OPTIMIZACIÓN DE UNA RED DE TRANSPORTE DEL CEMENTO A GRANEL EN COLOMBIA.

SERGIO ANDRÉS MONTOYA ZULETA

Director

LUIS FERNANDO MORENO VELASQUEZ. Msc

Co-Director

JULIAN GONZALEZ BUILES. Msc

MEDELLÍN

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

FACULTAD DE MINAS

2017

OPTIMIZACIÓN DE UNA RED DE TRANSPORTE DEL CEMENTO A GRANEL EN COLOMBIA

SERGIO ANDRÉS MONTOYA ZULETA

Trabajo final de maestría

Presentada como requisito para optar el título de Magíster en Ingeniería – Ingeniería de Sistemas

Director

LUIS FERNANDO MORENO VELASQUEZ, Msc.

Co Director

JULIAN GONZALEZ BUILES. Msc

MEDELLÍN

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

FACULTAD DE MINAS

2017

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme una vida con oportunidades, felicidad y tranquilidad.

A mi madre Claudia Montoya, quien me ha formado e inspirado con el ejemplo y amor.

A mi familia, mis tías Fabiola y Cristina, mis primos hermanos Santiago, Juan David y Julian, mis sobrinos Alejandro y Emanuel, quienes actualmente conforman mi familia siendo la mayor fuente de inspiración.

A mi Director y maestro Luis Fernando Moreno, por todo el acompañamiento, consejos, soporte y amistad, por ser un guía y ejemplo.

A mi Co director, Julian Gonzalez, por su apoyo y enseñanzas.

A mi amiga Catalina Velasquez, que siempre ha estado apoyando y potenciando lo mejor de mí, convirtiéndose en una luz en mi caminar.

A Transportempo SAS y Renting Colombia SA, por la flexibilidad en brindarme los espacios para estudiar, por el apoyo económico y conceptual en el desarrollo de este trabajo y permitir ejercer la profesión que me apasiona.

A la universidad Nacional de Colombia, por ser una institución donde me han inculcadlo los principios de “trabajo y rectitud”; y a todos mis maestros que han dejado huella en mi formación profesional y personal.

Y a todos aquellos que me apoyaron y acompañaron en la elaboración de este trabajo.

RESUMEN

La cadena de abastecimiento del cemento es un sistema complejo que va desde la modelación de la red de materias primas y agregados, pasa por el sistema de producción y almacenamiento del cemento, continua con el transporte del producto hacia los clientes, y finaliza con el almacenamiento en los clientes para posterior uso como materia principal en la producción de concreto.

Este trabajo presenta un modelo integrado de transporte que se utiliza para la toma de decisiones de la planeación táctica estratégica en una cadena de suministro de cemento; a partir de premisas como la ubicación fija de las plantas, una capacidad de producción que no representa una restricción, y unos clientes que solicitan producto de manera determinística diferenciando la calidad de producto que cada planta puede producir; para dar respuesta a las siguientes preguntas: ¿dónde deben estar ubicados los centros de distribución para poder implementar esquemas de doble tripulación en transporte y minimizar los costos de la red? ¿Qué configuración tienen los centros de distribución (Silos o Tolvas) con el fin de adaptarse a la proyección de la demanda y requerimientos del modelo?

Para dar respuestas a los anteriores interrogantes, se implementó el software de optimización y simulación “Supply Chain Guru” de la casa Llamasoft; donde en primera instancia se trabaja en el diseño de la red y luego en la red de transporte optimizada, teniendo en cuenta restricciones específicas como ventanas horarias de servicio, jornadas laborales de los conductores y una canasta de costos del sector automotor de Colombia. Se optimiza el transporte y la configuración de los equipos que se deben utilizar, bajo la claridad que son resultados de datos modificados de un problema real.

En este trabajo se presenta la introducción al problema objeto de estudio, su respectiva justificación y objetivos; luego la caracterización de la red de transporte de cemento en Colombia, y finalmente se presenta el marco teórico que resume todos los conceptos relacionados con el problema, finalizando con el modelo y el análisis de los resultados.

ABSTRACT

In order to be competitive, companies must pay attention to their entire supply chain. In the case of cement, the analysis emcompasses the raw materials and aggregates network modeling, the production and warehouse systems in source, and the distribution to final customers and storage in these final nodes.

This work studies an integrated transportation model to support tactical and strategical supply chain decisions for an organization in the colombian cement industry. Given an existing distribution network, a fixed location for origins which have different products with no capacity restriction, a set of hubs and a set of customers with a deterministic demand that can be only satisfied from specific origins; the proposed model answers the next questions in order to minimize the distribution network costs and satisfy the expected demand:

Where to locate the hubs in order to minimize the distribution network costs?
What kind of hubs must be used and how to configure them?

The model is implemented in the optimization and simulation software “supply chain guru” from Llamasoft. The methodology is divided in two phases: the first one designs the network in terms of hubs location and configuration, and according to this a reassignment of the network flows is developed. The second phase involves the fleet sizing and distribution planning in terms of vehicle types, customer time windows, drivers labor costs and distribution costs.

This paper presents the introduction to the problem under study, its respective justification and objectives; Then the characterization of the cement transport network in Colombia, and finally presents the theoretical framework that summarizes all the concepts related to the problem; finalizing with the model and the analysis of the results.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1 Planteamiento del Problema 1

1.2 Justificación 9

1.3 Objetivos 10

1.3.1 Objetivo general 10

1.3.2 Objetivos específicos 10

2. CARACTERIZACIÓN DE CADENAS DE SUMINISTRO DEL CEMENTO EN COLOMBIA 11

3. MARCO TEÓRICO 14

3.1 Índice de desempeño logístico 14

3.2 Contextualización de una red de transporte 14

3.3 Modelación de una red de transporte 16

3.4 Planeación estratégica, táctica y operativa de una red de transporte 19

3.5 Modelos de gestión logística 20

3.6 Software utilizado 21

4. METODOLOGÍA UTILIZADA 25

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS 36

6. CONCLUSIONES 44

7. TRABAJO FUTURO 45

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 46

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comportamiento de los despachos nacionales de cemento gris según canal de distribución (DANE, 2017)..... 12
Tabla 2. Capacidad por tipo de vehículo (Elaboración propia) 26
Tabla 3. Tipos de Cedi a modelar (Elaboración propia) 32

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Estructura de un silo. (TURBOSQUID, 2016)..... 1
Ilustración 2. Estructura de tráiler tolva. (HEIL, 2016) 2
Ilustración 3. Canasta de costos (Elaboración propia) 3
Ilustración 4. Ubicación de nodos, red Actual (Elaboración propia)..... 6
Ilustración 5. Demanda de los clientes por volumen (Elaboración propia)..... 7
Ilustración 6. Cobertura en doble tripulación y modelo eficiente, red actual (Elaboración propia) 7
Ilustración 7. Producción de cemento a granel en Colombia (DANE, 2017)..... 11
Ilustración 8. Producción y despachos nacionales de cemento gris (DANE, 2017)..... 12
Ilustración 9. Concesiones viales de cuarta generación (ANI, 2017)..... 13
Ilustración 10. Índice de desempeño logístico**.** (Banco Mundial , 2016) 14
Ilustración 11. Esquema de red (Elaboración propia)..... 17
Ilustración 12. Planificación estratégica, táctica y operativa (Mattes Insights, 2016)... 20
Ilustración 13. Liderazgo Llamasoft a nivel mundial (Gartner, 2017)..... 21
Ilustración 14. Guía de Greenfield analysis (Llamasoft, 2017) 22
Ilustración 15. Optimización de redes (Llamasoft, 2017)..... 22
Ilustración 16. Optimización de flujos (Llamasoft, 2017) 23
Ilustración 17. Tablas Estándar de Supply Chain Guru (Llamasoft, 2017)..... 23
Ilustración 18. Cabezote tracto camión. (Kenworth, 2017) 25
Ilustración 19. Tráiler tolva granelera dos ejes (Carmextrailers, 2017)..... 25
Ilustración 20. Tracto camión Cabezote y tráiler (Fara-internacional, 2017)..... 26
Ilustración 21. Dobletroque Tolva sobre chasis (RemolquesCruz, 2017) 26
Ilustración 22. Ubicación de orígenes y Cedi, red actual (Elaboración propia) 27
Ilustración 23. Producción proyectada Vs Capacidad instalada por planta (Elaboración propia) 28
Ilustración 24. Ubicación geográfica por tipo de cliente (Elaboración propia)..... 29
Ilustración 25. Clientes en cabeceras municipales (arqhys, 2017) 29
Ilustración 26. Clientes concreteras (Sitsa, 2017) 30
Ilustración 27. Proyección de la demanda para un origen mes a mes (Elaboración propia) 31
Ilustración 28. Red actual. (Elaboración propia)..... 33
Ilustración 29. Validación y análisis de flujo de producto, Red Actual (Elaboración propia) 36
Ilustración 30. Resultados de validación del Baseline (Elaboración propia) 37
Ilustración 31. Propuesta nuevos Cedis sin cobertura actual (Elaboración propia) 38
Ilustración 32. Propuesta de nuevos Cedis contemplando cobertura actual (Elaboración propia) 38
Ilustración 33. Cobertura de red optimizada (Elaboración propia)..... 39
Ilustración 34. Cobertura de la Red Base (Elaboración propia)..... 40
Ilustración 35. Comportamiento de la demanda mes a mes de los Cedis de configuración Silos (Elaboración Propia)..... 41
Ilustración 36. Comportamiento de la demanda mes a mes de los Cedis de configuración Tolvas (Elaboración Propia)..... 42

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

Para entender el problema de distribución de cemento a granel en Colombia, es importante enmarcar el proceso de distribución dentro de toda la cadena de abastecimiento cementera. El cemento es producido en las plantas mezclando caliza, arcillas y otras sustancias a muy alta temperatura (CAÑÓN, 2008) y transportado en vehículos a los centros de distribución para su posterior entrega a clientes, o directamente a los clientes finales donde utilizan el cemento como materia prima para la producción de concreto.

