



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**MODELACIÓN Y EVALUACIÓN DEL REDISEÑO  
DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN NACIONAL DE  
PRODUCTO TERMINADO DE UNA EMPRESA  
MANUFACTURERA EN ANTIOQUIA**

Autor(es)  
Estefany López Toro

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de ingeniería  
industrial  
Medellín, Colombia  
2021



Modelación y evaluación del rediseño de la red de distribución nacional de producto terminado de una empresa manufacturera en Antioquia

Estefany López Toro

Informe de práctica como requisito para optar al título de:  
Ingeniero Industrial

Asesora

Elena Valentina Gutiérrez Gutiérrez, Ingeniera industrial

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de ingeniería industrial  
Medellín, Colombia  
2021

## Tabla de contenido

1. Resumen .....	5
2. Introducción .....	5
3. Marco Teórico .....	7
4. Revisión de la literatura.....	9
5. Objetivos.....	12
5.1 Objetivo general .....	12
5.2 Objetivos específicos.....	12
6. Metodología .....	12
6.1 Metodología Etapa I: Caracterización de la red de distribución de producto terminado.....	12
6.2 Metodología etapa II: Formulación y validación del modelo actual de la red de suministro .....	15
6.3 Metodología etapa III: Implementación y evaluación del rediseño de la red de distribución de producto terminado en el modelo. ....	23
7. Resultados y análisis .....	26
7.1 Resultados etapa I: Caracterización de la red de distribución de producto terminado.....	26
7.2 Resultados etapa II: Formulación y validación del modelo actual de la red de suministro .....	29
7.3 Resultados etapa III: Implementación y evaluación del rediseño de la red de distribución de producto terminado en el modelo. ....	31
8. Conclusiones .....	32
9. Anexos.....	33
10. Referencias bibliográficas .....	34

### Lista de Tablas

<i>Tabla No.1: Conjuntos Modelo No.1.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla No.2: Parámetros y Variables de decisión - Modelo No.1.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla No.3: Conjuntos Modelo No.2.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla No.4: Parámetros y Variables de decisión - Modelo No.2.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla No.5: Conjuntos Modelo No.3.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla No.6: Parámetros y Variables de decisión - Modelo No.3.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla No.7: Caracterización CEDIS.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla No.8: Participación de cada CEDI en costos, m2 Y m3.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla No.9: Costos de transporte entre CEDI Copacabana y poblaciones.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla No.10: Resultados Modelo No.1.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla No.11: Resultados Modelo No.2.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla No.12: Resultados Modelo No.3.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla No.13: Movimientos de CEDIS a poblaciones - Modelo No.3.....</i>	<i>32</i>

### Lista de Figuras

<i>Figura No.1: Tres modos de entrega en un modelo de red logística flexible multietapa.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura No.2: Estructura Red de distribución de producto terminado.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura No.3: Modelo No.3 -Red de distribución de producto terminado.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura No.4: Modelo CEDI Cali para cálculo de capacidad de almacenamiento volumétrica.....</i>	<i>27</i>

## 1. Resumen

Las organizaciones en la actualidad deben tener una red logística costo eficiente y efectiva para ser competitivas en mercados cada vez más exigentes y volátiles, por lo que gestionar este sistema logístico se ha convertido en una cuestión clave para que muchas empresas controlen sus costes.

El presente estudio de modelación y evaluación del rediseño de la red de distribución nacional de producto terminado se realizó en una empresa manufacturera y comercializadora de electrodomésticos nacida en Medellín, Antioquia en el año 1943, y actual marca líder de electrodomésticos en Colombia. La empresa dispone de dos plantas de producción localizadas en Copacabana, Antioquia, siete CEDIS en diferentes zonas del país, y entrega mercancía a 26 departamentos de Colombia. El objetivo de este trabajo fue modelar y evaluar el rediseño de la red de distribución de producto terminado de la empresa manufacturera para minimizar los costos de la operación logística, para lo que fueron empleados tres modelos de programación lineal entera mixta de localización que fueron ejecutados en Xpress IVE 8.8 64 bit licenciada. Estos modelos buscaron determinar cuáles centros de distribución de los que tiene actualmente la empresa deberían utilizarse para minimizar los costos, y cuál debe ser el flujo de mercancía entre nodos en esta red de suministro. Fueron considerados costos de red logística los costos fijos y variables de los centros de distribución, el costo variable del transporte entre planta y centros de distribución, y de centros de distribución a poblaciones. Dado que estos datos no estaban determinados por la empresa, fueron calculados mediante expresiones matemáticas que permitieran hacer estimaciones de la realidad. Tras la evaluación de resultados se concluye que el CEDI de Copacabana es el CEDI con mejor relación entre costo y capacidad de almacenamiento, y que por tanto puede resultar más rentable para la compañía los envíos directos desde este CEDI hacia las poblaciones del país. Considerando que los datos insumo del modelo fueron fruto de una estimación, y los resultados producidos por el mismo, se concluye que dichos resultados constituyen también una estimación para apoyar la toma de decisiones, los cuales pueden mejorar con mejores datos de entrada. Sin embargo, la formulación del modelo, la notación matemática y el código en Xpress es una metodología confiable, que puede ser replicada para apoyar las decisiones de diseño. Se propone a la empresa trabajar en la recolección de datos que faciliten este tipo de estudios, que funcionan como herramienta para la toma de decisiones a corto y largo plazo.

## 2. Introducción

Se trata de una empresa manufacturera y comercializadora de electrodomésticos nacida en Medellín, Antioquia en el año 1943, y es actualmente la marca líder de electrodomésticos en Colombia. Comercializa sus productos en todas las regiones de Colombia, y realiza

aproximadamente 25.000 entregas a domicilio, y 3.000 entregas masivas mensuales de acuerdo con la información suministrada por la coordinación de transporte y la coordinación de servicio al cliente. Para la entrega de sus productos cuenta con siete centros de distribución a nivel nacional, de los cuales cinco están dados por operadores logísticos. Para lograr el transporte de esta mercancía tiene una flota propia, y contrata los servicios de las empresas de transporte TDM transportes S.A.S (TDM), TNC Logística Trascontainer S.A (TNC), y Compañía de distribución y transporte (Ditransa), entre otros en menores proporciones.

La empresa ha implementado estrategias con el fin de que sus procesos tengan un ciclo de mejora continua, entre las que se incluyen reuniones internas de formulación de propuestas y “Mesas de sinergia” con los principales proveedores de servicios logísticos, siendo estos TDM, TNC, y Ditransa. Estas mesas son una propuesta colaborativa en que las cuatro empresas trabajan con el fin de disminuir y cumplir los tiempos de entrega pactados con los clientes. La mesa de sinergia se realiza de forma individual con cada una de las tres empresas, y convoca a miembros administrativos del área de logística comercial, y a quienes administran las operaciones relacionadas en la empresa de transporte.

En la mesa de sinergia llevada a cabo con TDM, tras recibir una charla sobre tendencias de los consumidores en el año 2020 dirigida por la coordinadora del área de innovación y prospectiva de la empresa, surgió la propuesta de realizar entregas masivas a nivel nacional enviadas directamente desde la sede principal en Copacabana, sin pasar por centros de distribución. Del mismo modo, en la mesa de sinergia con TNC, surgió la propuesta de implementar plataformas *Cross docking* en Boyacá e Ibagué, y tener un nuevo centro de distribución en el norte de Bogotá. Igualmente, en las reuniones internas de mejora continua se ha formulado la posibilidad de prescindir o reubicar alguno(s) de los centros de distribución, y de enviar la mercancía que llega al puerto de Buenaventura directamente desde el puerto hacia las diferentes regiones del país.

Gestionar el sistema logístico de forma eficiente se ha convertido en una cuestión clave para que muchas empresas controlen sus costes. Esa es también la razón por la que una red de logística diseñada bajo la ayuda de la tecnología de la información hoy en día está captando cada vez más la atención de las entidades comerciales, especialmente la de muchas empresas multinacionales (Chopra, S., & Meindl, P., 2010).

Es por esto por lo que, para evaluar la viabilidad de estas propuestas se requiere de métodos cuantitativos que permitan determinar si los flujos de demanda actuales y esperados justifican su aplicación, y actualmente la empresa no tiene un conocimiento preciso respecto a cómo es el flujo de su demanda, ni herramientas o metodologías desarrolladas que le faciliten su entendimiento. Considerando que el ideal es que estas decisiones de nivel estratégico sean

tomadas con base en los datos, se requiere de formular un modelo que represente el flujo actual de la demanda y permita evaluar el efecto e impacto de las propuestas formuladas, para determinar sobre la posibilidad de realizar un rediseño a la red de distribución. El ideal es que esta red se adapte a los pilares estratégicos de logística comercial de prestar un servicio de calidad, cumpliendo con la promesa de entrega de la empresa a sus clientes. De esta manera surge el proyecto *“Modelación y evaluación del rediseño de la red de distribución nacional de producto terminado de una empresa manufacturera en Antioquia”*.

Este, es un problema de gestión de operaciones estratégico en la gestión de la cadena de suministro y, por lo general, implica objetivos múltiples y conflictivos, como el costo, el nivel de servicio y la utilización de recursos (Altıparmak, F., Gen, M., Lin, L., & Paksoy, T., 2006). El modelo debe generarse en consciencia de los recursos ya existentes, y considerando las propuestas actuales que han surgido al interior de la empresa. El objetivo es lograr un equilibrio entre el nivel de respuesta que la cadena ofrece, y el costo de lograrlo (Vidal, 2011).

