



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Modelo matemático para la estimación de costos logísticos del transporte de paquetería y mensajería terrestre en Colombia**

**Silvana Ruiz Moreno**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería de la Organización  
Medellín, Colombia  
2019



# **Modelo matemático para la estimación de costos logísticos del transporte de paquetería y mensajería terrestre en Colombia**

**Silvana Ruiz Moreno**

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería Industrial**

Director:

PhD. Martín Darío Arango Serna

Codirector:

PhD. Conrado Augusto Serna Urán

Línea de Investigación:

Logística

Grupo de Investigación:

Grupo I+D+i Logística Industrial Organizacional - GICO

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería de la Organización  
Medellín, Colombia  
2019



A mi padre Pablo Ruiz y a mi madre Sandra Moreno,  
apoyo incondicional; polo a tierra de mi existencia.

A mis compañeros del grupo GICO,  
Compañía incesante y necesaria para finalizar esta etapa.

# Agradecimientos

Agradezco infinitamente a mi familia, quienes, a pesar de las vicisitudes y ausencias generadas por el proceso de crecimiento, han permanecido incondicionales para mí.

A Luisa Fernanda Ortiz y Cristian Giovanny Gómez, compañeros de camino en el grupo GICO y quienes me apoyaron día a día.

A mis directores y guías: Martín Darío Arango Serna y Conrado Augusto Serna Urán quienes, sin importar el tiempo, permanecieron siempre dispuestos a acompañarme.

## Resumen

La estimación y optimización de los costos en el proceso de transporte de paquetería y mensajería, ha sido un problema ampliamente estudiado dado que impacta la estrategia organizacional de las empresas que se dedican a esta actividad. La modelización de este proceso de tal forma que se tomen decisiones operativas y tácticas que apunten a disminuir costos y apoyen en última instancia la toma de decisiones, requiere la estructuración de una red que refleje el uso adecuado de los recursos principales: instalaciones y vehículos, En este sentido, en el proyecto de maestría se propone un modelo matemático para la estimación de costos logísticos en las empresas de transporte de paquetería y mensajería terrestre en Colombia asociados al diseño de la red de envíos y recogidas.

**Palabras clave:** Costos logísticos, problema de diseño de red, transporte de paquetería y mensajería.

## **Abstract**

The estimation and optimization of costs in the parcel and courier transport has been a problem widely studied given that it impacts the organizational strategy of the transport companies. The modeling of this process in such a way that operational and tactical decisions are made that aim to reduce costs and ultimately support decision-making, requires the structuring of a network that reflects the adequate use of the main resources: facilities and vehicles. According to this, the master's project proposes a mathematical model for the estimation of logistics costs in the parcel transport and land courier companies in Colombia associated with the design of the shipping and collection network.

**Keywords:** Logistics costs, Network Design Problem, parcel and courier transport.



## CONTENIDO

	Pág.
<b>1. Generalidades de las redes de transporte.....</b>	<b>3</b>
1.1 Características en las redes de transporte en empresas de paquetería y mensajería.....	4
1.1.1 Configuración de las redes de transporte de paquetería y mensajería.....	5
1.1.2 Estrategias para la distribución de mercancías.....	6
1.2 Transporte de paquetería.....	8
1.2.1 Estrategia de envío hub and spoke en el transporte de paquetería.....	10
1.2.2 Estrategia de envío de paradas múltiples en el transporte de paquetería.....	11
1.3 Transporte de mensajería.....	11
1.3.1 Estrategia hub and spoke en el transporte de mensajería.....	13
1.4 Red de paquetería y mensajería.....	14
1.4.1 Composición de la red de paquetería y mensajería.....	17
1.4.2 Rutas asociadas al transporte de paquetería y mensajería.....	19
<b>2. Modelización del transporte de paquetería y mensajería.....</b>	<b>23</b>
2.1 Características de los modelos de estimación de costos logísticos en sistemas de transporte.....	25
2.2 Costos logísticos en el transporte de paquetería y mensajería.....	27
2.3 Modelos de estimación y optimización de costos propuestos para transporte de paquetería y mensajería.....	30
2.3.1 Costos asociados a los nodos.....	31
2.3.2 Costos asociados al transporte.....	32
<b>3. Modelización de la red de paquetería y mensajería en Colombia.....</b>	<b>41</b>
3.1 Definición de la red de transporte de paquetería y mensajería para Colombia.....	44
3.2 Construcción del modelo matemático.....	49
3.2.1 Parámetros y variables.....	49
3.2.2 Construcción de la función objetivo.....	51
3.2.3 Restricciones.....	52
3.2.4 El impacto ambiental de la red.....	54
3.3 Simulación del modelo propuesto.....	55
3.3.1 Etapa I.....	57
3.3.2 Etapas II y III.....	58
3.3.3 Análisis de la estrategia propuesta.....	65
<b>4. Conclusiones.....</b>	<b>67</b>
<b>5. Bibliografía.....</b>	<b>69</b>
<b>Anexo 1.....</b>	<b>75</b>
<b>Anexo 2.....</b>	<b>81</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1:</b> Estrategias de distribución de mercancía. ....	8
<b>Figura 1-2:</b> Red logística del sistema postal en Corea – Hub and Spoke.....	13
<b>Figura 1-3:</b> Red de entrega de correos.....	15
<b>Figura 1-4:</b> Red de servicios de distribución de paquetería .....	18
<b>Figura 1-5:</b> Red de distribución de paquetería y mensajería.....	20
<b>Figura 1-6:</b> Red de distribución Hub and Spoke .....	21
<b>Figura 2-1:</b> Distribución de los costos de transporte en las fases de transporte.....	29
<b>Figura 2-2:</b> Componentes de los costos en las terminales o Hubs.....	31
<b>Figura 2-3:</b> Componentes de los costos de transporte.....	32
<b>Figura 3-1:</b> Red de servicios de paquetería y mensajería en Colombia .....	42
<b>Figura 3-2:</b> Decisiones en empresas de transporte para los niveles organizacionales .....	43
<b>Figura 3-3:</b> Etapas para el desarrollo del modelo para la red.....	44
<b>Figura 3-4:</b> Nodos de la red.....	56
<b>Figura 3-5:</b> Asignación de clientes a satélites.....	57
<b>Figura 3-6:</b> Gráfico radial de las variables de respuesta .....	60
<b>Figura 3-7:</b> Costos de la red para las tres estrategias analizadas.....	61
<b>Figura 3-8:</b> Flujo entre centros logísticos principales en la estrategia de solución 1 .	62
<b>Figura 3-9:</b> Flujo entre centros logísticos principales en la estrategia de solución 2 .	62
<b>Figura 3-10:</b> Flujo entre centros logísticos principales en la estrategia de solución 2	63
<b>Figura 3-11:</b> Comparación de vehículos usados con costos entre hub para cada estrategia .....	63
<b>Figura 3-12:</b> Análisis de la huella de carbono para las estrategias propuestas .....	65
<b>Figura 3-13:</b> Gráfico de superficie de respuesta del costo entre centros logísticos ...	65



## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 2-1:</b> Funciones objetivo en la construcción de modelos de transporte .....	28
<b>Tabla 2-2:</b> Factores que contribuyen a los costos logísticos. ....	28
<b>Tabla 2-3:</b> Factores que contribuyen a los costos logísticos. ....	30
<b>Tabla 2-4:</b> Variables y parámetros considerados por diferentes autores en la estimación de costos de transporte .....	39
<b>Tabla 2-5:</b> Metodologías para la medición de la huella de carbono.....	39
<b>Tabla 3-1:</b> Factores del modelo por etapas.....	46
<b>Tabla 3-2:</b> Factores ambientales.....	55
<b>Tabla 3-3:</b> Datos de ingreso.....	56
<b>Tabla 3-4:</b> Asignación de algunos nodos .....	57
<b>Tabla 3-5:</b> Resultados sin consideración se sobrecarga .....	59
<b>Tabla 3-6:</b> Cambios en las variables de respuesta .....	60
<b>Tabla 3-7:</b> Asignación de rutas generadas en la estrategia 3.....	61
<b>Tabla 3-8:</b> Calculo en la huella de carbono de la red en CO <sub>2</sub> e .....	64
<b>Tabla A-1 –</b> Datos de entrada, asignación de clientes y ruta generada.....	75

# Introducción

La definición y el alcance de la logística ha sido descrita por diferentes autores; puede decirse de forma general que la logística planea, implementa, coordina y controla todas las actividades que facilitan el movimiento tanto de los bienes materiales como de información, desde y hacia los proveedores - empresa y demandantes, considerando los tiempos y cantidades apropiadas (Ballou, 2004; Daganzo, 2005; Langevin & Riopel, 2005). Según Lindholm & Behrends (2012), la planeación de la distribución de paquetería al igual que de mensajería debe ser analizada desde sus funciones básicas para lograr proponer nuevos modelos o modificar los ya propuestos, de tal forma que la competitividad esté al alcance de las empresas públicas y privadas.

La construcción de modelos que permitan cuantificar costos en empresas de transporte, ha pasado de considerar factores internos y su impacto en la estructura de costos, a incorporar los costos que se generan debido a factores externos y al análisis detallado del uso de recursos (Bettinelli, Ceselli, & Righini, 2011). Debido a la necesidad de identificar las fuentes generadoras de costo, se han construido modelos que permiten obtener el costo derivado del transporte, asignación de clientes y diseño de la red de servicio, donde los costos que se estiman incluyen parámetros asociados a los recursos operativos de las empresas (Jakob, Craig, & Fisher, 2006). La integración de factores como los costos fijos, los costos variables, los recursos requeridos para el transporte, la demanda y las restricciones impuestas sobre las empresas de transporte, son la base para el desarrollo de un modelo matemático que permita estimar los costos logísticos del transporte de carga (Janic, 2007).

Según Bravo & Vidal (2013) la minimización de costos ha sido la estrategia preferida en procesos de modelización del transporte; sin embargo, las funciones objetivo presentadas no corresponden con la realidad logística de la mayoría de empresas que transportan mercancía de cualquier índole, ya que se abordan problemas logísticos de

forma independiente (Por ejemplo, el tamaño de la flota, fluctuaciones en la demanda, la asignación de vehículos a los nodos de servicio, el impacto ambiental de la movilización de mercancías, etc.), por lo que los resultados de estas funciones de costos no representan la realidad operativa de las empresas; surgiendo entonces la necesidad de realizar modelos que inicialmente estimen acertadamente los costos para posteriormente optimizarlos.

En esta tesis de maestría, se desarrolla un modelo para la estimación de costos logísticos en el transporte de paquetería y mensajería terrestre en Colombia que permite evaluar el impacto en los costos dada una asignación de recursos asociados a la red logística de las empresas del sector a través del análisis de los diferentes componentes del modelo desarrollado; lo anterior, responde a la necesidad de implementar modelos que permitan conocer el estado real de la empresa y conocer el origen de los costos (Bravo, Orejuela, & Osorio, 2007). El proceso de desarrollo del modelo se basó en cuatro objetivos, en primer lugar, en la identificación de los modelos matemáticos más relevantes para la cuantificación de los costos logísticos asociados al transporte de paquetería y mensajería, posteriormente se clasificaron estos modelos según sus ventajas, desventajas y aplicabilidad en empresas colombianas. En cumplimiento del tercer objetivo se analizó el proceso de distribución en empresas de transporte terrestre de este sector en Colombia, permitiendo formular un modelo matemático para la cuantificación de los costos asociados a la movilización de paquetería y mensajería que considere variables relevantes en la operación del transporte terrestre de las empresas del sector en Colombia.

La estructura de esta tesis de maestría se compone de tres capítulos, el primero de ellos presenta las generalidades del transporte de paquetería y mensajería, el segundo caracteriza los modelos matemáticos más relevantes que se han formulado en torno al transporte y que tienen como fin cuantificar u optimizar los costos asociados a esta actividad. Finalmente, se presenta un tercer capítulo que desarrolla el modelo matemático en consideración con la estructura identificada de las empresas.

# 1. Generalidades de las redes de transporte

El acelerado desarrollo de las actividades de transporte en la cadena de abastecimiento, el impacto del transporte en la eficiencia de las empresas, así como las actividades logísticas o la adecuada consolidación y desconsolidación, la generación de rutas óptimas para minimizar tiempos y costos de transporte, han cambiado el contexto logístico (K. Chen, Shen, & Feng, 2013). Autores como Lindholm, (2010) han identificado la necesidad de modelos que permitan la consecución de objetivos puntuales para lograr un transporte urbano e interurbano de bienes eficiente, entre estos modelos se encuentran los que permiten una gestión efectiva de los costos para un uso adecuado de los recursos y que consideren además los costos externos, es por esta razón que el planteamiento de un modelo matemático que contribuya a la cuantificación efectiva de costos a través del análisis detallado de los componentes del mismo, permite realizar una mejor gestión logística en las empresas de transporte (Marín, Serna, & Urán, 2018).

Dentro de esta minimización de costos como objetivo de análisis en el sector transporte, han surgido principalmente cuatro modelos que responden a la cuantificación y optimización de costos en el transporte:

- Asignación de clientes a instalaciones
- Localización de las instalaciones de consolidación y desconsolidación
- Ruteo de vehículos para la distribución de mercancías
- Diseño de redes de servicios

En este sentido, previo al análisis de las funciones de costos y modelos desarrollados para la estimación de costos, es necesario identificar las

características de las redes de transporte en las empresas de transporte del sector y cómo se han propuesto diferentes modelos en las problemáticas anteriormente deseadas.

## **1.1 Características en las redes de transporte en empresas de paquetería y mensajería**

El análisis de redes de transporte es un tema que se ha abordado ampliamente como objeto de estudio, debido a que de las características de estas redes se identifican las relaciones entre los recursos para movilizar mercancías y cómo utilizarlos para maximizar la competitividad logística desde un transporte eficiente, ya sea en términos de tiempo, distancia o costos (Lee & Moon, 2014). Autores como Janic, (2007), han presentado consideraciones generales que se deben incluir en el proceso de modelización de redes de transporte; presentando como principal característica la necesidad de definir las unidades de carga en función de un periodo fijo (día, semana, etc.); y si las terminales logísticas son centros de consolidación y desconsolidación como en el caso de paquetería y mensajería, la capacidad siempre será suficiente para satisfacer la demanda del servicio de transporte. Otras características importantes en estas redes de transporte son:

- Las terminales representan los nodos de la red, donde las unidades de carga se intercambian entre las mismas y/o diferentes modos de transporte; además, las unidades de carga pueden entrar y / o salir de la red a través de estos nodos.
- Las unidades de carga entran y salen de la red en lotes, que pueden formar inventarios en las localizaciones articulares como los nodos de la red, es decir, los terminales y los enlaces de la red.
- La formación de inventarios de las unidades de carga genera retrasos; los retrasos pueden ser repetitivos a intervalos de tiempo regulares llamados ciclos de red (día o una semana) dependiendo de la estructura de la oferta y la demanda.
- Los costos totales de las redes particulares consisten en los costos de inventario, costos de transporte y costos de la terminal; los costos de inventario se relacionan



con el manejo de los inventarios de las unidades de carga, mientras que en una red dada; el costo de transporte se compone de costos de los operadores para el transporte de unidades de carga entre su origen y destino, el coste en el terminal incluye el costo de manejo de la mercancía durante su estancia en la terminal.

Al analizar los diferentes tipos de redes para el transporte, se encuentra que el transporte de paquetería y mensajería abarca características de las redes “Uno a Muchos” descrita por Daganzo (2005) desde los nodos principales de cada zona y hacia los diferentes puntos de origen y destino de la carga. A continuación, se presenta como se han abordado las estrategias de envío y configuraciones de las redes de transporte de paquetería y mensajería en la literatura científica, con el fin de identificar la estructura que debe tener el modelo para la cuantificación de costos logísticos en estas empresas.

### **1.1.1 Configuración de las redes de transporte de paquetería y mensajería**

La proposición de un modelo para la cuantificación de costos en las empresas de transporte de paquetería y mensajería requiere caracterizar inicialmente la red de distribución que se asocia a este servicio y comprender las dinámicas inmersas entre los diferentes actores de esta. Las redes de distribución representan las rutas de envío de los bienes desde uno o varios puntos de origen hasta su destino final que puede ser una o varias locaciones (Daganzo, 2005).

La solución para asignar una red de distribución varía no solo en función del número de puntos de origen o destino, sino también de las funciones de costos asociadas a cada vínculo entre nodos. Cada una de estas estrategias se puede describir brevemente como (Daganzo, 2005):

- Uno a Uno: Se tiene un punto de origen y uno de destino
- Uno a Muchos: Un punto de origen a múltiples destinos, generalmente los puntos de destino se dividen en regiones, en estas redes es la distancia recorrida por los vehículos el factor que más afecta los costos totales de la red, por lo que la asignación de vehículos resulta importante para minimizar las distancias y por

ende el tiempo de entrega. Para el análisis de estas redes se tiene que los vehículos se despachan en tiempos, teniendo en cuenta consideraciones sobre:

- Si el tamaño de los vehículos es homogéneo o heterogéneo.
  - La ubicación de los puntos de destino (Como se zonifica, y si los volúmenes a transportar son iguales o no)
  - Los tiempos de despacho.
  - Número de paradas y el tiempo en cada una de ellas.
  - Capacidad usada de los vehículos.
  - Las características del producto transportado: homogeneidad, peso, capacidad de los vehículos en función de los ítems.
  - Inventario en el punto de origen.
  - Si la demanda es constante o aleatoria.
- Uno a muchos con transbordos: La decisión que hace más complejo el diseño de una red de distribución con transbordos, es la de cuántas terminales se operarán, su ubicación, la programación de los diferentes tipos de vehículo y las rutas que se les asignan. El diseño de este tipo de redes suele asociarse a los problemas de recolección de bienes.

### 1.1.2 Estrategias para la distribución de mercancías

A continuación se describen las diferentes redes de distribución, en torno a estas se han generado estrategias de distribución que buscan realizar un transporte eficiente de bienes entre nodos de origen y destino, algunas de las más utilizadas son descritas por Janic, (2007):

- **P-P (Point to Point)**

Las redes punto a punto son similares a la clasificación uno a uno realizada por Daganzo (2005), esta red sirve a flujos relativamente importantes y regulares de transporte de mercancías, las unidades de carga de diferentes puntos de origen son recogidas por carretera y se concentran en una terminal principal; después son transbordados de los camiones al modo de transporte que los llevará a la terminal

de destino (si hay intermodalidad) y posteriormente son trasbordados al camión que llevará los bienes por carretera receptor final.

- **TCD (Trunk Line with collecting/Distribution forks)**

En español hace referencia a una línea troncal con empalmes de recogida y distribución; es similar a una red Punto a Punto, pero cubre una red más amplia que está conformada por dos tipos de terminales: terminales troncales de origen y destino y las terminales de Recolección/Distribución (RD). Si hay servicios de transporte secundario como barcasas o trenes, estos operan entre ambos tipos de terminales, en las terminales RD los medios de transporte pueden cargarse o descargarse parcialmente y se movilizan entre ambas terminales.

- **HS (Hub and spoke)**

Traduce literalmente buje y radios por la conformación de las ruedas de bicicletas que inspira la conformación de esta red. La red cuenta con varios terminales de inicio y fin (radios) y una terminal situada en el centro (hub). Las unidades de carga transportadas llegan a los radios generalmente por carretera. Allí, son transbordados a partir de los camiones a los vagones de ferrocarril, barcasas u otros camiones. A continuación, se procede a transportar la mercancía a la terminal central, en el que se va a transbordar entre los medios de transporte entrantes y salientes. El transbordo lleva desde varios minutos a varias horas, dependiendo del horario de entrada y salida y el tipo de operaciones de transbordo. Después de que los vehículos salientes de la terminal central lleguen a las secundarias, las unidades de carga se transbordan a un nuevo vehículo que lo llevará a los clientes

- **L/R (Line or Ring)**

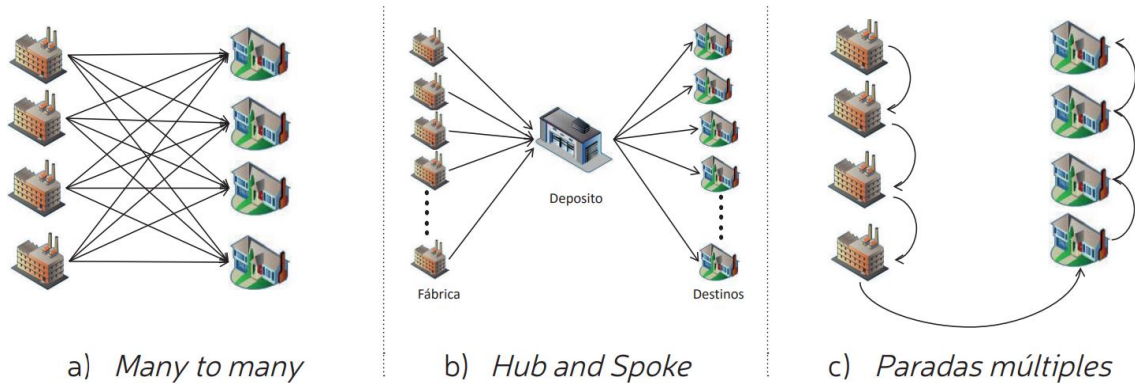
Consiste en una terminal de inicio y fin localizada en ambos extremos de varias terminales intermedias ubicados en medio de la línea o anillo que conforma la red, los vehículos para el transporte son agendados en estas terminales y pueden detenerse en una o algunas de estas terminales intermedias para realizar transbordo o carga de mercancía.

- **M (Mixed)**

Las redes mixtas se generan al combinar elementos de las redes ya mencionadas.

Otra clasificación de las principales redes de distribución es descrita por Serna, (2016), son las propuestas por Estrada (2007) y se muestran en la Figura 1-1

**Figura 1-1:** Estrategias de distribución de mercancía.



Fuente: Serna (2016).

