto de entrega, agilizando la visita al mandar a un dron.

En la tabla A.2, se encontró que el ahorro mínimo en la instancia de 4 clientes fue de un 38.12% pero al evaluar la ruta con 30 clientes solo se tiene ahorro un 0.09%, esto se debe que al tener más clientes el dron puede servir a un único cliente.

En el mejor de los casos se presenta un ahorro del 62.72% al considerar pocos clientes, también se analizó que al tener poca demanda de estos productos el porcentaje de ahorro aumenta.

5.3 ESCENARIO 3

Estos productos representan el 1.7% de los paquetes en su categoría, solo hay un producto que se puede enviar por dron (en este caso en el (I_5)) con la diferencia que se puede enviar solo una vez.

En la figura 5.4, se hace una comparativa de un ruteo mixto, considerando al grupo 18, donde un UAV fue asignado a FCB, en este caso fue al cliente más lejano.

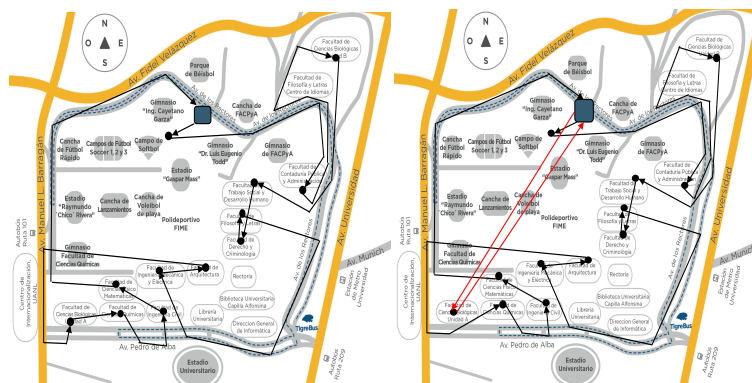


Figura 5.4: Ruta tradicional vs ruta mixta en el escenario 3

De acuerdo a la tabla A.3, se desglosa los ahorros obtenidos al contemplar solo productos grandes, donde en el mejor de los casos se puede tener un ahorro del 21.61%, el peor de los casos fue cuando no es asignado drones debido que no fue conveniente su participación, por ende, no se presentaron ahorros.

Este escenario presenta poco porcentaje de ahorro debido a la magnitud de los pesos de los paquetes, cabe señalar que fueron 9 grupos donde el modelo no asignó drones y se optó por el uso del camión.

El porcentaje de ahorro es mucho menor que los otros dos escenarios anteriores, debido que los productos son menos frecuentes para enviarse con esta tecnología pero a pesar de eso se observaron ahorros mínimos.

A pesar de que los productos son pocos frecuentes para enviarse por UAVs, se siguen presentando ahorros aunque son mínimos.

Posteriormente se estudió cuatro escenarios considerando productos mixtos.

5.4 ESCENARIO 4

En este escenario se tienen en cuenta todos los productos con distintos pesos, donde se presenta una mejora máxima de un 56.02% en mejora de los costos logísticos, esta fue encontrada al entregar a cuatro clientes en el grupo 3.

De acuerdo a la tabla A.4, se desglosa los ahorros obtenidos al contemplar todos los productos, se puede observar como va cambiando el porcentaje de ahorro conforme a las instancias. Los ahorros que se encontraron abarca de un 0.01% hasta un ahorro de un 56.02%.

En la figura 5.5, se observa la diferencia de ruteo en el grupo 10, donde un UAV fue asignado a 3 clientes, debido que los productos fueron aptos para este ruteo.

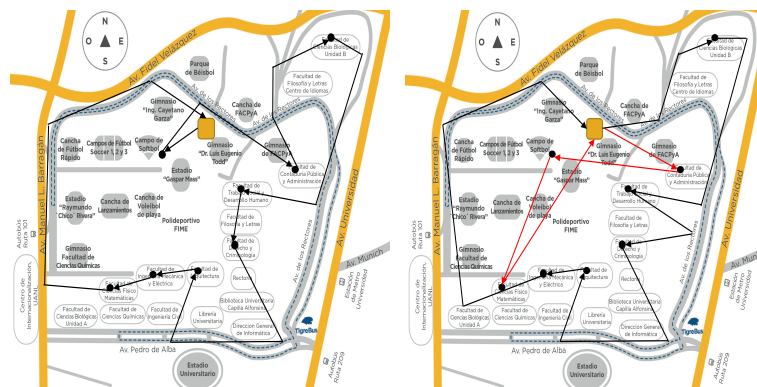


Figura 5.5: Ruta tradicional vs ruta mixta en el escenario 4

En el ruteo se alcanzó un ahorro de 33.34 %, por lo tanto, es importante entender que al hacer un ruteo mixto se tiene una mejora en la distribución.

5.5 ESCENARIO 5

De igual manera, se consideran productos mixtos pero con la particularidad que no se contemplaron los productos chicos, fue un escenario donde se obtuvo un porcentaje menor que a otras instancias debido a los tamaños de los productos.

En la figura 5.6, se puede observar la diferencia que se encontró en el grupo 13 al usar drones donde el ahorro fue de un 12.69 %.

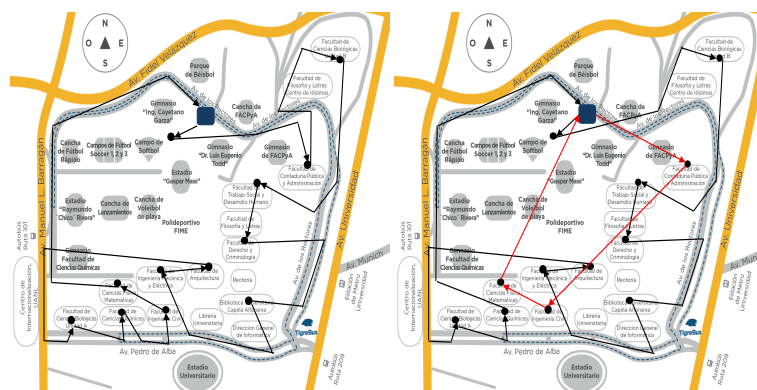


Figura 5.6: Ruta tradicional vs ruta mixta en el escenario 5

En la tabla A.5, se encontró que en el mejor de los casos se tiene un ahorro de \$81.36 pesos y un mínimo de \$1.12 pesos (instancia de 30 clientes).

5.6 ESCENARIO 6

En el escenario 6, se manejó productos chicos y grandes, dónde en la tabla A.6 se puede ver el comportamiento de entrega al considerar drones en el proceso de distribución, en la cuál el porcentaje de ahorro mínimo fue de un 0.03 %.

En la figura 5.7, el modelo matemático asignó 3 drones para el recorrido, de igual manera, se observa como se ajusta el enfoque tradicional al usar drones en el grupo 14.

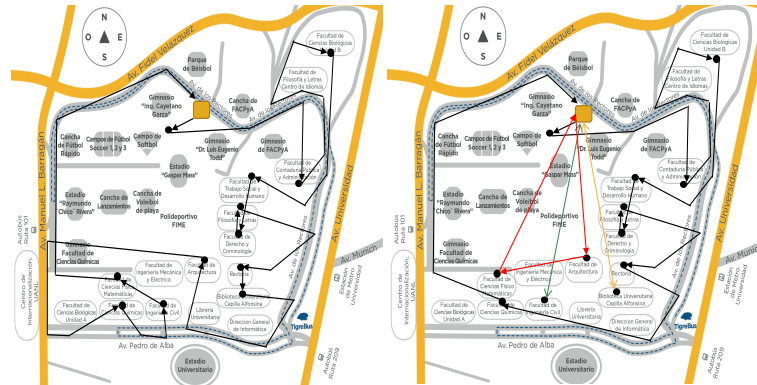


Figura 5.7: Ruta tradicional vs ruta mixta en el escenario 6

Analizando las instancias con pocos clientes se observa un porcentaje mínimo de 12.10% y un máximo de 56.92%, al considerar pocos clientes el porcentaje de ahorro es alto considerando los tamaños de paquetes (ver tabla A.6).

El ahorro total fue de \$2,051 pesos (suma de los 36 grupos), el modelo asignaba de manera estratégica entre ambas categorías de productos para la asignación de las rutas.

5.7 ESCENARIO 7

En el escenario 7, solo se consideró paquetes chicos y medianos, por lo tanto, podemos observar que los resultados de la experimentación en la tabla A.7 que en el peor de los casos se puede tener un ahorro de \$38.99 en instancias de pocos clientes, pero esta se reduce al considerar 40 clientes.