Las decisiones por abordar en el proyecto son de tipo estratégico, por lo que su alcance está dado hasta la creación del modelo y no incluye la puesta en marcha de éste, ni el diseño de operaciones al interior de las instalaciones estudiadas. Por último, se clarifica que se entrega a la empresa los modelos matemáticos creados, la explicación de estos, y la serie de conclusiones que se extraen de ellos, sin embargo, dado que se empleará un software licenciado por la universidad gracias a acuerdos académicos, no es posible suministrar el software para futuras evaluaciones.

### 3. Marco Teórico

Entendiendo la logística como toda aquella labor de aprovisionamiento y distribución de bienes, se puede afirmar que la logística ha existido desde el origen de los tiempos, considerando, por ejemplo, que las personas primitivas utilizaron una logística rudimentaria al suplir la necesidad de almacenar alimentos en las cuevas. Por tanto, ha sido un término que ha ido evolucionando con la historia y ha mantenido la misma denominación para funciones muy diferentes (Datasur, 2019).

Según Lamb, Hair y McDaniel (2002), la logística es el proceso de administrar estratégicamente el flujo y almacenamiento eficiente de las materias primas, de las existencias en proceso y de los bienes terminados del punto de origen al de consumo" (Lamb Charles, Hair Joseph y McDaniel Carl, 2002). Abarca el camino que sigue un producto desde que ha sido elaborado por el fabricante hasta que llega a manos del consumidor final. Se trata de una de las partes de la gestión de la cadena de suministro (*Supply Chain*) que tiene como

objetivo que la llegada de un producto o bien hasta el cliente. (Instituto Europeo de Posgrados, 2020)

El origen de la mercancía de producto terminado o de materias primas generalmente se da desde una planta de producción, que es el lugar en el que se desarrollan actividades en un orden específico para transformar un bien material. También puede darse desde un puerto, que son lugares resguardados del viento a la orilla del mar o de un río donde las embarcaciones pueden detenerse y permanecer seguras, que dispone de instalaciones para hacer reparaciones o realizar operaciones de embarque y desembarque (Oxford, 2020). Según los términos de negociación internacional, se define si el proveedor o el cliente deben encargarse de la recepción y transporte de la mercancía.

La logística inicia desde las labores de abastecimiento, que es entendida como una actividad económica encaminada a cubrir las necesidades de consumo de una unidad económica en tiempo, forma y calidad (Ministerio de defensa, s.f.). Estos productos abastecidos son almacenados, que se refiere a tareas como colocar y guardar los aprovisionamientos recibidos, mantenerlos en correcto estado, así como procurar que el depósito de todos estos elementos redunde de manera positiva en la actividad de la empresa. Es decir, no solo tratan de almacenar, sino también de que el almacenaje sea eficiente. (López, 2021)

La mercancía almacenada se encuentra generalmente en bodegas, que son espacios en los que se ejecuta la recepción, almacenamiento y movimientos de materiales, materias primas y productos semielaborados, hasta el punto de distribución. Es un espacio destinado, bajo ciertas condiciones, al almacenamiento de distintos bienes. Una bodega de almacenamiento le permite mantener las materias primas a cubierto de incendios, robos y deterioros (Complejo Logístico industrial, 2017).

Cuando no se encuentra en estos espacios, la mercancía se guarda en centros de distribución (CEDIS), que son espacios logísticos en los que se almacena mercancía y se embarcan órdenes de salida para que sean distribuidos en el comercio mayorista o minorista. Normalmente está conformado por uno o más almacenes en los que ocasionalmente se implementan ciertos sistemas según las necesidades (Zona Logística, 2018).

Los procesos de distribución que implican la salida de mercancía desde las bodegas o centros de distribución hacia los clientes requieren de transporte. El transporte es el responsable de mover los productos terminados, materias primas e insumos, entre empresas y clientes que se encuentran dispersos geográficamente, y agrega valor a los productos transportados cuando estos son entregados a tiempo, sin daños y en las cantidades requeridas. Es uno de los puntos clave en la satisfacción del cliente, y es también uno de los costos logísticos más

elevados, puesto que constituye una proporción representativa de los precios de los productos. (Logistec, 2013). Se estima que los desplazamientos de cargas suponen al menos un tercio (33%) de los costos totales de distribución logística (Cisneros, 2019).

La configuración de todos los elementos anteriormente mencionados, constituyen una red logística, que es el sistema que permite que el producto de la empresa llegue de los proveedores hasta los consumidores. Para que esto sea posible, la red está conformada por una serie de centros de producción, distribución y almacenes, todos ellos interconectados entre sí por una red de medios de transporte. (Team Peru Consulting, 2015).

Esta red de distribución puede contemplar eslabones diferentes en la cadena como lo puede ser el uso de plataformas *Cross docking*. Estas plataformas son lugares de recepción, consolidación y reexpedición de mercancías de resurtido frecuente a los almacenes de una región. En estas plataformas, el fabricante entrega las mercancías en la instalación y el comerciante reexpide a sus almacenes en un máximo de un día; generalmente son operadas por el mismo distribuidor o por operadores logísticos. La premisa básica de las plataformas *Cross docking* es que no tendrán almacenamiento (Mora, 2018).

El reto que han tenido y tienen actualmente quienes dirigen la cadena de suministro y logística, es lograr, a partir de la toma de decisiones, la formulación de una estructura que permita alcanzar el equilibrio óptimo entre brindar un servicio que permita la satisfacción del cliente, y los costes de prestar ese servicio (School, 2016).

#### 4. Revisión de la literatura

Según Quiroz (2015), los elementos que componen el sistema logístico son la infraestructura, los servicios, los procesos, los sistemas de información, las capacidades de gestión, el marco institucional, la regulación, y la infraestructura (Quiroz, 2015). Por otro lado, en tanto a la Cadena de Abastecimiento (CA), Chopra y Meindl (2010) definen que las directrices principales para su administración son las instalaciones, los inventarios, los sistemas de transporte, la información, el aprovisionamiento, y la fijación de precios, destacando que en su opinión los sistemas de información son el principal elemento (Chopra, S., & Meindl, P., 2010)

El diseño y optimización de la red de logística y gestión de la cadena de suministro es un tema importante, que planifica, implementa y controla el flujo hacia adelante y hacia atrás y el almacenamiento eficiente y efectivo de bienes, servicios e información relacionada entre el punto de origen y el punto de consumo para satisfacer los requisitos de los clientes. (Mitsuo

Gen, 2018 ). Los expertos han sugerido que entre el 30 y el 80% de los costos están determinados por el tema logístico en la cadena de suministro (Watson, M., 2013)

El diseño ha ido ganando importancia debido a transformaciones generacionales, incluso según Mitsuo Gen se volvió imperativo para las empresas del mundo por factores como la globalización económica, la extensión del marketing electrónico global, y la creciente interacción de cadenas de suministro mundiales. Cómo gestionar el sistema logístico de forma eficiente se ha convertido en una cuestión clave para que muchas empresas controlen sus costes (Mitsuo Gen, 2018 ).

Debe considerarse la creciente relación de la logística con las demás áreas de la empresa, a sabiendas de que, por ejemplo, actualmente los productos no sólo se diseñan para que puedan ser producidos eficientemente en una planta, sino también para que puedan ser eficientemente almacenados, transportados y controlado su inventario. Esta incidencia de la logística sobre todas las áreas de la empresa tiene que ser considerada para la definición de la estrategia de la CA (Vidal, 2011).

Los costos totales de logística y producción son un elemento clave para su diseño y configuración, considerando los costos variables de producción, los costos de transporte, los costos de inventarios, los costos fijos de las instalaciones y los costos de promoción, mercadeo y administración del sistema. Los costos variables de producción muchas veces dependen de la localización de la instalación.

Por otra parte, los sistemas de distribución juegan un papel muy importante en el diseño de una CA, principalmente en lo relacionado con la ubicación y el diseño de CEDS y bodegas, que deben estar ubicadas estratégicamente dentro de una zona de consumo, bajo la determinación de cuáles clientes deben ser atendidos desde cada centro.

Existe una serie de preguntas básicas relativas a la estrategia que generalmente son a las que buscan respuesta los empresarios, como: ¿Cuántas plantas y CEDIS deben tenerse, ¿Dónde deben estar situados y cuál debe ser su capacidad? ¿Cuáles proveedores deben seleccionarse? ¿Qué productos deben producirse en cada planta y de dónde debe proveerse de materia prima y componentes? ¿Qué tipo de CEDIS deben utilizarse, es decir, manuales, combinados, automáticos? ¿Qué nivel de inventarios debe mantenerse en cada punto de la cadena? ¿Se deben tener CEDIS propios, tercerizados, híbridos o de otro tipo? ¿Cómo deben asignarse los clientes a los CEDIS? ¿Cuáles modos de transporte deben seleccionarse entre cada par de puntos de la cadena? ¿Cuáles sistemas de información y planeación se deben utilizar?, entre otras posibles (Vidal, 2011).