La estrategia de distribución de muchos a muchos se basa en el envío directo desde el centro de producción al centro de demanda y su implementación se basa en los bajos costos de los vehículos usados; la estrategia Hub and Spoke como ya se explicó, corresponde a una estrategia que usa centros de consolidación de carga que busca incrementar la cantidad de carga de los vehículos y realizar entregas finales a centros de consumo aprovechando economías de escala; finalmente, la estrategia de envíos con paradas múltiples lo que busca es tener un número reducido de rutas que es útil cuando los costos del vehículo son altos.

## 1.2 Transporte de paquetería

El transporte de paquetería se refiere al reparto de paquetes desde terminales donde se recolectan los envíos y se envían hacia los clientes finales, generalmente los paquetes se entregan a las plataformas centrales a primera hora de la mañana o al finalizar la noche para ser clasificados de acuerdo a su destino final, una vez se han clasificado los paquetes, los camiones se cargan y los conductores comienzan las entregas en las zonas de distribución ya definidas. Una vez terminado el despacho de paquetes inician la recolección de nuevos envíos en las terminales secundarias

para repetir el proceso de llevarlas a la terminal principal para ser ordenados y enviados. Una cuestión importante es que una sola ruta está prevista para el reparto en cada zona en función de los paquetes ordenados en la plataforma principal, por lo que la planeación del ruteo de los vehículos debe ser ágil.

En cuanto a las rutas para la recogida de paquetes, suelen ser más estándar debido a que se cuenta con terminales secundarias fijas (Ducret, 2014); sin embargo, pueden presentarse casos en que las empresas de transporte adoptan políticas que obligan a cambiar estas características tradicionales del transporte de paquetería; el cambio más común es el de realizar envíos “personalizados” que requieren un menor tiempo de entrega. Bajo esta perspectiva se encuentran dos tipologías que se refieren a la consolidación de la carga: *Full Truckload* (FTL) y *Less-than Truckload* (LTL) (Estrada, 2007); como sus nombres en inglés lo indica, la primera tipología se refiere al envío de camiones con la capacidad de carga usada en su totalidad, lográndose una disminución de costos pero suponiendo en muchos casos el aumento de tiempo de envío debido a la espera de consolidar la carga completa. En el caso de la tipología *Less-Than Truckload* se consolidan los vehículos con cargas parciales con el fin de cumplir con tiempos de envío predeterminados.

En los problemas logísticos que se asocian al transporte de paquetería la demanda es incierta, los tiempos variables en las rutas y la posibilidad de no realizar una entrega debido a la ausencia de un cliente se encuentra presente, lo que afecta no solo los tiempos de envío, sino también la capacidad esperada del vehículo para realizar la recogida de paquetes en las terminales secundarias.

La caracterización general de la red de transporte de una empresa de paquetería es presentada por Estrada (2007), donde una red troncal conecta las terminales de consolidación de carga principales (delegaciones), mientras que una red secundaria denominada red capilar, conecta las terminales con los clientes finales. Bajo estas condiciones, dos estrategias se presentan como las más indicadas para modelizar el transporte de paquetería, estas son la estrategia *Hub and Spoke* y la estrategia de paradas múltiples, ambas se relacionan a continuación.

### **1.2.1 Estrategia de envío hub and spoke en el transporte de paquetería**

Las estructuras de redes hub-and-spoke juegan un papel crucial en el rendimiento de las redes de transporte de hoy en día, estos modelos de redes se pueden implementar en cualquier modo de transporte, aunque esta configuración nació de la necesidad de redes aeroportuarias. Algunos autores han resaltado las estrategias de envío hub and spoke como una opción que permite adoptar las nuevas regulaciones en materia ambiental, ya que se minimiza el consumo de combustible al disminuir los trayectos y/o distancia para llevar mercancías, lo que hace que la adopción de este tipo de estructuras se vuelven aún más crítica en el entorno actual (Gelareh, Neamatian Monemi, & Nickel, 2015)

Durante los últimos años, los investigadores han estudiado el problema de diseño de redes hub and spoke convencionales bajo condiciones de incertidumbre estocástica. Por ejemplo, T.-H. Yang, (2009) presenta un modelo de programación estocástica de dos etapas para la ubicación de hubs de carga aérea y la planificación de rutas de vuelo en virtud de las variaciones estacionales de la demanda; mientras que Sim, Lowe, & Thomas, (2009) abordaron este diseño de redes considerando el carácter estocástico de los tiempos de viaje y su impacto en el nivel de servicio, asociando distribuciones normales independientes a los tiempos de viaje. En cuanto a la incertidumbre que puede asociarse a los costos en las redes Hub and Spoke, se encuentra que Contreras Castañeda, Tordecilla Madera, & Silva Rodríguez, (2013) relacionan directamente la incertidumbre de la demanda y el tiempo a los costos logísticos en estas redes.

Aunque en la mayor parte de estudios enfocados en la configuración de redes Hub and Spoke incluyen la incertidumbre para modelizar ya sean costos, tiempos o nivel de servicio, es claro que no se logra una integración de estas incertidumbres en un modelo que sea útil y además comprensible para las organizaciones (Khosravi & Jokar, 2018; K. Yang, Yang, & Gao, 2016). En cuanto a esta configuración, en cada zona de envío dentro de los límites de la región de servicio, es posible identificar como hubs los terminales principales de consolidación donde se busca la optimización de la capacidad

de los vehículos, los nodos al interior de la región de servicio corresponden a *spokes*. Bajo esta estrategia, es posible tomar decisiones sobre las rutas a asignar, el número de vehículos y la capacidad a usar de los mismos.

### **1.2.2 Estrategia de envío de paradas múltiples en el transporte de paquetería**

Las estrategias de envío de paradas múltiples al igual que las estrategias de envío hub and spoke, se han estudiado desde el reconocimiento del transporte como actividad crítica generadora de costos en las empresas; Kuby & Gray, (1993), estudiaron el impacto de integrar envíos de paradas múltiples desde un nodo central o Hub, sin embargo, los supuestos de esta estructuración consideraban la demanda determinística, los costos fijos, capacidad de vehículos homogénea y no permitía la interconexión con otros hubs; estos supuestos siguieron estando presentes en los modelos desarrollados en la década siguiente; sin embargo, autores como Estrada-Romeu & Robusté, (2015), expresan como las estrategias de envíos con paradas múltiples se deben concentrar en la optimización de los factores de carga, por lo que la heterogeneidad de vehículos debe considerarse ya que afecta directamente los costos de transporte.

En la Figura 1-1, se ve el uso de paradas múltiples como estrategia con un número reducido de rutas compuestas por un alto número de paradas en cada una de ellas. Su aplicación se puede llevar a cabo cuando el costo y el tiempo para realizar una parada adicional en una ruta son reducidos.

## **1.3 Transporte de mensajería**

El transporte de mensajería involucra la movilización de cartas y pequeños paquetes desde y hacia diferentes zonas geográficas. Los problemas logísticos que las empresas de transporte de mensajería enfrentan en el día a día son los relacionados con la definición de rutas hacia zonas de envío ya predeterminadas considerando la naturaleza estocástica de la demanda y la congestión vehicular como principales

variables externas que afectan la eficiencia del transporte (Yan, Lin, & Lai, 2013). De forma general, la red espacio-temporal de los flujos de mensajería denota los movimientos posibles de los correos dentro de un cierto período tiempo y ubicaciones (Yan et al., 2013); sin embargo en esta configuración no se contempla el diseño de la red, por lo que si bien se logran identificar los tiempos de servicio, no se diferencia la asignación del cliente a los depósitos.

La característica dinámica de las redes de transporte de mensajería, hace referencia a los cambios constantes en la demanda del servicio, la asignación de rutas eficientes que respondan a esta característica ya ha sido abordada por autores como Larsen, Madsen, & Solomon, (2008), quienes analizan el impacto del uso de Tecnologías de la Información y la Comunicación en la eficiencia de las rutas establecidas para los vehículos cuantificando el grado de dinamismo de la red; de forma similar se aborda este tema por Barkaoui, Berger, & Boukhtouta, (2015); Lin et al., (2014). Aunque el dinamismo de estas redes ya ha sido abordado, Yan et al., (2013) afirman que la naturaleza estocástica del tiempo de viaje no ha sido tan estudiado en las redes de transporte de mensajería.

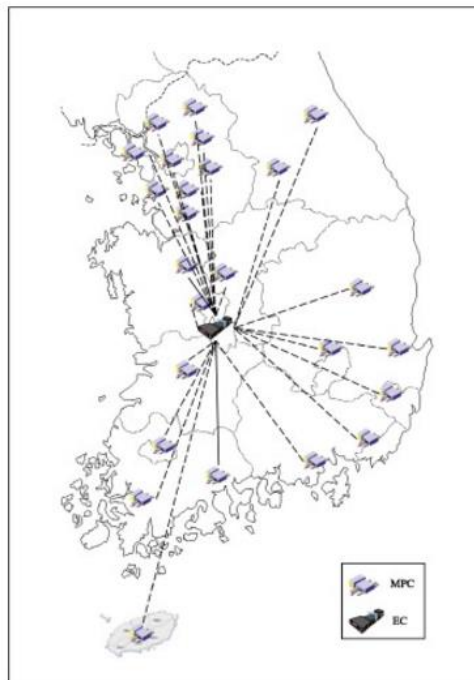
Lo anterior muestra que el ruteo de vehículos en redes de mensajería y el problema de programación y ajuste en tiempo real con sus múltiples restricciones, implican un análisis complicado entre numerosas limitaciones de tiempo y espacio que están altamente correlacionados entre sí; requiriendo la formulación de modelos logísticos que generalicen las características de estas redes e incluyan las variables estocásticas que hasta el momento parecen haber sido abordadas independientemente. En función de las características mencionadas, la estrategia de envío que se ha considerado principalmente para sistemas postales y de pequeños paquetes es la Hub and Spoke; considerando que previo a la inclusión de tiempos de envío; es necesario configurar una red robusta que asigne apropiadamente los clientes a los centros de recolección.



### 1.3.1 Estrategia hub and spoke en el transporte de mensajería

Esta estrategia se ha analizado para redes postales cuando para una ciudad o zona geográfica se presentan varias micro-zonas que son atendidas desde una terminal central donde se concentran la totalidad de cartas y pequeños paquetes. Lee & Moon, (2014), desarrollaron dos modelos matemáticos híbridos que permiten analizar el comportamiento de la red logística del sistema postal en Corea, Esta red se presenta en la Figura 1-2.

**Figura 1-2:** Red logística del sistema postal en Corea – Hub and Spoke



Fuente: Tomado de Lee & Moon (2014)

Los MPC son centros de procesamiento de correo ubicados en diferentes zonas capitales de Corea, y los EC son centros de intercambio de correo, que corresponden a grandes terminales que corresponden a los denominados Hub. En cuanto a las decisiones operativas que dependen de las decisiones estratégicas, incluyen la disposición del número de vehículos de transporte de carga y la planificación de la recogida y entrega de paquetes o recorridos parciales de las

cargas a los clientes de cada depósito; sin embargo, no se considera el diseño de la red para clientes finales.

Otros autores que basan la formulación de modelos de asignación de vehículos y de análisis de las redes de mensajería en estrategias hub and spoke son Gelareh, Nickel, & Pisinger, (2010) y Sun, Zhao, & Hou, (2015); pero si bien se considera la posibilidad de disminución de costos a través de las rutas inter hub haciendo uso de economías de escala, no se considera la posible disminución de costos a través de una asignación adecuada de spokes a los mismos. En cuanto a los costos asociados al transporte de mensajería Sun, Wang, & Hou, (2015), presentan el costo operacional, costo asociado a enviar un vehículo de capacidad homogénea, costo de penalización por congestión, costo asociado a la distancia recorrida y el costo de espera en una terminal de mensajería.

## **1.4 Red de paquetería y mensajería**

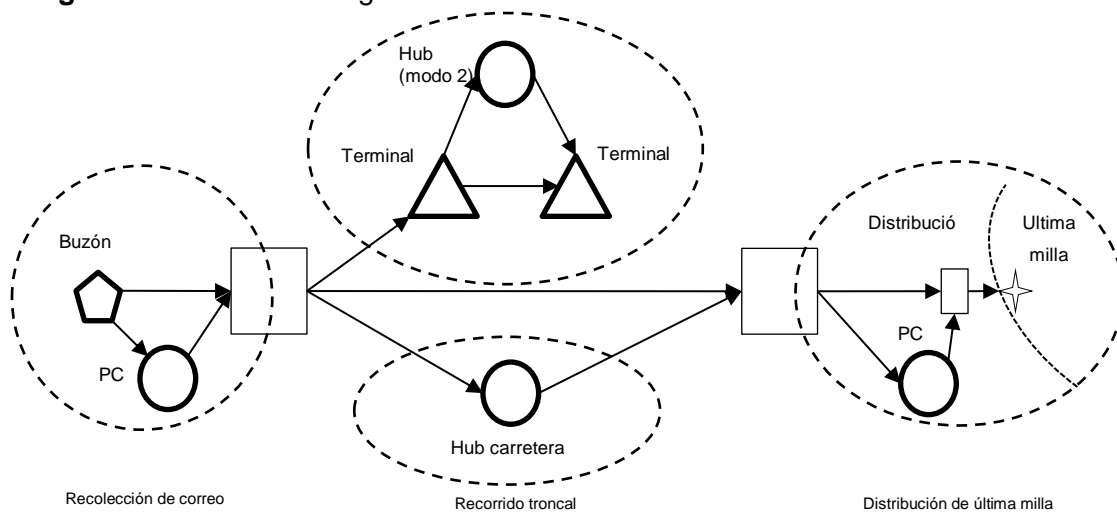
Para la construcción del modelo logístico que represente la red de transporte de paquetería y mensajería, se realiza inicialmente una descripción de la composición de la red de paquetería y mensajería, las rutas que se generan en este tipo de distribución considerando las características presentadas en las secciones 1.1; 1.2 y 1.3. y con base en estas descripciones identificar los costos que se asocian a dicha red. Un modelo logístico para la distribución de paquetería y mensajería es presentado por Baumung et al., (2015), este se muestra en la Figura 1-3 y considera los siguientes componentes:

- Subred de recolección de correo: el correo se obtiene de diferentes fuentes de correo (por ejemplo, buzones de correo, clientes empresariales) y se transportan a los centros de clasificación. Los puntos de consolidación (CoP) se utilizan para cambiar de vehículos que transportan el correo a los centros de clasificación.
- Centros de clasificación (SC): son grandes instalaciones de clasificación automática para el correo y los paquetes que funciona en dos modos diferentes durante diferentes intervalos de tiempo. El centro de entrada de clasificación

(ISC) que realiza la clasificación con respecto a la clasificación de destino central (SC), mientras que el centro de salida de clasificación (OSC) realiza procesos para la distribución y entrega en el destino final.

- Subred de transporte de larga distancia: La subred se encarga del intercambio de correo entre los centros de clasificación (durante la noche). La idea principal es el uso de vehículos más grandes y más rápidos para las distancias largas y correo consolidado a un subconjunto de los centros de clasificación que se utilizan como hubs. En aplicaciones del mundo real, la subred de transporte de larga distancia a menudo se realiza en diferentes modos de transporte (por ejemplo, aire-carretera, carretera-ferrocarril).
- Subred de Distribución: el correo es distribuido por el transporte desde los centros de clasificación (denominado: estaciones de distribución (DS) en el caso de la correspondencia, y las bases de entrega (DB) en el caso de correo de paquetes). En los mini-centros de una clasificación final en la secuencia se lleva a cabo para cada uno de los distritos de entrega asignados (DD).
- Subred de entrega (última milla): Cada cartero o vehículo tiene un distrito de entrega asignado. La ruta de entrega inicia en el mini-hub, se mueve a la zona de entrega y lo visita en una secuencia predefinida (óptimo) y finalmente regresa a la mini-hub (DS / DB).

**Figura 1-3:** Red de entrega de correos



Fuente: Baumung, et al., (2015)

Este modelo logístico aplica para la distribución de paquetería y mensajería terrestre en Colombia, en cuanto a que se requieren centros intermedios de consolidación y que se conectan a los hub, esta es una configuración en 3 niveles diferentes compuestos por las terminales denominadas hubs, los centros de consolidación locales (cc), los puntos de recogida de la mensajería/paquetería y los destinos finales resultantes del proceso de distribución.

Esta estructura puede variar, ya que las redes de distribución de paquetería y mensajería presentan una estructura que depende de la diversidad de clientes que deben ser atendidos, lo que ha llevado a la creación de centros de envíos desde las terminales de consolidación de carga, permitiendo la obtención de economías de escala al usar una mayor capacidad tanto en bodegas como vehículos, lo que se ve reflejado en un menor costo de procesamiento por unidad (Estrada, 2007).

Para las diferentes instalaciones que las empresas de paquetería y mensajería han debido adoptar, se tiene un objetivo diferente, en este sentido los puntos de recepción locales o almacenes locales se encuentran distribuidos en las zonas de servicio y se consideran clientes para la recogida de productos encontrándose en la zona externa del sistema de recolección/distribución de paquetería y mensajería.

Desde estos puntos de recepción de mercancía, los vehículos que transitan las diferentes zonas de recogida/entrega, llevan los paquetes a centros logísticos locales para que sean desconsolidados y posteriormente consolidados para ir a las zonas de entrega respectivas. Estos centros de consolidación se ubican en un punto medio dentro del sistema logístico de distribución de paquetes como terminales satélites. En el centro del sistema de recolección y entrega de paquetería y mensajería se encuentran las terminales logísticas principales o troncales que reciben la mercancía procedente de los centros logísticos locales que pueden estar ubicados en otras ciudades.

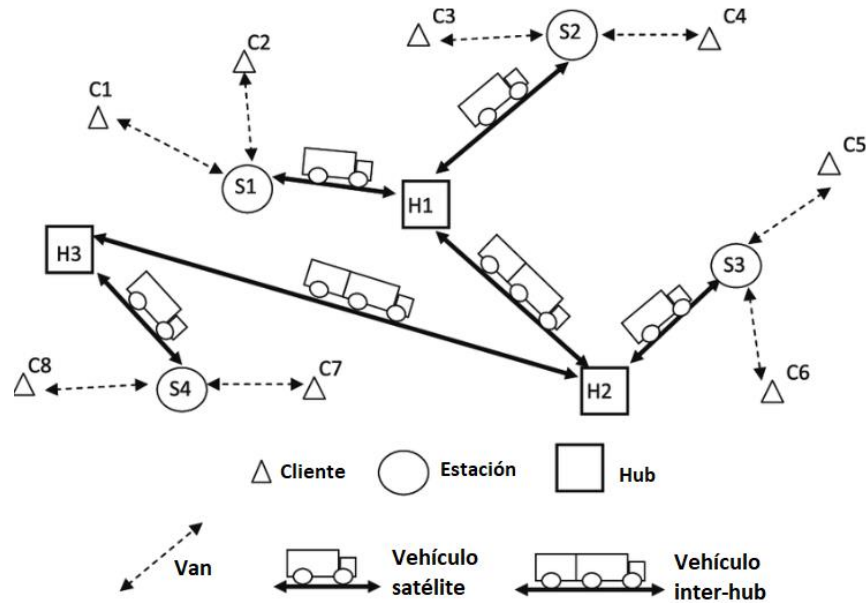
### 1.4.1 Composición de la red de paquetería y mensajería

Previo a la formulación de un modelo que permita estimar los costos logísticos asociados al transporte de mercancía y mensajería, es necesario comprender el funcionamiento de estas redes de distribución. En la literatura se encuentran casos de estudio del problema de ruteo de los vehículos a través de redes Hub and Spoke, sin embargo, es necesario considerar las ubicaciones de los centros o terminales satélites que están asociados a cada Centro logístico principal (Hub) y los costos asociados al manejo de la correspondencia que se da en ellos. Ante esta necesidad, se plantean los problemas de diseño de redes para distribución de correspondencia (Problem Design Network for Parcel Distribution - PDNDP). Este problema se ilustra en la Figura 1-4.

Como se ha señalado anteriormente, los Hubs son los centros logísticos principales de cada ciudad mientras que los Spokes, son satélites donde clientes dejan mercancía para ser recogida por un vehículo y llevada a un Hub para su direccionamiento al satélite correspondiente y a su destinatario final. El problema PDNDP considera tres escenarios de distribución:

- La mercancía pasara por un único centro logístico, esto sucede si en la gráfica C1 envía a C4; es decir, el paquete es enviado desde un satélite de origen a un satélite destino de la misma ciudad o área del Hub 1.
- La mercancía pasará por dos Hubs que son adyacentes, es decir, están conectados directamente. En la figura esto sucederá si el cliente 1 envía un paquete desde el satélite 1 al cliente 5, quien es servido desde el satélite 3 pero que está asociado al Hub 2.
- La mercancía deberá pasar por más de dos Hubs ya que el Hub inicial y el final no son adyacentes; esto sucede si en la gráfica el cliente 1 desea enviar al cliente 8; en este sentido el Hub dos será un centro logístico de tránsito.

Figura 1-4: Red de servicios de distribución de paquetería



Fuente: Ben-Ayed (2013).

Este diseño generalizado de red tiene como consideraciones bases que:

- El costo resultante del ahorro por usar instalaciones de consolidaciones se expresa como un factor de descuento teórico entre 0 y 1. La idea es que el costo de ir de  $i$  a  $j$  se disminuya si los dos nodos  $i$  e  $j$  son Hubs.
- Se justifica económicamente tener conexiones directas entre todos los pares de Hubs o centros logísticos, ya que el costo de ir directamente de un Hub a otro siempre será menor que transitar por un tercero; es decir, tienden a crearse rutas directas entre los centros logísticos.
- Se busca minimizar costos de ubicación de los centros logísticos.

En la literatura, la mayoría de problemas PDNDP se concentran en la localización de Hubs minimizando sus costo operativo; sin embargo en los últimos años se ha incluido el problema de ruteo y costos asociados al transporte al diseño de estas redes, ya que centrarse únicamente en los costos por ubicación limitaba el problema a tomar decisiones netamente considerando distancias y no otros factores como el tipo de mercancía movilizada y los vehículos implicados en el despacho de la correspondencia (Baumung et al., 2015).