Una red de abastecimiento cuenta con tres tipos de nodos importantes a tener en cuenta en una modelación: en primer lugar, la red de abastecimiento en mención está conformada por plantas de producción de cemento a granel las cuales son el origen del producto; para fines de este trabajo dichas plantas permanecerán fijas y tendrán una capacidad de producción que no representa una restricción en cantidad de producción del cemento; otro tipo de nodo a tener en cuenta en la modelación son los centros de distribución (pueden estar formados por silos (SCUTTI, 2016) y por tolvas (O.ME.P.S., 2016) (Romarco, 2016) (HEIL, 2016) o ambos dependiendo de las necesidades de demanda y fluctuación de volumen requerido mes a mes), este tipo de nodo es el más importante en este trabajo, pues se debe identificar: cuantos centros de distribución se requieren, su ubicación y respectiva configuración, con el fin de optimizar la red de transporte y vencer las restricciones planteadas; finalmente, tenemos como nodo final los clientes que consumen el producto transportado (GIFFORD, 2010), en el modelo se trabajan dos tipos de clientes: concreteras: son aquellos destinos que tienen una ventana de atención de 24 horas y un alto volumen de demanda, y las obras comunes, quienes se agrupan en el modelo bajo la premisa de cabecera municipal, donde la demanda de una cabecera municipal es la suma de todas las obras en la zona a un radio de 10 kilómetros partiendo del punto central del municipio. Para un mayor entendimiento del nodo de centros de distribución se definirá el concepto de silo y tolvas:

Silos: Lugar seco en donde se almacenan granos, materiales , semillas o forraje (RAE, 2016). (SCUTTI, 2016)

Ilustración 1. Estructura de un silo. (TURBOSQUID, 2016)

Tolvas: Tráiler especializado en el transporte y almacenamiento de productos a granel. (HEIL, 2016)

Ilustración 2. Estructura de tráiler tolva. (HEIL, 2016)

A través de los nodos anteriormente nombrados se presentan flujos de diferentes tipos de producto que se diferencian por la calidad de los materiales de las diversas plantas de origen (CAÑÓN, 2008); El transporte de los múltiples productos se realiza por una flota heterogénea, la cual se diferencia en capacidad de carga y costos mensuales asociados al vehículo como lo puede ser el rendimiento de combustible, el cual se ve afectado por la zona del país donde opera (impactado por condiciones climáticas y altimetría) (Correa Espinal, Cogollo Flórez, & Salazar López, 2010), todos los vehículos son de único compartimento; cada vehículo sólo puede transportar un único tipo de producto a la vez y todo lo que se carga en el vehículo debe ser entregado al centro de distribución o al cliente asignado (Wu, Hartman, & Wilson, 2015), es decir, no se permite atender dos o más clientes en un viaje de un vehículo; un viaje en esta modelación se define como la ida y regreso de un vehículo partiendo de su origen, realizando la entrega de producto en el nodo cliente y regresando de nuevo al respectivo origen.

Se trata entonces de una red de transporte para múltiples productos y con varios tipos de vehículos y una canasta de costos particular, en la cual los costos fijos representan normalmente el 55% de la totalidad de los costos de la canasta (I&DL, Canasta de costos Transportempo, 2016) y el 45% es asociado a costos variables del transporte (SICETAC, 2016), a continuación el esquema de costos utilizado en la modelación:

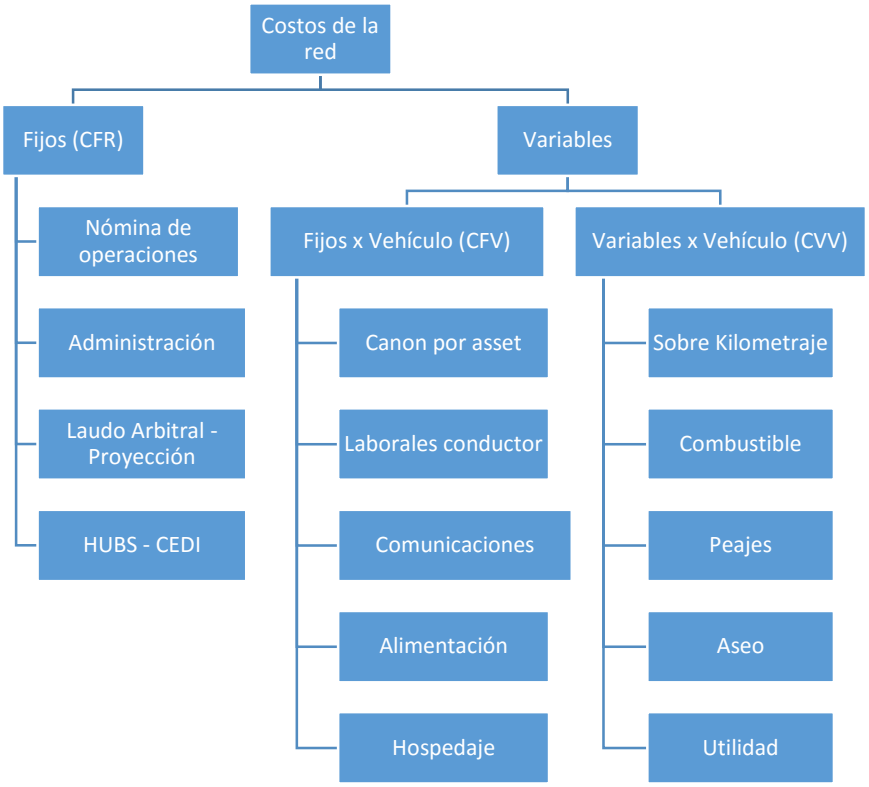


Ilustración 3. Canasta de costos (Elaboración propia)

Una vez ilustrado el esquema de costos, se tiene el reto de disminuir el costo logístico de distribución, para este caso en particular, el costo por tonelada transportada; entonces es necesario analizar como disminuir el costo por viaje y a su vez, diluirlo en la máxima capacidad instalada de carga de los vehículos cumpliendo con las restricciones del modelo.

Una forma interesante de disminuir el costo por ciclo, es diluyendo los costos fijos, que como se nombró anteriormente, estos representan más de la mitad de la canasta de costos; una forma de realizarlo es optimizando el uso del activo y transportando más toneladas al mes por equipo con los costos fijos anclados a la operación.

Para calcular el Costo Logístico de Distribución (CLD) se debe entender las siguientes variables y ecuaciones de costos:

Definición de variables:

- Costo Total por vehículo al mes: Valor total a facturar por vehículo al mes para alcanzar el punto de equilibrio, se obtiene al sumar los costos fijos al mes de cada activo más todos los costos variables en los que se incurra al realizar los viajes durante el periodo de tiempo.

- Toneladas Transportadas por vehículo al mes: son aquellas toneladas estimadas al multiplicar la capacidad instalada de cada viaje por el número de viajes que realiza un vehículo, para este modelo un viaje es considerado igual a un ciclo, es decir, llevar el producto y devolverse en vacío.

- Dimensionamiento de flota: número de vehículos que se tienen en la red a modelar.

- Número de ciclos al mes: es el número de viajes que un vehículo puede realizar en una ruta, teniendo en cuenta el tiempo de ciclo y tipo de tripulación.

- Tiempo de ciclo: es el tiempo que se demora un viaje completo, está definido como la suma de tiempo de cargar el producto, tiempo de transito cargado, tiempo de descargue en el cliente y tiempo de tránsito en vacío.

- Tipo de tripulación: es la condición de poner uno o dos conductores por vehículo con el fin de utilizar el activo 12 o 24 horas al día, importante resaltar que para pasar a una doble tripulación se debe cumplir con la restricción de jornada laboral (SICETAC, 2016) y el tiempo de ciclo de esa ruta debe de ser igual o inferior a 12 horas, contemplada como la jornada laboral de un conductor al día. En caso contrario, esa ruta se debe de atender en tripulación sencilla; esta restricción de tiempo de ciclo se modela en este trabajo como una restricción de distancia entre el origen y destino, y se reemplaza con un condicional de implementar una doble tripulación si y solo si la distancia entre origen y destino son 140 kilómetros en un solo tramo (280 kilómetros sumando el tramo de ida y regreso) (I&DL, Distancia entre nodos para implementar doble tripulación, 2016) (Rancourt, Cordeau, & Laporte, 2010).

- Días hábiles al mes: son los días que se laboran en la operación, este valor ya viene afectado por la disponibilidad mecánica de los vehículos.

- Kilómetros al mes por vehículo: hace referencia al número de kilómetros que recorre un camión dada la combinación de rutas que puede realizar en el mes (ir de un origen i a un destino j).