En tanto a lo respectivo a los modos de distribución, Mitsuo Gen y coautores en el año 2018, determinaron que los modos de entrega son: Entrega normal, para entregar productos desde un escenario a otro contiguo. Envío directo, para transportar productos desde plantas hasta minoristas o clientes directamente. Entrega directa, para entregar productos de los países en desarrollo a los clientes, no a través de los minoristas. En caso de que exista envío directo y la entrega directa combinados con la red logística tradicional de varias etapas, puede modelarse como una red logística multietapa (Mitsuo Gen, 2018 ). A continuación, la Figura No.1 que representa estos modos de entrega:

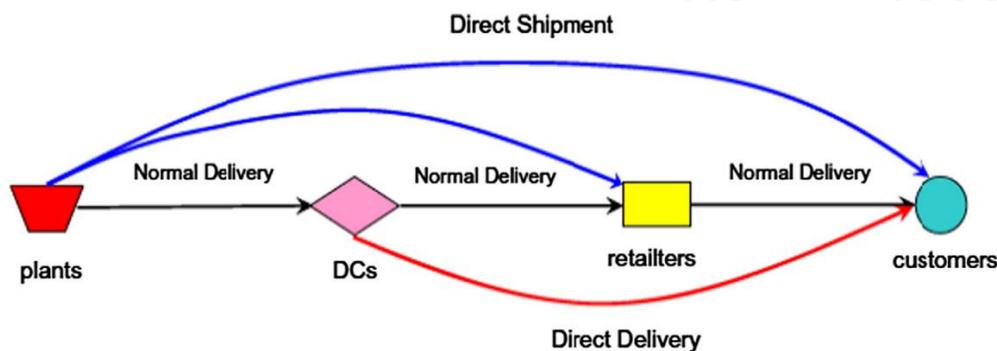


Figura No.1: Tres modos de entrega en un modelo de red logística flexible multietapa  
Fuente: (Mitsuo Gen, 2018 )

De acuerdo con Goetschalckx, M y coautores, un problema de red logística se define de la siguiente manera: dado un conjunto de instalaciones que incluye proveedores potenciales, instalaciones de fabricación potenciales y centros de distribución con múltiples configuraciones posibles y un conjunto de clientes con demandas deterministas, determinar la configuración del sistema de producción-distribución entre varias subsidiarias de la corporación de manera que se cumplan las demandas de los clientes estacionales y los requisitos de servicio y se maximice la ganancia de la corporación o se minimice el costo total (Goetschalckx, M., Vidal, C. J., & Dogan, K., 2002).

Según Vidal (2011) puede distinguirse entre dos tipos de problemas en el diseño de CAs. Primero, si la cadena ya existe y se está tratando solamente de optimizar los flujos de productos y componentes y la selección de modos de transporte. En este caso se aplican generalmente técnicas estándar de programación lineal. Segundo, si toda la cadena o parte de ella aún no existe y se está, por ejemplo, definiendo una nueva localización de una planta o de uno o varios CEDIS, se generan problemas de optimización lineal entera-mixta. En el caso más complejo, se pueden generar modelos de optimización no-lineal entera-mixta, como ocurre en el diseño de CAs internacionales que consideran precios de transferencia junto con

problemas de localización (Vidal, 2011) .Lo que se busca eventualmente es obtener una configuración de la CA que minimice los costos totales de logística y producción, pero que a su vez produzca el nivel de respuesta deseado en cuanto a tiempos de entrega y facilidad de suministro.

## 5. Objetivos

### 5.1 Objetivo general

Modelar y evaluar el rediseño de la red de distribución nacional de producto terminado de una empresa manufacturera en Antioquia.

### 5.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar la red de distribución de producto terminado la empresa manufacturera.
2. Formular y validar el modelo actual de la red de suministro.
3. Implementar y evaluar el rediseño de la red de distribución de producto terminado en el modelo.

## 6. Metodología

La metodología y resultados y análisis se dividirá en etapas, y cada una de ellas tendrá como fundamento los objetivos específicos definidos con anterioridad.

### 6.1 Metodología Etapa I: Caracterización de la red de distribución de producto terminado.

Con el fin de tener un entendimiento completo de la red de distribución de producto terminado se realizaron varias sesiones de entendimiento entre julio y agosto de 2020 con el jefe de logística comercial, el coordinador nacional de transporte y con la auxiliar de logística comercial. Con ellos fue definida una estructura base que se evidencia a continuación en la Figura No.2:

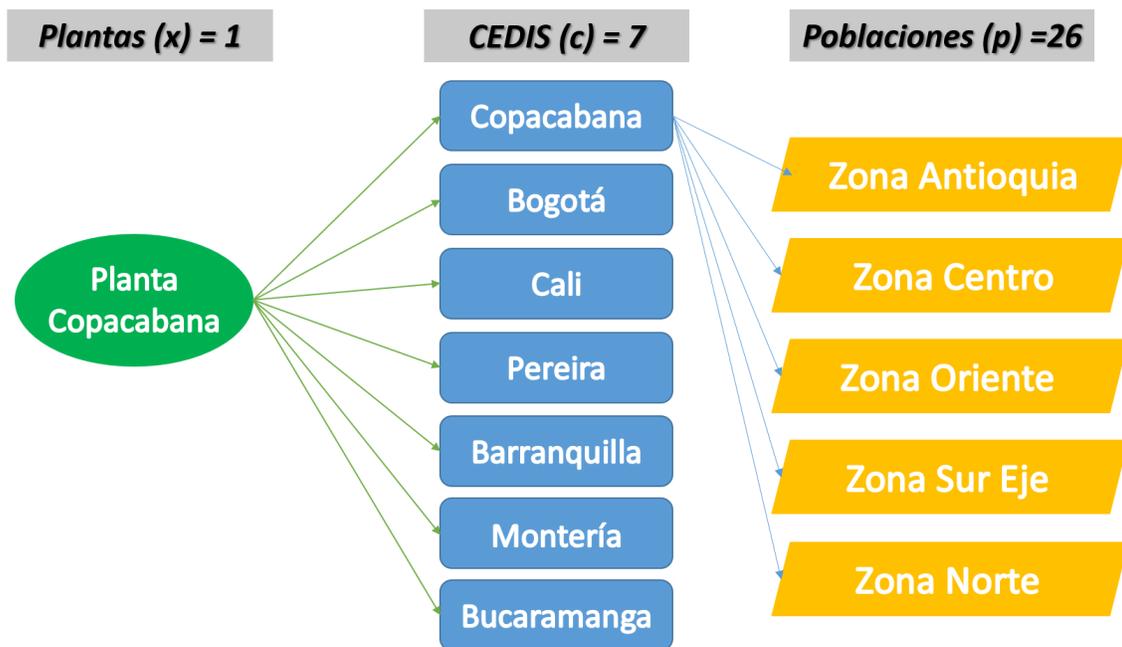


Figura No.2: Estructura Red de distribución de producto terminado  
Fuente: Elaboración propia

Inicialmente se confirmó toda la información base respecto a los nodos de distribución de producto terminado de la empresa manufacturera. Fueron identificados tres conjuntos denominados como Plantas, CEDIS, y poblaciones, en la que cada conjunto tiene 1, 7, y 26 elementos respectivamente.

Las operaciones están centralizadas en la sede de Copacabana, en la que se encuentran las plantas de producción de refrigeración y calefacción, cuyos productos son conocidos al interior de la empresa como *manufacturados*. Algunos productos de calefacción y refrigeración, todos los electrodomésticos (electrodomésticos de tamaño pequeño) como las chocoterías, sanducheras, freidoras, hornos microondas, entre otros, son productos importados, que al interior de la empresa se le conocen como *comercializados*. Estos productos llegan al puerto de Buenaventura para ser trasladados al CEDI de Copacabana, en donde quedan a disposición del área de Logística Comercial para ser trasladados a los demás centros de distribución del país. Todos estos productos considerados como comercializados son productos terminados que no requieren de ningún procesamiento adicional en la sede de Copacabana.

Cabe resaltar en este punto que la mercancía de productos manufacturados no sale directamente de la planta de producción sino del centro de distribución, puesto que no existe en las plantas espacio suficiente para almacenar producto terminado (PT). Con el fin de

facilitar el entendimiento del modelo y su posterior implementación, se establece que la mercancía saldrá directamente de la planta, y que el costo y la cantidad de kilómetros entre la planta de producción y el centro de distribución de Copacabana es cero. Es necesario aclarar que sí existe un costo para este traslado de PT puesto que se dispone de tres vehículos tipo mula para movilizar esta mercancía durante todo el día, sin embargo, dado que toda la mercancía debe pasar por este arco, y no genera efectos sobre el modelo el considerarlo, se acuerda con la empresa que será tomado como cero. Toda la mercancía que se distribuye sale directamente desde el CEDI Copacabana, dado que en el marco de la planeación y de la práctica, es atípico que se presenten traslados de mercancía entre centros de distribución.

En tanto a los centros de distribución, todos tienen condiciones físicas y de información diferentes. Todos los centros de distribución conocen con claridad su capacidad en áreas de almacenamiento en metros cuadrados ( $m^2$ ), sin embargo, dado que debe ser utilizada una misma medida para hablar de la mercancía que se almacena y la mercancía que es transportada, y que en almacenamiento es impreciso hablar de  $m^2$  puesto que se ignora la capacidad en altura, se optó por trabajar con la capacidad de cada centro de distribución en capacidades volumétricas en metros cúbicos ( $m^3$ ).

Ninguno de los centros de distribución del país tiene definida su capacidad de almacenamiento volumétrico en  $m^3$ , por lo que fue necesario hacer un modelo físico de cada espacio considerando variables como los niveles de almacenamiento en estantería, altura del techo, obstrucciones físicas que impedían el almacenamiento, distribución del espacio, altura del producto más alto, entre otras, para después calcular sobre estos parámetros su capacidad de almacenamiento en unidades volumétricas. Estas reconstrucciones fueron realizadas por medio de videollamadas entre agosto y octubre de 2020 con analistas de operaciones CEDI, analistas de Logística Comercial, y el Coordinador de Operaciones Logísticas, a excepción del modelo de CEDI Copacabana que ya tenía un primer modelo, y que fue necesario asistir presencialmente para hacer la actualización de este modelo, y calcular con base en él la capacidad en  $m^3$ . Cabe aclarar que la empresa tiene claramente definido el volumen de cada uno de sus productos.