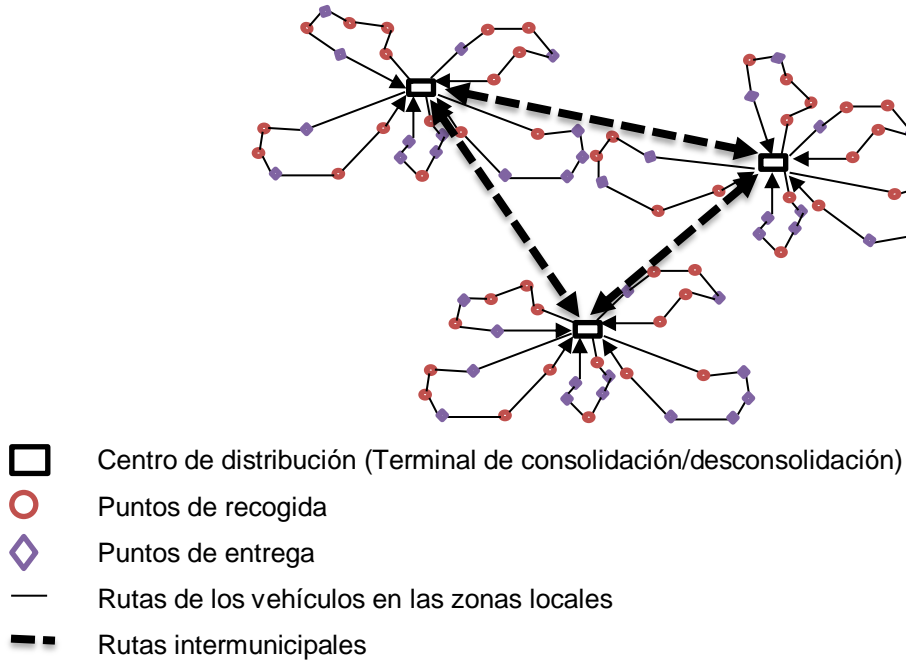
A partir de estas consideraciones generales y la necesidad de análisis de costos asociados tanto al transporte como a las instalaciones, autores como Campbell, Ernst, & Krishnamoorthy, (2005) proponen un problema para ubicación de centros logísticos donde la minimización del costo se centra en el costo de los arcos que unen los hubs en lugar de la instalación; mientras que Yoon & Current, (2008) llevan este análisis más allá al incluir los costos fijos y variables de estos arcos. Posteriormente y con el ánimo de ampliar no solo la complejidad sino la utilidad de los PDNDP, Ben-Ayed, (2013) propone el diseño de una red de servicio útil para compañías postales donde se incluyen costos asociados a diferentes vehículos e instalaciones; si bien realiza un planteamiento inicial de esta red, su solución relaja las dos últimas restricciones mencionadas anteriormente con una solución simplificada del problema donde las ubicaciones y las instalaciones se dedican a todos los niveles simultáneamente, donde los spokes o satélites evidentemente no se comportan así.

#### **1.4.2 Rutas asociadas al transporte de paquetería y mensajería**

Según el análisis de las características que presentan el transporte de paquetería y de mensajería, es posible representar una red que ilustre el comportamiento de ambos servicios haciendo uso de la estrategia hub and spoke. La presencia de hubs como terminales principales de consolidación y desconsolidación de los paquetes y/o cartas es necesaria en cada una de las zonas de distribución, mientras que los nodos que deben ser atendidos representan los spokes (Wasner & Zäpfel, 2004).

La Figura 1-5 representa la red que caracteriza el transporte de paquetería y mensajería, donde los múltiples centros de distribución interconectados reciben y despachan paquetes directamente a los clientes sin pasar por centros logísticos de mayor tamaño; esta red de dos niveles es la más usual en zonas geográficas de bajo volumen de envíos.

**Figura 1-5:** Red de distribución de paquetería y mensajería



Fuente: Adaptado de Daganzo (2005).

En el esquema puede observarse como las rutas se distribuyen en función de zonas de recogida o envío, sin embargo, debe considerarse las capacidades de los vehículos antes de asignarles una ruta. Otras consideraciones del transporte de paquetería y mensajería son:

Los clientes depositan los paquetes que serán recogidos en puntos de servicio que se encuentran distribuidos en diferentes zonas, es allí donde la empresa de transporte debe enviar sus vehículos para recoger los paquetes ( $R_i$ ).

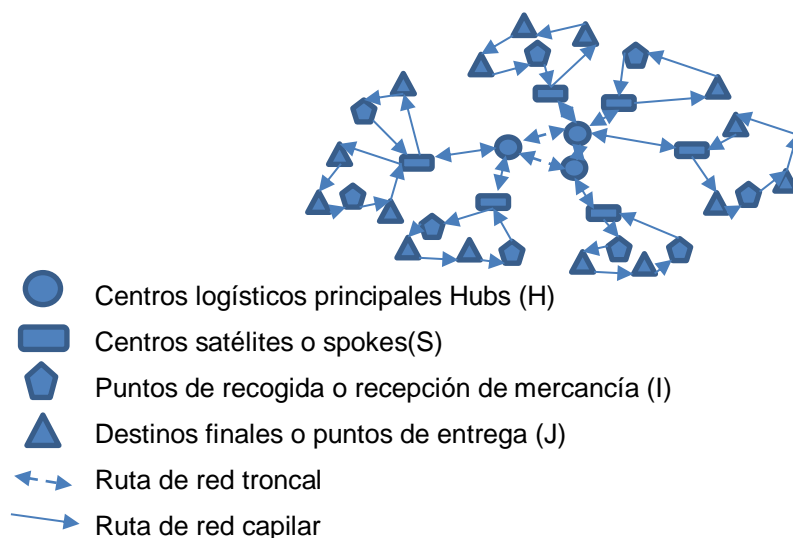
- Posterior a la recolección de los paquetes, los vehículos regresan a la terminal correspondiente para la clasificación de los paquetes según la zona a ser enviada y el peso de este.
- La terminal puede ser tratada como un centro de *cross-docking*, o como lo expresa Daganzo (2005), como una terminal de transbordo, donde los vehículos son cargados nuevamente hacia los puntos de envío. Cada vínculo entre nodos ya sea de recogida o de despacho, tiene asignado una función de costos que contempla:



- Costo fijo de  $R_{i-1}$  a  $R_i$  y de  $F_{i-1}$  a  $F_i$
- Costo de espera en cada  $R_i$  y  $F_i$
- Costo asociado a la carga que se lleva de  $R_{i-1}$  a  $R_i$  y de  $F_{i-1}$  a  $F_i$  y que disminuye a medida que avanza el despacho y aumenta a medida que se realiza la recolección, lo que permite la obtención de un costo promedio.

Sin embargo, es necesario considerar rutas con tres niveles, la cual refleja de forma más idónea el caso colombiano; donde hay centros logísticos principales en las ciudades y alrededor del mismo se encuentran diferentes centros satélites que se encargan de consolidar y desconsolidar paquetería para zonas de distribución de menor tamaño. Esta formulación se presenta en la Figura 1-6, la cual representa claramente una configuración de tipo Hub and Spoke como las descritas en las secciones anteriores. En este sentido se tiene entonces Conjunto de clientes iniciales [I], conjunto de clientes finales [J], conjunto de Hubs o centros logísticos principales [H] y conjunto de centros satélite [S]. Las rutas que se generan entre clientes de recogida y entrega y los satélites es una ruta atendida por vehículos de baja capacidad y es denominada red capilar, y se integra con ruta entre satélites y Hubs; sin embargo, la red inter-hub es atendida por vehículos de mayor capacidad y es denominada red troncal.

**Figura 1-6:** Red de distribución Hub and Spoke



Fuente: Teodorović & Janić (2017).

Esta representación tiene mayor cercanía a la realidad operativa de empresas de paquetería y mensajería. A continuación, se describe entonces la composición de la red de servicios de una empresa de paquetería y mensajería; que si bien no contempla como principal objeto de estudio las rutas de recogida y entrega a clientes finales; si realiza un diseño de red en consideración de las conexiones entre nodos.

## **2. Modelización del transporte de paquetería y mensajería**

Para mejorar la eficiencia de las empresas de transporte y obtener ventaja competitiva, se han planteado modelos enfocados en la optimización del uso de los recursos como los vehículos y la minimización del tiempo de viaje, los modelos de ruteo contribuyen desde la administración de los recursos y consideran variables y restricciones que permitan hacer seguimiento desde diversas aristas a la operación de las empresas de transporte (Santos, Coutinho-Rodrigues, & Current, 2008); las soluciones que se plantean en torno al Problema de Ruteo de Vehículos o VPR, se han enfocado en la asignación de cargas y rutas a los vehículos, incluyendo variables que son determinantes para mejorar la operación como la demanda, el tiempo de entrega, la capacidad de los vehículos, e incluso el nivel de servicio que perciben los demandantes (Montoya-Torres, López Franco, Nieto Isaza, Felizzola Jiménez, & Herazo-Padilla, 2015); sin embargo, al tomar decisiones sobre las rutas usadas para el transporte no se consideran la totalidad de variables que afectan los costos logísticos de las empresas transportadoras de paquetería y mensajería ya que los costos considerados en estos modelos son aquellos sobre las que las empresas pueden actuar o aquellos sobre los que se tiene información; obviando costos externos que dependen de variables estocásticas y sobre los que la empresa no puede actuar o no tiene conocimiento.

Debe considerarse que la construcción de modelos que permitan la estimación de costos logísticos asociados al transporte de paquetería y mensajería, no puede obviar las variables que afectan el desempeño del sistema de distribución, estos modelos deben buscar cuantificar el impacto monetario de los tiempos asociados a las demás actividades logísticas, las distancias atribuidas a la red de distribución y además los tiempos de entrega asociados al servicio (Ambrosino, Ferrari, Sciomachen, & Tei,

2016). Autores como Lindholm, (2010) han identificado la necesidad de modelos que permitan la consecución de objetivos puntuales para lograr un transporte urbano e interurbano de bienes eficiente, entre ellos se encuentra una gestión efectiva de los costos que permita el uso adecuado de los recursos, que considere además los costos externos, es por esta razón que el planteamiento de un modelo matemático que contribuya a la cuantificación efectiva de costos, permite realizar una mejor gestión sobre la operación de transporte urbano en general.

Al analizar los diferentes elementos que se consideran en la construcción de las funciones de costos logísticos y modelos que buscan su minimización, se encuentran como principales factores la cantidad movilizada y el costo por unidad transportada, algunos incluyen los costos fijos y el número de unidades en la función de costos que alimenta el modelo; ignorando elementos que no son controlados por quienes transportan y afectan el comportamiento de los costos (Bravo & Vidal, 2013). Algunos de los tipos de modelos que se han propuesto son:

- Modelos econométricos; que consideran el tiempo y la distancia sin considerar otros factores (Combes, 2014)
- Modelos de costos internos y externos: Consideran todos los elementos que influyen en los costos de operación de la empresa como impuestos, demanda, costos ambientales, etc.; haciendo de los modelos mucho más robustos, permitiendo incluso predecir el comportamiento de los costos en el tiempo (Pérez & Vassallo, 2013)
- Modelos de estimación de costos basados en el producto: Autores como (Dooley, Parker, & Blair, 2005), indican que se requiere considerar el costo de transportar cada producto, considerando los requerimientos que tiene su transporte.

A continuación, se presentan las principales características de los modelos que se han desarrollado para la estimación de costos logísticos en sistemas de transporte.

## 2.1 Características de los modelos de estimación de costos logísticos en sistemas de transporte

Los esfuerzos centrados en la creación de modelos en torno a la logística y el diseño de redes de suministro, consideran la importancia de los costos asociados al transporte, sin embargo, la determinación de estos costos ha llevado a la construcción de modelos centrados en la estimación de costos específicos; ya sea para una actividad, un sector, empresa o ciudad. Un ejemplo de ello lo presentan Dooley et al., (2005); quienes desarrollan un modelo de costos para una productora de leche en Nueva Zelanda; sin embargo este modelo es determinístico y considera las variables que no son controladas por las empresas productoras de leche como valores promedios, lo que puede reflejarse en las franjas de error en la estimación de los costos del modelo presentado por los autores.

Dentro de la literatura científica enfocada en el diseño de cadenas de suministro que consideran la importancia de los costos del transporte se encuentra a Nasiri, Davoudpour, & Karimi, (2010); quienes además de considerar el tiempo y la distancia en función de los costos fijos, incluyen un costo promedio de inventario; Thanh, Péton, & Bostel, (2010) presentan un modelo matemático de costos lineal y consideran los costos fijos, los costos de inventario, y cómo únicas variables presentan la cantidad transportada y la distancia. De forma similar Monteiro, Leal, & Raupp, (2010) Cardona-Valdés, Álvarez, & Ozdemir, (2011); Bashiri, Badri, & Talebi, (2012) y otros, presentan modelos de costos con pocas variables, donde se consideran el combustible y el funcionamiento de los vehículos como costos fijos.

Autores como Sahin, Yilmaz, Ust, Guneri, & Gulsun, (2009); expresan que la formulación de modelos de costos de transporte donde se consideren constantes los costos asociados a los vehículos, a los transportadores, a la distancia recorrida, etc., funcionan bien para aquellas empresas que delimitan su producción y la cantidad de bienes a transportar; sin embargo para el caso de estudio; distribución de bienes y

mensajería; no es el caso. Las empresas que se dedican al transporte urbano de bienes se ven enfrentadas a condiciones cambiantes en la demanda, el tamaño de los envíos, y otras variables que dependen del tiempo y requieren modelos más dinámicos; en función de esto Ambrosino & Grazia Scutellà, (2005), proponen que se formulen modelos que contemplen variables binarias asociadas a si el envío de un cliente  $i$  para el periodo  $k$  pertenece o no a una ruta determinada, además de considerar el cambio en dicha demanda y la flota de vehículos con los que se cuenta.

Zahou & Dai, (2012), presentan un resumen de los tipos de modelos que pueden ser usados para el transporte urbano de mercancías, y que además tienen como objetivo la minimización de costos: los de flujo económico; modelos basados en los el origen y destino; los “*Commodity models*” y los modelos econométricos; sin embargo reconocen la necesidad de definir otros modelos que van más allá de lo económico como los modelos basados en series de tiempo, modelos basados en dinámica de sistemas y modelos no estáticos

De los análisis realizados por autores como Zahou & Dai (2012) y Bravo & Vidal (2013), se destaca la necesidad de modelos que consideren los tipos de vehículos usados, las restricciones gubernamentales, los costos asociados a retrasos y el nivel de servicio percibido por los clientes, vincular variables económicas del entorno en el que se transporta a las funciones de costos; esta necesidad se ve reflejada en el análisis que se realizó de la literatura científica, donde se encuentra que los modelos presentados para estimar los costos logísticos en las redes de transporte se centran en la construcción de funciones que detallen los costos asociados al movimiento de personas, mercancía o bienes en general, integrando los factores operativos de los vehículos, del personal involucrado en el transporte y los recursos físicos requeridos para esta actividad; sin embargo, la tendencia actual de tomar decisiones que incluyan factores ambientales y de competitividad a través de la satisfacción del cliente, lo que hace necesario que se formulen funciones para estimar los costos de transporte que consideren estas opciones a través de penalizaciones directas al costo.

Algunas consideraciones para optimizar el desarrollo de un modelo de costos logísticos son las decisiones estratégicas que deben considerarse al analizar las variables, por ejemplo, la elección del número de camiones; la calidad del personal, la capacidad de almacenamiento en terminales, el número de viajes permitido para cada vehículo, etc. Para lograr la minimización de la combinación de los costos fijos y de operación, las decisiones de configuración deben anticiparse y adaptarse a las necesidades a largo plazo de la estrategia de control; es decir, el sistema debe ser planificado para el control (Arango, Gómez, Serna, & Zapata, 2018). A continuación, se presenta el modelo para la estimación de costos logísticos en las empresas de transporte de mercancía y mensajería terrestre en Colombia haciendo un análisis desde cada factor de costos que se incorpora al modelo.

## **2.2 Costos logísticos en el transporte de paquetería y mensajería**

Determinar la estrategia óptima a aplicar en un sistema de distribución debe responder a un balance de los distintos costos logísticos que actúan: *los costos de transporte, costos de inventario (fijos o en tránsito) y costos de manipulación y de amortización asociados a los almacenes y centros de consolidación* (Estrada, 2007). Dada la importancia de estimar los costos logísticos de forma apropiada, se han desarrollado diferentes modelos que enfocados en variables de decisión que se definen según las prioridades de los diferentes sistemas de transporte.

Diversas funciones objetivo se han formulado para la construcción de modelos de transporte, sin embargo, la minimización de costos ha sido la estrategia preferida en procesos de optimización (Bravo & Vidal, 2013), como se muestra en la Tabla 2-1, si bien se presentan otros enfoques para modelizar como la minimización del tiempo, la maximización del beneficio y minimizar la distancia, generar funciones objetivo que minimicen los costos es un enfoque que se ha usado constantemente para la construcción de modelos de estimación que faciliten simular u optimizar el proceso de transporte.

**Tabla 2-1:** Funciones objetivo en la construcción de modelos de transporte

<b>Autores</b>	<b>Minimización costos</b>	<b>Minimizar Tiempo</b>	<b>Maximizar Beneficio</b>
Vidal & Goetschalckx (2001)			X
(Bard & Nananukul, 2009)	X		
Cintron et al. (2010)		X	X
Nasiri et al. (2010)	X		
Ahmadi Javid y Azad (2010)	X		
Mirzapour Al-e-hashem et al. (2011)			X
Bashiri et al. (2012)			X
Jawahara and Balaji (2012)	X		
Melo et al. (2012)	X		
Fazlollahtabara et al. (2013)	X		
Lee & Moon (2014)	X	X	
Sun, et al (2015)	X		
Ambrosino, et al. (2016)	X		
Ponboon, et al (2016)	X		

Dado que el objetivo de esta investigación es modelizar los costos logísticos, es importante caracterizar este tipo de costos; en este sentido se considera costo logístico a cualquier gasto en el que la empresa deba incurrir para la ejecución de las actividades logísticas requeridas para la prestación del servicio o la producción de un bien. En las empresas de transporte de carga que se dedican a la distribución de bienes, esta actividad representa el mayor porcentaje de costos en la operación (Garcés, 2010), por ello, el análisis de los costos logísticos que se asocian al transporte es una tarea prioritaria que permite la identificación de los factores que le incrementan (Ayala, 2001). Caris, Macharis, & Janssens, (2013) indican que la errónea estimación de los costos puede llevar a malas interpretaciones y finalmente, a tomar decisiones no adecuadas para la empresa. En la Tabla 2-2 se presentan algunas de las actividades logísticas al interior de la empresa incluido el transporte y los diferentes factores que aportan a los costos que asume cada una de ellas.

**Tabla 2-2:** Factores que contribuyen a los costos logísticos.

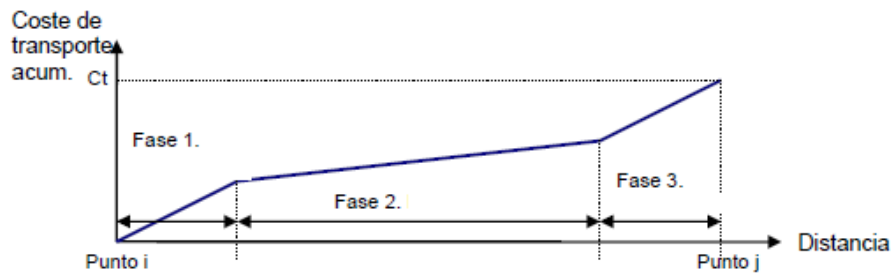


	Embalaje	Stock	Almacén	Transporte	Preparación pedidos
Personal	X		X	X	X
Vehículos				X	
Equipos	X		X	X	X
Instalaciones			X	X	X
Costos financieros	X	X	X	X	X
Amortizaciones			X	X	X
Seguros		X	X	X	
Impuestos			X	X	
Mantenimiento	X		X	X	X
Informática		X	X	X	X
Comunicaciones			X	X	X
Documentación			X	X	X
Administración		X	X	X	X

Fuente: Robusté (1997)

Para el análisis de costos, no se separarán los denominados costos fijos de los variables, sino que se realizará un análisis de los recursos necesarios para el transporte de paquetería y mensajería en cada una de las etapas descritas en la Figura 2-1.

**Figura 2-1:** Distribución de los costos de transporte en las fases de transporte



Fuente: Estrada, (2007)

La fase uno hace alusión a la recolección de la mercancía en la red capilar ilustrada en la Figura 1-6, la fase 2 muestra la relación de los costos de transporte asociada al transporte hacia las terminales principales por la red troncal y el almacenamiento de la mercancía en estas terminales; finalmente la fase 3 hace alusión a la entrega de los paquetes a los clientes finales a través de la red capilar.

## 2.3 Modelos de estimación y optimización de costos propuestos para transporte de paquetería y mensajería

Si bien en la Tabla 2-1 se presentan los objetivos propuestos para mejorar el desempeño del proceso de transporte de mensajería, paquetería o bienes; es necesario considerar dentro de los problemas de optimización bajo estudio para empresas de transporte mencionados en el capítulo 1. La Tabla 2-3 presenta los principales modelos propuestos en torno a cada uno de estos problemas.