Todos los productos estaban categorizados para enviarse con drones, pero el camión elegía los más pesados para sus entregas dando un resultado promedio de ahorro de un 14.2% hasta un 20.21%.

En la figura 5.8, se puede observar la diferencia que se encontró en el grupo 6 al usar drones donde el ahorro fue de \$38.99 pesos.

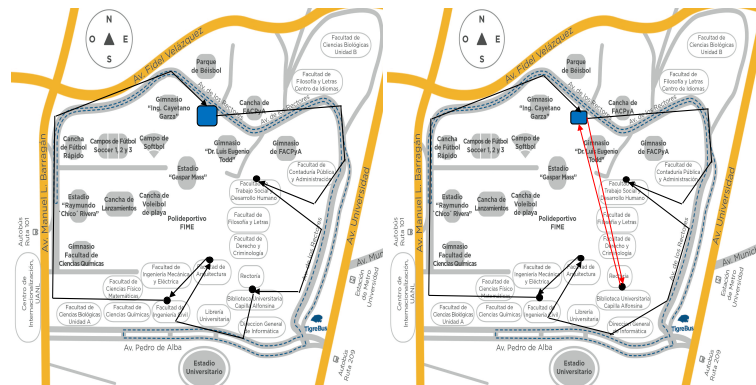


Figura 5.8: Ruta tradicional vs ruta mixta en el escenario 7

Cuando fue necesario usar los 4 drones y el camión el ahorro fue de un 10.47% para cumplir con la demanda de 20 clientes, este escenario presenta mejores resultados al tomar en cuenta 8 clientes, debido que con los grupos que se experimentó daba más opciones de poder usar UAVs.

Una vez realizado los experimentos, se lleva a cabo el análisis de los ahorros teniendo en cuenta los clientes, demandas y paquetes.

5.8 COMPARATIVA DE LOS 7 ESCENARIOS

Los 7 escenarios presentan diferentes ahorros debido a las variables que se contemplaron en cada uno, a continuación se presenta en la tabla 5.1 la comparación de ahorros dando énfasis a los ahorros mínimos, promedios y máximos de cada escenario.

| Escenarios | 4 clientes | | | 8 clientes | | | 12 clientes | | | 20 clientes | | | 30 clientes | | | 40 clientes | | | Costo promedio total |
|-------------|------------|------|-----|------------|------|-----|-------------|------|-----|-------------|------|-----|-------------|------|------|-------------|------|-----|----------------------|
| | Min | Prom | Max | Min | Prom | Max | Min | Prom | Max | Min | Prom | Max | Min | Prom | Max | Min | Prom | Max | |
| Escenario 1 | 36% | 61% | 98% | 21% | 43% | 98% | 10% | 32% | 97% | 2% | 16% | 34% | 9% | 12% | 21% | 2% | 13% | 26% | 30% |
| Escenario 2 | 38% | 47% | 63% | 11% | 22% | 34% | 0.7% | 6% | 13% | 0.5% | 5% | 11% | 0.09% | 1% | 2% | 0.6% | 1% | 2% | 13% |
| Escenario 3 | 17% | 20% | 22% | 0% | 9% | 12% | 0.4% | 2% | 10% | 0.01% | 1% | 4% | 0% | 0.2% | 0.5% | 0% | 0% | 0% | 5% |
| Escenario 4 | 18% | 28% | 56% | 11% | 23% | 36% | 0.3% | 10% | 22% | 0.01% | 6% | 24% | 2% | 6% | 11% | 5% | 11% | 17% | 14% |
| Escenario 5 | 18% | 24% | 39% | 9% | 16% | 22% | 0.7% | 8% | 13% | 0.3% | 2% | 4% | 0.2% | 0.9% | 2% | 0.2% | 0.7% | 1% | 9% |
| Escenario 6 | 18% | 32% | 57% | 13% | 22% | 25% | 12% | 20% | 32% | 0.03% | 9% | 14% | 2% | 7% | 17% | 1% | 9% | 25% | 16% |
| Escenario 7 | 18% | 20% | 22% | 10% | 21 | 32% | 11% | 14% | 25% | 1% | 9% | 11% | 0.3% | 4% | 10% | 1% | 8% | 12% | 12% |

Tabla 5.2: Comparación entre escenarios

El escenario 1 presenta el mayor ahorro en comparación de los otros escenarios, esto se debe porque este escenario considera paquetes pequeños cabe señalar que todo estos paquetes pueden enviarse por dron, también se observa que hay un ahorro máximo y un ahorro mínimo, esto cambia dependiendo de la cantidad de clientes, por las demandas generadas por cada uno de los clientes y esto implica la participación que pueden tener estos vehículos para ser asignados.

Por lo tanto, en el estudio se encontró un porcentaje de ahorro promedio de un 30% para este porcentaje fue conveniente realizar pruebas con distintos tamaños de clientes, podemos indicar que es un porcentaje considerable al tomar en cuenta la participación de estos paquetes en la universidad.

El escenario 2 presenta un ahorro de un 13% este porcentaje se da de acuerdo que son productos medianos donde todos estos pueden enviarse por drones aunque solo un dron esta capacitado para cumplir con las entregas con estos paquetes.

En el escenario 3 se observa como se disminuye el porcentaje de ahorro, el promedio de ahorro fue de un 5%, porque solo un producto podía enviarse con esta tecnología, en diversos grupos no se presentó un ahorro debido que no era factible mandar drones para cumplir con las entregas, por lo tanto, se dio cuenta que al contemplar 40 clientes no era funcional usar esta tecnología considerando estos tamaños de paquetes. Esto da como ejemplo que entre más pequeños sean los paquetes hay más porcentaje de ahorro.

En el escenario 4, se contemplaron todos los tamaños de paquetes donde los paquetes pequeños se enviaban regularmente con drones para entregar a los puntos de entrega, los ahorros representan casi la mitad de lo que se obtuvo en el primer escenario con 14 %.

En el escenario 5, el porcentaje de ahorro fue de un 9%, su porcentaje fue disminuyendo conforme se fueron añadiendo más clientes, se puede señalar que este escenario es más beneficioso que el escenario 3 que solo contempla productos grandes.

En el escenario 6, presenta un ahorro de un 16 %, siendo un buen resultado en comparación de los últimos 4 escenarios, logró un buen porcentaje porque sus ahorros promedios fueron más constantes que otros escenarios, cabe señalar que los productos grandes eran enviados por camión y los chicos por drones.

En el escenario 7, hubo un ahorro del 12 % esto fue porque a veces el modelo asignaba a los productos medianos enviarse por drones (dependiendo de la demanda y el cliente), y se reducía su participación con las demás dependencias de la UANL.

A continuación se observa el orden de los resultados conforme al porcentaje de ahorro obtenido en las experimentaciones, la gráfica 5.9 muestra los ahorros promedios por cada instancia de cliente.

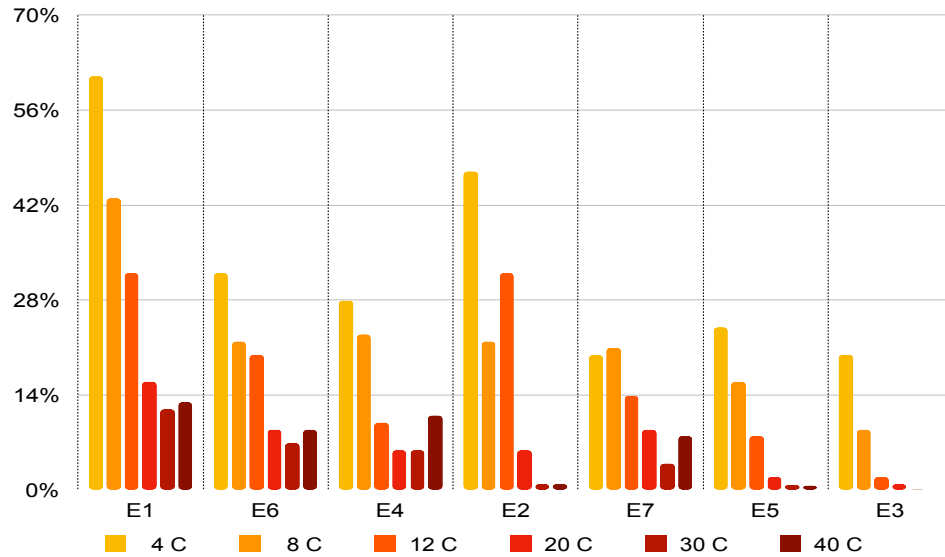


Figura 5.9: Resultados de los escenarios

Analizando las instancias con pocos clientes (4, 8 y 12 clientes) en el escenario 1 se presentan ahorros promedios desde un 32 % hasta un 61 %, al agregar más puntos de entrega el porcentaje tiende a bajar en la mayoría de las veces, al considerar 20 clientes el porcentaje de ahorro promedio disminuye a un 16 %, se observó que al tomar en cuenta cantidades de clientes altos (30 y 40 clientes) la tendencia es entre un ahorro del 12 % al 13 % con paquetes pequeños.