Para los CEDIS propios los analistas de operaciones CEDI tienen definida una metodología en función del porcentaje de utilización del espacio para determinar los costos mensuales, por lo que se llegó a un acuerdo con ellos para determinar un costo representativo del CEDI. Para los CEDIS contratados con operadores logísticos, está definida una cantidad de  $m^2$  alquilados. Según lo explicado por el analista de Operaciones Regionales, encargado de controlar los costos de los CEDIS, es muy atípico que exista un cambio en la cantidad de  $m^2$  alquilados, por lo que este valor pagado es constante para todos los meses, y solo cambia en relación con el aumento de tarifa anual. Adicionalmente, se aclara que este valor incluye

tanto los costos fijos como los variables, por lo que no existe precisión en tanto a cuál es el costo variable real de cada centro de distribución.

Por último, en tanto a las poblaciones a las que es llevada la mercancía, la coordinación de transporte tiene un control exhaustivo que permite determinar el volumen de mercancía entregada a cada municipio, y actualmente se hacen entregas a aproximadamente 526 municipios en todo el país. Sin embargo, dado el carácter estratégico del modelo para el rediseño de la red de distribución, se decide agrupar esta información por departamentos, teniendo un total de 26 departamentos atendidos.

En tanto a los pilares estratégicos, se identifica principalmente un interés por brindar un servicio de calidad que permita mantener unos costos bajos. Existe un método de medición del cumplimiento de este nivel de servicio desde transporte determinado como el OTIF (*On Time In Full*), que se refiere a la entrega completa y a tiempo de la mercancía pactada con los clientes, y su método de medición se define a partir de “Si cumplió”, o “No cumplió”, y se calcula el porcentaje de cumplidos sobre el total de viajes. Sin embargo, al tratarse de un modelo que es de alcance estratégico, no se tiene visualización de cada uno de los viajes realizados, y, por tanto, no existe la posibilidad de llevar el control exhaustivo del cumplimiento de cada entrega. Adicionalmente, no existe un control de este indicador de forma agregada que permita realizar su evaluación anual.

## **6.2 Metodología etapa II: Formulación y validación del modelo actual de la red de suministro**

Para formular el modelo que representa la red de distribución de producto terminado se escogió un modelo de programación lineal entera mixta, que ha sido ampliamente estudiado en la literatura para orientar decisiones como la planeación de la producción (Ortiz Gaitán, Sebastián Enrique, 2017), la formulación del plan de requerimiento de materiales (Reyes, 2015), el ruteo de vehículos (Araya, 2012), la evaluación y selección de proveedores (Peña, 2018), entre muchas otras. En este caso se trata de un modelo de localización que permite determinar cuáles centros de distribución de los que tiene actualmente la empresa deberían utilizarse para minimizar los costos, y cuál debe ser el flujo de mercancía entre nodos en esta red de suministro.

Inicialmente se realizó un modelo base denominado Modelo No.1 en el que se consideran los conjuntos Poblaciones, Plantas de producción, y CEDIS, con el fin de facilitar la formulación y el entendimiento del modelo, y de comparar sus resultados con los obtenidos en modelos posteriores. Posteriormente, se realizó el Modelo No.2, que añade a sus conjuntos la variable tiempo, y que, si bien considera los mismos parámetros y variables de decisión, las evalúa

indexadas en el conjunto tiempo. Por último, ya para la etapa III de evaluación del rediseño de la red, se estructuró un modelo que añade un elemento al conjunto plantas, y añade el conjunto Productos. En este tercer modelo se profundizará en la etapa III.

Estos modelos buscan determinar cuál debe ser el diseño estratégico de la cadena de abastecimiento, de modo que se satisfaga la demanda de cada una de las poblaciones, y se minimicen los costos totales de la red, siendo estos los costos fijos y variables de los centros de distribución, los costos variables de envío desde la planta hacia los centros de distribución, y de los centros de distribución a las poblaciones. Para determinar respecto a este objetivo debe definirse:

- Los centros de distribución que deben habilitarse para la operación de la red
- Cuál debe ser el flujo de producto terminado a enviar desde la planta de producción en Copacabana hacia cada uno de los centros de distribución ( $m^3$ )
- Cuál debe ser el flujo de producto terminado a enviar desde cada uno de los centros de distribución hacia cada una de las poblaciones ( $m^3$ )

Hay una serie de consideraciones generales que deben ser tenidas en cuenta para el entendimiento de los modelos, que se enuncian a continuación:

- Se desconoce la demanda anual, por tanto, se trabaja con las ventas del año 2019 que es el último año concluido con datos hasta el mes de diciembre.
- El único movimiento de mercancía entre centros de distribución está dado entre el CEDI de Copacabana a los demás CEDIS. No existen movimientos adicionales entre CEDIS, por esta razón no son contemplados estos arcos en el modelo.
- Todo el modelo está formulado y pensado para poder ser editado en la posteridad, por esta razón se identifican notaciones y restricciones que pueden no parecer lógicas a primera lectura, como la consideración del conjunto “Plantas de producción” cuando solo se considera una planta.

Por otro lado, existe una serie de consideraciones en relación con la disponibilidad de los datos, y a la manipulación que tuvo que hacerse a la información existente para obtener los parámetros del modelo. Serán divididos entre datos con relación a los costos, y datos con relación a la capacidad:

*Con relación a los costos:*

- En tanto al costo del transporte en cada uno de los arcos, entendidos estos como los desplazamientos entre el centro de distribución de Copacabana (Planta de producción) y los centros de distribución, y el existente entre los centros de distribución y las poblaciones, no está definido en base de datos, ni existe una

ecuación que facilite el cálculo para determinar el costo de transportar una cantidad específica de mercancía hasta cada uno de los nodos. Esto se concluyó tras tener sesiones de entendimiento del transporte entre agosto y septiembre de 2020 con el coordinador de transporte. Por tal motivo fue necesario realizar el procedimiento que se especifica a continuación.

1. Se analizaron los costos de transporte que ya habían sido efectivos a diferentes regiones del país, y se evaluó la variabilidad de los datos para posteriormente extraer los puntos atípicos. Una vez realizada esta operación se calcularon la media, moda y la mediana de los datos, y con base en estas medidas de tendencia central se determinó el costo de transportar  $1\text{m}^3$  de mercancía un kilómetro.
  2. Se calculó la distancia entre nodos factibles de la cadena, es decir, la cantidad de kilómetros entre CEDI Copacabana a cada centro de distribución, y de cada CEDI a cada una de las 26 poblaciones. Dado que cada población representa un departamento, se calculó la distancia hasta la capital de cada departamento. Esto representa un total de siete distancias calculadas de CEDI Copacabana a CEDIS y 182 distancias calculadas de CEDIS a poblaciones. Todas estas distancias fueron calculadas por medio de Google Maps (Google, 2020)
  3. Se multiplicó el costo de transportar  $1\text{m}^3$  de mercancía un kilómetro, por la cantidad de kilómetros existente entre cada arco. De esta forma se llega a una estructura de costos variable en función de la cantidad de  $\text{m}^3$  a transportar.
- Los costos de los centros de distribución son constantes durante todo el año, por lo que no hay una base definida para calcular el costo variable de almacenar mercancía en función de la cantidad de  $\text{m}^3$  recibidos. Por esta razón se realizó el siguiente procedimiento:
    1. Se calculó la capacidad en metros cúbicos de cada uno de los siete centros de distribución.
    2. Se determinó que el 50% de este valor equivaldría al costo fijo de transporte
    3. El 50% restante fue dividido en la capacidad cúbica de cada centro de distribución, y este valor fue definido como el costo de almacenar  $1\text{m}^3$  de mercancía en cada centro de distribución.

*Con relación a la capacidad:*

- Puesto que la demanda será entendida como las ventas, la capacidad de la planta de producción debe ser suficiente para satisfacer las ventas que fueron efectivas. En este sentido, con los datos actuales, se garantiza que la capacidad de la planta es superior a la demanda.

- Dado que los centros de distribución son contratados con operadores logísticos y puede negociarse un aumento en la capacidad conforme sea necesario, se asume que todos los centros de distribución tienen una capacidad mayor o igual a la sumatoria de la demanda en todo el año.

Se hace evidente en la información anteriormente expuesta, que existe una limitante importante en tanto a la disponibilidad de los datos, que dificulta la precisión del modelo para representar el comportamiento de la realidad. A continuación, se adjunta la notación matemática del Modelo No.1 con la explicación de cada una de las restricciones implementadas, seguido del Modelo No. 2. Los resultados de ambos modelos serán analizados posteriormente en la sección de resultados.