**Tabla 2-3:** Factores que contribuyen a los costos logísticos.

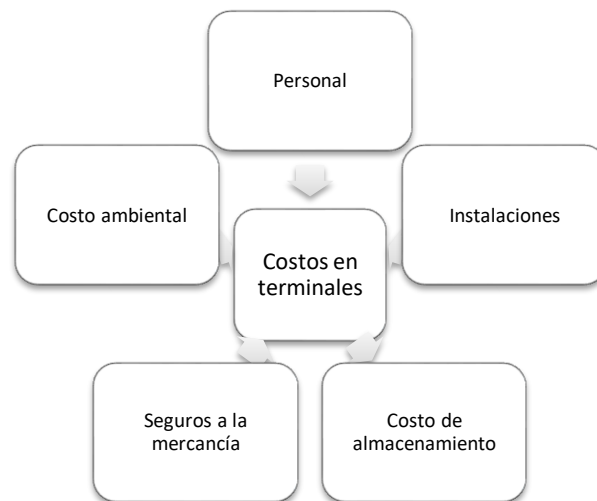
Fuente	Asignación	Localización	Ruteo	Diseño de red
Janssens, Van den Bergh, Sörensen, & Cattrysse, (2015)			x	
Akeb, Moncef, & Durand, (2018)	x			
Zhao et al., (2018)		x		
Thompson & Zhang, (2018)			x	
B. Lin, (2018)				x
W. Chen, Mes, & Schutten, (2018)			x	
Chow, (2018)				x
C.-C. Lin & Lee, (2018)				x
Scherr, Neumann Saavedra, Hewitt, & Mattfeld, (2019)				x
Sitek & Wikarek, (2019)			x	

En función de lo anterior, es importante considerar que el ruteo a clientes finales y el diseño de la red son los principales modelos presentados para la estimación y optimización de costos en los últimos 5 años; esto puede deberse a que según lo manifestado por Scherr et al., (2019), permiten un reconocimiento amplio de la red en sí misma e identificar puntualmente las fuentes generadoras de los costos o que afectan el desempeño general de la red de servicios. A continuación, se describen los costos que se han considerado en los modelos de estimación y optimización hallados; si bien no son en su totalidad considerados en el mismo modelo, sino que varían en función del problema abordado (Asignación, localización, ruteo o diseño de la red), es importante identificar transversalmente los costos asociados.

### 2.3.1 Costos asociados a los nodos

La infraestructura física requerida para la operación de cualquier empresa, genera costos fijos asociados a mantenimiento, alquiler, amortización, seguros y otros rubros que periódicamente requieren de un pago. En el caso de las empresas de paquetería y mensajería, se deben considerar factores como el personal, seguros a la mercancía e instalaciones y los costos relacionados a la operación de la instalación en sí. Estos factores se ilustran en la Figura 2-2.

**Figura 2-2:** Componentes de los costos en las terminales o Hubs



Fuente: Elaboración propia con base en Janic, (2007)

Los costos de almacenamiento incluyen todos los costos necesarios para mantener los bienes en un lugar. Una parte significativa de los costos de almacenamiento es fija, al menos durante un cierto período de tiempo, especialmente los costes de la instalación. Los costos de manipulación incluyen todos los costos de las actividades dentro del almacén o punto de transbordo, especialmente en los países con altos costos de mano de obra todos los costos de manipulación manual, *picking* o embalaje de bienes desempeñan un papel muy importante (Friedrich, Tavasszy, & Davydenko, 2014), sin embargo, en el caso de las empresas de transporte de paquetería y mensajería terrestre en Colombia, los costos asociados a este personal son bajos debido a que las funciones de los operarios con sueldos básicos incluyen estas actividades. Los costos de riesgo o de seguros a la mercancía, son todos los costos de eventos no deseados

que podrían suceder, generalmente cuando se incurre en un costo de riesgo debe incluirse el impacto en el nivel del servicio en caso de deterioros, incumplimientos, etc.

### 2.3.2 Costos asociados al transporte

Los costos que se asocian directamente al transporte, varían en función de las empresas que se estudian, Según Friedrich et al., (2014), la estructura de los costos de transporte puede desagregarse en cinco componentes principales que se muestran en la Figura 2-3; estos son los costos asociados al conductor, al combustible, al vehículo, al uso de la infraestructura y el costo del capital durante el tránsito, que se puede asociar a la mercancía transportada; el uso de estos factores depende de la disponibilidad de información para estimar costos y de las variables de decisión que se identifiquen como relevantes para la construcción de funciones de estimación de costos.

**Figura 2-3:** Componentes de los costos de transporte



Fuente: Elaboración propia con base en Friedrich et al., (2014)

Los costos que se asocian a los vehículos de transporte responden a sus características físicas y operacionales; de esta forma se considera el Costo Kilométrico que compone los costos de mantenimiento del vehículo, lubricantes, aceite, y demás productos requeridos para la operación adecuada del automotor. En cuanto al costo

operacional asociado al vehículo se considera fijo, y se asocia al costo del personal, seguros, amortización y otros cargos que son fijos en un periodo de tiempo.

Los costos asociados a la carga varían en función de la demanda, por lo que su estimación requiere un análisis previo del comportamiento estocástico de la misma. El transporte de carga que incluye la movilización de bienes de cualquier índole es uno de los temas más estudiados en la literatura, principalmente debido a los altos costos que se presentan en comparación con los costos logísticos totales en cualquier otro tipo de industria (Bravo & Vidal, 2013).

El transporte de carga que incluye la movilización de bienes de cualquier índole es uno de los temas más estudiados en la literatura, principalmente debido a los altos costos que este componente normalmente genera en comparación con los costos logísticos totales en cualquier otro tipo de industria (Bravo & Vidal, 2013). El transporte de paquetería y mensajería y los costos que se asocian a estos servicios, se relacionan directamente con la logística urbana o de ciudad y se han abordado analizando estrategias de distribución para la minimización de los costos de transporte (Burns, Hall, Blumenfeld, & Daganzo, 1985). En la Tabla 2-4 se resumen algunas de las variables que se han considerado para la construcción de modelos que estimen los costos logísticos asociados al transporte





Algunos de los esfuerzos que se han realizado para construir modelos que estimen el costo logístico total de distribución se detallan a continuación.

- **Modelos econométricos:** Los primeros modelos que se abordaron consideraban el tiempo de transporte y la distancia. La mayoría de funciones objetivo planteadas en los modelos econométricos se componen por variables estáticas y que se relacionan con una función determinada (función lineal, exponencial, logarítmica etc.), lo que no considera la realidad del comportamiento de variables como la demanda, los costos variables durante el transporte, etc.
- **Consideración de externalidades en los modelos:** Posterior al planteamiento de modelos que minimizan los costos en función de variables controladas por las empresas, se identificó la necesidad de incluir variables que, si bien no son controladas por la empresa, afectan el costo total del transporte. En este sentido, Janic (2007) presenta como factores que se deberían incluir en las funciones de costos:
  - Costo ambiental relacionado con las emisiones de gases de efecto invernadero
  - Costo relacionado con la congestión
  - Costo ambiental relacionado con la contaminación auditiva
  - Costo social relacionado con los accidentes de tránsito
- **El servicio al cliente:** En la actualidad, otras consideraciones se incluyen en los modelos de estimación de costos buscando que los resultados de estos modelos correspondan a la realidad, entre estas el nivel de servicio al cliente. Las ventanas de tiempo como factor para la cuantificación de cumplimiento en entregas han tomado fuerza en el estudio de sistemas de transporte al igual que en la programación de entregas en empresas (Ponboon, Qureshi, & Taniguchi, 2016). Además, la creciente competencia en el sector transporte requiere que desde la logística se dé un nuevo enfoque a la toma de decisiones estratégicas.

El factor ambiental se ha caracterizado por su protagonismo en los modelos actuales para estimar el desempeño de redes de distribución, centrándose en la medición del CO<sup>2</sup> emitido. Existen diversas metodologías de las cuales las más utilizadas a nivel internacional son el *Greenhouse Gas Protocol* o "GHG Protocol", la PAS 2050 y la ISO 14064. La primera, se encuentra centrada en aspectos corporativos relacionados con la empresa y toda su labor productiva, ha sido adoptada por importantes sectores y empresas



internacionales. La segunda, está enfocada en productos y fue la primera metodología de cálculo que puso a disposición del público un software libre, lo cual contribuyó a su uso masivo. Finalmente se encuentran las normas ISO, que alimentan y a su vez recogen elementos de las metodologías anteriormente nombradas, estas normas reflejan los consensos internacionales públicos y privados, ocasionando la posibilidad de que las normas ISO 14064 puedan imponerse eventualmente como el estándar de uso generalizado. A la ISO 14064 (de tipo corporativo), se sumará próximamente la ISO 14067 que se encuentra orientada a productos.

Internacionalmente se conocen otras metodologías que presentan herramientas para calcular las tasas de emisión para diferentes actividades. R. Garcia and F. Freire presentan una comparación entre la ISO/TS 14067, el GHG Protocol, PAS 2050 y “Climate Declaration” para el cálculo práctico de la huella de carbono, obteniendo resultados similares para el mismo caso (Garcia & Freire, 2014). La Tabla 2-5 presenta una descripción breve de las metodologías usadas para la medición de la huella de carbono.

**Tabla 2-5:** Metodologías para la medición de la huella de carbono

Metodología	Descripción
ISO/TS 14067	Proporciona requerimientos y guías específicas para la cuantificación y comunicación de la huella de carbono de productos, con base a las normas ISO existentes sobre evaluación del ciclo de vida en las etiquetas y declaraciones ambientales. Proporciona los requisitos para el tratamiento de las emisiones y la absorción (por ejemplo, combustibles fósiles) y los requisitos adicionales para la comunicación de la huella de carbono de los GEI específicos (ISO/TS 14067, 2013)
The Greenhouse Gas Protocol- (GHG Protocol)	Proporciona requerimientos para cuantificar los inventarios de GEI de los productos y también los requisitos para su reporte público. Se basa en el enfoque del ciclo de vida y se basa adicionalmente en las normas ISO para LCA (Life Cycle Assessment) y en la primera versión del PAS. Esta metodología se desarrolla buscando emitir comparaciones significativas entre productos, el desarrollo y la utilización de normas sectoriales específicas, usando las

	denominadas “normas de productos (The Greenhouse Gas Protocol, 2011)
PAS 2050	Las especificaciones de acceso público ó PAS 2050 por sus siglas en inglés, establece las instrucciones sobre cómo hacer frente a las cuestiones metodológicas comunes como la definición de los límites del Sistema que se estudia, cómo calcular el almacenamiento de carbono y las emisiones diferidas (Carbon Trust, Defra, & BSi, 2008)
Climate Declaration	La declaración Climática o Climate declaration se encuentra enfocada en las emisiones de GEI. La evaluación se basa en directrices específicas denominadas reglas de categoría de producto (PCR), desarrolladas para un grupo de productos. En particular los impactos ambientales y climáticos de productos dentro de la misma categoría no difieren significativamente

Fuente: elaboración propia con base en Zapata-Cortes, Arango-Serna, & Serna-Urán, (2018).

Las metodologías enunciadas, buscan la cuantificación de la huella de carbono generada, sin embargo, difieren en los enfoques. Algunas enfatizan su metodología en la producción o manufactura, mientras que otras como la GHG Protocol, presentan herramientas que diversifican las opciones de cálculo y permiten realizarlo en industrias de menor escala de contaminación (Zapata-Cortes et al., 2018).

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, en el caso del transporte debe considerarse que el impacto sobre el ambiente es directo, por lo que los resultados de calcular la huella de carbono asociada diferirán con las diferentes metodologías, según éstas consideren el rol del transporte en la generación de GEI. Es necesario entonces analizar las características de la actividad cuya huella de carbono busca medirse para así proceder a un ejercicio que arroje resultados realistas.

### **3. Modelización de la red de paquetería y mensajería en Colombia**

En función de lo analizado en la sección 1.4, es necesario caracterizar la red de transporte de paquetería y mensajería en Colombia, ya que el PDNDP (*Parcel delivery Network Design Problem*) define de forma general los criterios para el diseño de una red; estas redes varían en función de las condiciones logísticas de las empresas de envío, que de país a país se diferencian por la simplificación o ampliación de la misma.

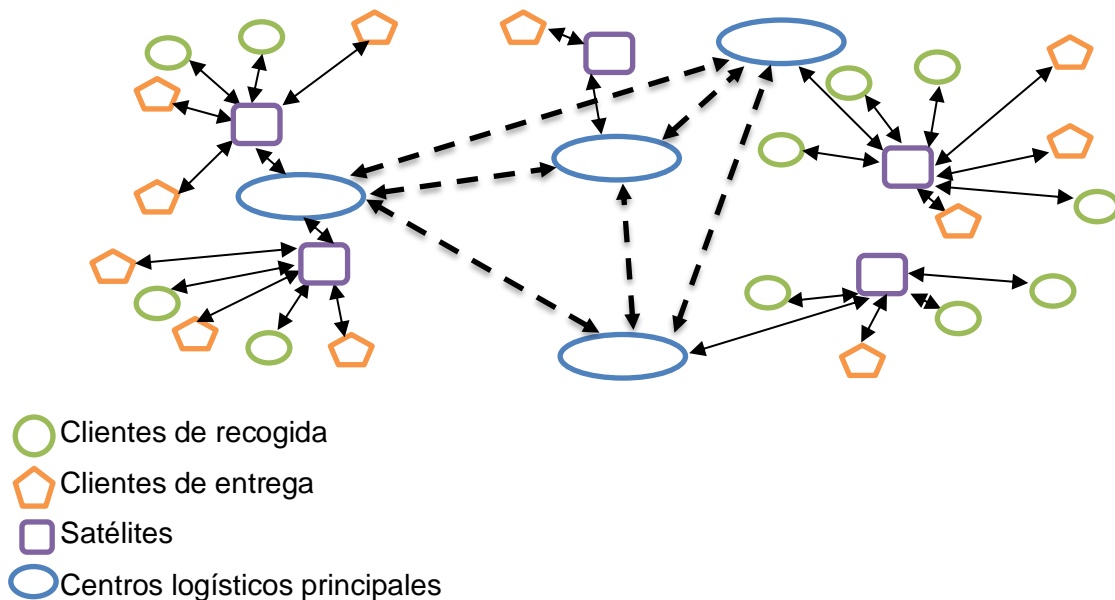
En este sentido, Xie, Lin, & Cui (2015) realizan una caracterización de este sector en China a través de la estructuración de lo que denominan una comunidad; allí hay nodos que difieren en su tamaño según la demanda que cada nodo represente, habiendo así un nodo principal que consolida lo que desde nodos intermedios y pequeños saldrá de la comunidad; sin embargo, esta red asume que incluso pequeños clientes pueden acceder directamente al nodo principal de la comunidad sin atravesar un nodo intermedio; contrario a esta red donde la totalidad de nodos se encuentran conectados entre sí; Ducret, (2014) plantea la necesidad de centros que sorteen los envíos hacia hub por ciudades, estos centros son puntos de intercambio que permiten una trazabilidad de envíos, disminución de costos logísticos asociados a los arcos generados entre nodos y que permite aprovechar economías de escala en países europeos; similar a esta propuesta, Akeb et al., (2018) proponen el diseño de una red de envíos postales en Francia donde hayan centros de consolidación intermedios por zonas que posteriormente se conecten a otros centros de mayor tamaño.

Los dos últimos conceptos propuestos para el diseño de red, es el más aplicable al caso Colombiano, donde cada ciudad tiene un centro logístico principal que funciona como un hub que desconsolida y consolida envíos hacia centros logísticos principales de otras ciudades; a estos centros logísticos llegan camiones que han recorrido centros

de menor tamaño en los barrios o comunidades de cada ciudad que funcionan como centros satélites dónde se consolidan previamente los envíos al hub de cada ciudad.

La representación gráfica de la red descrita es similar a la presentada en la Figura 1-6, donde se tienen unos clientes finales que pueden tanto enviar como recibir y que deben ser asignados a un satélite; posteriormente cada satélite debe ser asignado a un hub; en este caso se considera la distancia lineal entre los nodos como criterio de decisión para estas asignaciones. El problema de diseño de red de servicios no contempla el ruteo desde los satélites hacia los clientes finales, pero sí el costo asociado a vincular cada cliente con su respectivo satélite, considerando la demanda, distancia y número de vehículos requeridos. Las rutas generadas al interior de la red en la conectividad entre centros logísticos principales, es uno de los problemas abordados por el PDNDP; la Figura 3-1 muestra la conformación de esta red, donde se generan rutas que inician en el cliente que envía, pasa por el satélite correspondiente, hub correspondiente al satélite, hub de destino, satélite de destino y finalmente llega al cliente final.

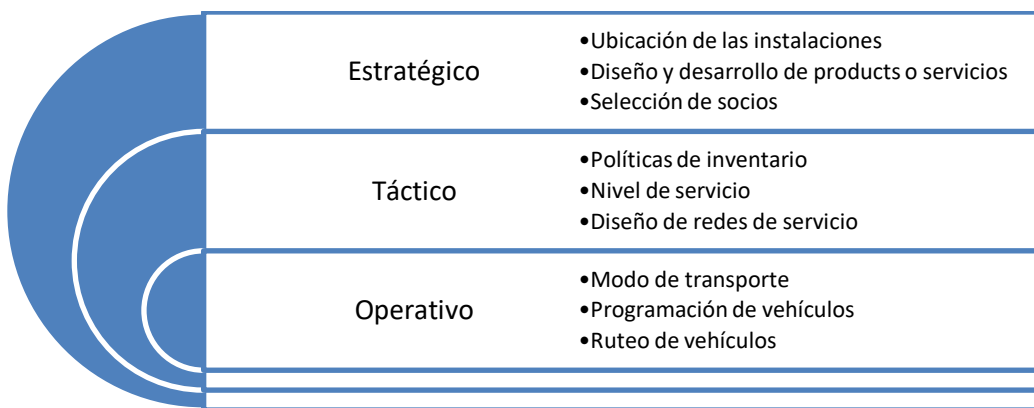
**Figura 3-1:** Red de servicios de paquetería y mensajería en Colombia



Con base en la descripción anterior del funcionamiento de las empresas de distribución de paquetería y mensajería es posible definir cómo interactúan los costos y la posibilidad de integrarlos de tal forma que se puedan generar indicadores de seguimiento a la operación.

Con esta propuesta se lograría una visión holística sobre el impacto que se puede generar al cambiar operaciones en los centros logísticos o en la red de distribución; esta propuesta de interacción se realiza con base en el modelo conceptual propuesto por Arango Serna, Ruiz Moreno, Ortiz Vásquez, & Zapata Cortes, (2017), donde se evidencia la posibilidad de impactar nivel operativo, táctico y estratégico siempre que se conozcan los flujos de información y material de las empresas. En este sentido lo que se debe identificar inicialmente son las actividades clave que desde los diferentes niveles se ejecuta, éstas se muestran en la Figura 3-2.

**Figura 3-2:** Decisiones en empresas de transporte para los niveles organizacionales



Fuente: Elaboración propia con base en Serna, (2016)

El problema abordado de diseño de la red de servicios postales contempla decisiones de nivel operativo y táctico pero que puede influir en las decisiones estratégicas en cuanto a la selección de proveedores de servicio, ubicación de instalaciones y diseño de servicios ofertados a los clientes según las características de la red. El procedimiento para el diseño y costeo de la red se presenta en la Figura 3-3; posteriormente se describe cada fase de construcción de la red y los componentes principales del modelo propuesto. Sin embargo, el Costo Promedio de Transporte por kilogramo es un indicador que se obtiene a partir de la sumatoria costos reales generados en una operación y los distribuye en la demanda atendida. El valor estimado de este indicador se debe definir con apoyo del área de análisis, quienes debe identificar los valores promedios del sector.

$$CPTT = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} CT_i}{\sum_{i=1}^{i=n} T_i} \quad (34)$$

Donde CT es el costo total en la operación i, y T<sub>i</sub> representa los kilogramos movilizados en la operación i; siendo n el número de operaciones realizadas en el periodo de medición.

Igualmente es necesario considerar el actor de carga promedio, ya que indica si la sobrecarga es efectiva en el proceso, este se calcula a través de:

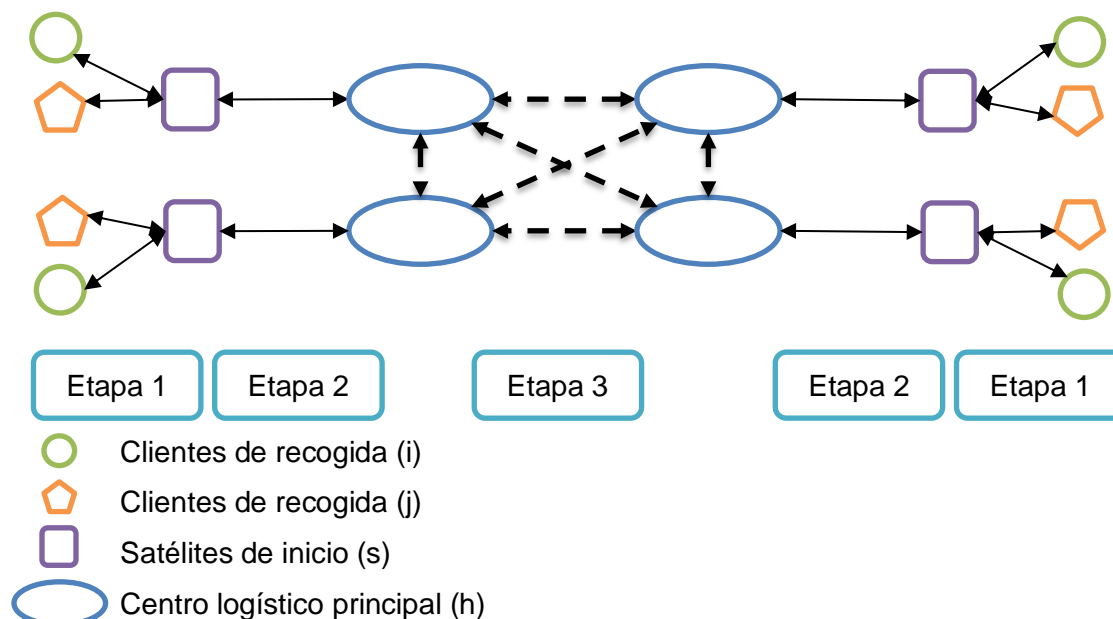
$$FCP = \frac{\frac{\text{Toneladas movilizadas}}{\text{Capacidad total de los vehículos en toneladas}}}{\text{Número de viajes}} \quad (35)$$

Finalmente, es necesario que desde las empresas se propongan valores base para estos indicadores de tal forma que se logre identificar si la operación cumple a satisfacción con lo esperado. Si bien la estimación de los costos de la red es un problema de estudio, la optimización de estos es aún más relevante, ya que es así como la operación de transporte se torna realmente eficiente. A continuación, se presenta la definición de la red, que indica las características que se deben considerar para construir el modelo matemático que no solo permita estimar sino también optimizar los costos asociados a la red.