Para la definición de las ecuaciones, se tienen en cuenta las siguientes convenciones de siglas:

CLD: Costo logístico de distribución

CFR: Costos fijos de red

CVR: Costos variables de red

CFV: Costos Fijos por Vehículo

CVV: Costos Variables por vehículo

Km: Kilómetros

CTVM: Costo total por vehículo al mes

TM: Toneladas transportadas por vehículo al mes

NCM: Número de ciclos al mes

HV: Horas/día disponible para conducir por vehículo

Ecuaciones de costos:

$$CLD = \frac{(CTVM)}{(TM) * (Km\ al\ mes\ por\ vehículo)}$$

$$CTVM = (CFV) + (CVV) * (NCM) + \frac{CFR}{Dimensionamiento\ de\ flota}$$

$$TM = (NCM) * (Capacidad\ Instalada\ por\ vehículo\ por\ viaje)$$

$$NCM = \frac{(HV) * (Días\ hábiles\ al\ mes)}{(Tiempo\ de\ ciclo)}$$

$$Tiempo\ de\ ciclo = Tiempo\ de\ cargue + Tiempo\ Descargue + \frac{Kilómetros\ por\ ciclo}{Velocidad\ por\ ciclo}$$

$$Km/mes\ por\ veh = \sum_{j \in R} Número\ ciclos\ en\ la\ ruta\ j * Cantidad\ Kms\ en\ la\ ruta\ j, \qquad \forall j$$

$$En\ donde\ R\ es\ el\ conjunto\ de\ rutas.$$

Importante resaltar que la velocidad y el rendimiento varían según la altimetría de la ruta, además de que el rendimiento en Round Trip (ir cargado y regresar vacío) es diferente en cada uno de los tramos, por ende, se debe de trabajar con una tabla detallada que relaciona los kilómetros de cada ciclo, su altimetría en lleno y en vacío y cálculo de velocidad y rendimiento de combustible por ciclo y por cada tipo de vehículo.

Entiéndase entonces por CLD como aquel costo asociado a transportar una tonelada de cemento una distancia de un kilómetro.

Nótese que, en las ecuaciones anteriores, para disminuir el CLD se puede gestionar reduciendo los costos totales por vehículo o incrementando el número de toneladas transportadas por vehículo, esto se simplifica cuando nos centramos en incrementar el número de ciclos al mes.

Para incrementar el número de ciclos al mes, se tiene una decisión que depende del tipo de tripulación, ya que del tipo de tripulación depende el número de horas al día que es utilizado un vehículo y, por ende; al incrementar esta variable se incrementa en el mismo factor el número de ciclos, lo que finalmente se traduce en la disminución de los costos fijos que se diluyen sobre esta variable y finalmente se obtiene una reducción en el CLD.

Se debe entonces plantear una estrategia que permita incrementar el uso del esquema de transporte llamado “doble tripulación”; para lograr transportar más toneladas al mes por equipo (incrementando la capacidad instalada actual) y diluyendo otros costos fijos, obteniendo al final el cumplimiento de la función objetivo.

Es importante resaltar que actualmente se tiene en el modelo una red de abastecimiento base, con unos orígenes, centros de distribución con cierta configuración y ubicación geográfica, y adicional se tienen todos los destinos con su respectiva proyección de demanda; esta demanda se trabaja como determinística en la optimización (Rezapour, Zanjirani Farahani, & Zhang, 2016). A continuación, se presenta la ubicación de la red

base, la proyección de la demanda de los clientes para los próximos 4 años (años 2017 – 2020) y la cobertura en doble tripulación actual. (Magnanti & Wong, 2016),

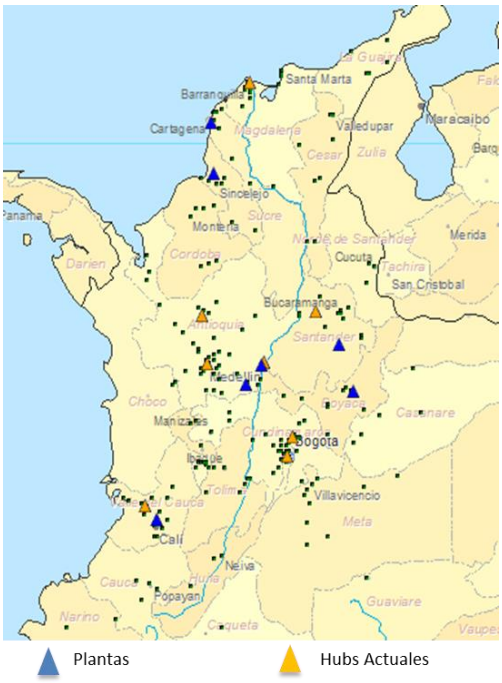


Ilustración 4. Ubicación de nodos, red Actual (Elaboración propia)

El gráfico anterior representa la ubicación (geo referenciados mediando coordenadas de latitud-longitud) de las plantas de producción, representadas como triángulos azules, los centros de distribución actuales representados como triángulos amarillos y los clientes que se van a atender en el modelo representados como puntos negros.

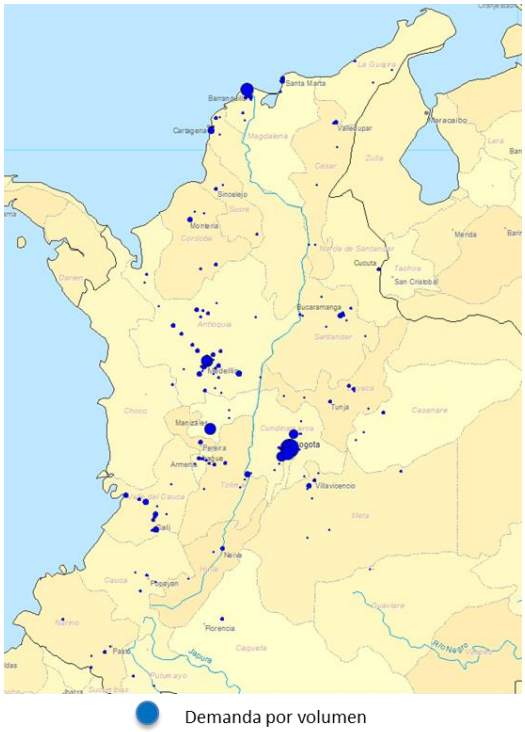


Ilustración 5. Demanda de los clientes por volumen (Elaboración propia)

La ilustración 5; representa el volumen de demanda de cada cliente geo referenciado, donde el tamaño del circulo representa el volumen de la demanda proyectada para los próximos 4 años (la premisa sobre la demanda de los clientes representados en este modelo es que se comporta de manera determinística (Rezapour, Zanjirani Farahani, & Zhang, 2016), y está dada como input para la optimización).

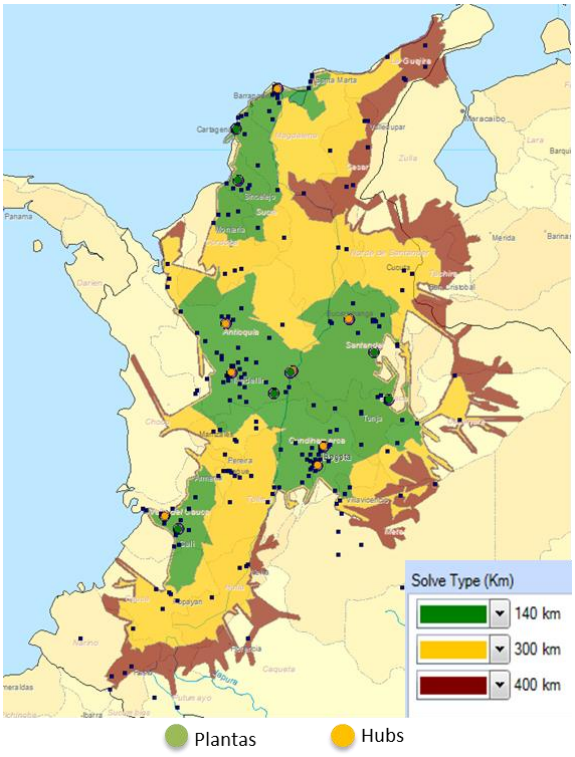


Ilustración 6. Cobertura en doble tripulación y modelo eficiente, red actual (Elaboración propia)

La ilustración anterior nos presenta la cobertura de la red actual, representada con tres colores: el verde es aquella zona donde hoy se aplica doble tripulación y se considera un modelo eficiente, donde la distancia entre el punto de abastecimiento del producto y los destinos es inferior a 140 kilómetros de radio, la zona amarilla es aquella zona donde por algunas restricciones no se aplica la doble tripulación actualmente; se encuentra a menos de 300 kilómetros de los puntos actuales de abastecimiento de producto y la zona roja es aquella donde la restricción es dura y no se puede vencer, por lo que no se puede abastecer en doble tripulación.

El reto es incrementar la cobertura en la zona verde, se debe entonces analizar la ubicación de los centros de distribución actuales (Montoya, Vélez, & Villegas, 2012), decidir si dichos centros deben de continuar en la ubicación y/o configuración actual o y adicional, decidir si se deben abrir nuevos centros, hallar su ubicación geográfica, definir su respectiva configuración (Silos o tolvas) y además, se debe dimensionar la flota de vehículos que tienen características diferentes y decisivas a la hora de atender un cliente (Wu, Hartman, & Wilson, 2015).

Es así como el reto del presente trabajo es dar respuesta a las siguientes preguntas:

- ¿Dónde deben ubicarse los centros de distribución para garantizar un cubrimiento de la demanda de los clientes a una distancia menor o igual a 140km de radio de un punto de abastecimiento?
- ¿Qué configuración (Silos o Tolvas) debe de tener cada uno de los Centros de distribución propuestos?
- ¿Cuál es la capacidad de flujo mensual que debe de tener cada centro de distribución para garantizar el abastecimiento de la demanda solicitada por los clientes mes a mes?

teniendo como función objetivo la minimización de los costos totales de la red de transporte.

1.2 Justificación

Dentro de todos los componentes de costos que existen en la cadena de suministro, los costos de transporte son los más significativos, y estos son los que impactan de mayor forma el rendimiento de la empresa, es decir su rentabilidad (Vidović, Popović, & Ratković, 2013); por tanto uno de los indicadores para medirse en cuanto a su costo para poder llegar a ser competitivos en el mercado es el costo logístico de distribución (CLD) que indica cual es el costo de transportar una unidad de medida de un punto a otro.