### Modelo No.1

- Conjuntos modelo No.1

<i>Conjuntos</i>			
<i>Nombre</i>	<i>Conjunto</i>	<i>Notación</i>	<i>No. Elementos</i>
Poblaciones	P	p	26
Plantas de producción	X	x	1
CEDIS	C	c	7

Tabla No.1: Conjuntos Modelo No.1

Fuente: Elaboración propia

- Parámetros de decisión y variables de decisión modelo No.1

<i>Parámetros de decisión</i>	
<i>Nombre</i>	<i>Definición</i>
$COVTC_{xc}$	Costo variable de transportar 1M3 desde la planta x hasta el centro de distribución c (COP)
$COVTC_{cp}$	Costo variable de transportar 1M3 desde el centro de distribución c hasta la población p (COP)
$COFC_c$	Costos fijos del centro de distribución c en un año (COP)
$COVC_c$	Costo variable de operación por M3 en el centro de distribución c por recibir mercancía (COP)
$CAPX_x$	Capacidad productiva de la planta de producción en un año (M3)
$CAPC_c$	Capacidad de almacenamiento del centro de distribución c en un año (M3)
$DEM_p$	Demandada de la población p en un año (M3)
$N$	Número de centros de distribución a abrir (Adimensional)

<i>Variables de decisión</i>	
<i>Nombre</i>	<i>Definición</i>
$MERXC_{xc}$	Cantidad de M3 a transportar desde la planta de producción hasta el centro de distribución c (M3)
$MERCP_{cp}$	Cantidad de M3 a transportar desde el centro de distribución c hasta la población p (M3)
$USA_c$	Usar el centro de distribución c (Adimensional)

Tabla No.2: Parámetros y Variables de decisión - Modelo No.1

Fuente: Elaboración propia

- Función objetivo modelo No.1

Minimizar:

1. Sumatoria de costos fijos en los centros de distribución
2. Sumatoria de costos variables en los centros de distribución
3. Costos de envío de la planta a los centros de distribución
4. Costos de envío de los CEDIS a las poblaciones

$$\begin{aligned}
 & \sum_{c=1}^C COFC_c \times USA_c \\
 & + \sum_{x=1}^X \sum_{c=1}^C COVC_c \times MERXC_{xc} \\
 & + \sum_{x=1}^X \sum_{c=1}^C COVTC_{xc} \times MERXC_{xc} \\
 & + \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P COVTC_{cp} \times MERCP_{cp}
 \end{aligned}$$

- Restricciones modelo No.1

1. La cantidad de mercancía entregada desde todos los centros de distribución a la población p, debe ser igual a la demanda de esa población p.

$$\sum_{c=1}^C MERCP_{cp} = DEM_p \quad \forall p \in P$$

2. La cantidad de mercancía que se envíe desde todas las plantas de producción al centro de distribución  $c$ , debe ser menor o igual a la capacidad del centro de distribución  $c$ .

$$\sum_{x=1}^X MERXC_{xc} \leq CAPC_c \times USAC_c \quad \forall c \in C$$

3. Restricción de balance que permite denotar que todo lo que llega de las plantas de producción al centro de distribución  $c$ , sale del centro de distribución  $c$  hacia las poblaciones.

$$\sum_{x=1}^X MERXC_{xc} = \sum_{p=1}^P MERCPC_p \quad \forall c \in C$$

4. La cantidad de mercancía que sale de la planta  $x$  debe ser menor o igual a la capacidad de esa planta  $x$ .

$$\sum_{c=1}^C MERXC_{xc} \leq CAPX_x \quad \forall x \in X$$

5. Cuenta la cantidad de centros de distribución que van a ser usados.

$$\sum_{c=1}^C USAC_c \leq N$$

6. Usa el centro de distribución  $c$

$$USAC_c \in \{1,0\} \quad \forall c \in C$$

7. Restricciones obvias

$$MERXC_{xc}, MERCPC_p \geq 0$$

Tal y como se indicó anteriormente, se adjunta el Modelo No. 2 para posteriormente realizar la evaluación de ambos modelos.

**Modelo No.2:**

Para el modelo No.2 se indexa la variable tiempo dada en semanas, para un total de 53 semanas al año.

- Conjuntos modelo No.2

<i>Conjuntos</i>			
<i>Nombre</i>	<i>Conjunto</i>	<i>Notación</i>	<i>No. Elementos</i>
Poblaciones	P	p	26
Plantas de producción	X	x	1
CEDIS	C	c	7
Tiempos	T	t	53

Tabla No.3: Conjuntos Modelo No.2  
Fuente: Elaboración propia

- Parámetros de decisión y variables de decisión modelo No.2

<i>Parámetros de decisión</i>	
<i>Nombre</i>	<i>Definición</i>
$COVXC_{xc}$	Costo variable de transportar 1M3 desde la planta x hasta el centro de distribución c (COP)
$COVCP_{cp}$	Costo variable de transportar 1M3 desde el centro de distribución c hasta la población p (COP)
$COFC_c$	Costos fijos del centro de distribución c en un año (COP)
$COVC_c$	Costo variable de operación por M3 en el centro de distribución c por recibir mercancía (COP)
$CAPX_x$	Capacidad productiva de la planta de producción x en un año (M3)
$CAPC_c$	Capacidad de almacenamiento del centro de distribución c (constante para todos los periodos t) (M3)
$DEM_{pt}$	Demandada de la población p en un periodo t (M3)
$N$	Número de centros de distribución a abrir (Adimensional)
<i>Variables de decisión</i>	
<i>Nombre</i>	<i>Definición</i>
$MERXC_{xct}$	Cantidad de M3 a transportar desde la planta de producción x hasta el centro de distribución c en el tiempo t (M3)
$MERCP_{cpt}$	Cantidad de M3 a transportar desde el centro de distribución c hasta la población p en el tiempo t (M3)
$USA_c$	Usar el centro de distribución c (Adimensional)

Tabla No.4: Parámetros y Variables de decisión - Modelo No.2  
Fuente: Elaboración propia

- Función objetivo modelo No.2

Minimizar:

$$\begin{aligned} & \sum_{c=1}^C COFC_c \times USA_c \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{x=1}^X \sum_{c=1}^C COVC_c \times MERXC_{xct} \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{x=1}^X \sum_{c=1}^C COVTC_{xc} \times MERXC_{xct} \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P COVTC_{cp} \times MERCP_{cpt} \end{aligned}$$

- Restricciones modelo No.2

1.

$$\sum_{c=1}^C MERCP_{cpt} = DEM_{pt} \quad \forall p \in P, \quad \forall t \in T$$

2.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{x=1}^X MERXC_{xct} \leq CAPC_c \times USAC_c \quad \forall c \in C$$

3.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{x=1}^X MERXC_{xct} = \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P MERCP_{cpt} \quad \forall c \in C$$

4.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C MERXC_{xct} \leq CAPX_x \quad \forall x \in X$$

5.

$$\sum_{c=1}^C USAC_c \leq N$$

6.

$$USAC_c \in \{1,0\} \quad \forall c \in C$$

7.

$$MERXC_{xcto}, MERCP_{cpt} \geq 0$$

### 6.3 Metodología etapa III: Implementación y evaluación del rediseño de la red de distribución de producto terminado en el modelo.

Inicialmente se habían planteado dos posibles escenarios de mejora:

1. Uso de plataformas *Cross docking*
2. Replanteamiento en relación con el puerto de Buenaventura

En primera instancia en tanto al uso de plataformas *Cross docking*, no fue posible su evaluación puesto que no se tuvieron los datos asociados a este rediseño a tiempo para la realización del estudio. Por otro lado, en tanto al replanteamiento de la red con base en el puerto de Buenaventura, se tienen las siguientes consideraciones:

- Se define que existen solo dos tipos de productos, siendo estos manufacturados y comercializados.
- Se asume el puerto de Buenaventura como el único origen de los productos comercializados.
- Por facilidad en el planteamiento, se define el puerto de Buenaventura como otra planta de producción, puesto que de él también surgen productos.

Para conocer cuáles productos de los distribuidos por la empresa son de origen comercializado, o manufacturado, fue necesario realizar el cruce con una base de datos maestra en la que se especificaba el origen de todos los productos. Sin embargo, no todos los productos registrados en la base de datos se encontraban en la base maestra, por lo que para muchas referencias fue necesario buscar de qué producto se trataba, y con los conocimientos adquiridos en tanto a productos de la empresa, se determinó para cada uno de estos productos de forma manual si se trataba de productos comercializados o manufacturados.

A continuación, se adjunta el modelo No.3, que tiene las mismas características del modelo No.2, adicionando la existencia de dos plantas de producción (Planta Copacabana y puerto de Buenaventura), y dos tipos de productos (Comercializados y manufacturados):

**Modelo No.3:**

- Conjuntos modelo No.3

<b>Conjuntos</b>			
<i>Nombre</i>	<i>Conjunto</i>	<i>Notación</i>	<i>No. Elementos</i>
Poblaciones	P	P	26
Plantas de producción	X	X	2
CEDIS	C	C	7
Tiempos	T	T	53
Tipo de Productos – (Origen)	O	O	2

Tabla No.5: Conjuntos Modelo No.3  
Fuente: Elaboración propia

- Parámetros de decisión y variables de decisión modelo No.3

<b>Parámetros de decisión</b>	
<i>Nombre</i>	<i>Definición</i>
$COVTC_{xc}$	Costo variable de transportar 1M3 desde la planta x hasta el centro de distribución c (COP)
$COVTC_{cp}$	Costo variable de transportar 1M3 desde el centro de distribución c hasta la población p (COP)
$COFC_c$	Costos fijos del centro de distribución c en un año (COP)
$COVC_c$	Costo variable de operación por M3 en el centro de distribución c por recibir mercancía (COP)
$CAPX_{xo}$	Capacidad productiva de la planta de producción x del producto o (M3)
$CAPC_c$	Capacidad de almacenamiento del centro de distribución c (constante para todos los periodos t) (M3)
$DEM_{pto}$	Demandada de la población p en un periodo t del producto o (M3)
$N$	Número de centros de distribución a abrir (Adimensional)
<b>Variables de decisión</b>	
<i>Nombre</i>	<i>Definición</i>
$MERXC_{xcto}$	Cantidad de M3 a transportar desde la planta de producción x hasta el centro de distribución c en el tiempo t del producto o (M3)
$MERCP_{cpto}$	Cantidad de M3 a transportar desde el centro de distribución c hasta la población p en el tiempo t del producto o (M3)
$USA_c$	Usar el centro de distribución c (Adimensional)