### 3.1 Definición de la red de transporte de paquetería y mensajería para Colombia.

El proceso para el diseño de una red de servicios para empresas de mensajería y paquetería se puede describir en 3 etapas como se muestra en la Figura 3-3. Estas etapas tienen diferentes costos asociados y las decisiones se centran en la asignación de nodos y los envíos que se realizan entre centros logísticos principales.

**Figura 3-3:** Etapas para el desarrollo del modelo para la red.



Para simplificar la nomenclatura de las rutas que se generan en cada etapa, se denominará considerarán los satélites asociados al cliente final como  $s'$ ; los centros logísticos asociados al satélite final  $h'$  y si hubiese un centro logístico intermedio como  $h''$ ; la unión entre estos nodos se denota con un guion; es decir,  $(h'-s'-j)$  denota que se genera una ruta entre el centro logístico final, el satélite asociado al cliente de entrega y el cliente de entrega.

En la etapa 1, se calculan las distancias entre los clientes  $i$  e  $j$  hacia los satélites en toda el área, teniendo en cuenta la distancia euclidiana de cada cliente a la totalidad de los satélites. En esta etapa es posible calcular el flujo de mercancía que deberá entrar y salir de cada satélite en función de los clientes asignados y al mismo tiempo, el número de vehículos mínimo necesario para suplir la demanda de sus clientes. Dado que para el análisis del modelo propuesto se validarán tres estrategias, es importante señalar que esta etapa no cuenta con modificaciones, ya que la asignación se da netamente por distancia. En esta etapa se generan dos tipos de rutas que no pueden contemplar sobrecarga:

- ✓ Ruta Cliente de recogida a satélites ( $i-s$ )
- ✓ Ruta Satélites a clientes de entrega ( $s'-j$ )

El número de vehículos requeridos para estas rutas se calcula sumando el flujo total de la mercancía que se deberá recoger y se relaciona con la capacidad de los vehículos, en caso de dar decimal, en número de vehículos se aproxima al mayor y se compara con el número de vehículos requeridos para entregar a los clientes del satélite, seleccionando así el mayor número de vehículos necesarios para atender la totalidad de los clientes.

La asignación que se realiza en la etapa 2 es de los satélites a los centros logísticos principales bajo la misma consideración de la distancia euclidiana. De aquí es posible calcular los flujos de mercancía que irán al hub asignado y el número de vehículos requeridos para lograr transportar la totalidad de la demanda. En esta etapa se generan dos rutas y puede considerar sobrecarga aun cuando la ruta es atendida por los mismos vehículos de la etapa 1:

- ✓ Ruta satélite a hub ( $s-h$ )
- ✓ Ruta hub final a satélite ( $h'-s$ )

El número de vehículos se calcula de forma similar a la etapa 1; solo que se suma la totalidad de flujo de mercancía que recoge el satélite y que deberá ser entregado al único hub asignado y se relaciona con la capacidad del vehículo (incluyendo sobrecarga). El

número de vehículos que se requieren para la ruta del hub al satélite se obtiene al calcular el flujo total que saldrá del hub hacia el satélite y se divide sobre la capacidad del vehículo.

Finalmente, en la etapa 3, se asigna la ruta inter-hub; asumiendo que todos los hub se encuentran conectados. En esta etapa se deben calcular los vehículos que recorren los centros logísticos, los costos de manejo y el costo asociado a la ruta entre los centros. La generación de rutas en este punto es más compleja y no se limita a asignar vehículos en función de la demanda, sino que se genera un problema de ruteo inter-hub que debe ser abordado desde un enfoque de optimización ya que las posibles rutas que se pueden generar son:

- ✓ Ruta directa del cliente inicio al cliente de fin (i-s-h-h'-s'-j)
- ✓ Ruta con hub intermedio (i-s-h-h''-h'-s'-j)

En este sentido la cantidad de vehículos y el costo de la ruta inter hub varía y debe abordarse como un problema de optimización; para lograr hallar la mejor ruta se propone usar el método de la p-mediana que como lo describe Mokhtar, Krishnamoorthy, & Ernst, (2019), permite el diseño de redes asignando uno o varios (p) hub concentradores de carga, evitando la conexión innecesaria entre hubs con baja densidad de tránsito. Si bien el método de la p-mediana es un problema en sí *NP-hard*, se considera como un método de solución que permite realizar un análisis de conectividad interhub eficiente.

En la Tabla 3-1 se presentan los costos que se asocian a cada etapa y que se considerarán dentro del modelo, como ya se mencionó, los problemas PDNDP consideran dos tipos de costos: Costos de transporte y costos de manejo; sin embargo, cada uno de estos costos se asocia con variables que afectan la estimación de dicho costo según las características de las redes de transporte propuestas por Ben-Ayed (2013).

**Tabla 3-1:** Factores del modelo por etapas

Costo	Etapas 1	Etapas 2	Etapas 3
Costo de transporte	Costo marginal por kilogramo transportado entre clientes y satélites	Costo marginal por kilogramo transportado entre satélites y hubs	Costo marginal por kilogramo transportado entre clientes y satélites
	Costo marginal por kilómetro entre clientes y satélites	Costo marginal por kilómetro entre satélites y hubs	Costo marginal por kilómetro entre clientes y satélites



	Costo fijo del vehículo que se moviliza entre clientes y satélite	Costo fijo del vehículo que se moviliza entre satélites y hub	Costo fijo del vehículo que se moviliza entre hubs
	Costo ambiental en CO <sub>2</sub> emitido	Costo ambiental en CO <sub>2</sub> emitido	Costo ambiental en CO <sub>2</sub> emitido
		Costo de sobrecargar el vehículo de red secundaria	Costo de sobrecargar el vehículo de red principal
Costo de manejo	Costo de manejo en satélite por kilogramo	Costo de manejo en el hub de inicio o fin por kilogramo	Costos por manejo en un hub intermedio por kilogramo
	No se consideran costos de instalación debido a que son satélites de terceros.	Costos fijos de los hubs	Costos fijos hub intermedios

Algunas consideraciones adicionales en los nodos que deben tenerse en cuenta para la construcción de una red que represente la operatividad de las empresas de transporte de paquetería y mensajería en Colombia; estas se derivan del análisis de modelos propuestos por Ben-Ayed (2013) y del análisis de información secundaria del sector.

- **Consideraciones en centros logísticos.**

Los centros logísticos principales de cada ciudad, ya se encuentran ubicados y el costo de su operación corresponde en 100% a la compañía envíos de correspondencia. A estos centros llegan dos tipos de vehículos: los que llegan desde otros centros logísticos principales y que son de mayor tamaño, y los vehículos que llegan desde los satélites de la ciudad y son de menor tamaño. Es importante considerar que aun cuando los centros logísticos principales reciban un vehículo de otro centro logístico adyacente, la mercancía recibida podrá provenir de otro Hub inicial si el centro logístico adyacente sirve de Hub intermedio. El costo del material que se maneja en los Hubs se asocia al volumen de correspondencia que se recibe y se despacha, que finalmente, impactará también los costos de transporte; dada esta condición y que entre hubs puede haber un volumen bajo de material, el uso de vehículos dedicados puede ser costoso.

- **Consideraciones en estaciones satélite**

Las instalaciones en las que los clientes finales depositan correspondencia y paquetes para ser enviados son satélites que se encuentran ubicados en diferentes zonas de las ciudades; éstos no implican costos de manejo o de instalaciones para las empresas ya que son centros independientes que prestan este servicio y cuyo costo por paquete recibido es considerado como costo marginal por el número de unidades que recibe. A estos centros

satélites llega uno o dos vehículos diarios que reciben el material a ser dirigido a los centros logísticos principales y en ocasiones se deja paquetes que los clientes deciden recoger por cuenta propia en estos satélites.

- **Consideraciones hacia los clientes finales**

Un cliente es visitado una única vez para entregar un bien que ha sido dirigido a su dirección. Los clientes están asociados a un centro satélite de cercanía.

- **Consideraciones generales**

Dentro de estas consideraciones generales se deben considerar:

- El volumen total de paquetes que van de un cliente inicial a uno final debe pasar por al menos un Hub
- Se busca minimizar el costo total como función de la suma de los costos de viaje y de la instalación. Si bien esta función es un costo anual, los flujos de mercancía son diarios.
- Con el fin de considerar las economías de escala, no hay vehículos dedicados de un Hub a otro; ya que el volumen total a transportar entre hubs adyacentes puede ser bajo. En este sentido se usan dos tipos de vehículos: Vehículos que van únicamente entre Hubs y los que van de un hub a centros satélites y clientes.
- No se debe realizar un proceso de localización de las instalaciones, ya que los centros logísticos principales se encuentran establecidos en las ciudades principales y los centros satélite no hacen parte directa de la compañía.

Dado los vehículos que pueden transitar, se tiene el conjunto de vehículos  $V$  con una capacidad  $q_v^k$  de volumen a ser transportado para el tipo de mercancía  $K$  que puede corresponder a mensajería o paquetería; el costo anual asociado a la operación del vehículo entre centros logísticos principales será  $C_{V_{hh}}$  y el número de vehículos tipo  $v$  necesario para transportar carga entre ellos será  $Z_{V_{hh}}$ . La variable binaria que indica si el nodo es un centro logístico principal para así asignar los costos de operación como  $Y_h$  mientras que la variable  $Y_{sh}$  indica si el centro satélite  $s$  se asocia al centro logístico  $h$ .

En cuanto a los volúmenes diarios de un cliente  $i$  a uno  $j$  del elemento de correspondencia  $k$ , se debe considerar su paso por los centros satélite y el o los centros logísticos principales que requiera notándose:  $X_{is}^k$ ;  $X_{ish}^k$ ;  $X_{ihs}^k$ ;  $X_{ihh}^k$ ;  $X_{ihj}^k$  (Lo anterior implica un tránsito por los nodos  $i$ - $s$ ;  $s$ - $h$ ;  $h$ - $h'$ ;  $h'$ - $s'$ ;  $s'$ - $j$ . Igualmente, se consideran los costos asociados a los viajes

como  $C_{vis}^k$ ;  $C_{vsh}^k$ ;  $C_{vhh}^k$ ;  $C_{vhj}^k$  y el costo marginal de cada satélite y centro logístico son  $C_s^k$  y  $C_h^k$ , sin embargo se debe considerar el costo fijo en los centros logísticos principales únicamente, es decir  $C_h$ . Estas variables y parámetros se relacionan en el siguiente apartado.

## 3.2 Construcción del modelo matemático

Para la construcción del modelo matemático, es necesario definir conjuntos asociados a los nodos y a los recursos que movilizan la paquetería y mensajería entre los mismos; asociados a estos conjuntos se asocian parámetros y variables que permiten relacionar los costos logísticos de la operación; tanto conjuntos, parámetros y variables se definen a continuación.

### 3.2.1 Conjuntos

Los conjuntos que se definen para el modelo matemático, corresponden a los nodos que conforman la red y a los recursos que transitan por la misma, es decir, los vehículos. Estos conjuntos son entonces:

$I =$  Conjunto de clientes que envían (Recogida)

$J =$  Conjunto de clientes que reciben (Entrega)

$H =$  Conjunto de centros logísticos principales (Hubs)

$S =$  Conjunto de satélites

$V =$  Conjunto de vehículos

### 3.2.2 Parámetros y variables

Para el diseño de la red de servicios asociados al transporte de paquetería y mensajería se definen los siguientes parámetros:

$k =$  Tipo de envío (Mensajería o Paquetería)

$F_{ij} =$  Kilogramos de flujo entre  $i - j$

$C_s =$  Costo de manejo en satélites

$C_h =$  Costo de manejo en centros logísticos principales

$C_{is} =$  Costo entre clientes de recogida y satélites

$C_s^k =$  Costo de manejo marginal en  $S$  de  $k$

$C_h^k$  = Costo de manejo marginal en H de k

$C_{vsh}^k$  = Costo de envío desde un s al h de la mercancía tipo k

$C_{vhh'}^k$  = Costo de envío entre el hub de inicio y el de fin

$q_v^k$  = Capacidad del vehículo tipo v para mercancía k

$q_v^{lk}$  = Capacidad de sobrecarga del vehículo tipo v para mercancía k

El conjunto de clientes tipo i o j, los satélites y satélites se definen como conjunto de coordenadas que indican la ubicación de estos. Se tendrán dos tipos de vehículos: los que conectan clientes i, j con satélites y a éstos con su Hub, y el segundo tipo de vehículo que solo realiza rutas entre centros logísticos principales. Los tipos de envío k serán dos: Mensajería que toma el valor de 1 kg o paquetería que es cualquier valor superior a 1 y serán valores enteros.

En cuanto a los kilogramos de flujo, es necesario considerarlos para garantizar las restricciones que se verán más adelante. El costo de manejo en satélites y hubs responde a las estimaciones que las empresas de transporte y se expresa en \$/Kg. Los costos de los arcos entre clientes, satélites y centros logísticos principales consideran el valor por kilogramo/kilómetro recorrido en función del tipo de vehículo que se usa en los diferentes niveles. En cuanto a las capacidades de los vehículos, se contará con la posibilidad de viajar sobrecargados entre satélites y hubs, sin embargo, no es posible viajar con sobrecarga desde o hacia los clientes i, j y ambos se definen en kilogramos.

En cuanto a las variables de decisión que se encuentran contempladas en la construcción del modelo se encuentran:

$Y_s$  = Variable binaria que es 1 si se usa la instalación s, 0 en caso contrario

$Y_h$  = Variable binaria que es 1 si se usa la instalación h, 0 en caso contrario

$Y_{is}$  = Variable binaria que es 1 si el cliente i pertenece al satélite s, 0 en caso contrario

$Y_{sh}$  = Variable binaria que es 1 si el satélite s pertenece al h, 0 en caso contrario

$Z_{vsh}$  = Variable binaria que es 1 si el vehículo v va de s a h 0 en caso contrario

$Z_{vhh'}$  = Variable binaria que es 1 si el vehículo v va de h a h' 0 en caso contrario

$X_{vsh}^{lk}$  = Cantidad de carga sobrecargada que va en el vehulo v de s a h

$X_{vhs}^{lk}$  = Cantidad de carga sobrecargada que va en el vehulo v de h a s

$X_{vhh'}^{lk}$  = Cantidad de carga sobrecargada que va en el vehulo  $v$  de  $h$  a  $h'$

$X_{iis}^k$  = Cantidad de flujo que se originó en el cliente  $i$  que va de  $i$  a  $s$

$X_{isj}^k$  = Cantidad de flujo que se originó en el cliente  $i$  que va de  $s$  a  $j$

$X_{ih_s}^k$  = Cantidad de flujo que se originó en el cliente  $i$  que va de  $h$  a  $s$

$X_{ish}^k$  = Cantidad de flujo que se originó en el cliente  $i$  que va de  $s$  a  $h$

$X_{ihh'}^k$  = Cantidad de flujo que se originó en el cliente  $i$  que va de  $h$  a  $h'$

### 3.2.3 Construcción de la función objetivo

- Costos fijos y marginales en los centros logísticos principales

$$\sum_{h \in H} \sum_{j \in J} C_h Y_h + \sum_{h \in H} C_h^k \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left( X_{ish}^k + \sum_{h \in H} X_{ih'h}^k \right) \quad (1)$$

- Costos Marginales asociados a los satélites ya que no hay costo fijo

$$\sum_{h \in H} C_s^k \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left( X_{iis}^k + \sum_{s \in S} X_{ih_s}^k \right) \quad (2)$$

- Costos asociados al recorrido desde los clientes iniciales hacia los centros satélite y costo asociado de los centros satélite a los clientes de envío  $j$ .

$$\sum_{i \in I} \sum_{s \in S} C_{is} Y_{is} + \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} C_{sj} Y_{sj} \quad (3)$$

- Costo de movimiento de los centros satélite a los centros logísticos principales, se considera el costo de sobrecarga asociado únicamente entre los centros satélite y los centros logísticos principales.

$$\sum_{v \in V} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} [C_{vsh}^k Z_{vsh} + C_{vhs}^k Z_{vhs} + C_{vsh}^{lk} (X_{vsh}^{lk} + X_{vhs}^{lk})] \quad (4)$$

- Costo asociado a los arcos que unen los centros logísticos principales considerando la posibilidad de sobrecarga

$$\sum_{v \in V} \sum_{h \in H} \sum_{h' \in H'} (C_{vhh'}^k Z_{vhh'} + C_{vhh'}^{lk} X_{vhh'}^{lk}) \quad (5)$$

- Función objetivo final

$$Min CT = 1 + 2 + 3 + 4 + 5$$

$$\begin{aligned}
Min CT = & \sum_{h \in H} \sum_{j \in J} C_h Y_h \\
& + \sum_{h \in H} C_h^k \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left( X_{ish}^k + \sum_{h \in H} X_{ih'h}^k \right) + \sum_{h \in H} C_s^k \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left( X_{iis}^k + \sum_{s \in S} X_{ih's}^k \right) \\
& + \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} C_{is} Y_{is} + \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} C_{sj} Y_{sj} \\
& + \sum_{v \in V} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} [C_{vsh}^k Z_{vsh} + C_{vhs}^k Z_{vhs} + C_{vsh}^{lk} (X_{vsh}^{lk} + X_{vhs}^{lk})] \\
& + \sum_{v \in V} \sum_{h \in H} \sum_{h' \in H'} (C_{vhh'}^k Z_{vhh'} + C_{vhh'}^{lk} X_{vhh'}^{lk}) \quad (6)
\end{aligned}$$

### 3.2.4 Restricciones

- Conservación de flujo entre nodos.

$$\sum_{s \in S} X_{iis}^k = \sum_{j \in J} F_{ij}^k \quad i \in I, k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{s \in S} X_{isj}^k = F_{ij}^k \quad i \in I; \quad j \in J; \quad k \in K \quad (8)$$

$$X_{iis}^k = \sum_{h \in H} X_{ish}^k \quad i \in I; \quad s \in S; \quad k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{h \in H} X_{ih's}^k = \sum_{j \in J} X_{isj}^k \quad i \in I; \quad s \in S; \quad k \in K \quad (10)$$

$$\sum_{s \in S} X_{ish}^k + \sum_{h' \in H'} X_{ih'h}^k = \sum_{s \in S} X_{ih's}^k + \sum_{s \in S} X_{ih'h'}^k \quad i \in I; \quad h \in H; \quad k \in K \quad (11)$$

Estas restricciones garantizan que la cantidad de paquetes enviados desde el cliente inicial hasta el cliente final, transitan a través de cada uno de los nodos.

- Los centros logísticos principales y los satélites deben estar funcionando y ser relacionados respectivamente entre ellos (Cada centro satélite está conectado a un centro logístico principal)

$$\sum_{s \in S} Y_{is} = 1 \quad i \in I \quad (12)$$

$$\sum_{s \in S} Y_{sj} = 1 \quad j \in J \quad (13)$$

$$\sum_{h \in H} Y_{sh} = Y_s \quad s \in S \quad (14)$$

- Las relaciones anteriores están dadas en función de (15) y (16), garantizando que haya conexión entre los clientes, satélites y centros logísticos principales.

$$Y_{is} \leq Y_s \quad i \in I; s \in S \quad (15)$$

$$Y_{sh} + Y_{hs} \leq Y_s + Y_h \quad s \in S; h \in H \quad (16)$$

- Mientras que las relaciones entre los flujos en los diferentes nodos están dadas por:

$$X_{iis}^k \leq \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} F_{ij}^k Y_{is} \quad i \in I; s \in S; k \in K \quad (17)$$

$$\sum_{j \in J} X_{jsi}^k \leq \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} F_{ij}^k Y_{is} \quad i \in I; s \in S; k \in K \quad (18)$$

$$\sum_{i \in I} X_{ish}^k \leq \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} F_{ij}^k Y_{sh} \quad h \in H; s \in S; k \in K \quad (19)$$

$$\sum_{i \in I} X_{ihs}^k \leq \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} F_{ij}^k Y_{sh} \quad h \in H; s \in S; k \in K \quad (20)$$

$$\sum_{i \in I} X_{ihh'}^k \leq \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} F_{ij}^k Y_h \quad h, h' \in H; k \in K \quad (21)$$

$$\sum_{i \in I} X_{ihh'}^k \leq \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} F_{ij}^k Y_{h'} \quad h, h' \in H; k \in K \quad (22)$$

Las ecuaciones 17 a 22 garantizan que, en las rutas generadas en el modelo, transitará mínimamente la cantidad total de paquetes que se generan en los clientes de inicio en los nodos de la ruta.

- Restricciones de capacidad:

$$\sum_{v \in V} (q_v^k Z_{vsh} + X_{vsh}^{sck}) \geq \sum_{i \in I} X_{ish}^k \quad h \in H; s \in S; k \in K \quad (23)$$

$$\sum_{v \in V} (q_v^k Z_{vsh} + X_{vhs}^{sck}) \geq \sum_{i \in I} X_{ihs}^k \quad h \in H; s \in S; k \in K \quad (24)$$

$$\sum_{v \in V} (q_v^k Z_{vhh'} + X_{vhh'}^{sck}) \geq \sum_{i \in I} X_{ihh'}^k \quad h, h' \in H; k \in K \quad (25)$$

Las restricciones de la 23 a la 24 garantizan que la cantidad de carga asignada a un vehículo ya sea con sobrecarga o sin ella, es menor a su capacidad en función de la ruta que transite.