Por ende la búsqueda de minimizar los costos a lo largo de la cadena de suministro es importante (GIFFORD, 2010), y una de las maneras de obtener este resultado es diluyendo los costos fijos de la red con una mayor productividad de los vehículos, ya que cada vehículo puede transportar más unidades con el mismo costo fijo, lo que se traduce en poder transportar más toneladas de producto con la misma flota sin necesidad de crecer la misma tasa de la demanda, En la industria del cemento, existen restricciones que afectan el transporte del producto, la principal es la ubicación de las plantas productoras, las cuales son nodos ubicados de manera lejana a las ciudades que consumen la mayor cantidad de demanda y el producto que por sus características debe de ser transportado en vehículos que pueden duplicar el valor de los vehículos convencionales de otros productos en Colombia (I&DL, Canon de arrendamiento de Renting Colombia, 2016), lo que hace que el transporte sea una componente muy importante en el costo y a su vez afecta en gran manera la rentabilidad de las compañías. (Wirdianto, Qi, & Khan, 2011)

Por esta razón los modelos de optimización en esta industria se enfocan principalmente en este eslabón de la cadena de suministro buscando optimizar su distribución y transporte. (GIFFORD, 2010) .

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Optimizar el costo de una red de transporte de cemento a granel en Colombia teniendo en cuenta la demanda pronosticada para los años 2017 al 2020.

1.3.2 Objetivos específicos

- Conocer de manera presencial una operación nacional de transporte de cemento a granel.
- Revisar literatura frente a las metodologías para optimizar las redes de transporte.
- Construir un modelo base en el software Supply Chain Guru del proyecto con información histórica del 2016.
- Validar el modelo base frente a la demanda histórica transportada, los costos fijos de la red y los costos variables por vehículo asociados a dicho modelo.
- Presentar un diseño de red, indicando la ubicación, configuración y dimensionamiento de la capacidad de los centros de distribución necesarios para el nuevo esquema de operación.
- Implementar el modelo elaborado en el software de Supply Chain Guru de Llamasoft.
- Realizar presentación comparativa con los resultados obtenidos en la optimización.

2. CARACTERIZACIÓN DE CADENAS DE SUMINISTRO DEL CEMENTO EN COLOMBIA

En el año 2016 los despachos de cemento gris al mercado nacional ascendieron a 12.101,9 mil toneladas. Esto representó una variación de -5,5% con relación al año 2015, cuando se registró una variación de 7,0%. En 2015 se presentó el nivel más alto en toneladas desde el año 2010 con 12.806,8 mil toneladas; Por departamentos, los mayores crecimientos en despachos de cemento se registraron en Atlántico (7,0%) y Antioquia (3,5%). Por su parte, la producción de cemento gris en el año 2016 alcanzó las 12.494,6 mil toneladas, lo que significó una variación de -4,2% con relación al año precedente cuando llegó a las 13.046,7 mil toneladas. (DANE, 2017)

Variación anual (diciembre 2016/2015); En diciembre de 2016, se despacharon 1.006,9 mil toneladas de cemento gris al mercado nacional, lo que significó una variación de -9,0% frente al mismo mes de 2015 cuando fue 1.106,9 mil toneladas, siendo el nivel más alto en toneladas para todos los meses de diciembre desde 2009. En diciembre de 2015 la variación fue 12,5%; En diciembre de 2016, el mayor crecimiento en despachos se registró al departamento de Antioquia con una variación de 13,6%. En contraste, la mayor reducción se presentó en los despachos a Norte de Santander con -34,5%. Por su parte, en este mes, la producción de cemento gris en el país alcanzó las 1.098,6 mil toneladas, lo que representó una variación de -9,2% con relación al mismo mes del año anterior, cuando se presentó el nivel de producción más alto de la serie histórica desde 2010 con 1.209,7 miles de toneladas. (DANE, 2017)

El cemento a granel, representa un 31% de la producción a nivel nacional (DANE, 2017); este tipo de distribución es importante ya que

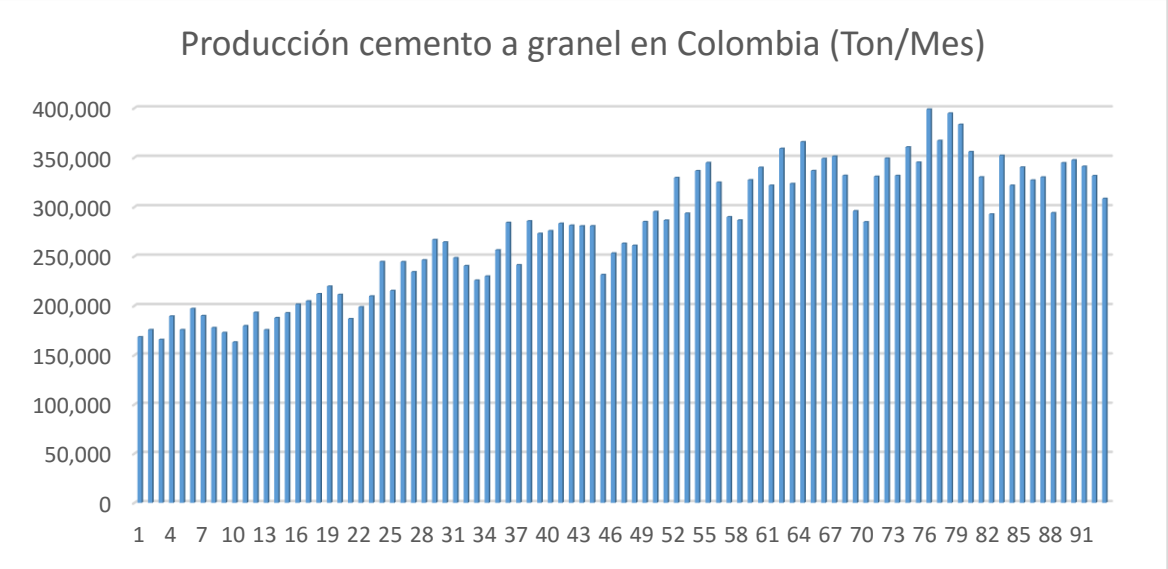


Ilustración 7. Producción de cemento a granel en Colombia (DANE, 2017)

El gráfico anterior ilustra el comportamiento de la producción de cemento a granel en Colombia en los meses entre abril del 2009 hasta diciembre del 2016 (93 meses); donde se puede observar que históricamente el cemento tiene un comportamiento estacional; con meses de baja demanda como lo son diciembre y enero, y el mes que es afectado

por el periodo de semana santa (marzo o abril); mientras en los meses de junio y julio se tiene un pico de demanda. (DANE, 2017).

Revisando en más detalle los meses del 2017 con respecto a los del año 2016 se tiene:

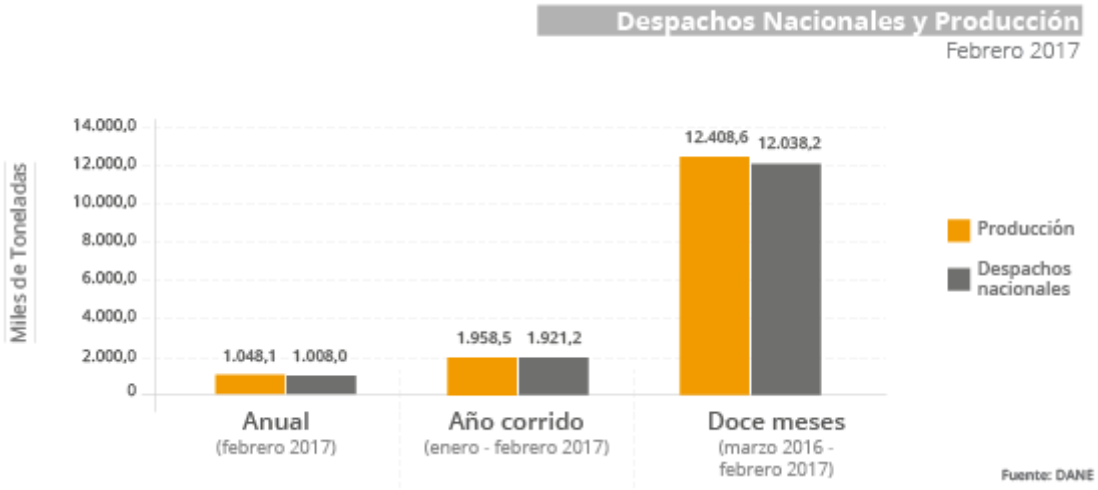


Ilustración 8. Producción y despachos nacionales de cemento gris (DANE, 2017)

En general, se puede observar la relación entre la producción y los despachos nacionales de cemento gris a febrero del 2017, y al analizar esta información con respecto al año inmediatamente anterior, se observa un decrecimiento en el sector como se muestra en la siguiente tabla teniendo en cuenta el detalle de canal de distribución:

Canal Distribución	Anual		Año corrido		Doce meses	
	Variación (%)	Contribución ptos. porcentuales	Variación (%)	Contribución ptos. porcentuales	Variación (%)	Contribución ptos. porcentuales
Total	**-3.6**	**-3.6**	**-3.2**	**-3.2**	**-6.5**	**-6.5**
Concreteras	-7.3	-1.7	-6.1	-1.4	-9.1	-2.1
Comercialización	-0.4	-0.2	1.0	0.5	-1.9	-0.9
Constr.y contratistas	-5.7	-1.3	-9.0	-1.9	-10.8	-2.3
Fibrocemento	4.3	0.1	3.4	0.1	-5.0	-0.1
Prefabricados	-4.6	-0.1	-6.8	-0.1	-23.3	-0.6
Otros*	-41.3	-0.4	-29.7	-0.3	-38.9	-0.5

Fuente: DANE - ECG.
[1] El canal de distribución "otros" incluye los despachos a gobierno, donaciones, consumo interno y ventas a empleados.
[P] Cifra provisional
NOTA: La diferencia en la suma de las variables, obedece al sistema de aproximación en el nivel de dígitos trabajados en la investigación.
Fecha de publicación: 30 de marzo 2017

Tabla 1. Comportamiento de los despachos nacionales de cemento gris según canal de distribución (DANE, 2017)

Analizando el comportamiento de febrero del 2017, con respecto a febrero del 2016 se puede observar la reducción en producto despachadol, concentrado principalmente en los canales de concreteras y construcción y contratistas; esto se debe a una situación política del país que ha impactado el país y el sector de infraestructura, como lo es el caso de Odebrecht (Portafolio, 2017); aun así, se tiene pronosticado el crecimiento del sector para el segundo semestre del 2017 y los años siguientes hasta el 2020.