En las primeras instancias de clientes el escenario 1 presentó ahorros promedios de más del 30 %, y las otras instancias se redujeron a la mitad de estos ahorros, la ventaja de este escenario es que los drones estaban aptos para enviar cualquier producto, por ende, comprueba que el uso de UAVs es más barato que el enfoque tradicional y que se pueden tener ventajas logísticas en la entrega de paquetes.

El segundo mejor escenario es el 6, se identificaron ahorros entre un 20 % al tomar en cuenta pocos clientes, después de incrementar la cantidad de clientes los ahorros fueron disminuyendo a la mitad pero sin mucha diferencia entre las últimas instancias, en la instancia de 4 clientes el enfoque moderno mixto obtuvo buenos resultados.

El mejor tercer escenario es el 4, se puede ver en la gráfica que las ultimas instancias se mantuvo casi el mismo nivel de ahorro, logrando un mejor resultado que el escenario 2 que al considerar 20, 30 y 40 clientes se tiene menos participación del uso de drones.

Los UAVs en el proceso de distribución ofrecen beneficios económicos, como es en su rápido tiempo de entrega que es mucho menor que a la de un camión, revisando los escenarios se puede señalar que el mejor panorama fue el escenario 1, posteriormente a ello se encuentran los escenarios 6 y 4 que usan igual estos paquetes combinado con otros tamaños.

En las experimentaciones también se analizó el CO2 en las rutas, según INECC (2019) describe que el camión empleado en los experimentos genera 255 g/km de dióxido de carbono, se realizó una comparativa del kilometraje ahorrado al usar drones, la comparativa se presenta en la gráfica 5.10.

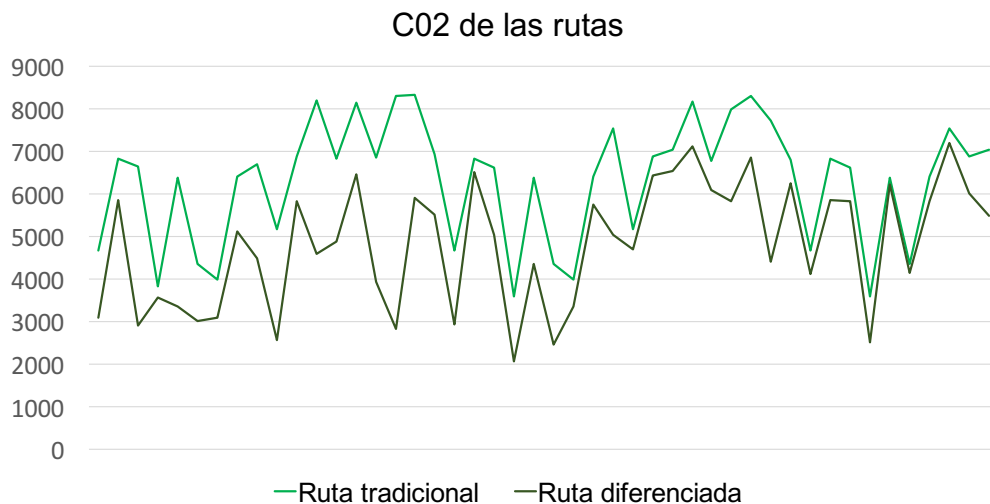


Figura 5.10: Ruta tradicional vs ruta diferenciada de CO2

Partiendo de las instancias 20, 30 y 40 clientes, se obtuvo un recorrido de 1143.1311 km, mientras que usando drones disminuyó a un 871.982, donde la diferencia radica en 271.1491 km, el uso de drones permitió que se disminuyera los kilómetros recorridos del camión, analizando este factor entonces el CO₂ que se ahorro fue de 69,143.021 g/km.

El objetivo del estudio fue diseñar un ruteo óptimo al considerar una tecnología emergente en el proceso de distribución en la UANL utilizando los 3 enfoques de ruteo, los ahorros presentados cambian de acuerdo con el número de clientes y sus demandas.

De las ventajas que se analizaron también está el uso de drones que pueden disminuir los kilómetros recorridos del camión, logrando un impacto ambiental al reducir el CO₂, en las experimentaciones realizadas se obtuvo un buen resultado en este factor ambiental, en sí estos vehículos ofrecen diversos beneficios y en este trabajo se vieron reflejados al realizar el análisis de ruteo.

De acuerdo a la experimentación se llega a la conclusión que se obtiene mayor ahorro considerando paquetes pequeños cabe destacar que la mayoría de los paquetes que necesita la universidad son de ese tamaño, los ahorros presentan mejores resultados en todos los escenarios al contemplar de 4 a 12 clientes así se observó durante la experimentación, por ello, se puede decir que cuando existan entregas urgentes lo más viable sería usar un dron para entregar cualquier producto de papelería que se necesite de un departamento a otro, finalizando que el uso de drones presentó ahorros en todos los escenarios.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Como bien se mencionó la cadena de suministro emplea una variedad de procesos, estos llegan a presentar diversos problemas, lo interesante que si un proceso no funciona de la manera correcta suele afectar a todos los demás, actualmente por el auge de las tecnologías hay diferentes herramientas que pueden solucionar estos problemas.

La industria 4.0 nos da la pauta de entender que las organizaciones deben usar tecnologías que les ayuden a mejorar de manera global en sus actividades logísticas, por ende, en este trabajo se visualizaron que tecnologías emergentes existen en la cadena de suministro y la elección de una de ellas para mejorar un proceso en la cadena de suministro.

Las tecnologías emergentes brindan grandes beneficios en la cadena de suministro, debido que son capaces de dar una mayor flexibilidad que el método tradicional empleado. En este caso se contempló el uso de UAVs en el proceso de distribución, porque se demostró que son una alternativa de solución porque ofrecen beneficios al disminuir costos y tiempos en este proceso e incluso dando agilidad a la cadena de suministro.

El uso de UAVs contamina menos que los camiones, esto impacta en la parte ambiental debido que hoy en día se observan grandes cantidades de contaminación

en ciudades muy urbanizadas, esta fue otra razón muy justificada para contemplar el uso de estos vehículos en la distribución de paquetes, al tener en cuenta todo esto en este trabajo se buscó disminuir el uso de los camiones de tal manera que se redujera el dióxido de carbono empleado por el camión, por ende, se eligió esta tecnología para que fuera participe en un diseño de rutas para la entrega de paquetes.

Para planificar estas rutas se propuso un modelo matemático basado en el TSP con Múltiples Drones (TSP-MD) para mejorar el servicio de entrega de paquetes entre las facultades del Campus de Ciudad Universitaria de la UANL, donde se observaron mejoras en cuanto al ruteo tradicional facilitando la trazabilidad de las rutas del camión y mejorando los costos operativos de las entregas.

Será importante monitorear de cerca los avances tecnológicos, regulatorios y operativos de estos Sistemas Aéreos No Tripulados, para que puedan usarse de manera recurrente en la distribución de paquetes o incluso en la de personas, en si es una tecnología que puede cambiar el ambiente logístico en las organizaciones.

6.1 CONTRIBUCIONES A LA LOGÍSTICA

Las contribuciones de este trabajo puede caracterizarse de la siguiente manera:

- Diseño de un ruteo que facilita la toma de decisiones en el proceso de distribución: la planificación de las rutas es importante en la logística, debido que si se logra un mal ruteo las empresas pueden presentar problemas económicos o incluso no cumplir con sus clientes, por lo tanto, se decidió enfocarse al diseño de un ruteo que pueda mejorar la toma decisiones al incluir una tecnología que contempla la I4.0.
- Disminución del congestionamiento vehicular al contemplar una tecnología emergente en la entrega de paquetes: la urbanización es un factor clave para las empresas, esto se debe que cada vez hay mucho tráfico en las ciudades

que poseen una gran cantidad de habitantes generando retrasos en las entregas de productos, por ello, se recalca la importancia de la incursión de un nuevo de transporte que tomé otra alternativa de medio para enviar paquetes de un punto a otro, en este caso se utilizó el uso de drones.