- En concordancia con las restricciones anteriores, debe definirse el límite de la capacidad de sobrecarga entre centros logísticos principales y satélites:

$$X_{vsh}^{lk} \leq q_v^{lk} Z_{vsh} \quad h \in H; s \in S; v \in V; k \in K \quad (26)$$

$$X_{vhs}^{lk} \leq q_v^{lk} Z_{vsh} \quad h \in H; s \in S; v \in V; k \in K \quad (27)$$

$$X_{vhh'}^{lk} \leq q_v^{lk} Z_{vhh'} \quad h, h' \in H; v \in V; k \in K \quad (28)$$

- Conservación de flujo de entrada y salida en los centros logísticos principales

$$Z_{vh'h} = Z_{vhh'} \quad h, h' \in H; v \in V \quad (29)$$

- Definición de los tipos de variables

$$Y_s, Y_h, Y_{is}, Y_{sh} \in (0,1) \quad i \in I; s \in S; h \in H \quad (30)$$

$$Z_{vsh}; Z_{vhh'} \in N; \quad i \in I; s \in S; h \in H \quad (31)$$

$$X_{vsh}^{lk}, X_{vhs}^{lk}, X_{vhh'}^{lk}, X_{iis}^k, X_{isj}^k, X_{ihj}^k, X_{ish}^k, X_{ihh'}^k \geq 0 \quad v \in V; i \in I; j \in J; s \in S; k, sck \in K; h, h' \in H \quad (32)$$

### 3.2.5 El impacto ambiental de la red

Actualmente, gobiernos alrededor del mundo se han preocupado por promover la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero en las industrias, obligando a las empresas de cualquier sector a tomar medidas que disminuyan la huella de carbono derivada de sus procesos Arango et al., (2018). Debido al creciente interés y necesidad de adaptar las actividades hacia estándares de bajo impacto ambiental, desde la logística se ha buscado cuantificar el costo asociado a las emisiones de las actividades que afectan en mayor proporción el ambiente, resaltando el transporte como el mayor contribuyente de este impacto negativo (Ahi & Searcy, 2015).

Para cuantificar el impacto ambiental derivado del transporte, J. Yang, Guo, & Ma, (2016) proponen una ecuación que considera el factor ambiental asociado a la mercancía transportada y el factor ambiental asociado a la emisión de gases por uso de combustible; Se propone entonces incluir en los costos de transporte:



$$F_{cv} = \delta \sum_v \beta_v \left( \frac{\sum_{i \in I} X_{iis}^k + \sum_{i \in I} X_{ish}^k + \sum_{i \in I} X_{isj}^k + \sum_{i \in I} X_{ihh'}^k}{\sum_{j \in J} F_{ij}^k} \right) \quad (33)$$

Los valores de  $\delta$  y  $\beta_v$  dependen del tipo de vehículo, siendo estos los presentados en la Tabla 3-2.

**Tabla 3-2:** Factores ambientales

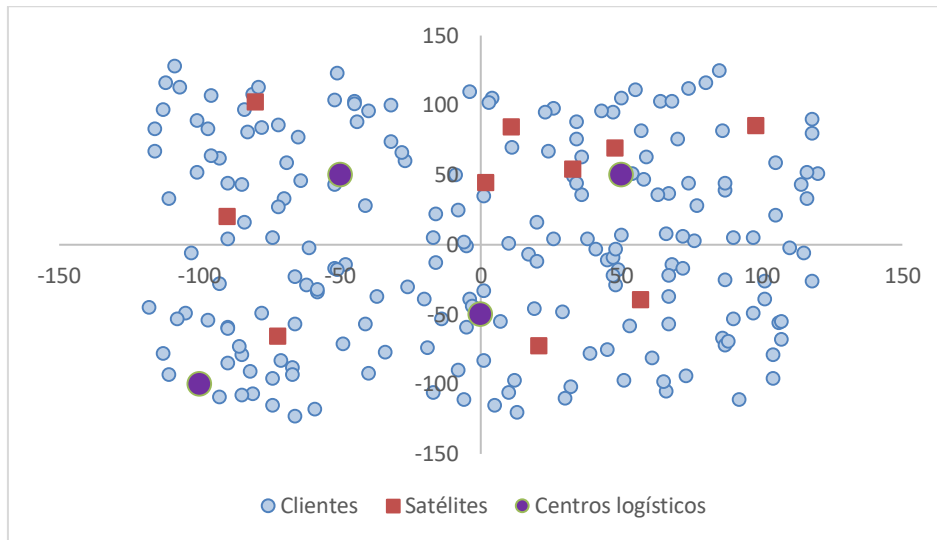
Tipo de vehículos	CO <sub>2</sub> por galón combustible $\delta$	CO <sub>2</sub> por galón configuración vehicular $\beta_v$
Motocicleta	1,469	0,5
Van	1,469	0,721
Turbo	1,469	0,074
Camión C2	1,469	1,529
Camión C3	1,469	2,318
Tractocamión	1,469	1,468

Fuente: The Greenhouse Gas Protocol, (2011)

Con los resultados de los flujos, los vehículos usados y distancias recorridas es posible calcular la huella de carbono de la red.

### 3.3 Simulación del modelo propuesto

Con el fin de realizar un análisis del modelo propuesto, éste se aplica a un conjunto de 200 clientes de recogida y entrega que suman así, 100 envíos; se sitúan 10 satélites y 4 centros logísticos principales. Este modelo se simula a través de la construcción de un algoritmo en Java. Dado que la obtención de datos simulados para el modelo propuesto no permite hacer una comparación del mismo con otros modelos, se propone una simulación para tres estrategias de solución, la primera contempla un diseño de red tradicional, la segunda incluye la posibilidad de incorporar un factor de sobrecarga, mientras que la estrategia propuesta contempla el modelo propuesto y una asignación entre centros logísticos que incorpora el concepto de p-mediana para el uso de centros logísticos intermedios. Las tres estrategias varían entonces en la etapa II y III del modelo y se explican detalladamente en la sección 3.3.2. En cuanto a la información sobre la que se realiza la simulación, la Figura 3-4 muestra el conjunto de clientes, satélites y centros logísticos principales que servirán para analizar las estrategias descritas.

**Figura 3-4:** Nodos de la red

Fuente: Elaboración propia (2019).

Es importante aclarar que los clientes no se diferencian gráficamente entre los de recogida y entrega dado el diseño de la red contempla la asignación de los clientes a los satélites; esta diferenciación es necesaria únicamente para conocer el cliente de origen y destino y se realiza asignando un código a cada envío. En la Tabla 3-3 se presentan dos ejemplos de envío, el 100 y el 101, se presentan los datos ingresados al modelo y sobre los que se realiza la simulación, en el Anexo 1 se encuentran los 100 envíos simulados.

**Tabla 3-3:** Datos de ingreso

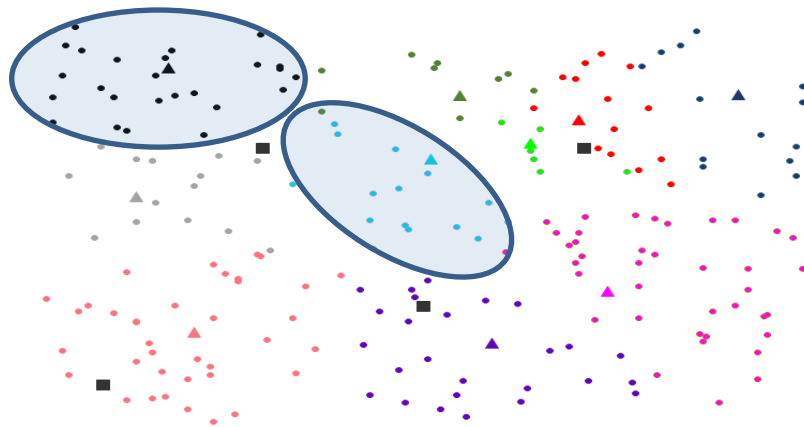
Código de envío	Coordenada X	Coordenada Y	Demanda (Kg)	Descripción
100	76	3	12	Recogida
	118	80	-12	Entrega
101	-113	97	-17	Entrega
	-66	-123	17	Recogida

Se tomaron entonces 100 envíos que pueden corresponder a paquetería o mensajería. Los envíos de paquetes se denotan con su peso en kilogramos donde un valor positivo significa que se recoge un paquete, y un valor negativo demora que se entregará. Para la mensajería, los envíos se identifican con valores de 1 o -1 bien sea si se trata de recogida o entrega simultáneamente. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la simulación para cada una de las etapas.

### 3.3.1 Etapa I

En esta etapa se asignan los clientes en función de la distancia euclidiana de cada uno de ellos a los satélites, bajo el mismo criterio, se asignan los satélites a los centros logísticos principales, la Figura 3-5 muestra la asignación obtenida, dado el número de nodos no se identifica mediante arcos entre los nodos sino por colores que permiten además, identificar la zonificación generada por esta asignación; los triángulos son los satélites, los puntos son clientes y los cuadrados son centros logísticos principales.

**Figura 3-5:** Asignación de clientes a satélites



Fuente: Elaboración propia

En el Anexo 1, se detalla la asignación de cada satélite al centro logístico más cercano, al igual que del satélite a los clientes. La Tabla 3-4 muestra las asignaciones obtenidas para los satélites y tres ejemplos de asignaciones obtenidas para clientes a satélites, considerando que la nomenclatura dada a los 4 centros logísticos es: Hub0, Hub 1, Hub 2 y Hub 3. La numeración de los satélites inicia también en 0 y finaliza en 9.

**Tabla 3-4:** Asignación de nodos

Tipo	Nodo	Nodo al que es asignado
Satélite	0	Hub 2
Satélite	1	Hub 1
Satélite	2	Hub 0
Satélite	3	Hub 0

Satélite	4	Hub 3
Satélite	5	Hub 0
Satélite	6	Hub 0
Satélite	7	Hub 2
Satélite	8	Hub 0
Satélite	9	Hub 1
Cliente	0	Satélite 7
Cliente	1	Satélite 3
Cliente	2	Satélite 9

Es decir, el cliente 0 está asignado al satélite 7 que a su vez está asignado al centro logístico 2; el cliente 1 está asignado al satélite 3 que a su vez está asignado al centro logístico 0. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la asignación de vehículos y los costos generados por el transporte bajo las tres estrategias definidas.

### 3.3.2 Etapas II y III

Es en estas etapas donde se proponen tres estrategias de solución encaminadas a analizar si la estrategia propuesta que se basa en el modelo propuesto, no solo cuantifica los costos derivados de la operación, sino que también permite minimizarlos al asignar menos vehículos a las rutas entre centros logísticos y aprovechar economías de escala, las tres estrategias de solución propuestas son:

- **Estrategia de solución 1:** Se diseña la red bajo consideraciones clásicas del modelo PND (Parcel Network Delivery). En la etapa 2 y en la etapa 3 se asume que los envíos son directos y no se tiene sobrecarga en ningún recorrido, así si se requieren 0.1 vehículos se enviará 1 vehículo por lo que la economía de escala no se considera.
- **Estrategia de solución 2:** Se evalúa el modelo propuesto; es decir; en la etapa 2 se incluye un factor de sobrecarga y siempre se propenderá por enviar vehículos cargados en su totalidad. En la etapa 3 se asignarán también vehículos completamente cargados; sin embargo, si se asignan los vehículos con sobrecarga y aún hay demanda restante por asignar siendo su valor inferior a la capacidad del vehículo, se evalúa la posibilidad de enviarlo a través de un centro logístico intermedio que también deba enviar al centro logístico final. Este criterio se basa en que la decisión de enviar por un centro logístico intermedio se da si la demanda restante no completa el 50% de la capacidad del vehículo.

- **Estrategia de solución 3:** Es la estrategia que contempla el modelo propuesto e incorpora el concepto de p-mediana, donde se asigna uno o varios centros logísticos primarios en función de su tamaño (demanda que procesa), resultando entonces la eliminación de una o más rutas entre los hub con el fin de aprovechar economías de escala. Para esto, en la etapa 3 toda vez se conoce la demanda que ingresa a cada centro y que debe distribuirse a los demás, se identifica el o los centros logísticos primarios, se procede a asignar la demanda a los vehículos que irán a cada centro logístico principal y si no se completa la capacidad de vehículo de un hub al otro, este será enviado al centro logístico primario siempre que éste último tenga envíos para el hub final

Como datos de entrada para la simulación y que permite el análisis de las estrategias, se tiene el costo de tránsito que se define como la relación del valor monetario por cada kilogramo transportado en un kilómetro de la red; los costos difieren en función del nivel de la red donde se esté transportando la paquetería y mensajería: si es transporte entre clientes, satélites y centros logísticos o si es entre centros logísticos ya que en estos tipos de transporte difiere el vehículo usado. De forma análoga, costo marginal de envío varía en función de los dos tipos de vehículos considerados. Los costos de manejo en los satélites y centros logísticos también difieren dadas las características descritas en la sección 3.1. En la Tabla 3-5, se presenta la comparación de los resultados en cuanto a dos de las tres variables respuesta que según Ben-Ayed,( 2013) y Scherr et al.,(2019), quienes dicen que deben compararse el número de vehículos usados; el costo generado por la red y las rutas de los envíos, estas últimas se presentan en la Tabla 3-7.

**Tabla 3-5:** Resultados sin consideración de sobrecarga

<b>Variables respuesta</b>	<b>Estrategia 1</b>	<b>Estrategia 2</b>	<b>Estrategia 3</b>
Cantidad de vehículos i-s-h	43	43	43
Cantidad de vehículos h-h	15	13	11
Costo i-s	\$18.791.175	\$18.791.175	\$18.791.175
Costo s-h	\$7.508.450	\$2.703.500	\$2.703.500
Costo h-h	\$6.214.480	\$6.730.809	\$4.632.434
Costo total	\$32.514.105	\$28.225.484	\$26.127.109

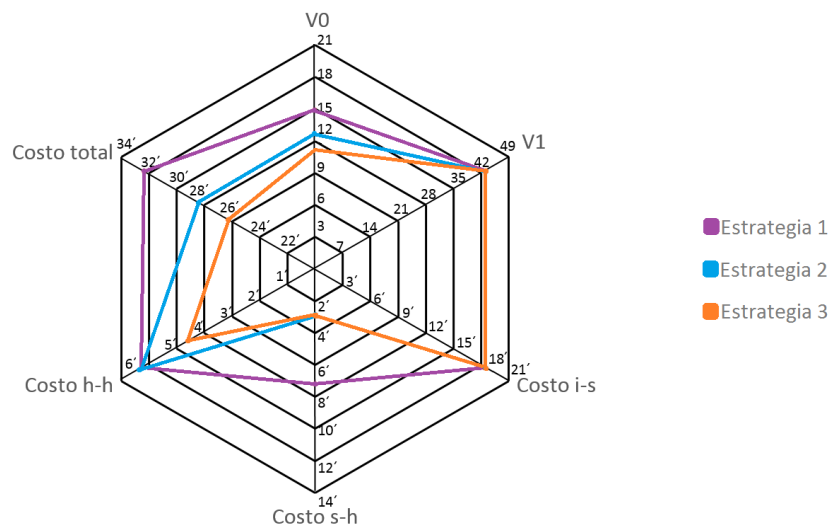
Dado que las estrategias no generan impacto en la etapa I de asignación de clientes a satélites, el número de vehículos que transitan entre clientes (i), satélites (s) y centros logísticos (h) no varía; sin embargo, los vehículos que transitan entre centros logísticos

principales disminuyen para las estrategias 2 y 3 en comparación a la 1. De forma análoga, los costos entre clientes y satélites no se reducen ya que los vehículos y la carga transportada en cada uno de ellos no varía; sin embargo, el costo de tránsito de los satélites a los centros logísticos se reduce significativamente, ya que se está haciendo uso del factor de sobrecarga, lo que disminuye el uso de vehículos y los costos fijos asociados a los mismos. En cuanto al costo entre centros logísticos, la estrategia 2 aumenta levemente lo que puede deberse a la conexión entre la totalidad de los centros logísticos, lo que impide el aprovechamiento de las economías de escala que se ve reflejado en la disminución del mismo costo en la estrategia 3. Los cambios porcentuales obtenidos en la función de costos para las estrategias 2 y 3 en comparación con la estrategia 1 se presentan en la Tabla 3-6, mientras que en la Figura 3-6 se presentan los cambios en las variables analizadas para cada estrategia.

**Tabla 3-6:** Cambios en las variables de respuesta

Variable respuesta	Estrategia 2	Estrategia 3
Cantidad de vehículos h-h	-13,0%	-27,0%
Costo s-h	-36,0%	-36,0%
Costo h-h	8,0%	-24,5%
Costo total	-13,0%	-19,6%

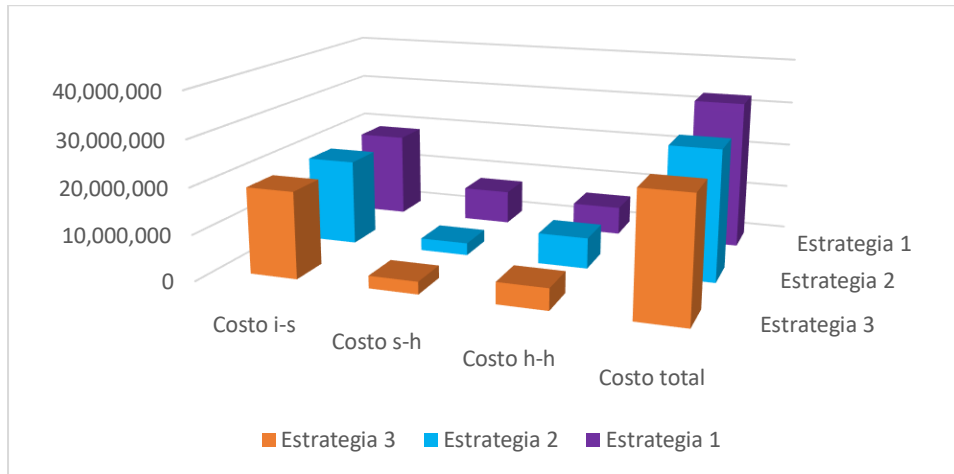
**Figura 3-6:** Gráfico radial de las variables de respuesta



Fuente: Elaboración propia (2019)

Puede verse que solo con incluir restricciones asociadas a la sobrecarga del vehículo, se da una reducción del 13% en los costos totales diarios de la red; mientras que al incluir la decisión de rutas entre centros logísticos principales se reduce en un 19,6%. Con el ánimo de identificar las reducciones en cada uno de los costos de la red para cada estrategia se presenta la Figura 3-7.

**Figura 3-7:** Costos de la red para las tres estrategias analizadas



Para analizar si la estrategia 3 efectivamente aprovecha economías de escala a través de la reducción de rutas entre nodos, se realiza un seguimiento a los envíos, en el Anexo 1 se detalla la ruta seguida en la red por cada uno de los 100 envíos, en la Tabla 3-7.

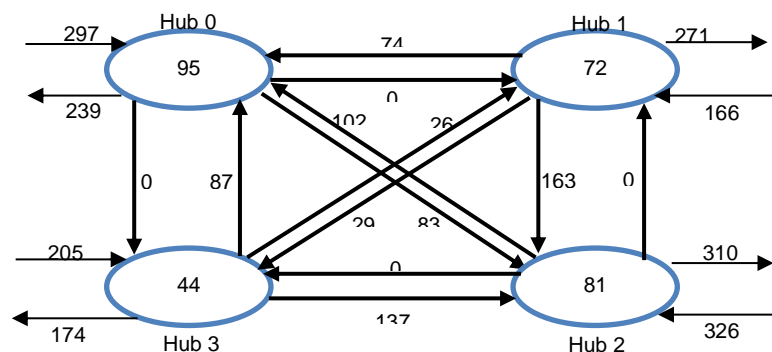
**Tabla 3-7:** Asignación de rutas generadas en la estrategia 3

Tipo	Nodo	X	Y	Demanda	Código	Nodo al que es asignado	Ruta							
							Cod	i	s	h	h'	h	s	j
Cliente	0	76	3	12	100	7	100	0	7	2		0	3	1
Cliente	1	118	80	-12	100	3								
Cliente	108	-52	104	2	154	9	154	108	9	1	2	0	6	109
Cliente	109	-6	2	-2	154	6								

La información presentada indica que el cliente 0 con coordenadas en x=76 y con coordenadas en y=3 que fue asignado al satélite 7, tiene una demanda de 12 kg que será enviada al cliente 1 con coordenadas x=118 e y=80 (el signo negativo indica entrega de la mercancía) y que está asignado al satélite 3; este envío fue codificado como 100 y la ruta que siguió fue: del cliente de recogida 0 al satélite 7, luego al centro logístico 2,

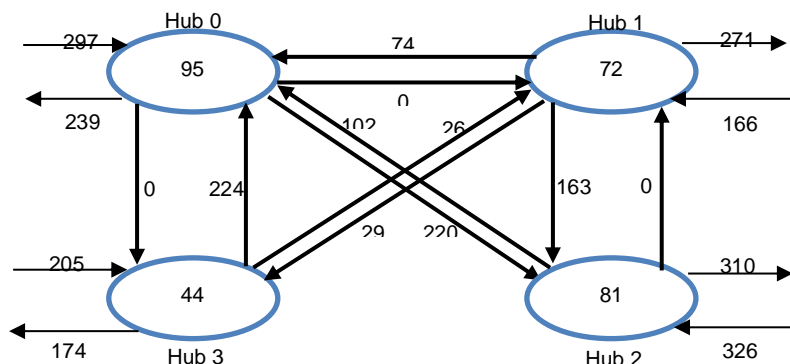
posteriormente se transportó al centro logístico 0, se llevó al satélite 2 y se entregó al cliente 1. De forma análoga se puede leer el envío con código 154, donde en la ruta generada el envío pasa por el centro logístico primario 2. En general, se evidencia que en la estrategia 3 se elimina la unión entre los centros logísticos 0 y 1, y que cuando hay un envío entre estos dos centros se direcciona al centro logístico primario identificado a través de p-mediana, que es el 2. El flujo de paquetería enviado a través de los centros logísticos principales se ilustran en la Figura 3-8, Figura 3-9 y En la Figura 3-10 se observa que no hay transporte entre el centro logístico 0 y el 1, y que a diferencia de la estrategia 2, los paquetes se desvían hacia el centro logístico 2, esto se debe a que la decisión no solo contempla la sobrecarga sino también que este centro logístico es el que más paquetes y mensajes procesa.