En Colombia, durante el 2017, se está trabajando en el proyecto de infraestructura vial más ambicioso de toda la historia del país, llamado el proyecto de las autopistas de la cuarta generación; este proyecto será el que reactive la demanda de cemento a granel, y también impactara en la red de distribución actual, pues se proyecta que la demanda migrará a destinos donde hoy en día no se tiene la mejor cobertura con el fin de construir los túneles, puentes y vías e así comunicar el país mediante un mejoramiento considerable de la malla vial. (ANI, 2017)

La cuarta generación de concesiones es un proyecto que le permitirá al país desarrollarse aceleradamente y ser más competitivo para enfrentar los retos del comercio global, generando más empleo y brindándole a los colombianos vías de mejor calidad.

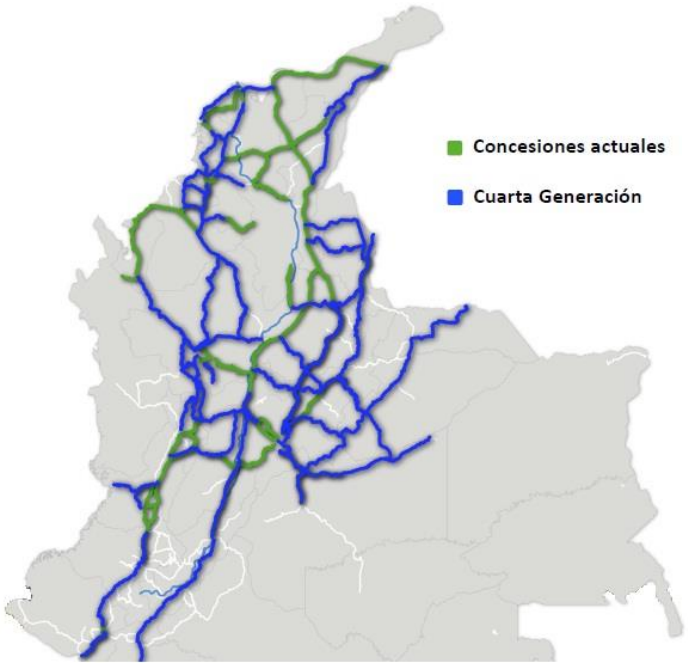


Ilustración 9. Concesiones viales de cuarta generación (ANI, 2017)

Basados en la información anterior, se espera que la malla vial cambie la demanda y el volumen que viene teniendo el mercado cementero, se transformarán aproximadamente 8.000 km de vías, con más de 1.200 km en doble calzada para lo cual se estima una inversión de $ 47 billones de pesos. Estas obras generarán más de 180.000 empleos. (ANI, 2017).

Dadas estas variables, se hace importante el rediseño de la red de transporte y abastecimiento de cemento para los próximos años y así obtener un modelo que permita tomar decisiones estratégicas para afrontar la demanda y garantizar que se tiene una red de con amplia cobertura y que minimiza el Costo Logistico de Distribución.

3. MARCO TEÓRICO

En la revisión de la literatura fueron incluidos seis temas principales: Índice de desempeño logístico, Contextualización de una red de transporte, Modelación de una red de transporte, Planeación estratégica, táctica y operativa de una red de transporte, Modelos de gestión logística y software a utilizar en el modelo.

3.1 Índice de desempeño logístico

Éste es publicado cada dos años por el Banco Mundial; en su reporte de 2016 indica que Colombia está situado en el lugar 94 de un total de 160 países encuestados con un desempeño global logístico del 2.61 equivalente al 50%. Esta medición de desempeño consiste en una escala de 1 a 5, donde 1 es el nivel menos eficiente y 5 el nivel más eficiente. Los seis factores que mide el Banco Mundial de desempeño logístico de Colombia son: seguimiento y rastreo, aduanas, competencia y calidad logística, infraestructura, tiempos de entrega y envíos internacionales. Estas mediciones y posiciones de Colombia en el ranking mundial revelan que existen oportunidades de mejora en las diferentes áreas de la logística, mismas que de ser corregidas, permitirán elevar en alguna medida la competitividad del país. (Banco Mundial , 2016) (SNCCTI, 2016)

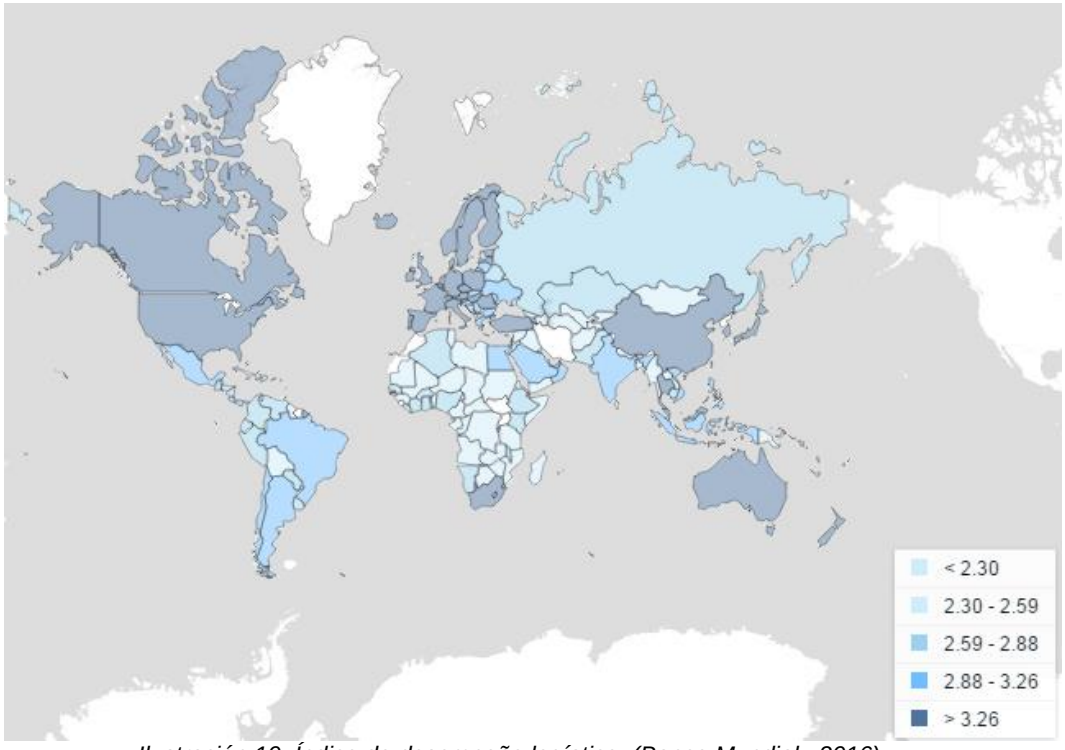


Ilustración 10. Índice de desempeño logístico. (Banco Mundial , 2016)

3.2 Contextualización de una red de transporte

Las empresas deben de analizar la cadena de suministro para poder mejorar el nivel de servicio al cliente sin un crecimiento desproporcionado en costos; es decir, las empresas

deben de incrementar la eficiencia de sus operaciones logísticas. (Ambrosino & Scutella, 2005)

Al analizar una red de distribución, generalmente se puede distinguir entre:

- Optimización de los flujos de mercancías, en este caso, se considera una red de distribución existente y se desea optimizar los flujos de mercancía a través de la red.
- Mejora de la red existente, en este caso, se desea elegir la mejor configuración de la red para satisfacer los objetivos de la empresa, minimizando al mismo tiempo los costos totales.

Los problemas de diseño de redes de distribución implican ambos tipos de análisis. Más precisamente, estos problemas consideran determinar la mejor manera de transferir bienes del suministro a los puntos de demanda, estructurando la red (capas, diferentes tipos de instalaciones que funcionan en diferentes capas, su ubicación etc.) minimizando al mismo tiempo los costos globales. (Ambrosino & Scutella, 2005).

En particular, este tipo de problemas son difíciles de considerar en conjunto. En general, algunos supuestos han sido adaptados a literatura, y solo algunos aspectos relacionados con las complejas decisiones de la red han sido modelados, por ejemplo, algunos autores trataron problemas de diseño de red de distribución como problemas de localización, sin tratar de abordar o implementar diferentes tipos de decisiones estratégicas. (Webb, 1968), tiempo después, se introduce la interdependencia entre la decisión de enrutamiento y ubicación.