- Impacto ambiental: se reduce el dióxido de carbono al no usar solo camiones para cumplir con las entregas a los clientes, esto se logró combinando otro modo de transporte.
- El uso de un nuevo canal de distribución alineado a las nuevas tendencias de la industria 4.0 usando drones: la I4.0 ofrece tecnologías que pueden mejorar la logística, el uso de drones es una alternativa que funciona de gran manera en la distribución para disminuir las desventajas que ofrece el medio terrestre en la actualidad.
- Mejora en los costos de transporte al enviar paquetería mediante un ruteo mixto (camión y UAV) en las facultades: mediante la revisión de literatura y de las experimentaciones realizadas, se encontraron las mejoras en los costos operativos que contempla el proceso de distribución, otra premisa es de que no se toma en cuenta todos los rubros de costos que se utiliza para un camión, esta tecnología también tiene la premisa de que su vuelo es en línea recta y por lo tanto, su tiempo de respuesta en cuanto a entrega es mucho menor que el camión.

6.2 TRABAJO A FUTURO

Como desarrollo a futuro se considera proponer un ruteo tipo estrella para el uso de drones y así observar que beneficios pueden presentar y en que escenarios sería su potencial uso al tomar en cuenta este tipo de ruteo.

Modificar el modelo matemático de tal forma que el camión funcione como un CEDIS móvil, para ello, deben existir tiempos de sincronización entre ambos vehículos, los UAVs podrán recoger paquetes para entregarlos al cliente final, mientras que el camión reparte a otros distintos clientes, y así observar los resultados al tomar esta perspectiva de entrega.

APÉNDICE A

RELACIÓN DE COSTOS ENTRE
ESCENARIOS

| Clientes | Grupo de facultades | F.O “A” | F.O “B” | Ahorro | Vehículos empleados |
|-------------|---------------------|----------|----------|---------|-----------------------------------|
| 4 clientes | Grupo 1 | \$201.58 | \$81.98 | 59.3 % | Camión, 2 drones (l_2, l_5) |
| | Grupo 2 | \$203.65 | \$13.30 | 93.5 % | 4 drones (l_2, l_3, l_4, l_5) |
| | Grupo 3 | \$206.38 | \$119.58 | 42.1 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 4 | \$215.02 | \$137.86 | 35.9 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 5 | \$217.06 | \$137.86 | 36.5 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 6 | \$211.70 | \$3.33 | 98.4 % | Un dron (l_5) |
| 8 clientes | Grupo 7 | \$373.66 | \$291.63 | 22.0 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 8 | \$373.66 | \$180.26 | 51.7 % | Camión y dron (l_2) |
| | Grupo 9 | \$386.54 | \$257.36 | 33.4 % | Camión y 2 drones (l_3, l_5) |
| | Grupo 10 | \$373.66 | \$259.50 | 30.6 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 11 | \$387.84 | \$306.57 | 21.0 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 12 | \$366.11 | \$6.66 | 98.2 % | 2 drones (l_2, l_5) |
| 12 clientes | Grupo 13 | \$387.19 | \$299.11 | 22.7 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 14 | \$392.68 | \$348.94 | 11.1 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 15 | \$391.94 | \$318.06 | 18.85 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 16 | \$394.02 | \$353.00 | 10.41 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 17 | \$389.91 | \$254.07 | 34.84 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 18 | \$390.60 | \$9.99 | 97.44 % | Camión y 2 drones (l_2, l_5) |
| 20 clientes | Grupo 19 | \$400.05 | \$390.52 | 2.38 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 20 | \$403.43 | \$389.18 | 3.53 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 21 | \$404.79 | \$254.29 | 26.13 % | Camión y 2 drones (l_2, l_5) |
| | Grupo 22 | \$389.22 | \$350.89 | 9.85 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 23 | \$413.58 | \$328.13 | 20.66 % | Camión y 2 drones (l_2, l_5) |
| | Grupo 24 | \$391.25 | \$257.43 | 34.20 % | Camión y dron (l_5) |
| 30 clientes | Grupo 25 | \$479.30 | \$432.48 | 9.77 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 26 | \$493.52 | \$438.57 | 11.13 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 27 | \$488.17 | \$431.87 | 11.53 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 28 | \$481.64 | \$379.62 | 21.18 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 29 | \$495.55 | \$442.63 | 10.68 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 30 | \$493.14 | \$444.28 | 9.91 % | Camión y un dron (l_5) |
| 40 clientes | Grupo 31 | \$578.93 | \$544.41 | 5.96 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 32 | \$580.28 | \$560.56 | 3.4 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 33 | \$580.28 | \$424.03 | 26.93 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 34 | \$580.28 | \$471.11 | 18.81 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 35 | \$580.28 | \$427.41 | 26.34 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 36 | \$580.28 | \$568.01 | 2.12 % | Camión y dron (l_5) |

Tabla A.1: Relación de costos en el escenario 1

| Clientes | Grupo de facultades | F.O “A” | F.O “B” | Ahorro | Vehículos empleados |
|-----------------|----------------------------|----------------|----------------|---------------|----------------------------|
| 4 clientes | Grupo 1 | \$213.80 | \$121.61 | 43.12 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 2 | \$211.77 | \$129.09 | 39.05 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 3 | \$206.37 | \$127.69 | 38.12 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 4 | \$228.02 | \$92.85 | 59.28 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 5 | \$219.89 | \$131.76 | 40.08 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 6 | \$219.89 | \$81.97 | 62.72 % | Camión y dron (l_5) |
| 8 clientes | Grupo 7 | \$373.66 | \$252.67 | 32.28 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 8 | \$373.06 | \$325.90 | 12.64 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 9 | \$386.54 | \$255.39 | 33.93 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 10 | \$373.66 | \$333.98 | 10.62 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 11 | \$387.84 | \$345.43 | 10.93 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 12 | \$380.41 | \$259.42 | 31.81 % | Camión y dron (l_5) |
| 12 clientes | Grupo 13 | \$387.19 | \$344.83 | 10.94 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 14 | \$392.67 | \$389.90 | 0.70 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 15 | \$391.94 | \$387.14 | 1.22 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 16 | \$394.01 | \$391.24 | 0.70 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 17 | \$383.17 | \$342.15 | 10.71 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 18 | \$353.68 | \$306.56 | 13.32 % | Camión y dron (l_5) |
| 20 clientes | Grupo 19 | \$400.05 | \$348.86 | 12.80 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 20 | \$403.43 | \$401.35 | 0.52 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 21 | \$404.79 | \$389.86 | 3.69 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 22 | \$389.22 | \$345.48 | 11.24 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 23 | \$413.58 | \$402.71 | 2.63 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 24 | \$391.25 | \$284.44 | 1.74 % | Camión y dron (l_5) |
| 30 clientes | Grupo 25 | \$479.30 | \$474.13 | 1.08 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 26 | \$493.52 | \$486.98 | 1.32 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 27 | \$488.17 | \$478.87 | 1.91 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 28 | \$481.64 | \$481.19 | 0.09 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 29 | \$495.55 | \$485.63 | 2.00 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 30 | \$493.14 | \$485.71 | 1.51 % | Camión y dron (l_5) |
| 40 clientes | Grupo 31 | \$576.22 | \$568.67 | 1.31 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 32 | \$580 | \$574.02 | 1.03 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 33 | \$579.61 | \$576.11 | 0.60 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 34 | \$580.28 | \$570.03 | 1.77 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 35 | \$574.19 | \$565.29 | 1.55 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 36 | \$580.28 | \$576.05 | 0.73 % | Camión y dron (l_5) |