**Figura 3-8:** Flujo entre centros logísticos principales en la estrategia de solución 1



Se evidencia como los flujos internos de la red se distribuyen para satisfacer la demanda, por lo que los valores internos corresponden a la demanda exacta de cada centro logístico. Sin embargo, en la figura 3-9, se observa que la ruta entre centros logísticos 2 y 3 se elimina haciendo que se envíe esta demanda a través del centro logístico 0, considerando como factor para esta decisión la sobrecarga de los vehículos, pero sin contemplar la demanda que procesa cada centro logístico.

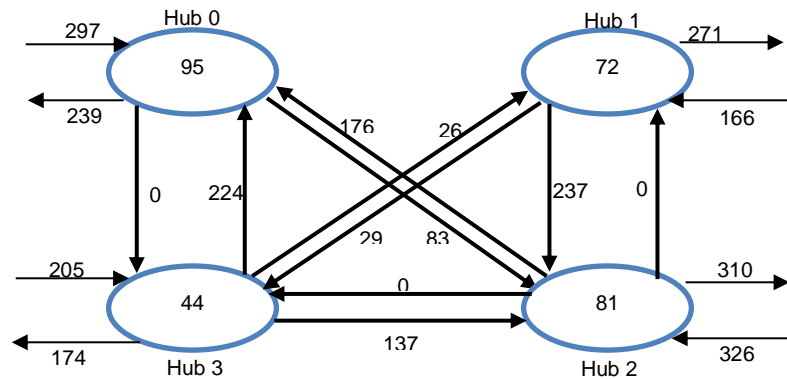
**Figura 3-9:** Flujo entre centros logísticos principales en la estrategia de solución 2





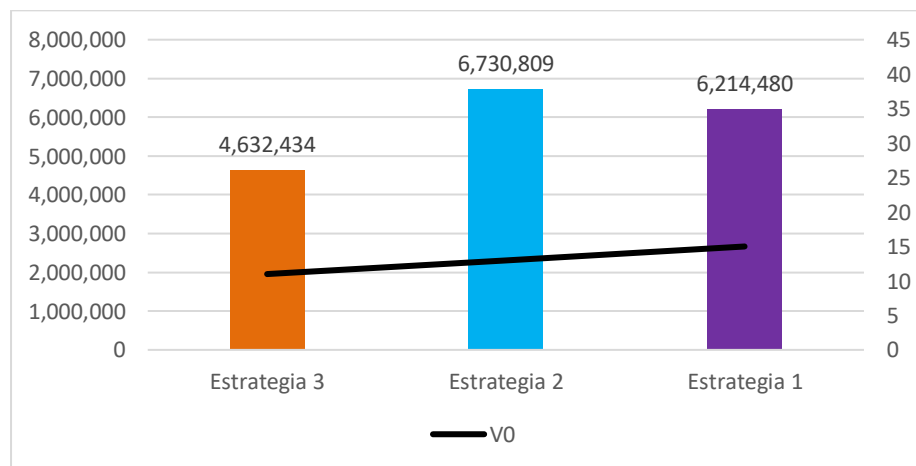
En la Figura 3-10 se observa que no hay transporte entre el centro logístico 0 y el 1, y que a diferencia de la estrategia 2, los paquetes se desvían hacia el centro logístico 2, esto se debe a que la decisión no solo contempla la sobrecarga sino también que este centro logístico es el que más paquetes y mensajes procesa.

**Figura 3-10:** Flujo entre centros logísticos principales en la estrategia de solución 2



Se puede observar que en la estrategia de solución 2, se aumenta el flujo entre los centros 3 a 0 y 0 a 2, esto debido a que se presentaron envíos a través de centros logísticos intermedios cuando la capacidad del vehículo no se completó; sin embargo en la estrategia de solución 3, no hay envíos entre el centro logístico 0 y el 14 debido a la baja demanda transporta entre ellos, lo que aumenta los flujos entre estos dos centros logísticos hacia y desde el centro logístico 2. En cuanto a la relación del uso de los vehículos como recursos para el transporte de paquetería y mensajería, se presenta la Figura 3-11.

**Figura 3-11:** Comparación de vehículos usados con costos entre hub para cada estrategia



Es posible analizar que la estrategia 3 no solo reduce el costo asociado a la red en la operación entre centros logísticos, sino que, reduce el número de vehículos usados para la operación entre los mismos, la estrategia 2 usa un número intermedio de vehículos, sin embargo, aumenta el costo de operación puede ser debido al envío de vehículos dedicados entre todos los hubs sin aprovechar economías de escala.

Dada la criticidad actual del impacto ambiental de las actividades productivas, y más aún, de la operación de transporte terrestre como gran contribuyente de emisión de material particulado por la combustión de fuentes de energía fósil, es necesario que las propuestas de configuración de redes de servicio realicen una estimación de su impacto ambiental haciendo uso de las herramientas diseñadas por las entidades expertas en el cálculo de huella de carbono, esto puede lograrse debido a que el diseño de redes arroja los parámetros requeridos para el cálculo de este impacto.

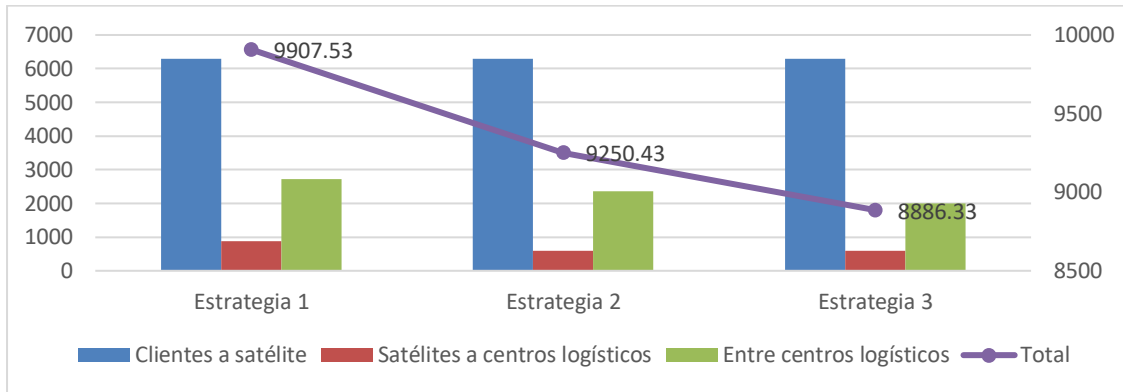
Se busca entonces identificar el impacto de las estrategias a nivel ambiental usando como indicador la huella de carbono causada por la red en su totalidad; este cálculo se realiza con la información consignada en el apartado 3.2.5. El GHGP provee los índices asociados a vehículos de las diferentes denominaciones de carga, el peso transportado y el tipo de combustible utilizado. Con los datos obtenidos de la simulación para cada una de las estrategias, es posible reemplazar las variables requeridas por el GHGP para obtener los valores de CO<sub>2</sub> presentados en la Tabla 3-8.

**Tabla 3-8:** Cálculo en la huella de carbono de la red en CO<sub>2</sub>e

Tramo de red	Estrategia 1	Estrategia 2	Estrategia 3
Clientes a satélite	6297,78	6297,78	6297,78
Satélites a centros logísticos	879	586	586
Entre centros logísticos	2730,75	2366,65	2002,55
Total	9907,53	9250,43	8886,33

Esta información se analiza gráficamente en la Figura 3-12, donde se evidencia que las estrategias 2 y 3 reducen el impacto ambiental total de la red debido a las reducciones de emisión entre centros logísticos

**Figura 3-12:** Análisis de la huella de carbono para las estrategias propuestas



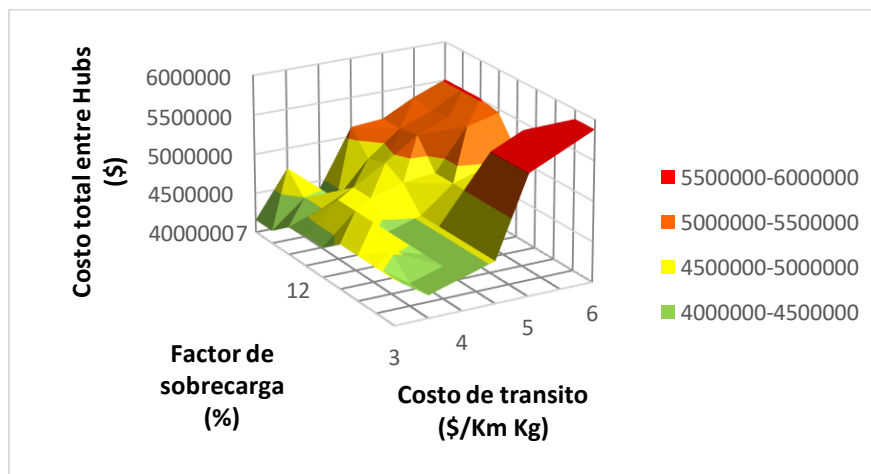
Fuente: Elaboración propia (2019).

Al reducir la cantidad de camiones se reduce la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido en los tramos entre centros logísticos, sin embargo, la reducción entre satélites y centros logísticos no es tan significativa dado que, al haber un factor de sobrecarga, esto aumenta la emisión de forma directa a los kilogramos sobrecargados.

### 3.3.3 Análisis de la estrategia propuesta

Con el ánimo de realizar un análisis detallado de la estrategia 3, se realiza una variación en los parámetros de costo de tránsito y de factor de carga para identificar el impacto que estas variaciones tienen sobre el costo entre centros logísticos. En la Figura 3-13 se puede apreciar que el valor obtenido para los costos asociados a la red en la operación resultante entre centros logísticos de \$4.632.434 se encuentra dentro de las posibles soluciones del modelo, ubicándose en la capa gris clara.

**Figura 3-13:** Gráfico de superficie de respuesta del costo entre centros logísticos



Se observa en el centro de la gráfica un valle que atraviesa transversalmente en un factor de sobrecarga de aproximadamente el 11%, esto indica que independientemente del costo de tránsito, el costo entre centros logísticos tiende a minimizarse para factores de sobrecarga de 11% a 12%; mientras que para valores entre 7% y 9% o de 13% y 15%, el costo total obtenido entre centros logísticos es altamente sensible a variaciones en el costo de tránsito.

En general, de la simulación realizada es posible afirmar que la estrategia de solución 3 que se propone, permite mejorar los indicadores de desempeño en los modelos de diseño de redes: Número de vehículos usados, costos de operación y arcos entre centros logísticos, adicional a estos se encuentra una disminución de la huella de carbono generada por esta estrategia.

## 4. Conclusiones

De los resultados obtenidos y el análisis realizado, es posible concluir que se logra cumplir a cabalidad con los objetivos propuestos, ya que se construye un modelo matemático que no solo permite estimar los costos logísticos en empresas de paquetería y mensajería bajo las condiciones operacionales colombianas, sino que también permite optimizar estos costos al incorporar variables de decisión asociadas a la sobrecarga y el envío entre centros logísticos intermedios.

El análisis de los modelos más relevantes para la cuantificación de costos logísticos, permite concluir que estos se centran en el diseño de la red o en el ruteo óptimo entre diferentes niveles de la misma; estos modelos presentan consideraciones como el factor de sobrecarga, la asignación óptima de clientes a nodos y la cuantificación de los vehículos necesarios para satisfacer la demanda, sin embargo, no siempre se integran a la cuantificación del costo ni permiten analizar variables que aporten a la identificación de un costo ambiental, en este caso, emisión de CO<sub>2</sub>.

Al analizar las ventajas y desventajas de los modelos que se han propuesto en la literatura, se encuentra que la estrategia *Hub and Spoke* es la más idónea para modelizar las redes de transporte de paquetería y mensajería; más aún en el contexto colombiano en el que las ciudades tienen centros logísticos principales de gran tamaño y centros intermedios que consolidan los envíos. Dentro de esta estrategia es necesario considerar la asignación adecuada de clientes a nodos, además de restricciones que propendan por el óptimo uso de los recursos en las rutas que conectan los centros logísticos principales, en este caso, vehículos; ya que es el factor que impacta directamente los costos operativos y ambientales.

La presente tesis de maestría propone un modelo que permite estimar y optimizar los costos logísticos asociados al transporte de paquetería y mensajería terrestre en Colombia, que dada su estructuración desde una estrategia *hub and spoke*, corresponde a la realidad operativa de estas empresas, permitiendo hacer seguimiento al flujo de mercancía, número de vehículos y asignación de las instalaciones; variables que permiten a demás cuantificar el impacto ambiental. El modelo matemático propuesto considera el factor de sobrecarga y el uso de centros logísticos intermedios con el fin de disminuir costos a través de economías de escala, obteniendo así una reducción del 13% de los costos totales con respecto a una configuración tradicional de una red de paquetería y mensajería; adicionalmente, al implementar el concepto de *p-mediana* considerado como un problema *np-hard* para la decisión de la ruta entre centros logísticos principales, se reducen los costos totales en un 19.6% en comparación con una red de distribución de paquetería tradicional.

De los resultados obtenidos, se concluye que emplear factores de sobrecarga de inferiores al 10% y superiores al 13%, no representa beneficios en los costos totales, dado que si el factor de sobrecarga es bajo no se generará economía de escala y si es elevado, aumenta el costo obtenido por la penalización asociada a la sobrecarga; sin embargo, un factor de entre 11% y 12% permite equilibrar el costo de la función independiente del costo de tránsito.

Como recomendación para futuras investigaciones, se sugiere abordar la integración de Modelos de diseño de redes de transporte y modelos de ruteo para la optimización transversal de la operatividad en empresas de transporte; el impacto de políticas ambientales en los costos logísticos asociados a la operación del transporte de paquetería en mensajería y el diseño de modelos dinámicos para redes de transporte que permitan identificar impacto en costos.

## 5. Bibliografía

- Ahi, P., & Searcy, C. (2015). An analysis of metrics used to measure performance in green and sustainable supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 86, 360–377. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.005>
- Akeb, H., Moncef, B., & Durand, B. (2018). Building a collaborative solution in dense urban city settings to enhance parcel delivery: An effective crowd model in Paris. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 119, 223–233. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.04.007>
- Ambrosino, D., Ferrari, C., Sciomachen, A., & Tei, A. (2016). Intermodal nodes and external costs: Re-thinking the current network organization. *Research in Transportation Business & Management*, 19, 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2016.05.001>
- Ambrosino, D., & Grazia Scutellà, M. (2005). Distribution network design: New problems and related models. *European Journal of Operational Research*, 165(3), 610–624. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.04.009>
- Arango, M. D., Gómez, C. G., Serna, C. A., & Zapata, J. A. (2018). Multi-agent Model for Urban Goods Distribution. *Research in Computing Science*, 147(3), 35–44.
- Arango, M. D., Zapata, J. A., Serna-Urán, C. A., Gómez, J. A., Gutiérrez, D., & Ruiz, S. (2018). *Sistema logístico de carga en Colombia: retos y escenarios futuros* (1st ed.). Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Arango Serna, M. D., Ruiz Moreno, S., Ortiz Vásquez, L. F., & Zapata Cortes, J. A. (2017). Indicadores de desempeño para empresas del sector logístico: Un enfoque desde el transporte de carga terrestre. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 25(4), 707–720. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052017000400707>
- Ayala, P. D. (2001). Desarrollo de los costos en un sistema logístico. Retrieved from <http://www.bibliociencias.cu/gsd/collect/eventos/index/assoc/HASH80c8.dir/doc.pdf>
- Ballou, R. (2004). *Logística: Administración de la cadena de suministros* (Quinta edición). Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=ii5xqLQ5VLgC&printsec=frontcover&dq=administracion+de+la+cadena+de+suministro#v=onepage&q&f=false>
- Bard, J. F., & Nananukul, N. (2009). The integrated production–inventory–distribution–routing problem. *Journal of Scheduling*, 12(3), 257–280. <https://doi.org/10.1007/s10951-008-0081-9>
- Barkaoui, M., Berger, J., & Boukhtouta, A. (2015). Customer satisfaction in dynamic vehicle routing problem with time windows. *Applied Soft Computing*, 35, 423–432. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.06.035>
- Bashiri, M., Badri, H., & Talebi, J. (2012). A new approach to tactical and strategic planning in production–distribution networks. *Applied Mathematical Modelling*, 36(4), 1703–1717. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.09.018>

- Baumung, M. N., Gündüz, H. I., Müller, T., & Sebastian, H.-J. (2015). Strategic Planning of Optimal Networks for Parcel and Letter Mail. In H.-J. Sebastian, P. Kaminsky, & T. Müller (Eds.), *Quantitative Approaches in Logistics and Supply Chain Management* (pp. 81–103). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-12856-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-12856-6_4)
- Ben-Ayed, O. (2013). Parcel distribution network design problem. *Operational Research*, 13(2), 211–232. <https://doi.org/10.1007/s12351-011-0118-2>
- Bettinelli, A., Ceselli, A., & Righini, G. (2011). A branch-and-cut-and-price algorithm for the multi-depot heterogeneous vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(5), 723–740. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.07.008>
- Bravo, J. J., Orejuela, J. P., & Osorio, J. C. (2007). Administración de recursos de distribución: indicadores para la priorización en transporte. *Estudios Gerenciales*, 23(102), 101–118. [https://doi.org/10.1016/S0123-5923\(07\)70004-9](https://doi.org/10.1016/S0123-5923(07)70004-9)
- Bravo, J. J., & Vidal, C. J. (2013). Freight transportation function in supply chain optimization models: A critical review of recent trends. *Expert Systems with Applications*, 40(17), 6742–6757. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.06.015>
- Burns, L. D., Hall, R. W., Blumenfeld, D. E., & Daganzo, C. F. (1985). Distribution Strategies that Minimize Transportation and Inventory Costs. *Operations Research*, 33(3), 469–490.
- Campbell, J. F., Ernst, A. T., & Krishnamoorthy, M. (2005). Hub Arc Location Problems: Part I—Introduction and Results. *Management Science*, 51(10), 1540–1555. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1050.0406>
- Carbon Trust, Defra, & BSi. (2008). Guide to PAS 2050. Retrieved from [http://aggie-horticulture.tamu.edu/faculty/hall/publications/PAS2050\\_Guide.pdf](http://aggie-horticulture.tamu.edu/faculty/hall/publications/PAS2050_Guide.pdf)
- Cardona-Valdés, Y., Álvarez, A., & Ozdemir, D. (2011). A bi-objective supply chain design problem with uncertainty. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(5), 821–832. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.04.003>
- Caris, A., Macharis, C., & Janssens, G. K. (2013). Decision support in intermodal transport: A new research agenda. *Computers in Industry*, 64(2), 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2012.12.001>
- Chen, K., Shen, J., & Feng, M. (2013). Disruptions management of a supply chain under strategic subsidy policy for the demand-stimulating inventory. *Computers & Industrial Engineering*, 76, 169–182. <https://doi.org/doi:10.1016/j.cie.2014.07.030>
- Chen, W., Mes, M., & Schutten, M. (2018). Multi-hop driver-parcel matching problem with time windows. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 30(3), 517–553. <https://doi.org/10.1007/s10696-016-9273-3>
- Chow, J. Y. J. (2018). Chapter 7 - Network Design. In J. Y. J. Chow (Ed.), *Informed Urban Transport Systems* (pp. 273–340). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813613-3.00007-3>
- Combes, F. (2014). 5 - Inventory Theory and Freight Transport Modelling. In L. Tavasszy & G. de Jong (Eds.), *Modelling Freight Transport* (pp. 89–115). Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124104006000057>
- Contreras Castañeda, E., Tordecilla Madera, R., & Silva Rodríguez, J. (2013). Revisión de estudios de caso de carácter cualitativo y exploratorio en logística inversa. *Revista EIA*, (20), 153–164.
- Daganzo, C. F. (2005). *Logistics Systems Analysis* (4th ed.). Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.