Algunos problemas de localización sugeridos en el contexto de problemas de diseño de red de distribución han sido investigados; en estos problemas, en general, se determina la ubicación de los depósitos y las rutas de los vehículos para atender los clientes, de manera que satisfaga las restricciones , generalmente relacionadas con la capacidad de los depósitos, su ubicación y tiempos asociados a dichos nodos, además de todos los requerimientos de los clientes para que estén satisfechos, minimizando al mismo tiempo una función que implica costos de enrutamiento, costos fijos de la red, costos fijos de vehículos etc. (Ambrosino & Scutella, 2005)

Según (Laporte, 1988) los problemas de distribución se clasifican de acuerdo con el dimensionamiento de capas de la red, en específico; Laporte presentó una terminología de “ruta tipo R” si la ruta conecta un par de nodos de diferentes capas (es decir, si conecta un deposito con un cliente) y la “ruta tipo T” o por viaje cuando se trata de un recorrido que conecta un depósito con cierto número de clientes en el mismo vehículo. (Ambrosino & Scutella, 2005).

Laporte observó que este tipo de problemas de distribución pueden formularse como un problema de encaminamiento de localización si y solo si las rutas son tipo T; y las decisiones de ubicación surgen al menos en una capa. (Ambrosino & Scutella, 2005).

En las tres últimas décadas se han propuesto en la literatura muchos modelos de encadenamientos de localización para formular y resolver problemas de diseño de redes de distribución. La mayoría de ellos están relacionados con una red simple con dos capas (depósitos y clientes), donde se permiten rutas tipo T; cada modelo se caracteriza

por el número de depósitos localizados (nodos de orígenes); por la presencia de restricciones de capacidad y por la forma de la función objetivo. (Ambrosino & Scutella, 2005).

3.3 Modelación de una red de transporte

Para el problema específico (ver: sección 1.1) se describe una red de distribución de 3 capas: plantas, centros de distribución y clientes, como fueron descritos en el planteamiento del problema. En este sentido y de acuerdo con las preguntas generadas, el modelo para la solución del problema busca tomar los dos tipos de decisiones, tanto de optimización, como de mejora de la red actual. Es importante notar que las decisiones que se soportan en este modelo son de nivel estratégico por lo que los procesos internos correspondientes a cada uno de los nodos (inventario, producción, calidad, etc.) no se consideran.

Este tipo de situaciones se modela de forma general por medio de la programación matemática, específicamente se formulan como problemas de programación lineal entera, en dónde se describen las variables, la función objetivo y las restricciones propias del problema.

Teniendo en cuenta que la metodología de solución utiliza un software comercial especializado en este tipo de problemas (ver: sección 3.6). Para ejemplificar el modelo matemático, se adapta la formulación realizada por (Eskandarpour, Dejax, & Péton, 2016) que considera un problema de diseño de red multi-producto y 4 capas (las mismas que el problema bajo estudio más los proveedores de las plantas).

El modelo adaptado se presenta a continuación:

Se considera un conjunto J de plantas fijas, un conjunto K de centros de distribución candidatos, un conjunto L de clientes, un conjunto P de productos y un conjunto M de vehículos con diferentes capacidades (flota heterogénea), este conjunto M puede ser interpretado como los diferentes modos de transporte definidos por la capacidad y la tripulación a ser utilizada entre nodos. El problema se modela sobre un grafo dirigido $G = (V, A)$ en donde $V = J \cup K \cup L$. El conjunto de arcos A define todas las posibles conexiones y por ende los posibles flujos de información existentes entre las diferentes capas de la red. De forma general los flujos y las direcciones de los productos dentro de la red se comportan de la siguiente manera:

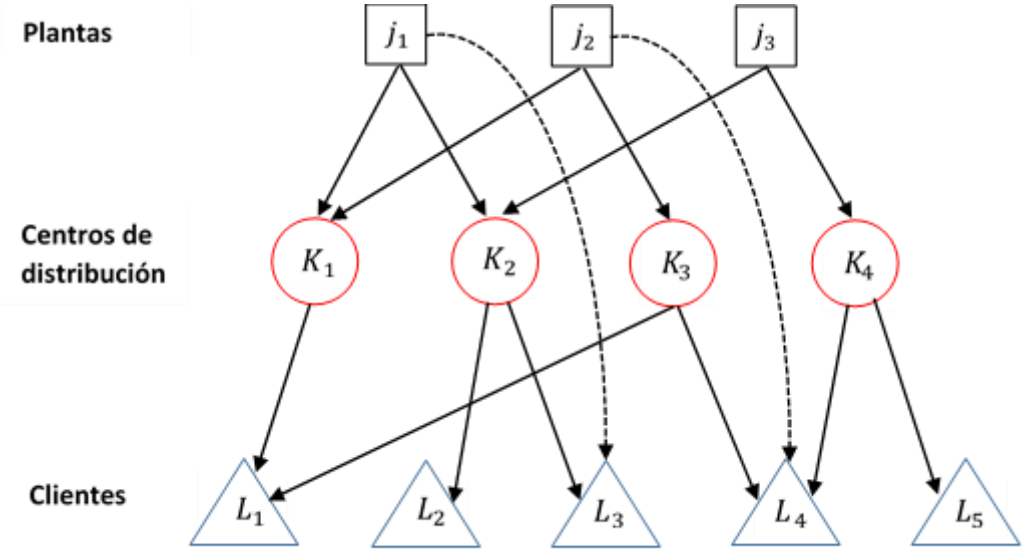


Ilustración 11. Esquema de red (Elaboración propia)

El gráfico anterior expone como los flujos de producto se presentan en una sola dirección (planta – centro de distribución – cliente), e ilustra de manera general sin considerar la cantidad real de nodos y conexiones establecidas en la metodología. Es importante resaltar que estos flujos pueden ser de diferentes productos y adicionalmente transportarse en diferentes medios o modos de transporte. Para el problema particular el transporte se da por medio de tolvas (ver: sección 1.1) que pueden ser de diferentes capacidades y con tripulación doble o sencilla.

Basados en esta información, se presenta la siguiente notación adaptada de (Eskandarpour, Dejax, & Péton, 2016):

- D_l^p: Demanda del cliente $l \in L$ de producto $p \in P$. $\forall\, l \in L, p \in P$
- cap_i: Capacidad del nodo $i. \forall i \in J \cup K \cup L$
- C_J: Costo fijo de utilizar o seleccionar la instalación $j \in J \cup K$
- v_{ij}^{mp}: Costo variable de transportar una unidad de producto $p \in P$ a través del arco $(i,j) \in A$ por el tipo de vehículo y tripulación $m \in M$.
- a_i^p: Costo de procesar una unidad de producto $p \in P$ en el nodo $i \in J \cup K$
- g_{ij}^m: Costo fijo del modo de transporte $m \in M$ a través del arco $(i,j) \in A$
- V_{ij}^m: Mínima cantidad de producto para el uso del modo de transporte $m \in M$ a través del arco $(i,j) \in A$.

De manera adicional se considera que existe un número máximo y mínimo de localizaciones de instalaciones para ser seleccionadas además de su correspondiente capacidad. Como se estableció en el planteamiento del problema se considera que la capacidad de las plantas no es una restricción en cuanto al origen del producto (cemento).

Las variables enteras binarias del modelo son:

- $y_j = \begin{cases} 1, & Si\ la\ instalación\ j \in J \cup K, se\ selecciona \\ 0, & lo\ contrario \end{cases}$

- $t_{ij}^{m} = \begin{cases} 1, & Si\ el\ modo\ de\ transporte\ m\ \in M\ es\ usado\ en\ el\ arco\ (i,j) \in A \\ 0, & lo\ contrario \end{cases}$

Las variables continuas que representan el flujo de los productos $p \in P$ a través de la red mediante el modo de tripulación son:

- $x_{ij}^{mp} = Representa\ el\ flujo\ de\ producto\ p \in P\ a\ través\ del\ arco\ (i,j) \in A\ en\ el\ modo\ m \in M.$

Esta definición de variables implica que cualquier producto puede ser procesado por cualquiera de las instalaciones (plantas y centros de distribución), sin embargo; si en la realidad esto no ocurre, el modelo puede simplemente ignorar la variable x_{ij}^{mp} y t_{ij}^{m} correspondiente. Lo mismo ocurre con el uso de los arcos $(i,j) \in A$ ya que puede haber arcos que no sean factibles.

De acuerdo con las definiciones anteriores se presenta la formulación matemática del problema como un problema de programación lineal entera mixta (*MILP* por su sigla en inglés) que busca minimizar los costos totales de transporte expresados en la siguiente función objetivo:

$$Min\ z = \sum_{j \in J \cup K} C_j y_j + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} (a_i^p + v_{ij}^{mp}) x_{ij}^{mp} + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{m \in M} g_{ij}^{m} t_{ij}^{m} \quad (1)$$

La primera expresión en la función objetivo (1) representa la suma de los costos fijos de seleccionar o utilizar las instalaciones (para el caso específico los centros de distribución $j \in K$). El segundo término es la suma de los costos variables de transportar y procesar las unidades de producto teniendo en cuenta el arco por el cual son transportadas y el modo de transporte, por último; la tercera expresión representa los costos fijos de transporte que dependen de los arcos y de los modos utilizados en los arcos.

La restricción (2) corresponde a las tradicionales ecuaciones de conservación del flujo de producto entre plantas, centros de distribución y los clientes:

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} x_{jk}^{mp} = \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} x_{kl}^{mp}, \qquad \forall k \in K, p \in P \qquad (2)$$

Las ecuaciones (3) se encargan de asegurar la demanda de los clientes de cada producto encargándose de que la suma de producto de cada tipo que llegue en los diferentes modos de transporte a cada nodo cliente iguale la demanda establecida.

$$\sum_{k \in K} \sum_{m \in M} x_{kl}^{mp} + \sum_{j \in J} x_{jl}^{mp} = D_l^p \ , \forall l \in L, p \in P \qquad (3)$$

Una de las restricciones importantes del modelo hace referencia a las capacidades en cada uno de los nodos. Las ecuaciones (4-5) se aseguran de que estas capacidades no sean violadas. Para el caso específico del problema, la capacidad de las plantas no es considerada ya que se asume como infinita a partir del planteamiento (sección 1.1); sin embargo; la ecuación (4) no se omite para plantear un modelo general.