Tabla No.6: Parámetros y Variables de decisión - Modelo No.3  
Fuente: Elaboración propia

Cabe aclarar que, en los datos suministrados al modelo, el parámetro  $CAPX_{xo}$ , tiene capacidad de 0 de la planta de producción de Copacabana en productos comercializados, y

de 0 en Puerto Buenaventura en productos manufacturados. De esta forma se controla la restricción de origen de los productos. La figura No.3 denota la estructura del Modelo No.3 para facilitar su entendimiento:

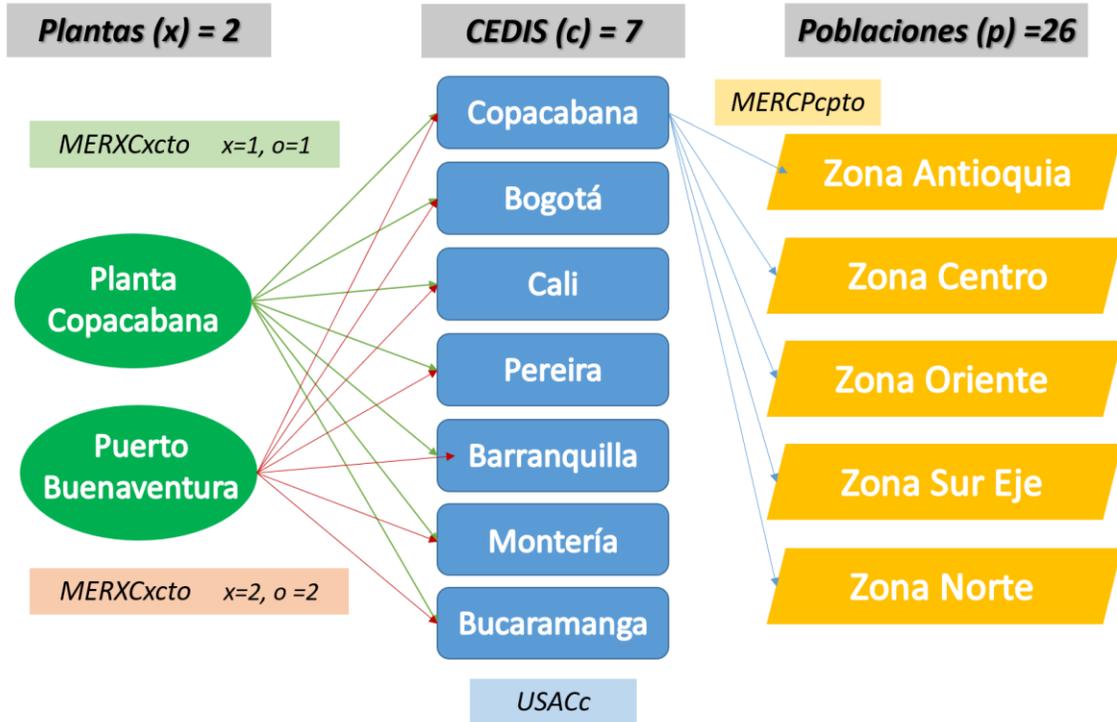


Figura No.3: Modelo No.3 -Red de distribución de producto terminado

Fuente: Elaboración propia

- Función objetivo modelo No.3

Minimizar:

$$\begin{aligned}
 & \sum_{c=1}^C COFC_c \times USA_c \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{x=1}^X \sum_{c=1}^C \sum_{o=1}^O COVC_c \times MERXC_{xcto} \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{x=1}^X \sum_{c=1}^C \sum_{o=1}^O COVTX_{xc} \times MERXC_{xcto} \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^O COVTC_{cp} \times MERCP_{cpto}
 \end{aligned}$$

- Restricciones modelo No.3

1.

$$\sum_{c=1}^C \text{MERC}P_{cpto} = \text{DEM}_{pto} \quad \forall p \in P, \quad \forall t \in T, \quad \forall o \in O$$

2.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{x=1}^X \sum_{o=1}^O \text{MER}XC_{xcto} \leq \text{CAP}C_c \times \text{USAC}_c \quad \forall c \in C$$

3.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{x=1}^X \sum_{o=1}^O \text{MER}XC_{xcto} = \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^O \text{MERC}P_{cpto} \quad \forall c \in C$$

4.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \text{MER}XC_{xcto} \leq \text{CAP}X_{xo} \quad \forall x \in X, \quad \forall o \in O$$

5.

$$\sum_{c=1}^C \text{USAC}_c \leq N$$

6.

$$\text{USAC}_c \in \{1,0\} \quad \forall c \in C$$

7.

$$\text{MER}XC_{xcto}, \text{MERC}P_{cpto} \geq 0$$

## 7. Resultados y análisis

### 7.1 Resultados etapa I: Caracterización de la red de distribución de producto terminado.

La primera caracterización cuantitativa lograda fue la de los centros de distribución. Como se había mencionado antes, fue necesario hacer una reconstrucción digital de los centros de distribución para el cálculo de la capacidad en  $m^3$ . A continuación, se adjunta en la Figura No.4 uno de los CEDIS reconstruidos:

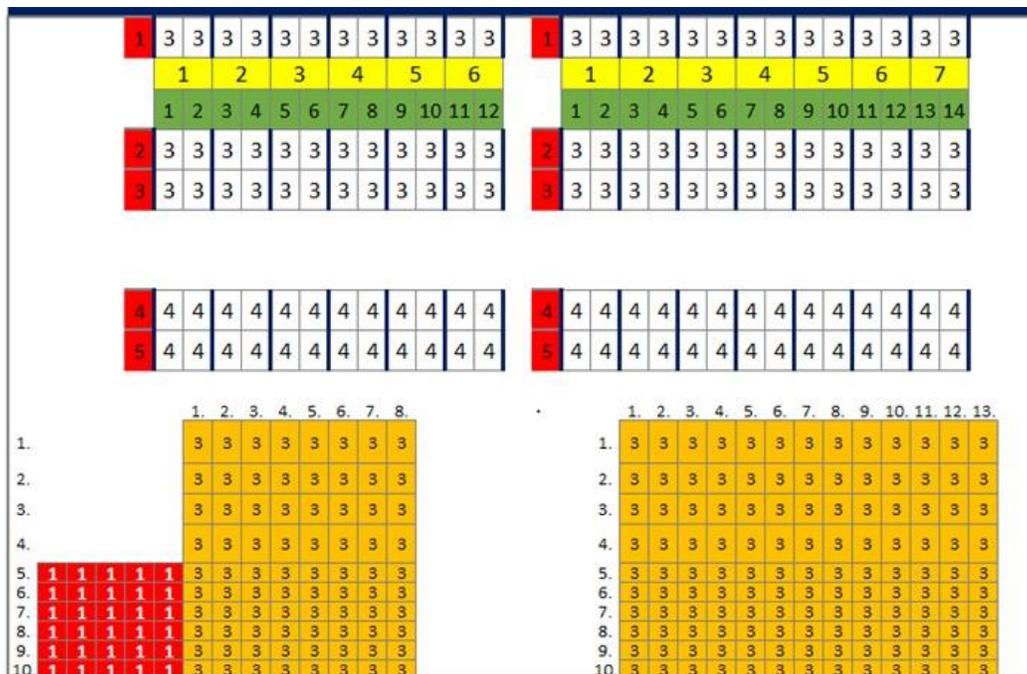


Figura No.4: Modelo CEDI Cali para cálculo de capacidad de almacenamiento volumétrica.  
Fuente: Elaboración propia

Una vez estuvo determinada la capacidad en  $m^3$  de todos los centros de distribución, se procedió a hacer la caracterización de los CEDIS en tanto a costo, capacidad en  $m^2$ , y capacidad aproximada en  $m^3$ . En la Tabla No.7, anexada a continuación, se evidencia esta caracterización. Fue eliminada de las tablas a continuación toda la información relativa a costos y ubicación de los CEDIS, con el fin de proteger la información confidencial de la empresa.

CEDI	M2	M3
Barranquilla	1800	5296,5
Bogotá	4600	7425,8
Bucaramanga	550	1633,3
Cali	1750	3739,9
Copacabana	16606	71736
Montería	350	932,6
Pereira	750	900,2

Tabla No.7: Caracterización CEDIS  
Fuente: Elaboración propia

Tras el análisis de estos datos se concluye que los centros de distribución cuentan con condiciones espaciales y de costos muy diferentes. Para facilitar su análisis se presenta la Tabla No.8, en la que se encuentra la participación de cada CEDI en tanto costos,  $m^2$ , y  $m^3$ . En rojo aparecen los valores con peor relación entre la participación en capacidad de almacenamiento y la participación en costo (Participación M3 – Participación Costo).