- Dooley, A. E., Parker, W. J., & Blair, H. T. (2005). Modelling of transport costs and logistics for on-farm milk segregation in New Zealand dairying. *Computers and Electronics in Agriculture*, 48(2), 75–91. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.12.007>
- Ducret, R. (2014). Parcel deliveries and urban logistics: Changes and challenges in the courier express and parcel sector in Europe — The French case. *Research in Transportation Business & Management*, 11, 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2014.06.009>
- Estrada, M. Á. (2007). Análisis de estrategias eficientes en la logística de distribución de paquetería (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Estrada-Romeu, M., & Robusté, F. (2015). Stopover and hub-and-spoke shipment strategies in less-than-truckload carriers. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 76, 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.02.006>
- Friedrich, H., Tavasszy, L., & Davydenko, I. (2014). 4 - Distribution Structures. In *Modelling Freight Transport* (pp. 65–87). Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124104006000045>
- Garcés, C. D. (2010). Modelo de entregas directas para la reducción de costos logísticos de distribución en empresas de consumo masivo. (Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia). Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/1859/2/carlosduvangarcqramirez20101.pdf>
- Garcia, R., & Freire, F. (2014). Carbon footprint of particleboard: a comparison between ISO/TS 14067, GHG Protocol, PAS 2050 and Climate Declaration. *Journal of Cleaner Production*, 66, 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.073>
- Gelareh, S., Neamatian Monemi, R., & Nickel, S. (2015). Multi-period hub location problems in transportation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 75, 67–94. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.12.016>
- Gelareh, S., Nickel, S., & Pisinger, D. (2010). Liner shipping hub network design in a competitive environment. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(6), 991–1004. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2010.05.005>
- ISO/TS 14067. (2013). Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification and communication. Retrieved from [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail?csnumber=59521](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=59521)
- Jakob, A., Craig, J. L., & Fisher, G. (2006). Transport cost analysis: a case study of the total costs of private and public transport in Auckland. *Environmental Science & Policy*, 9(1), 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2005.09.001>
- Janic, M. (2007). Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(1), 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2006.10.004>
- Janssens, J., Van den Bergh, J., Sörensen, K., & Cattrysse, D. (2015). Multi-objective microzone-based vehicle routing for courier companies: From tactical to operational planning. *European Journal of Operational Research*, 242(1), 222–231. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.09.026>
- Khosravi, S., & Jokar, M. (2018). Many to many hub and spoke location routing problem based on the gravity rule. *Uncertain Supply Chain Management*, 6(4), 393–406.
- Kuby, M. J., & Gray, R. G. (1993). The hub network design problem with stopovers and feeders: The case of Federal Express. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 27(1), 1–12. [https://doi.org/10.1016/0965-8564\(93\)90012-A](https://doi.org/10.1016/0965-8564(93)90012-A)
- Langevin, A., & Riopel, D. (2005). *Logistics Systems: Design and Optimization*. Springer Science & Business Media.
- Larsen, A., Madsen, O. B. G., & Solomon, M. M. (2008). Recent Developments in Dynamic Vehicle Routing Systems. In B. Golden, S. Raghavan, & E. Wasil (Eds.), *The*

- Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges (pp. 199–218). [https://doi.org/10.1007/978-0-387-77778-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-0-387-77778-8_9)
- Lee, J.-H., & Moon, I. (2014). A hybrid hub-and-spoke postal logistics network with realistic restrictions: A case study of Korea Post. *Expert Systems with Applications*, 41(11), 5509–5519. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.02.027>
- Lin, B. (2018). The design of courier transportation networks with a nonlinear zero-one programming model. arXiv:1805.00836 [Math]. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1805.00836>
- Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T. S., Lam, H. Y., Pang, G. K. H., & Chin, K. S. (2014). A decision support system for optimizing dynamic courier routing operations. *Expert Systems with Applications*, 41(15), 6917–6933. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.04.036>
- Lin, C.-C., & Lee, S.-C. (2018). Hub network design problem with profit optimization for time-definite LTL freight transportation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 114, 104–120. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.03.007>
- Lindholm, M. (2010). A sustainable perspective on urban freight transport: Factors affecting local authorities in the planning procedures. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2(3), 6205–6216. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.04.031>
- Lindholm, M., & Behrends, S. (2012). Challenges in urban freight transport planning – a review in the Baltic Sea Region. *Journal of Transport Geography*, 22, 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.01.001>
- Marín, C. G. G., Serna, M. D. A., & Urán, C. A. S. (2018). Modelos logísticos aplicados en la distribución urbana de mercancías. *Revista EIA*, 14(28), 57–76. <https://doi.org/10.24050/reia.v14i28.1055>
- Mokhtar, H., Krishnamoorthy, M., & Ernst, A. T. (2019). The 2-allocation p-hub median problem and a modified Benders decomposition method for solving hub location problems. *Computers & Operations Research*, 104, 375–393. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.09.006>
- Monteiro, M. M., Leal, J. E., & Raupp, F. M. P. (2010). A Four-Type Decision-Variable MINLP Model for a Supply Chain Network Design. *Mathematical Problems in Engineering*, 2010, e450612. <https://doi.org/10.1155/2010/450612>
- Montoya-Torres, J. R., López Franco, J., Nieto Isaza, S., Felizzola Jiménez, H., & Herazo-Padilla, N. (2015). A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. *Computers & Industrial Engineering*, 79, 115–129. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.10.029>
- Nasiri, G., Davoudpour, H., & Karimi, B. (2010). The impact of integrated analysis on supply chain management: a coordinated approach for inventory control policy. *Supply Chain Management: An International Journal*, 15(4), 277–289. <https://doi.org/10.1108/13598541011054652>
- Pérez, P. J., & Vassallo, J. M. (2013). Changes in the external costs of freight surface transport in Spain. *Research in Transportation Economics*, 42(1), 61–76. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2012.11.006>
- Ponboon, S., Qureshi, A. G., & Taniguchi, E. (2016). Evaluation of Cost Structure and Impact of Parameters in Location-routing Problem with Time Windows. *Transportation Research Procedia*, 12, 213–226. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.060>
- Sahin, B., Yilmaz, H., Ust, Y., Guneri, A. F., & Gulsun, B. (2009). An approach for analysing transportation costs and a case study. *European Journal of Operational Research*, 193(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.10.030>

- Santos, L., Coutinho-Rodrigues, J., & Current, J. R. (2008). Implementing a multi-vehicle multi-route spatial decision support system for efficient trash collection in Portugal. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(6), 922–934. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2007.08.009>
- Scherr, Y. O., Neumann Saavedra, B. A., Hewitt, M., & Mattfeld, D. C. (2019). Service network design with mixed autonomous fleets. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 124, 40–55. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.02.001>
- Serna, C. A. (2016). Modelo multi-agente para problemas de recogida y entrega de mercancías con ventanas de tiempo usando un algoritmo memético con relajaciones difusas (Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia). Retrieved from <http://bdigital.unal.edu.co/53685/>
- Sim, T., Lowe, T. J., & Thomas, B. W. (2009). The stochastic -hub center problem with service-level constraints. *Computers & Operations Research*, 36(12), 3166–3177. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.11.020>
- Sitek, P., & Wikarek, J. (2019). Capacitated vehicle routing problem with pick-up and alternative delivery (CVRPPAD): model and implementation using hybrid approach. *Annals of Operations Research*, 273(1), 257–277. <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2722-x>
- Sun, L., Wang, H., & Hou, J. (2015). Optimization of Postal Distribution Network Based on Rendezvous with Heterogeneous Vehicles and Capacity Constraints. *Procedia Computer Science*, 60, 1347–1356. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.207>
- Sun, L., Zhao, L., & Hou, J. (2015). Optimization of postal express line network under mixed driving pattern of trucks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 77, 147–169. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.01.003>
- Teodorović, D., & Janić, M. (2017). Chapter 9 - Freight Transportation and Logistics. In D. Teodorović & M. Janić (Eds.), *Transportation Engineering* (pp. 569–634). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803818-5.00009-3>
- Thanh, P. N., Péton, O., & Bostel, N. (2010). A linear relaxation-based heuristic approach for logistics network design. *Computers & Industrial Engineering*, 59(4), 964–975. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.09.007>
- The Greenhouse Gas Protocol. (2011). *Greenhouse Gas Protocol*. Retrieved from <http://www.ghgprotocol.org/about-ghgp>
- Thompson, R. G., & Zhang, L. (2018). Optimising courier routes in central city areas. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 93, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.05.016>
- Vidal, C. J., & Goetschalckx, M. (2001). A global supply chain model with transfer pricing and transportation cost allocation. *European Journal of Operational Research*, 129(1), 134–158. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00431-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00431-2)
- Wasner, M., & Zäpfel, G. (2004). An integrated multi-depot hub-location vehicle routing model for network planning of parcel service. *International Journal of Production Economics*, 90(3), 403–419. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2003.12.002>
- Xie, F., Lin, J., & Cui, W. (2015). Exploring express delivery networks in China based on complex network theory. *Complexity*, 21(2), 166–179. <https://doi.org/10.1002/cplx.21595>
- Yan, S., Lin, J.-R., & Lai, C.-W. (2013). The planning and real-time adjustment of courier routing and scheduling under stochastic travel times and demands. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 53, 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.01.011>

- Yang, J., Guo, J., & Ma, S. (2016). Low-carbon city logistics distribution network design with resource deployment. *Journal of Cleaner Production*, 119, 223–228. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.011>
- Yang, K., Yang, L., & Gao, Z. (2016). Planning and optimization of intermodal hub-and-spoke network under mixed uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 95, 248–266. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.10.001>
- Yang, T.-H. (2009). Stochastic air freight hub location and flight routes planning. *Applied Mathematical Modelling*, 33(12), 4424–4430. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.03.018>
- Yoon, M.-G., & Current, J. (2008). The hub location and network design problem with fixed and variable arc costs: formulation and dual-based solution heuristic. *Journal of the Operational Research Society*, 59(1), 80–89. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602307>
- Zahou, J., & Dai, S. (2012). Urban and Metropolitan Freight Transportation: A Quick Review of Existing Models. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 12(4), 106–114. [https://doi.org/10.1016/S1570-6672\(11\)60214-6](https://doi.org/10.1016/S1570-6672(11)60214-6)
- Zapata-Cortes, J. A., Arango-Serna, M. D., & Serna-Urán, C. A. (2018). Comparison of three IRP-based models to reduce logistics costs and greenhouse gas emissions. *DYNA*, 85(205), 199–204. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n205.68282>
- Zhao, L., Li, H., Li, M., Sun, Y., Hu, Q., Mao, S., ... Xue, J. (2018). Location selection of intra-city distribution hubs in the metro-integrated logistics system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 80, 246–256. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.06.024>

# Anexo 1

A continuación, se muestra la asignación lograda para clientes a satélites y satélites a clientes. En cuanto a la ruta de cada paquete, es necesario considerar el que la ruta muestra un -1 en el medio en caso de que no tenga centro logístico intermedio, sin embargo, si muestra un 0,1,2 o 3 significa que éste fue el centro logístico intermedio por que le transita la ruta.

**Tabla A-1 – Datos de entrada, asignación de clientes y ruta generada.**

Tipo	Nodo	X	Y	Demanda	Código	Nodo al que es asignado	Ruta											
							Cod	i	s	h	h'	h	s	j				
Hub	0	-50	50															
Hub	1	0	-50															
Hub	2	50	50															
Hub	3	-100	-100															
Satélite	0	-90	20			Hub 2												
Satélite	1	-80	102			Hub 1												
Satélite	2	-72	-66			Hub 0												
Satélite	3	2	44			Hub 0												
Satélite	4	11	84			Hub 3												
Satélite	5	21	-73			Hub 0												
Satélite	6	33	54			Hub 0												
Satélite	7	48	69			Hub 2												
Satélite	8	57	-40			Hub 0												
Satélite	9	98	85			Hub 1												
Cliente	0	76	3	12	100	7	100	0	7	2		0	3	1				
Cliente	1	118	80	-12	100	3												
Cliente	2	-113	97	-17	101	9	101	3	4	3		1	9	2				
Cliente	3	-66	-123	17	101	4												
Cliente	4	-16	22	10	102	6	102	4	6	0		2	0	5				
Cliente	5	39	-78	-10	102	0												

Cliente	6	-41	-57	19	103	4	103	6	4	3		2	7	7
Cliente	7	50	7	-19	103	7								
Cliente	8	-74	5	11	104	1	104	8	1	1		2	0	9
Cliente	9	51	-97	-11	104	0								
Cliente	10	-74	-115	-8	105	4	105	11	5	0		3	4	10
Cliente	11	64	103	8	105	5								
Cliente	12	-85	-79	9	106	4	106	12	4	3		2	0	13
Cliente	13	-4	-39	-9	106	0								
Cliente	14	-93	62	1	107	9	107	14	9	1		2	0	15
Cliente	15	66	-105	-1	107	0								
Cliente	16	-8	-90	-1	108	0	108	17	7	2		2	0	16
Cliente	17	67	-37	1	108	7								
Cliente	18	-5	-1	14	109	6	109	18	6	0		0	2	19
Cliente	19	36	63	-14	109	2								
Cliente	20	-90	-59	-8	110	4	110	21	0	2		3	4	20
Cliente	21	19	-46	8	110	0								
Cliente	22	87	-25	-18	111	7	111	23	3	0		2	7	22
Cliente	23	120	51	18	111	3								
Cliente	24	-118	-45	7	112	4	112	24	4	3		3	4	25
Cliente	25	-67	-88	-7	112	4								
Cliente	26	-34	-77	9	113	4	113	26	4	3		0	3	27
Cliente	27	74	112	-9	113	3								
Cliente	28	7	-55	15	114	0	114	28	0	2		0	5	29
Cliente	29	47	95	-15	114	5								
Cliente	30	-74	-96	10	115	4	115	30	4	3		0	3	31
Cliente	31	85	125	-10	115	3								
Cliente	32	86	-67	-1	116	7	116	33	3	0		2	7	32
Cliente	33	87	39	1	116	3								
Cliente	34	-90	-85	25	117	4	117	34	4	3		2	7	35
Cliente	35	101	-39	-25	117	7								
Cliente	36	-109	128	13	118	9	118	36	9	1		1	9	37
Cliente	37	-40	96	-13	118	9								
Cliente	38	-52	-17	-9	119	4	119	39	9	1		3	4	38
Cliente	39	-51	123	9	119	9								
Cliente	40	-5	-59	-13	120	0	120	41	7	2		2	0	40
Cliente	41	45	-11	13	120	7								
Cliente	42	-27	60	-13	121	6	121	43	8	0		0	6	42
Cliente	43	26	98	13	121	8								
Cliente	44	-70	33	-19	122	1	122	45	7	2		1	1	44
Cliente	45	38	4	19	122	7								

Ciente	46	-83	81	8	123	9													
Ciente	47	-45	103	-8	123	9	123	46	9	1			1	9					47
Ciente	48	-111	-93	11	124	4													
Ciente	49	13	-120	-11	124	0	124	48	4	3			2	0					49
Ciente	50	4	105	-19	125	8													
Ciente	51	11	70	19	125	8	125	51	8	0			0	8					50
Ciente	52	-116	67	-19	126	9													
Ciente	53	32	-102	19	126	0	126	53	0	2			1	9					52
Ciente	54	-72	27	-12	127	1													
Ciente	55	-67	-93	12	127	4	127	55	4	3			1	1					54
Ciente	56	-45	101	-20	128	9													
Ciente	57	-6	-111	20	128	0	128	57	0	2			1	9					56
Ciente	58	-90	4	12	129	1													
Ciente	59	-17	5	-12	129	6	129	58	1	1	2		0	6					59
Ciente	60	-61	-2	1	130	1													
Ciente	61	107	-68	-1	130	7	130	60	1	1			2	7					61
Ciente	62	-58	-34	-1	131	4													
Ciente	63	70	76	1	131	5	131	63	5	0			3	4					62
Ciente	64	-62	-29	3	132	4													
Ciente	65	-41	28	-3	132	6	132	64	4	3			0	6					65
Ciente	66	-52	43	-8	133	1													
Ciente	67	72	6	8	133	7	133	67	7	2			1	1					66
Ciente	68	-112	116	-11	134	9													
Ciente	69	87	-72	11	134	7	134	69	7	2			1	9					68
Ciente	70	54	51	-17	135	5													
Ciente	71	65	-98	17	135	0	135	71	0	2			0	5					70
Ciente	72	-96	64	-8	136	9													
Ciente	73	-81	108	8	136	9	136	73	9	1			1	9					72
Ciente	74	-111	33	-14	137	1													
Ciente	75	-48	-14	14	137	1	137	75	1	1			1	1					74
Ciente	76	-19	-74	8	138	0													
Ciente	77	10	-106	-8	138	0	138	76	0	2			2	0					77
Ciente	78	1	-83	-16	139	0													
Ciente	79	17	-7	16	139	7	139	79	7	2			2	0					78
Ciente	80	-105	-49	4	140	4													
Ciente	81	58	47	-4	140	5	140	80	4	3			0	5					81
Ciente	82	-28	66	18	141	6													
Ciente	83	104	-79	-18	141	7	141	82	6	0			2	7					83
Ciente	84	-8	25	9	142	6													
Ciente	85	45	-75	-9	142	0	142	84	6	0			2	0					85
Ciente	86	-81	-107	-3	143	4	143	87	7	2			3	4					86

Cliente	87	66	8	3	143	7												
Cliente	88	-113	-78	-13	144	4	144	89	9	1			3	4				88
Cliente	89	-72	86	13	144	9												
Cliente	90	-90	44	13	145	1	145	90	1	1			2	7				91
Cliente	91	20	-12	-13	145	7												
Cliente	92	-32	74	3	146	8	146	92	8	0			0	5				93
Cliente	93	74	44	-3	146	5												
Cliente	94	53	-58	-15	147	7	147	95	7	2			2	7				94
Cliente	95	106	-56	15	147	7												
Cliente	96	-40	-92	-1	148	4	148	97	7	2			3	4				96
Cliente	97	68	-14	1	148	7												
Cliente	98	-3	-44	12	149	0	149	98	0	2			0	5				99
Cliente	99	50	105	-12	149	5												
Cliente	100	-97	83	13	150	9	150	100	9	1			2	0				101
Cliente	101	12	-97	-13	150	0												
Cliente	102	-32	100	-16	151	8	151	103	5	0			0	8				102
Cliente	103	43	96	16	151	5												
Cliente	104	-90	-60	13	152	4	152	104	4	3			3	4				105
Cliente	105	-85	-108	-13	152	4												
Cliente	106	-82	-91	12	153	4	153	106	4	3			2	7				107
Cliente	107	110	-2	-12	153	7												
Cliente	108	-52	104	2	154	9	154	108	9	1	2	0	6					109
Cliente	109	-6	2	-2	154	6												
Cliente	110	49	-18	1	155	7	155	110	7	2			0	5				111
Cliente	111	57	82	-1	155	5												
Cliente	112	-116	83	-2	156	9	156	113	5	0	2	1	9					112
Cliente	113	77	28	2	156	5												
Cliente	114	-101	52	-6	157	1	157	115	7	2			1	1				114
Cliente	115	72	-17	6	157	7												
Cliente	116	92	-111	14	158	7	158	116	7	2			2	7				117
Cliente	117	118	-26	-14	158	7												
Cliente	118	90	5	2	159	7	159	118	7	2			2	7				119
Cliente	119	101	-26	-2	159	7												
Cliente	120	-107	113	-18	160	9	160	121	5	0	2	1	9					120
Cliente	121	67	37	18	160	5												
Cliente	122	-14	-53	-20	161	0	161	123	5	0			2	0				122
Cliente	123	59	63	20	161	5												
Cliente	124	-96	107	-9	162	9	162	125	0	2			1	9				124
Cliente	125	1	-33	9	162	0												
Cliente	126	-101	89	-6	163	9	163	127	3	0	2	1	9					126





Cliente	168	47	-9	4	184	7													
Cliente	169	115	-6	-4	184	7	184	168	7	2			2	7					169
Cliente	170	-66	-57	16	185	4													
Cliente	171	-9	50	-16	185	6	185	170	4	3			0	6					171
Cliente	172	-86	-73	-15	186	4													
Cliente	173	34	44	15	186	2	186	173	2	0			3	4					172
Cliente	174	20	16	3	187	6													
Cliente	175	67	-57	-3	187	7	187	174	6	0			2	7					175
Cliente	176	-4	110	-12	188	8													
Cliente	177	1	35	12	188	6	188	177	6	0			0	8					176
Cliente	178	-51	-18	-7	189	4													
Cliente	179	80	116	7	189	3	189	179	3	0			3	4					178
Cliente	180	-59	-118	-4	190	4													
Cliente	181	-44	88	4	190	9	190	181	9	1			3	4					180
Cliente	182	29	-48	9	191	0													
Cliente	183	88	-69	-9	191	7	191	182	0	2			2	7					183
Cliente	184	-17	-106	5	192	0													
Cliente	185	63	36	-5	192	2	192	184	0	2			0	2					185
Cliente	186	-97	-54	-4	193	4													
Cliente	187	23	95	4	193	8	193	187	8	0			3	4					186
Cliente	188	-16	-13	6	194	6													
Cliente	189	61	-81	-6	194	0	194	188	6	0			2	0					189
Cliente	190	-66	-23	4	195	4													
Cliente	191	48	-3	-4	195	7	195	190	4	3			2	7					191
Cliente	192	10	1	-6	196	6													
Cliente	193	68	103	6	196	3	196	193	3	0			0	6					192
Cliente	194	26	4	10	197	6													
Cliente	195	47	-22	-10	197	7	197	194	6	0			2	7					195
Cliente	196	-37	-37	9	198	4													
Cliente	197	24	67	-9	198	2	198	196	4	3			0	2					197
Cliente	198	-64	46	-4	199	1													
Cliente	199	41	-3	4	199	7	199	199	7	2			1	1					198

## Anexo 2

### 1)Asignación de satélites y clientes

CalcularSateliteCercano(coordenada X cliente, coordenada Y cliente, matriz Satélites)

satélite1 = distancia entre satélite 1 y cliente

satélite2 = distancia entre satélite 2 y cliente

satélite3 = distancia entre satélite 3 y cliente

satélite4 = distancia entre satélite 4 y cliente

satélite5 = distancia entre satélite 5 y cliente

satélite6 = distancia entre satélite 6 y cliente

satélite7 = distancia entre satélite 7 y cliente

satélite8 = distancia entre satélite 8 y cliente

satélite9 = distancia entre satélite 9 y cliente

satélite10 = distancia entre satélite 10 y cliente

si satélite1 es el menor

devuelva 0

de lo contrario si satellite2 es el menor

devuelva 1

de lo contrario si satellite3 es el menor

devuelva 2

de lo contrario si satellite4 es el menor

devuelva 3

de lo contrario si satellite5 es el menor

devuelva 4

de lo contrario si satellite6 es el menor

devuelva 5

de lo contrario si satellite7 es el menor

devuelva 6

de lo contrario si satellite8 es el menor

devuelva 7

de lo contrario si satellite9 es el menor

devuelva 8

de lo contrario

devuelva 9

### 2)Asignación de satélites con hub

CalcularHubCercano(coordenada X satélite, coordenada Y satélite, matriz Hubs )

Hub1 = distancia entre hub 1 y satélite

Hub2 = distancia entre hub 2 y satélite

Hub3 = distancia entre hub 3 y satélite

Hub4 = distancia entre hub 4 y satélite

Si Hub1 es el menor

Devuelva 0

De lo contrario si Hub2 es el menor

Devuelva 1

De lo contrario si Hub3 es el menor

Devuelva 2

De lo contrario

Devuelva 3

### 3)Envío entre hubs

Costo(matriz hubs, matriz envioEntreHubs, matriz clientes)

Se sacan las distancias entre Hubs

Se sacan los kilogramos que un Hub envía a otro Hub

Se asignan los pesos totales de los hubs

Calcula P-Mediana

Calcular probabilidad de envío a p-mediana1

Calcular probabilidad de envío a p-mediana2

for i = 0 hasta numHubs

for j = 0 hasta numHubs

verificar si i y j son diferentes

Si el envío hub i al hub j es mayor de cero

Si i y j no son hubs con PMedia mayor o PMedia secundario se mirará una ruta alternativa

Generación de aleatorio

Si aleatorio es inferior a porcentajeSecundario enviar a p-mediana2, de lo contrario enviar a p-mediana1

Calcular costos de envío

Generar matriz de envíos