Adicional se considera la posibilidad de seleccionar una planta o no por medio de la variable binaria y_j. Para efectos del problema particular las plantas se consideran fijas (ver sección 1.1), sin embargo, la restricción es considerada.

$$\sum_{k\in K}\sum_{m\in M}\sum_{p\in P} x_{jk}^{mp} + \sum_{l\in L}\sum_{m\in M}\sum_{p\in P} x_{jl}^{mp} = cap_j y_j, \qquad \forall j \in J \ (4)$$

$$\sum_{l\in L}\sum_{m\in M}\sum_{p\in P} x_{kl}^{mp} = cap_k y_k, \qquad \forall k \in K \qquad (5)$$

La ecuación (6) específica la cantidad máxima w de modos de transporte que pueden ser utilizados entre dos nodos. La restricción (7) garantiza que ningún vehículo transporte menos producto entre dos nodos respecto al umbral mínimo establecido V_{ij}^m. Por otra parte, la ecuación (8) expresa que si no se selecciona ningún modo de transporte en un arco $(i,j) \in A$, entonces no hay flujo en este arco.

$$\sum_{m\in M} t_{ij}^m \leq w, \qquad \forall (i,j) \in A \qquad (6)$$

$$\sum_{p\in P} x_{ij}^{mp} \geq V_{ij}^m t_{ij}^m, \qquad \forall (i,j) \in A, m \in M \qquad (7)$$

$$\sum_{p\in P} x_{ij}^{mp} \leq B t_{ij}^m, \qquad \forall (i,j) \in A, m \in M \qquad (8)$$

En la ecuación (8); B representa un número muy grande que por lo general puede ser considerado como el valor de la demanda total del producto $p \in P$.

Si se desea considerar un número mínimo y máximo de instalaciones (plantas y centros de distribución) a ser seleccionadas, las ecuaciones (9) y (10) pueden ser consideradas.

$$J_{min} \leq \sum_{j\in J} y_j \leq J_{max} \qquad (9)$$

$$K_{min} \leq \sum_{j\in K} y_j \leq K_{max} \qquad (10)$$

J_{min} y J_{max} representarían el número mínimo y máximo respectivamente de plantas a ser seleccionadas o utilizadas en el modelo, lo mismo pasa con el número de instalaciones (K_{min} y K_{max})

Por último, resulta importante recordar el dominio de las variables de decisión del programa matemático:

$$y_j \in \{0,1\}, \ \forall j \in J \cup K \qquad (11)$$

$$t_{ij}^m \in \{0,1\}, \ \forall (i,j) \in A, m \in M \qquad (12)$$

$$x_{ij}^{mp} \geq 0, \ \forall (i,j) \in A, m \in M, p \in P \qquad (13)$$

3.4 Planeación estratégica, táctica y operativa de una red de transporte

La incertidumbre sobre las tendencias del mercado y el entorno empresarial en que se encuentran las compañias es uno de los principales retos que actualmente enfrentan los

directivos de las empresas. Una compañía que analiza su entorno e intenta predecir los posibles escenarios futuros no se verá sorprendida por los cambios del mismo y podrá establecer planes de acción que le garanticen ser eficiente sin importar cual de ellos se materialice. (Argueta, Agudelo, & Cardona, 2016)

Por eso se debe optimizar la cadena de abastecimiento desde la parte estrategica, luego la táctica y finalmente la parte más operativa; la planeación estratégica tiene el alcance de definir donde deben de ubicarse los nodos de origen y centros de distribución para abastecer los clientes, es a largo plazo ya que son decisiones que se toman en horizontes superiores a los 3 años, la planeación táctica parte de la optimización de la estrategica, es decir, ya teniendo fijos los nodos (Origenes y destinos), como se debe de abastecer, es decir, en que tipo de vehículo, que tipo de tripulación etc, es a mediano plazo, entre 1 y 2 años. Y la parte operativa ya se centra en las decisiones del día a día, automatización de programación de pedidos, programación de viajes, despacho de documentos, manejo de indicadores. (Ogunbanwo, y otros, 2014)

Ilustración 12. Planificación estratégica, táctica y operativa (Mattes Insights, 2016)

Los ahorros principales en las redes de abastecimiento se dan en los horizontes estratégico y táctico, mientras el operativo apunta más a la mejora del nivel de servicio, y se deben resolver en ese orden para garantizar los mejores resultados. (Mirledy, Fredy, & Alfonso, 2016) (Üster & Kewcharoenwong, 2011)

3.5 Modelos de gestión logística

Una solución robusta al problema de optimización es de gran interés para las aplicaciones del mundo real (Veluscek, Kalganova, Broomhead, & Grichnik, 2015), donde se pueden obtener grandes beneficios cuando se optimizan problemas.

Luego de una revisión de la literatura se ha encontrado que aún no existen modelos que cumplan con las especificaciones del problema a abordar en este trabajo; se han realizado trabajos e investigaciones sobre la distribución logística del cemento y las variables que inciden sobre la competitividad en regiones específicas del país (LÓPEZ, 2011), pero no se tiene registro de un análisis de red de transporte de cemento a granel de manera holística que involucre un alcance a nivel nacional en Colombia.

El objetivo del modelo es minimizar los costos teniendo en cuenta restricciones de nivel de servicio, ubicación y configuración de centros de distribución, ventanas horarias, flota heterogénea para lo cual es primordial realizar una buena elección de software de optimización. (Odette, 2016)

3.6 Software utilizado

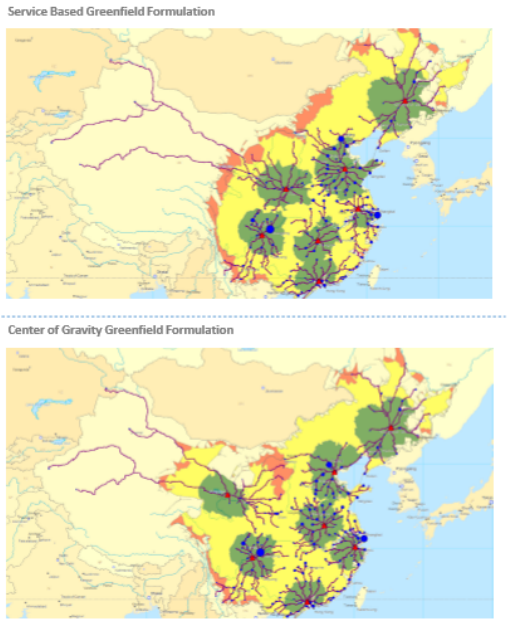
El software utilizado es “Supply Chain Guru”, de la casa Llamasoft; esta empresa está ubicada en Ann Arbor, Michigan EEUU, con oficinas en todo el mundo.

Llamasoft es uno de los líderes de software de diseño de cadena de abastecimiento. (Gartner, 2017)

Ilustración 13. Liderazgo Llamasoft a nivel mundial (Gartner, 2017)

La compañía provee tecnología, soporte y redes de comunidades para solucionar los problemas de cadena de abastecimiento que se puedan presentar, incorporando soluciones de diseño de redes, manufactura, inventarios y transporte. (Llamasoft, 2017)

A continuación, se pueden observar algunos de los módulos que se utilizaron en la elaboración de este trabajo, y un resumen con las soluciones que el software ofrece: Optimización para ubicación por centros de gravedad, optimización de redes y optimización de flujos de producto.



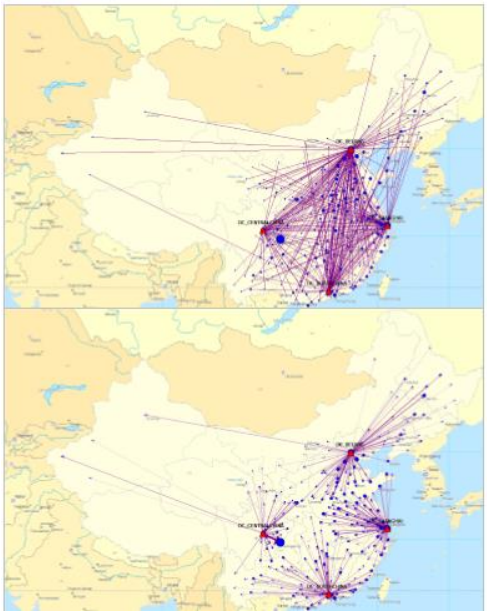
Greenfield Optimization

Optimize Facility Footprint for Service or Cost

- Realign the existing footprint or identify the next best location to setup a facility
- Service Based Optimization allows the model to decide “How Many?” And “Where?” given customer locations and service requirements
- Service Based Optimization covers the most number of customers using the fewest number of distribution points
- Center of Gravity Optimization solves the “Where?” question given customer locations, volumes and number of distribution points
- Center of Gravity Optimization yields the lowest cost solutions from a freight perspective

Ilustración 14. Guía de Greenfield analysis (Llamasoft, 2017)

EL módulo de Greenfield permite evaluar y proponer múltiples ubicaciones de los centros de distribución, tiene en cuenta el volumen de la demanda y realiza análisis de centro de gravedad para poder tener la cobertura más amplia y a su vez cumplir las restricciones del modelo.