Tabla A.2: Relación de costos en el escenario 2

| Clientes | Grupo de facultades | F.O “A” | F.O “B” | Ahorro | Vehículos empleados |
|-----------------|----------------------------|----------------|----------------|---------------|----------------------------|
| 4 clientes | Grupo 1 | \$213.81 | \$169.38 | 20.78 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 2 | \$211.77 | \$166.00 | 21.61 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 3 | \$206.38 | \$165.31 | 19.90 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 4 | \$228.02 | \$186.30 | 18.30 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 5 | \$219.89 | \$176.15 | 19.89 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 6 | \$219.89 | \$180.90 | 17.73 % | Camión y dron (l_5) |
| 8 clientes | Grupo 7 | \$373.67 | NA | 0.00 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 8 | \$373.06 | \$331.30 | 11.19 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 9 | \$386.54 | \$340.77 | 11.84 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 10 | \$373.66 | \$333.98 | 10.62 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 11 | \$387.84 | \$345.43 | 10.94 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 12 | \$380.41 | \$338.04 | 11.14 % | Camión y dron (l_5) |
| 12 clientes | Grupo 13 | \$387.19 | \$384.43 | 0.71 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 14 | \$392.68 | \$391.25 | 0.36 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 15 | \$391.94 | \$387.15 | 1.22 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 16 | \$394.02 | \$392.59 | 0.36 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 17 | \$383.17 | \$343.48 | 10.36 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 18 | \$353.68 | \$352.26 | 0.40 % | Camión y dron (l_5) |
| 20 clientes | Grupo 19 | \$400.05 | \$394.57 | 1.37 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 20 | \$403.43 | \$389.18 | 3.53 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 21 | \$404.79 | \$401.35 | 0.85 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 22 | \$389.22 | \$385.78 | 0.88 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 23 | \$413.58 | \$413.53 | 0.01 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 24 | \$391.25 | \$390.51 | 0.19 % | Camión y dron (l_5) |
| 30 clientes | Grupo 25 | \$479.30 | \$474.13 | 1.08 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 26 | \$493.52 | NA | 0 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 27 | \$488.17 | \$485.70 | 0.51 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 28 | \$481.64 | NA | 0 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 29 | \$495.55 | \$493.08 | 0.50 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 30 | \$493.14 | \$493.82 | 0.14 % | Camión y dron (l_5) |
| 40 clientes | Grupo 31 | \$580.28 | NA | 0 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 32 | \$580.28 | NA | 0 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 33 | \$580.28 | NA | 0 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 34 | \$580.28 | NA | 0 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 35 | \$580.28 | NA | 0 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 36 | \$580.28 | NA | 0 % | Camión y dron (l_5) |

Tabla A.3: Relación de costos en el escenario 3

| Clientes | Grupo de facultades | F.O “A” | F.O “B” | Ahorro | Vehículos empleados |
|-------------|---------------------|----------|----------|---------|----------------------------------|
| 4 clientes | Grupo 1 | \$215.47 | \$171.04 | 20.62 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 2 | \$211.77 | \$133.79 | 36.82 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 3 | \$206.37 | \$90.77 | 56.02 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 4 | \$228.02 | \$184.92 | 18.90 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 5 | \$222.94 | \$179.84 | 19.33 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 6 | \$219.90 | \$180.21 | 18.05 % | Camión y dron (l_5) |
| 8 clientes | Grupo 7 | \$377.04 | \$295.00 | 21.76 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 8 | \$373.06 | \$238.50 | 36.07 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 9 | \$379.44 | \$333.66 | 12.06 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 10 | \$377.04 | \$251.34 | 33.34 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 11 | \$387.84 | \$345.43 | 10.94 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 12 | \$385.16 | \$299.10 | 22.34 % | Camión y dron (l_5) |
| 12 clientes | Grupo 13 | \$386.74 | \$300.44 | 22.31 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 14 | \$392.68 | \$340.04 | 13.40 % | Camión y 2 drones (l_3, l_5) |
| | Grupo 15 | \$396.69 | \$395.35 | 0.34 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 16 | \$394.01 | \$351.61 | 10.76 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 17 | \$392.30 | \$389.91 | 0.61 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 18 | \$349.62 | \$304.5 | 12.91 % | Camión y dron (l_5) |
| 20 clientes | Grupo 19 | \$400.05 | \$385.78 | 3.57 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 20 | \$403.43 | \$376.32 | 6.72 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 21 | \$404.79 | \$308.45 | 23.80 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 22 | \$385.83 | \$377.67 | 2.12 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 23 | \$413.58 | \$413.53 | 0.01 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 24 | \$391.25 | \$385.10 | 1.57 % | Camión y dron (l_5) |
| 30 clientes | Grupo 25 | \$479.30 | \$437.21 | 8.78 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 26 | \$493.52 | \$482.93 | 2.14 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 27 | \$488.17 | \$437.96 | 10.29 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 28 | \$481.64 | \$427.96 | 11.27 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 29 | \$495.55 | \$486.99 | 1.73 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 30 | \$493.14 | \$482.33 | 2.19 % | Camión y dron (l_5) |
| 40 clientes | Grupo 31 | \$580.28 | \$511.94 | 11.78 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 32 | \$580.28 | \$549.73 | 5.26 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 33 | \$579.61 | \$490.98 | 15.29 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 34 | \$580.28 | \$503.82 | 13.18 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 35 | \$579.61 | \$560.57 | 3.29 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 36 | \$580.28 | \$482.86 | 16.79 % | Camión y dron (l_5) |

Tabla A.4: Relación de costos en el escenario 4

| Clientes | Grupo de facultades | F.O “A” | F.O “B” | Ahorro | Vehículos empleados |
|-----------------|----------------------------|----------------|----------------|---------------|----------------------------|
| 4 clientes | Grupo 1 | \$215.47 | \$168.68 | 21.72 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 2 | \$211.77 | \$170.71 | 19.39 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 3 | \$206.37 | \$125.01 | 39.42 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 4 | \$228.02 | \$174.81 | 23.33 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 5 | \$222.94 | \$168.69 | 24.34 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 6 | \$219.89 | \$180.90 | 17.73 % | Camión y dron (l_5) |
| 8 clientes | Grupo 7 | \$377.04 | \$299.10 | 20.67 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 8 | \$373.06 | \$293.69 | 21.28 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 9 | \$388.24 | \$351.28 | 9.52 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 10 | \$377.04 | \$293.62 | 22.12 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 11 | \$377.08 | \$335.32 | 11.07 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 12 | \$385.16 | \$341.41 | 11.36 % | Camión y dron (l_5) |
| 12 clientes | Grupo 13 | \$386.74 | \$337.68 | 12.69 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 14 | \$392.67 | \$352.29 | 10.28 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 15 | \$396.69 | \$352.94 | 11.03 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 16 | \$394.01 | \$350.26 | 11.10 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 17 | \$392.30 | \$386.82 | 1.40 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 18 | \$349.62 | \$346.85 | 0.79 % | Camión y dron (l_5) |
| 20 clientes | Grupo 19 | \$400.05 | \$394.57 | 1.37 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 20 | \$403.43 | \$397.28 | 1.52 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 21 | \$404.79 | \$389.86 | 3.69 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 22 | \$385.83 | \$387.81 | 0.36 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 23 | \$413.58 | \$412.18 | 0.34 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 24 | \$391.25 | \$384.44 | 1.74 % | Camión y dron (l_5) |
| 30 clientes | Grupo 25 | \$479.30 | \$477.51 | 0.37 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 26 | \$493.52 | \$486.98 | 1.32 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 27 | \$488.17 | \$478.94 | 1.89 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 28 | \$481.64 | \$479.17 | 0.51 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 29 | \$495.55 | \$494.43 | 0.23 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 30 | \$493.14 | \$485.71 | 1.51 % | Camión y dron (l_5) |
| 40 clientes | Grupo 31 | \$580.28 | \$578.82 | 0.25 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 32 | \$580.28 | \$572.67 | 1.31 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 33 | \$580.28 | \$578.82 | 0.25 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 34 | \$580.28 | \$576.11 | 0.72 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 35 | \$580.28 | \$571.38 | 1.53 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 36 | \$580.28 | \$576.73 | 0.61 % | Camión y dron (l_5) |