CEDI	Participación Costo	M2	Participación M2	M3	Participación M3	Relación
Barranquilla	10,3%	1800	6,8%	5297	5,8%	-4,6%
Pereira	2,8%	750	2,8%	900	1,0%	-1,8%
Bucaramanga	3,3%	550	2,1%	1633	1,8%	-1,5%
Montería	2,2%	350	1,3%	933	1,0%	-1,2%
Cali	4,6%	1750	6,6%	3740	4,1%	-0,5%
Bogotá	7,4%	4600	17,4%	7426	8,1%	0,7%
Copacabana	69,5%	16606	62,9%	71736	78,3%	8,8%

Tabla No.8: Participación de cada CEDI en costos,  $m^2$  Y  $m^3$

Fuente: Elaboración propia

Cabe resaltar que CEDI Copacabana representa el 69,5% de los costos, y el 78,3% de la capacidad de almacenamiento actual de la empresa, que hace referencia a la participación en  $m^3$ . El CEDI con mejor relación capacidad de almacenamiento vs. costo es el CEDI Copacabana, seguido de Bogotá, Cali, Montería, Bucaramanga, Pereira, y, por último, CEDI Barranquilla.

En tanto a transporte, se llegó a un costo de transportar un  $m^3$  un kilómetro de 92 COP. Con este valor, y la cantidad de kilómetros entre nodos factibles, se calcularon un total de 196 costos de transporte. Se adjunta a continuación a modo de ejemplo los costos variables de transporte desde CEDI Copacabana hacia las poblaciones (COVTCP) en la Tabla No.9:

COVTCP			
CEDI (c)	Población (p)	KM	COVTCP
CEDI COPACABANA	ANTIOQUIA	16	\$ 1.472
CEDI COPACABANA	ARAUCA	972	\$ 89.424
CEDI COPACABANA	ATLANTICO	692	\$ 63.664
CEDI COPACABANA	BOLIVAR	616	\$ 56.672
CEDI COPACABANA	BOYACA	405	\$ 37.260
CEDI COPACABANA	CALDAS	222	\$ 20.424
CEDI COPACABANA	CAQUETA	801	\$ 73.692
CEDI COPACABANA	CASANARE	610	\$ 56.120
CEDI COPACABANA	CAUCA	561	\$ 51.612
CEDI COPACABANA	CESAR	730	\$ 67.160
CEDI COPACABANA	CHOCO	244	\$ 22.448

**Modelación y evaluación del rediseño de la red de distribución nacional de producto  
terminado de una empresa manufacturera en Antioquia**

CEDI COPACABANA	CORDOBA	389	\$ 35.788
CEDI COPACABANA	CUNDINAMARCA	405	\$ 37.260
CEDI COPACABANA	HUILA	567	\$ 52.164
CEDI COPACABANA	LA GUAJIRA	876	\$ 80.592
CEDI COPACABANA	MAGDALENA	820	\$ 75.440
CEDI COPACABANA	META	521	\$ 47.932
CEDI COPACABANA	N. DE SANTANDER	567	\$ 52.164
CEDI COPACABANA	NARIÑO	807	\$ 74.244
CEDI COPACABANA	PUTUMAYO	885	\$ 81.420
CEDI COPACABANA	QUINDIO	278	\$ 25.576
CEDI COPACABANA	RISARALDA	233	\$ 21.436
CEDI COPACABANA	SANTANDER	376	\$ 34.592
CEDI COPACABANA	SUCRE	456	\$ 41.952
CEDI COPACABANA	TOLIMA	402	\$ 36.984
CEDI COPACABANA	VALLE DEL CAUCA	432	\$ 39.744

*Tabla No.9: Costos de transporte entre CEDI Copacabana y poblaciones  
Fuente: Elaboración propia*

Por último, en tanto a los datos empleados en el Modelo No.3 que clasifica la demanda por tipo de producto (Origen de los productos), se llega a la conclusión de que aproximadamente el 70% de la mercancía vendida en el año 2019 perteneció a productos manufacturados, y 30% a productos comercializados.

**7.2 Resultados etapa II: Formulación y validación del modelo actual de la red de suministro**

Para la ejecución de los tres modelos fue empleado el software Xpress IVE 8.8 64bit licenciado. La ejecución del Modelo No.1 generó los siguientes resultados:

**Costo Total:** 2,83E+19

**CEDIS a habilitar:**  
Usa CEDI BUCARAMANGA  
Usa CEDI COPACABANA

**Cantidades a enviar desde la Planta a cada CEDI:**

Planta	CEDI	m3
Planta Copacabana	CEDI BUCARAMANGA	1780
Planta Copacabana	CEDI CALI	0,00022737
Planta Copacabana	CEDI COPACABANA	711208

*Tabla No.10: Resultados Modelo No.1  
Fuente: Elaboración propia*

Se habilitan los centros de distribución de Bucaramanga y Copacabana. El traslado de mercancía de Planta Copacabana a Cali se asume como cero computacional. Se generaron dos movimientos de mercancía desde la Planta de Copacabana a CEDIS, uno de ellos a CEDI Bucaramanga con el 0,25% del total de mercancía, y uno a CEDI Copacabana con el 99,75% restante. Adicional a estos resultados, generó 27 movimientos entre CEDIS y poblaciones. Uno de ellos el existente entre CEDI Cali y Putumayo con un traslado de mercancía de 0.00022, por lo que se asume de nuevo como cero. De los 26 movimientos restantes, 25 salen directamente del CEDI de Copacabana (96,2%), y uno sale del CEDI Bucaramanga hacia la población Arauca (3,8%). Preocupa particularmente el costo total propuesto por el modelo, que está muy por encima del costo real de la red de distribución de producto terminado de la empresa manufacturera.

Se adjuntan a continuación los resultados del Modelo No.2. Se resume la información de movimientos por semana para llegar al total de m3 movilizados.

**Costo Total:** 2,83E+19

**CEDIS a habilitar:**

Usa CEDI BUCARAMANGA

Usa CEDI COPACABANA

Cantidades a enviar desde la Planta a cada CEDI:

Planta	CEDI	m3
Planta Copacabana	CEDI BUCARAMANGA	1780
Planta Copacabana	CEDI COPACABANA	711208

*Tabla No.11: Resultados Modelo No.2*

*Fuente: Elaboración propia*

Se habilitan los centros de distribución de Bucaramanga y Copacabana. Se generaron 79 movimientos de mercancía desde la Planta de Copacabana a CEDIS, de ellos 26 a CEDI Bucaramanga (32,9%) con el 0,25% del total de la mercancía y 53 a CEDI Copacabana (67,1%) con el 99,75% de mercancía restante. Generó además 1268 movimientos entre CEDIS y poblaciones a lo largo de las 53 semanas evaluadas, de los cuales 1242 surgen desde el CEDI Copacabana (97,9%), y 26 movimientos desde CEDI Bucaramanga (2,1%). De nuevo, un costo total mucho más elevado de lo que es la realidad de la red de distribución de producto terminado, pero ligeramente más bajo que el costo total del Modelo No.1.

Ambos modelos tuvieron un comportamiento semejante en tanto a costo total de la red, en relación con los CEDIS a habilitar, en movimientos de mercancía desde la planta hacia los CEDIS, y de los CEDIS a las poblaciones.

Cabe recalcar en este punto el hecho de que los datos insumo del modelo no fueron directamente entregados por la empresa puesto que no está claramente determinada esta información, y que, dados los resultados emitidos, se asume que los métodos empleados para transformar la información existente en datos insumo del modelo no fueron idóneos para representar la red de distribución.

Probablemente sea la estimación de los costos de transporte los que afectan principalmente la confiabilidad de la información, puesto que son los que según se cree, mas distan de la realidad. Esto podría estar ocasionando costos de transporte tan altos, que el modelo procure evitarlos al máximo, dejando inhabilitados la mayoría de los centros de distribución. De hecho, habilita uno de los CEDIS más cercanos, que, por tanto, tiene de los costos de transporte más bajos.

### **7.3 Resultados etapa III: Implementación y evaluación del rediseño de la red de distribución de producto terminado en el modelo.**

Se adjuntan a continuación los resultados del Modelo No.3. Se resume la información de movimientos por semana y por tipo de producto para llegar al total de m3 movilizados:

**Costo Total:** 2,17E+19

**CEDIS a habilitar:**

- Usa CEDI BARRANQUILLA
- Usa CEDI BOGOTÁ
- Usa CEDI BUCARAMANGA
- Usa CEDI CALI
- Usa CEDI COPACABANA
- Usa CEDI MONTERÍA
- Usa CEDI PEREIRA

**Cantidades a enviar desde la Planta a cada CEDI:**

Planta	CEDI	m3
Planta Copacabana	CEDI BUCARAMANGA	1114
Planta Copacabana	CEDI CALI	626
Planta Copacabana	CEDI COPACABANA	500751
Puerto Buenaventura	CEDI BARRANQUILLA	36359
Puerto Buenaventura	CEDI BOGOTÁ	64316
Puerto Buenaventura	CEDI BUCARAMANGA	13945
Puerto Buenaventura	CEDI CALI	41960
Puerto Buenaventura	CEDI COPACABANA	36443
Puerto Buenaventura	CEDI MONTERÍA	4818
Puerto Buenaventura	CEDI PEREIRA	12656

*Tabla No.12: Resultados Modelo No.3*

*Fuente: Elaboración propia*

Para el Modelo No.3 se habilitan todos los centros de distribución disponibles, y se realizan 462 movimientos de mercancía de las plantas hacia los CEDIS, 98 desde la planta en Copacabana (21,2%) con el 70,48% de la mercancía, y 364 desde el puerto de Buenaventura (78,8%) con el 29,52% de la mercancía restante. La planta de Copacabana entrega únicamente a los CEDIS de Copacabana, Bucaramanga y Cali, mientras que el puerto de Buenaventura entrega a los 7 CEDIS. Adicionalmente 2.444 movimientos de mercancía desde los centros de distribución hacia todas las poblaciones. A continuación, la Tabla No.13, que resume los movimientos de los CEDIS a las poblaciones. De nuevo, es el CEDI de Copacabana desde el que se transporta la mayor cantidad de mercancía:

CEDI	Viajes	% de viajes	% Mercancía
CEDI BARRANQUILLA	251	10,3%	5,1%
CEDI BOGOTÁ	259	10,6%	9,0%
CEDI BUCARAMANGA	153	6,3%	2,1%
CEDI CALI	211	8,6%	6,0%
CEDI COPACABANA	1259	51,5%	75,3%
CEDI MONTERÍA	103	4,2%	0,7%
CEDI PEREIRA	208	8,5%	1,8%

Tabla No.13: Movimientos de CEDIS a poblaciones - Modelo No.3  
Fuente: Elaboración propia

En este sentido, y a consciencia de que los datos tienen un bajo grado de confiabilidad, se propone para futuros escenarios estudiar lo que esperaba determinarse con este modelo, que es definir desde la perspectiva logística, si es viable o no que la mercancía que llega al puerto de Buenaventura sea enviada directamente desde el puerto, hacia los CEDIS del país.