Tabla A.5: Relación de costos en el escenario 5

| Clientes | Grupo de facultades | F.O “A” | F.O “B” | Ahorro | Vehículos empleados |
|-------------|---------------------|----------|----------|---------|---------------------------------------|
| 4 clientes | Grupo 1 | \$215.47 | \$92.82 | 56.92 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 2 | \$211.77 | \$129.04 | 39.07 % | Camión y dron (l_2) |
| | Grupo 3 | \$206.38 | \$167.29 | 18.94 % | Camión y 2 drones (l_2, l_5) |
| | Grupo 4 | \$228.02 | \$187.00 | 17.99 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 5 | \$222.94 | \$140.57 | 36.95 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 6 | \$219.89 | \$174.77 | 20.52 % | Camión y dron (l_2) |
| 8 clientes | Grupo 7 | \$377.04 | \$299.13 | 20.66 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 8 | \$373.06 | \$325.08 | 12.86 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 9 | \$379.44 | \$301.81 | 20.46 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 10 | \$377.04 | \$298.40 | 20.86 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 11 | \$387.84 | \$308.59 | 20.43 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 12 | \$385.16 | \$288.94 | 24.98 % | Camión y dron (l_5) |
| 12 clientes | Grupo 13 | \$386.74 | \$305.84 | 20.92 % | Camión y 2 drones (l_2, l_5) |
| | Grupo 14 | \$392.68 | \$330.49 | 15.84 % | Camión y 3 drones (l_2, l_4, l_5) |
| | Grupo 15 | \$396.69 | \$342.84 | 13.57 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 16 | \$394.02 | \$268.26 | 31.92 % | Camión y 2 drones (l_2, l_5) |
| | Grupo 17 | \$392.30 | \$344.83 | 12.10 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 18 | \$386.54 | \$296.38 | 23.32 % | Camión y dron (l_5) |
| 20 clientes | Grupo 19 | \$400.05 | \$354.28 | 11.44 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 20 | \$403.43 | \$402.70 | 0.18 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 21 | \$404.79 | \$348.38 | 13.94 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 22 | \$385.83 | \$333.31 | 13.61 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 23 | \$413.58 | \$413.48 | 0.03 % | Camión y 2 drones (l_2, l_5) |
| | Grupo 24 | \$391.25 | \$342.77 | 12.39 % | Camión y dron (l_5) |
| 30 clientes | Grupo 25 | \$479.30 | \$395.55 | 17.47 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 26 | \$493.52 | \$463.99 | 5.98 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 27 | \$488.17 | \$478.26 | 2.03 % | Camión y 2 drones (l_2, l_5) |
| | Grupo 28 | \$481.64 | \$472.40 | 1.92 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 29 | \$495.55 | \$489.02 | 1.32 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 30 | \$493.14 | \$431.43 | 12.51 % | Camión y un dron (l_5) |
| 40 clientes | Grupo 31 | \$580.28 | \$563.27 | 2.93 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 32 | \$580.28 | \$501.80 | 13.52 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 33 | \$580.28 | \$526.97 | 9.19 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 34 | \$580.28 | \$565.73 | 2.51 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 35 | \$580.28 | \$435.54 | 24.94 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 36 | \$580.28 | \$571.38 | 1.54 % | Camión y dron (l_5) |

Tabla A.6: Relación de costos en el escenario 6

| Clientes | Grupo de facultades | F.O “A” | F.O “B” | Ahorro | Vehículos empleados |
|-------------|---------------------|----------|----------|---------|--|
| 4 clientes | Grupo 1 | \$215.47 | \$168.68 | 21.72 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 2 | \$211.77 | \$166.00 | 21.61 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 3 | \$206.37 | \$163.96 | 20.55 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 4 | \$228.02 | \$185.49 | 18.65 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 5 | \$222.94 | \$176.15 | 20.99 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 6 | \$219.89 | \$180.90 | 17.73 % | Camión y dron (l_5) |
| 8 clientes | Grupo 7 | \$377.04 | \$338.04 | 10.34 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 8 | \$373.06 | \$252.07 | 32.43 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 9 | \$379.43 | \$292.96 | 22.79 % | Camión y 2 drones (l_2, l_5) |
| | Grupo 10 | \$377.04 | \$290.28 | 23.01 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 11 | \$387.84 | \$271.63 | 29.96 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 12 | \$385.16 | \$344.82 | 10.47 % | Camión y dron (l_5) |
| 12 clientes | Grupo 13 | \$386.74 | \$338.05 | 12.59 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 14 | \$392.67 | \$342.74 | 12.72 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 15 | \$396.69 | \$350.96 | 11.53 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 16 | \$394.01 | \$346.21 | 12.13 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 17 | \$392.30 | \$346.89 | 11.58 % | Camión y 4 dron (l_5) |
| | Grupo 18 | \$349.62 | \$263.49 | 24.64 % | Camión y 2 drones (l_3, l_5) |
| 20 clientes | Grupo 19 | \$400.05 | \$358.16 | 10.47 % | Camión y 4 drones ((l_2, l_3, l_4, l_5)) |
| | Grupo 20 | \$403.43 | \$398.58 | 1.20 % | Camión y 2 drones (l_2, l_5) |
| | Grupo 21 | \$404.79 | \$359.63 | 11.15 % | Camión y 2 drones (l_2, l_5) |
| | Grupo 22 | \$385.83 | \$296.39 | 23.18 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 23 | \$413.58 | \$376.56 | 8.95 % | Camión y 2 drones (l_2, l_5) |
| | Grupo 24 | \$391.25 | \$386.46 | 1.22 % | Camión y dron (l_5) |
| 30 clientes | Grupo 25 | \$479.30 | \$431.80 | 9.91 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 26 | \$493.52 | \$491.72 | 0.36 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 27 | \$488.17 | \$474.89 | 2.72 % | Camión y 2 drones (l_2, l_5) |
| | Grupo 28 | \$481.64 | \$478.86 | 0.58 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 29 | \$495.55 | \$491.73 | 0.77 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 30 | \$493.14 | \$444.96 | 9.77 % | Camión y un dron (l_5) |
| 40 clientes | Grupo 31 | \$580.28 | \$486.84 | 16.10 % | Camión y un dron (l_5) |
| | Grupo 32 | \$580.28 | \$516.67 | 10.96 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 33 | \$580.28 | \$510.16 | 12.08 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 34 | \$580.28 | \$573.41 | 1.18 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 35 | \$580.28 | \$563.20 | 2.94 % | Camión y dron (l_5) |
| | Grupo 36 | \$580.28 | \$565.97 | 2.47 % | Camión y dron (l_5) |

Tabla A.7: Relación de costos en el escenario 7

APÉNDICE B

GENERALIDADES DE GAMS

El GAMS *General Algebraic Modeling System* es un sistema de modelado programación matemática que permite resolver problemas de optimización. Este sistema esta diseñado para modelar problemas como:

- Enteros lineales
- No lineales
- Mixtos

Permite trabajar con diversas plataformas para su ejecución, así como con otros lenguajes de programación.

GAMS usa un lenguaje de modelación donde se escribe la formulación del modelo matemático y de ahí aplica un solver para resolver el problema del modelo, permitiendo conocer las condiciones del modelo matemático.

Uno de los *solvers* que contempla este sistema es CLPEX, fue el que se utilizó para el trabajo.

B.1 GAMS/CPLEX

Es un solucionador de GAMS que resuelve problemas complejos (grandes y difíciles, GAMS/CPLEX calcula y configura automáticamente la mayoría de las opciones con los mejores valores para problemas específicos.

El CPLEX para la Programación Lineal Entera Mixta (MILP) incluye implementaciones de algoritmos simplex y de barrera para los problemas de Programación Lineal (PL) y los modernos algoritmos de búsqueda de *Branch and Bound* con cortes y heurísticas para la solución de problemas de este tipo. Los experimentos con CPLEX para el problema en cuestión han demostrado que el solucionador selecciona métodos simplex para resolver estos problemas (Till *et al.*, 2004).

La filosofía del *Branch and Bound* es resolver un PLEM resolviendo un conjunto de problemas de programación lineal (PL) que son versiones relajadas del MILP, los cuales pueden ser resueltos por técnicas de solución conocidas o mediante software especializado (Edgar y Ramón, 2002).

Branch and Bound es un método de exploración de espacio de estado enumerativa que construye sucesivamente un árbol de decisión. En cada nodo, el conjunto factible se divide en dos o más subconjuntos separados que luego se asignan a los nodos secundarios.

Durante la exploración del espacio de estado, se calcula un límite inferior de la función objetivo en cada nodo y se compara con el límite superior más bajo encontrado hasta ahora. Si es mayor que el límite superior, se dice que la rama correspondiente está comprensiva y ya no se explora. El límite inferior generalmente se calcula relajando las restricciones de integralidad y resolviendo la PL resultante. El límite superior se toma de la mejor solución de enteros encontrada antes del nodo real (Floudas y Pardalos, 2001).