## 8. Conclusiones

Al respecto de la caracterización de la red de distribución de producto terminado de la empresa manufacturera se puede concluir que:

- El CEDI de Copacabana es el CEDI con mejor relación entre costo y capacidad de almacenamiento, muy por encima de la relación existente en los demás centros. Esto puede suceder por el efecto de la economía de escala producto de su gran capacidad de almacenamiento, del hecho de que se trata de un CEDI propio de la empresa por lo que no existen terceros generando utilidades, y/o al método de cálculo del costo que tienen los analistas encargados de su administración, que quizás lo define por debajo de lo que realmente cuesta.
- Los costos de transporte de la empresa no son directamente proporcionales a la distancia recorrida para trasladar la mercancía, puesto que también se consideran variables como las condiciones climáticas, los peajes, las condiciones de la vía en tanto a condiciones del suelo y la inclinación o planicie de la carretera, entre otras.

Al respecto de la caracterización de la formulación y validación del modelo para el rediseño de la red de suministro se puede concluir que:

- Considerando que los datos insumo de los tres modelos son producto de estimaciones matemáticas, y en consecuencia de los resultados emitidos por los mismos, se debe reconocer las limitaciones de la implementación del modelo, dada la carencia de datos más representativos de la realidad de la operación de la red de suministro. Sin embargo, si resulta confiable la formulación de los modelos, su notación matemática y su código en Xpress.
- Dado que el centro de distribución de Copacabana es el centro de distribución con mayor tamaño y con mejor relación entre capacidad y costo, se sugiere que puede resultar más rentable realizar envíos directos desde este centro de distribución hacia los departamentos cercanos. De hacerse estudios posteriores, es probable que se mantenga esta tendencia.

Al respecto de la implementación y evaluación del modelo para el rediseño de la red de distribución de producto terminado se puede concluir que:

- Para la continuidad del estudio, se propone recolectar datos respecto a la demanda. Esto, para identificar la demanda desatendida que representa una disminución en las posibles utilidades, y que pudiese demostrar la necesidad de aumentar la capacidad de las plantas de producción, o de algún centro de distribución en específico. Del mismo modo, sería de interés determinar la demanda como producto de la evaluación del histórico de las ventas (no solo tomar un año como en el caso del estudio) para tener datos con mayor precisión respecto a la demanda por zonas y por temporadas en el país.
- Se recomienda a la empresa manufacturera trabajar en la recolección de datos que pudiesen ser útiles para la generación de información, herramienta fundamental en la toma de decisiones a corto y largo plazo. Igualmente, que continúe en la profundización de este estudio que puede resultar muy útil para hacer una reestructuración efectiva de la red.

## 9. Anexos

- Anexo No.1: Reconstrucción centros de distribución.
- Anexo No.2: Datos Modelo Xpress.
- Anexo No.3: Modelo No.1
- Anexo No.4: Modelo No.2
- Anexo No.5: Modelo No.3

## 10. Referencias bibliográficas

- Altıparmak, F., Gen, M., Lin, L., & Paksoy, T. (2006). A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks. *Computers & Industrial Engineering*, 51, 196-215.
- Araya, N. (2012). *UN MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA PARA EL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHICULOS EN EL TRANSPORTE ESCOLAR*. Rio de Janeiro, Brasil: CLAIO/SBPO.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2010). Supply chain management: Strategy, planning and operations. *New Jersey: Prentice Hall*, -.
- Cisneros, J. (01 de 09 de 2019). *DATADEC*. Obtenido de DATADEC: <https://www.datadec.es/blog/la-gestion-del-transporte-en-el-area-logistica>
- Complejo Logístico Industrial. (22 de 08 de 2017). *clis.co*. Obtenido de Complejo Logístico Industrial: <http://clis.co/las-bodegas-almacenamiento/>
- Complejo Logístico industrial. (22 de 08 de 2017). <http://clis.co>. Obtenido de CLIS: <http://clis.co/las-bodegas-almacenamiento/>
- Datur. (10 de 05 de 2019). *www.Datur.com*. Obtenido de [www.Datur.com](http://www.Datur.com): [www.datur.com/la-evolucion-de-la-logistica-en-la-historia/#:~:text=La%20palabra%20logística%20es%20un,suministro%20de%20municiones%20y%20armas.&text=En%20aquella%20época%2C%20los%20Logistikas,“aquél%20que%20sabe%20calcular”](http://www.datur.com/la-evolucion-de-la-logistica-en-la-historia/#:~:text=La%20palabra%20logística%20es%20un,suministro%20de%20municiones%20y%20armas.&text=En%20aquella%20época%2C%20los%20Logistikas,“aquél%20que%20sabe%20calcular”).
- Goetschalckx, M., Vidal, C. J., & Dogan, K. (2002). Modeling and design of global logistics systems: A review of integrated strategic and tactical models and design algorithms. *European Journal of Operational Research*, 143, 1–18.
- Google. (1 de 10 de 2020). *Google Maps*. Obtenido de Google Maps: <https://www.google.es/maps/?hl=es>
- Instituto Europeo de Posgrados. (2020). *iep.edu.es*. Obtenido de Instituto Europeo de Posgrados: <https://www.iep.edu.es/que-es-logistica-de-distribucion/>
- Lamb Charles, Hair Joseph y McDaniel Carl. (2002). Marketing - Sexta Edición. En H. J. Lamb Charles, *Marketing* (pág. 383). International Thomson Editores S.A.
- Logistec. (30 de 12 de 2013). *www.Logistec.com*. Obtenido de [www.Logistec.com](http://www.Logistec.com): <https://www.revistalogistec.com/index.php/vision-empresarial/analisis/item/2356-la-distribucion-y-el-transporte>
- López, J. F. (- de - de 2021). *Economipedia*. Obtenido de Economipedia: <https://economipedia.com/definiciones/logistica-de-almacenamiento.html>
- Ministerio de defensa. (2021). *www.agencialogistica.gov.co*. Obtenido de Agencia Logística: <https://www.agencialogistica.gov.co/es/pagina/abastecimiento>
- Mitsuo Gen, L. L. (2018 ). Recent advances in hybrid priority-based genetic algorithms for logistics and SCM network design. *Computers & Industrial Engineering*, Ed. 125 Pg. 394-412 .
- Mora, L. A. (03 de 01 de 2018). *Meetlogistics*. Obtenido de Meetlogistics: <https://meetlogistics.com/operadorlogistico-transporte/cross-docking/>
- Ortiz Gaitán, Sebastián Enrique. (30 de 06 de 2017). Modelo de Programación Lineal Entera Mixta para la Programación de Sistemas tipo Job-Shop Flexible en Entornos

- Make to Order. *Repositorio Universidad de la costa (REDICUC)*, 1-7. Obtenido de (REDICUC).
- Oxford. (- de - de 2020). *Oxford*. Obtenido de Oxford: <https://www.lexico.com/es/definicion/puerto>
- Peña, L. (2018). Procedimiento de Evaluación y Selección de Proveedores basado en el Proceso de Análisis Jerárquico y en un Modelo de Programación Lineal Entera Mixta. *Ingeniería, ISSN-e 0121-750X, Vol. 23, N°. 3, -*.
- Quiroz, R. F. (2015). Integración Logística en América Latina. *Reflexión sobre la Logística Regional* (pág. 3). Bogotá, Colombia : CAF - Banco de desarrollo de américa látina.
- Reyes, J. (2015). Modelo de programación lineal para planeación de requerimiento de materiales. *Latitudes*, 1-10.
- School, E. B. (23 de 06 de 2016). *EAE Business School*. Obtenido de EAE Business School: <https://retos-operaciones-logistica.eae.es/cadena-de-suministro-y-logistica-estrategia-decisiones-y-novedades/>
- Team Peru Consulting. (26 de 01 de 2015). *taemperuconsulting.com*. Obtenido de Team Peru Consulting: <https://taemperuconsulting.com/desarrollo-de-una-red-logistica/>
- Vidal, C. J. (2011). *INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE Y OPTIMIZACIÓN DE CADENAS DE ABASTECIMIENTO*. Santiago de Cali, Colombia: Facultad de ingeniería, Universidad del valle.
- Watson, M. (2013). *Supply chain network design: applying optimization and analytics to the global supply chain* . Pearson Education .
- Zona Logística. (15 de 01 de 2018). ¿Qué es un centro de distribución? *Zona Logística*, 2. Obtenido de Zona Logística: <https://zonalogistica.com/que-es-un-centro-de-distribucion/>