APÉNDICE C

DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

C.1 MEMORIA EN CONGRESOS

- «Optimización de la red de distribución empleando drones». Memorias del Congreso Internacional de Logística y Cadena de Suministro (Ci-LOG2019). Instituto Tecnológico de Monterrey Campus Guadalajara, Jalisco, México. 9-11 de Octubre 2019.
- «Optimización de la red de distribución en el servicio de paqueterías empleando drones (UAV)». Memorias del congreso de la Academia Journals. Instituto Tecnológico de Los Mochis, Sinaloa, México. 24-26 de Octubre 2018.

C.2 PRESENTACIONES

Se presenta la difusión del proyecto en diferentes ámbitos explicando los resultados obtenidos como la investigación que se realizó en la tesis.

- «Optimización de la red de distribución empleando drones». Congreso Internacional de Logística y Cadena de Suministro (Ci-LOG2019) Instituto Tecnológico de Monterrey Campus Guadalajara, Jalisco, México. 9-11 de Octubre 2019.
- «Optimización de la red de distribución empleando una tecnología emergente». Seminario en Logística y Cadena de Suministro. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México. 10 de Junio del 2019.
- «Optimización de la red de distribución en el servicio de paqueterías empleando drones (UAV)». Congreso de la Academia Journals. Instituto Tecnológico de Los Mochis, Sinaloa, México. 24-26 de Octubre 2018.
- «Optimización de la red de distribución en el servicio de paqueterías». Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México. 12 de Febrero del 2018.

BIBLIOGRAFÍA

- ABOHARBA, S. E. y K. B. ARIKAN (2017), «Optimization for a Collaborative Delivery System», .
- ALICKE, K., D. REXHAUSEN y A. SEYFERT (2017), «Supply chain 4.0 in consumer goods», *Mckinsey & Company*.
- AMADOR, O. (2017), «Logística se catapulta con el e-commerce», Disponible en <http://www.eleconomista.com.mx>.
- ARCHETTI, C., M. G. SPERANZA y A. HERTZ (2006), «A tabu search algorithm for the split delivery vehicle routing problem», *Transportation science*, **40**(1), págs. 64–73.
- BARTHOLDI, J. y S. HACKMAN (2014), «Warehouse & distribution science: Release 0.96. The Supply Chain and Logistics Institute, Georgia Institute of Technology», *Atlanta, USA Google Scholar*.
- BASKIN, L. L., B. (2017), «Chinese Online Retailer JD.com Is Developing Heavy- Duty Delivery Drones», *Wall Street Journal*. Disponible en <http://https://www.wsj.com>.
- BECK, J. C., P. PROSSER y E. SELENSKY (2002), «Graph transformations for the vehicle routing and job shop scheduling problems», en *International Conference on Graph Transformation*, Springer, págs. 60–74.
- BENAVENTE, M. y J. BUSTOS (2012), «estado del arte en el problema de ruteo de vehículos (vrp)», .

- BJÖRSELL, K. y J. HEDMAN (2018), «Future impacts of self-driving vehicles: A case study on the supply chain of e-commerce to identify important factors for the transport administrators of Sweden», .
- BUNSE, B., H. KAGERMANN y W. WAHLSTER (2014), «Industrie 4.0 Smart Manufacturing for the Future», *Annals of Optimization Theory and Practice*.
- CANNELLA, S., R. DOMINGUEZ, J. M. FRAMINAN y B. PONTE (2018), «Evolving Trends in Supply Chain Management: Complexity, New Technologies, and Innovative Methodological Approaches», *Complexity*, **2018**.
- CARDOZ, J. P. O., D. O. TORO y E. M. T. OCAMPO (2016), «Solución al Problema de Ruteo de Vehículos con Capacidad Limitada (CVRP) usando una técnica metaheurística», *Scientia et Technica*, **21**(3), págs. 225–233.
- CARDOZO, O. D., E. L. GÓMEZ y M. A. PARRAS (2009), «Teoría de grafos y sistemas de información geográfica aplicados al transporte público de pasajeros en Resistencia (Argentina)», *Revista Transporte y Territorio*, (1), págs. 89–111.
- CASTELLTORT, R. (2018), «Los retos del comercio electrónico en México», Disponible en <http://www.eleconomista.com.mx>.
- CEÑA ARÉVALO, D. (2017), *Reparto de mercancías a través de drones: estudio y viabilidad*, Tesis de Maestría, Universitat Politècnica de Catalunya.
- CHANG, Y. S. y H. J. LEE (2018), «Optimal delivery routing with wider drone-delivery areas along a shorter truck-route», *Expert Systems with Applications*, **104**, págs. 307–317.
- CHEN, P., B. GOLDEN, X. WANG y E. WASIL (2017), «A novel approach to solve the split delivery vehicle routing problem», *International Transactions in Operational Research*, **24**(1-2), págs. 27–41.
- CHOI, Y. y P. M. SCHONFELD (2017), «Optimization of multi-package drone deliveries considering battery capacity», en *Proceedings of the 96th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, USA*, págs. 8–12.

- CHOPRA, S. y P. MEINDL (2008), *Administración de la cadena de suministro*, Pearson educación.
- COPACINO, W. C. (1997), *Supply chain management: The basics and beyond*, tomo 1, CRC Press.
- CORDEAU, D. S., DESAULNIERS y SOUMIS (2000), *The VRP with time windows*, Montréal: Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions.
- DAYARIAN, I. y M. SAVELSBERGH (2017), «Crowdshipping and same-day delivery: Employing in-store customers to deliver online orders», *Optimization Online*.
- DAZA, J. M., J. R. MONTOYA y F. NARDUCCI (2009), «Solving the capacitated vehicle routing problem using a twophase metaheuristic procedure», *Revista EIA*, (12), págs. 23–38.
- DORLING, K., J. HEINRICHS, G. G. MESSIER y S. MAGIEROWSKI (2017), «Vehicle routing problems for drone delivery», *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, **47**(1), págs. 70–85.
- DRUEHL, C., J. CARRILLO y J. HSUAN (2018), «Technological Innovations: Impacts on Supply Chains», *Innovation and Supply Chain Management: Relationship, Collaboration and Strategies*, págs. 259–281.
- EDGAR, M. C. F. y G. RAMÓN (2002), «Algoritmo de branch and bound especializado aplicado al planteamiento de sistemas de transmisión.», .
- FANCHER, J. C. (2017), «Drones for Medical Supplies», .
- FLOUDAS, C. A. y P. M. PARDALOS (2001), *Encyclopedia of optimization*, tomo 1, Springer Science & Business Media.
- GALARCIO, J. D., M. BUELVAS, P. NISPERUZA, J. LÓPEZ y H. HERNANDEZ (2017), «Una nueva metaheurística aplicada al problema de ruteo de vehículos capacitados (cvrp) para la distribución de productos perecederos», *Ingeniería e Innovación*, **5**(1).

- GARCÍA, R. (2017), «La gestión de la cadena de suministro en la era de la industria 4.0. Centro logístico Español», <https://www.economiadehoy.es>.
- GHADIRI NEJAD, M. y M. BANAR (2018), «Emergency response time minimization by incorporating ground and aerial transportation», *Annals of Optimization Theory and Practice*, **1**(1), págs. 43–57.
- GOLDEN, B. L., S. RAGHAVAN y E. A. WASIL (2008), *The vehicle routing problem: latest advances and new challenges*, tomo 43, Springer Science & Business Media.
- GRUDPAN, S., J. B. HAUGE y U. C. K.-D. THOBEN (2017), «A Systematic Literature Review of Challenges in Urban Logistics», .
- HARRISON, A. y R. I. VAN HOEK (2008), *Logistics management and strategy: competing through the supply chain*, Pearson Education.
- HEUTGER, M. y M. KÜCKELHAUS (2014), «Unmanned aerial vehicle in logistics: a DHL perspective on implications and use cases for the logistics industry», *DHL Customer Solutions & Innovation*, Troisdorf, Germany.
- HOFFMANN, T. y G. PRAUSE (2018), «On the Regulatory Framework for Last-Mile Delivery Robots», *Machines*, **6**(3), pág. 33.
- HONG, S. y B. MAO (2018), «An interactive logistics centre information integration system using virtual reality .», *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **42**, pág. 3.
- INECC (2019), «Instituto Nacional de Ecología», Disponible en <https://www.inecc.gob.mx>.
- IVANOV, D., A. TSIPOULANIDIS, J. SCHÖNBERGER *et al.* (2017), «Global supply chain and operations management», *A Decision-Oriented Introduction to the Creation of Value*.
- JACOBS, A. (2009), «The pathologies of big data», *Queue*, **7**(6), pág. 10.

- KALASHNIKOVA, A. *et al.* (2018), *Business potential analysis of UAV applications*, Tesis de Maestría, Lappeeranta University of Technology.
- KALLEHAUGE, B., J. LARSEN, O. B. MADSEN y M. M. SOLOMON (2005), «Vehicle routing problem with time windows», en *Column generation*, Springer, págs. 67–98.
- KELLY, A. (2017), «Autonomous vehicles and other disruptors: the impact of uncertainty on urban growth and supply chains», en *Australian Institute of Traffic Planning and Management (AITPM) National Conference, 2017, Melbourne, Victoria, Australia*.
- KHMELEV, A. y Y. KOCHETOV (2015), «A hybrid local search for the split delivery vehicle routing problem», *International Journal of Artificial Intelligence*, **13**(1), págs. 147–164.
- LAMB, C., J. HAIR y C. MCDANIEL (2002), «Marketing, Sexta Edición, de», *International Thomson Editores SA*.
- LEÓN VILLALBA, A. F. (2018), «Modelo CVRPPDTW (Capacitated Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery and Time Windows) aplicado a distribución colaborativa», .
- LI, H. y A. LIM (2003), «Local search with annealing-like restarts to solve the VRPTW», *European journal of operational research*, **150**(1), págs. 115–127.
- LUZURIAGA ROMERO, M. N. (2017), *Análisis del uso de drones en los servicios de entrega dentro de la ciudad de Guayaquil.*, Tesis Doctoral, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial. Carrera de Ingeniería en Teleinformática.
- MATHEW, N., S. L. SMITH y S. L. WASLANDER (2015), «Planning paths for package delivery in heterogeneous multirobot teams», *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **12**(4), págs. 1298–1308.
- McFARLANE, D., V. GIANNIKAS y W. LU (2016), «Intelligent logistics: Involving the customer», *Computers in Industry*, **81**, págs. 105–115.

- MEDINA, L., E. GONZÁLEZ y J. ORJUELA (2011), «Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución», *Ingeniería*, **16**(2), págs. 35–55.
- MILLER, D. (2018), «Blockchain and the Internet of Things in the Industrial Sector», *IT Professional*, **20**(3), págs. 15–18.
- MOURELO FERRANDEZ, S., T. HARBISON, T. WEBWER, R. STURGES y R. RICH (2016), «Optimization of a truck-drone in tandem delivery network using k-means and genetic algorithm», *Journal of Industrial Engineering and Management*, **9**(2), págs. 374–388.
- MURRAY, C. C. y A. G. CHU (2015), «The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery», *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **54**, págs. 86–109.
- NENTWICH, M. y D. M. HORVÁTH (2018), «The vision of delivery drones», *TATuP Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis*, **27**(2), págs. 46–52.
- ONU (2017), «World Population Prospects», Disponible en <https://esa.un.org>.
- PALOMERA, I. (2017), «E-commerce en México vs. e-commerce global», Disponible en <https://www.forbes.com.mx>.
- PARADA, J. L. (2018), «Fabricación aditiva y transformación logística: la impresión 3D», *Oikonomics: revista de economía, empresa y sociedad*, (9), págs. 41–57.
- PEÑA, C. G. A. *et al.* (2018), «El impacto de la cuarta revolución industrial en las relaciones sociales y productivas de la industria del plástico Implastic SA en Guayaquil-Ecuador: retos y perspectivas», *Universidad y Sociedad*, **10**(5), págs. 153–160.
- POIKONEN, S., X. WANG y B. GOLDEN (2017), «The vehicle routing problem with drones: Extended models and connections», *Networks*, **70**(1), págs. 34–43.

- POLANCO, X. (2006), «Análisis de redes: introducción», .
- PONZA, A. (2016), *Optimization of drone-assisted parcel delivery*, Tesis de Maestría, Università Degli Studi Di Padova.
- PUGLIESE, L. D. P. y F. GUERRIERO (2017), «Last-mile deliveries by using drones and classical vehicles», en *International Conference on Optimization and Decision Science*, Springer, págs. 557–565.
- PULLAN, W. (2003), «Adapting the genetic algorithm to the travelling salesman problem», en *Evolutionary Computation, 2003. CEC'03. The 2003 Congress on*, tomo 2, IEEE, págs. 1029–1035.
- RODRIGUE, J.-P., C. COMTOIS y B. SLACK (2016), *The geography of transport systems*, Routledge.
- RUEDA DURÁN, D. *et al.* (2014), «Estudio de la compañía DHL», .
- SATHYA, N. y A. MUTHUKUMARAVEL (2015), «A Review of the Optimization Algorithms on Traveling Salesman Problem», *Indian Journal of Science and Technology*, **8**(1).
- SAUCEDO-MARTÍNEZ, J. A., M. PÉREZ-LARA, J. A. MARMOLEJO-SAUCEDO, T. E. SALAIS-FIERRO y P. VASANT (2017), «Industry 4.0 framework for management and operations: a review», *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, págs. 1–13.
- SCHÖDER, D., F. DING y J. K. CAMPOS (2016), «The impact of e-commerce development on urban logistics sustainability», *Open Journal of Social Sciences*, **4**(03), pág. 1.
- SCOTT, J. y C. SCOTT (2017), «Drone delivery models for healthcare», .
- SLABINAC, M. *et al.* (2015), «Innovative solutions for a “Last-Mile” delivery—a European experience», en *Proceedings of the 15th International Scientific Conference Business Logistics in Modern Management Osijek, Osijek, Croatia*, págs. 111–129.

- TICHA, H. B., N. ABSI, D. FEILLET y A. QUILLIOT (2017), «Empirical analysis for the VRPTW with a multigraph representation for the road network», *Computers & Operations Research*, **88**, págs. 103–116.
- TILL, J., S. ENGELL, S. PANEK y O. STURBERG (2004), «Applied hybrid system optimization: An empirical investigation of complexity», *Control Engineering Practice*, **12**(10), págs. 1291–1303.
- TIPPING, A. y P. KAUSCHKE (2016), «Shifting patterns, the future of the logistics industry», *PriceWaterhouseCoopers, Phoenix*.
- TJAHJONO, B., C. ESPLUGUES, E. ARES y G. PELAEZ (2017), «What does industry 4.0 mean to supply chain?», *Procedia Manufacturing*, **13**, págs. 1175–1182.
- VILLARS, R. L., C. W. OLOFSON y M. EASTWOOD (2011), «Big data: What it is and why you should care», *White Paper, IDC*, **14**, págs. 1–14.
- WANG, X., S. POIKONEN y B. GOLDEN (2017), «The vehicle routing problem with drones: several worst-case results», *Optimization Letters*, **11**(4), págs. 679–697.
- WELCH, A. (2015), «A cost-benefit analysis of Amazon Prime Air», .
- WOŹNIAKOWSKI, T., K. ZMARZŁOWSKI y M. NOWAKOWSKA (2018), «Automation and innovations in logistic processes of electronic commerce», *Information Systems in Management*, **7**.
- YOON, J. J. (2018), *The traveling salesman problem with multiple drones: An optimization model for last-mile delivery*, Tesis Doctoral, Massachusetts Institute of Technology.
- YU, Y., X. WANG, R. Y. ZHONG y G. Q. HUANG (2016), «E-commerce logistics in supply chain management: Practice perspective», *Procedia Cirp*, **52**, págs. 179–185.

ZHANG, Z., H. HE, Z. LUO, H. QIN y S. GUO (2015), «An efficient forest-based tabu search algorithm for the split-delivery vehicle routing problem», en *Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence*.

ZIMMERMANN, R. A., L. M. D. FERREIRA y A. C. MOREIRA (2018), «The Intellectual Structure of the Relationship Between Innovation and Supply Chain Management», *Innovation and Supply Chain Management: Relationship, Collaboration and Strategies*, págs. 3–29.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Emanuel Jesús Ulin Hernández

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:

OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN EN EL SERVICIO DE
PAQUETERÍA EMPLEANDO UNA TECNOLOGÍA EMERGENTE

Emanuel Jesús Ulin Hernández nació el 27 de Diciembre de 1993, en Villahermosa, Tabasco. Hijo de José Candelario Ulin Madrigal y de María del Carmen Hernández Cupil.

Él ha vivido en Jalpa de Méndez, Tabasco y en Monterrey, Nuevo León. Emanuel se graduó del Instituto Tecnológico de Villahermosa (ITVH) como Licenciado en Ingeniería Industrial en el año 2017.