Network Optimization

Design the Network You’d Like to Have

- Analyze and optimize existing network for quick savings and service improvements
- Re-design network footprint to reduce cost, improve service, adapt to new production/distribution methods
- Analyze and plan for Mergers and Acquisitions
- Plan for and optimize expansions into other geographical areas

Ilustración 15. Optimización de redes (Llamasoft, 2017)

El módulo de Network optimization tiene en cuenta los costos de abrir y cerrar un centro de distribución, además tiene en cuenta el costo de las rutas; en este módulo se evalúan todos los nodos candidatos propuestos en el módulo anterior, y se toma la decisión de que nodos deben de permanecer, cuales se deben cerrar, y de los nodos que quedan; cual es la configuración idónea.

Product Flow Optimization

Finding the Lowest Cost Paths

- Utilizes optimal network design and creates flow paths at individual SKU levels
- Balances the trade off between lot sizes, freight rates, replenishment frequencies, inventory carrying cost and lead time requirements
- Bridges the gap between traditional network optimization and safety stock optimization by identifying optimal stocking locations
- Model impact of various Incoterms for lowest total delivered costs

Ilustración 16. Optimización de flujos (Llamasoft, 2017)

Una vez se tenga la optimización de la red, crea el flujo de producto, teniendo en cuenta que en el modelo existen varios tipos de producto; tiene un balance entre el valor de las rutas, la frecuencia de abastecimiento, el costo de inventario y el tiempo de abastecimiento requerido.

Con el fin de dar solución al problema planteado en este trabajo, se utiliza el módulo de diseño de redes para obtener mediante “Greenfield analysis” candidatos a centros de distribución, utilizando el principio de balance por centros de masa (Demanda), una vez obtenidos los posibles candidatos, se incorporan los costos y se optimiza la red con el módulo de “Network Optimization”.

Luego de tener una red óptima, y conocer la ubicación y configuración de los centros de distribución, se utiliza el módulo de “Product Flow Optimization”, para conocer el flujo de producto en el horizonte de tiempo y quien abastece a quien con el fin de minimizar el costo total de la red cumpliendo con las restricciones de ventana horaria, tipo de producto y configuración de vehículo por cliente.

Para realizar un modelo en esta herramienta, es indispensable tener la siguiente información:

Ilustración 17. Tablas Estándar de Supply Chain Guru (Llamasoft, 2017)

A continuación, se describe cada una de las tablas:

- ✓ Products: Se ingresan los nombres de cada tipo de producto que existen en la red, adicional, se coloca sus valores correspondientes a peso y volumen u otra variable para tenerla en cuenta en las restricciones del modelo, también se

pueden ingresar valores asociados a la producción e inventarios (en este trabajo no se contemplan dichos costos).

- ✓ Sites: Se ingresan los nodos existentes en la red, especificando la categoría a la que pertenecen, se ingresan sus ubicaciones, restricciones y costos. Importante resaltar que existen tres categorías de Sites; Customer: es aquel nodo que sólo demanda producto, para el caso de este trabajo es conocido como Clientes; Make, es aquel nodo que solo produce producto, para nuestro caso son las plantas; Y Facility, que el nodo al cual le entra y sale producto, para nuestro caso son del Cedis de distribución.
- ✓ Demand: En esta tabla se ingresa la información de la demanda de los "customer" por unidad de tiempo, para este modelo se ingresa con proyección a 4 años con intervalo de tiempo mensual.
- ✓ Sourcing policies: En esta tabla se detallan los arcos o uniones que se pueden dar entre los nodos para que la herramienta haga las respectivas evaluaciones.
- ✓ Transportation Assets: En esta tabla se definen todos los tipos de transporte existentes, con su costo y restricciones; para el caso de este modelo son los tipos de vehículo.
- ✓ Transportation Policies: Se le asigna a cada flujo el tipo de transporte (definido en Transportation Assets) que se puede presentar en dicha unión, en esta tabla es donde se tiene en cuenta las restricciones de clientes por tipo de vehículo.

4. METODOLOGÍA UTILIZADA

El modelo se realiza en software Supply Chain Guru, por ende se requiere obtener toda la información requerida para modelar en la herramienta (ver tablas requeridas en sección 3.6)

Se procede a conocer la operación de transporte de cemento realizando trabajo de campo en la cementera más importante del país, se conoce a nivel detallado el proceso de transporte y se presenta la información requerida para implementar en el software y esquematización de la red:

Tipos de Vehículos (Transportation Assets):

La modelación utiliza 5 tipos de vehículos:

Los equipos que son articulados; es decir, están compuestos por un cabezote y una tolva enganchada:

- Tracto camión CCS2: Cabezote con Compresor y tolva S2
- Tracto camión CCS3: Cabezote con Compresor y tolva S3
- Tracto camión SCS2: Cabezote sin Compresor y tolva S2
- Tracto camión SCS3: Cabezote sin Compresor y tolva S3

Ilustración 18. Cabezote tracto camión. (Kenworth, 2017)

Una premisa importante es el uso del compresor; este último es un accesorio que se adapta al cabezote para permitir ser auto suficiente en los descargues en clientes, el tener este accesorio implica un diferencial en costos y capacidades de carga diferentes; (no todos los destinos requieren instalar este accesorio, ya que algunos destinos tienen instalado compresor fijo para realizar el descargue de producto); dicho compresor encarece el costo fijo mensual del vehículo y adicional disminuye la capacidad de carga neta aproximadamente en 1%; pero un destino que requiera descargue con compresor del vehículo hace que este tipo de configuración se deba tener en cuenta.

Ilustración 19. Tráiler tolva granelera dos ejes (Carmextrailers, 2017)

Cuando se analiza el tráiler (tolva), se debe de tener en cuenta que la configuración puede tener 2 o 3 ejes; implica costos y capacidades netas de carga diferentes; adicional un tamaño y radios de giro diferente, lo que constituye una restricción para el abastecimiento de producto en cada cliente.

Ilustración 20. Tracto camión Cabezote y tráiler (Fara-internacional, 2017)

La ilustración anterior, muestra el equipo completo, formado por el cabezote y tráiler, en este caso, un cabezote con una tolva dos ejes; a continuación, una tabla con las capacidades de carga de cada combinación en los tipos de vehículos articulados y los dobletroque:

Configuración	Carga Neta (Kilogramos)
CCS2	33600
SCS2	34000
CCS3	36600
SCS3	37000
Dobletroque	15000

Tabla 2. Capacidad por tipo de vehículo (Elaboración propia)

- Dobletroque: es el quinto tipo de equipo utilizado en el modelo, es una configuración rígida (no articulado), tiene un uso especial para la distribución urbana en algunas ciudades; los clientes que requieren presencia de este tipo de vehículo no pueden recibir los cuatro equipos anteriores (cabezote y tolva), debido a las restricciones de acceso, restricciones de peso por carretera y radios de giro para entrar a descargar en un cliente.

Ilustración 21. Dobletroque Tolva sobre chasis (RemolquesCruz, 2017)

Como se puede observar, es un equipo de menor capacidad, y la tolva esta sobre chasis, lo que la hace de esta configuración una elección muy maniobrable para vencer restricciones de acceso, pero con poca capacidad de carga, lo que incrementa el costo Logistico de distribución.

La capacidad neta de carga vehículo es por ciclo, ya que, al ser vehículos especiales, no pueden compensar la carga y el retorno de cada viaje se debe realizar en vacío; en caso de que estos vehículos necesiten operar en otro origen, deben de pasar por un proceso de descontaminación interna para no tener mezcla de productos que afecte la calidad del cemento.

Productos (Products):

Se tienen siete tipos de producto; cada producto se elabora en un tipo específico de origen, la calidad de origen es importante por las características específicas del producto y la demanda está dada por tipo de producto (en este modelo, existe un solo caso en que una planta puede elaborar dos tipos de producto diferente).

No se puede reemplazar demanda con otro tipo de producto.

Orígenes (Plantas o Makes):

Estos son aquellos nodos de la red donde se origina el producto, se debe de tener la siguiente información:

- Geo-localización: Ubicación geográfica, en Latitud – longitud, que permite tener una ubicación exacta de los nodos donde se produce producto.

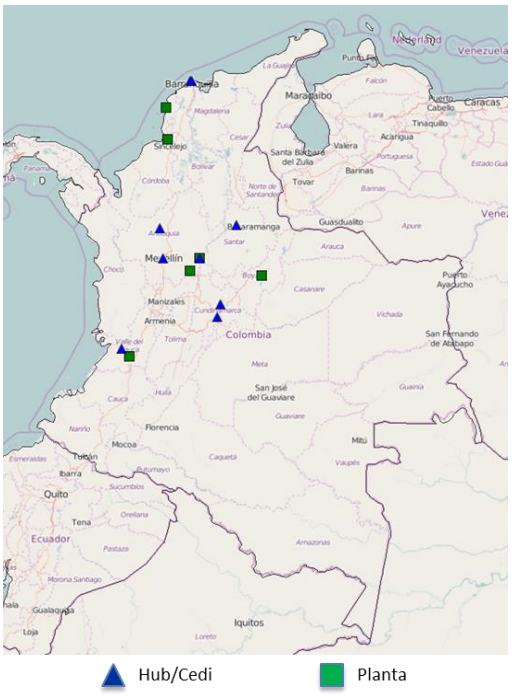


Ilustración 22. Ubicación de orígenes y Cedi, red actual (Elaboración propia)

La ilustración anterior, presenta la ubicación de cada planta inicial, representada como cuadros de color verde, adicional, se tiene la información de geo referencia de los centros de distribución que se tienen en operación actualmente; representados como triángulos azules.

En la red a modelar se cuenta con 6 plantas de producción (orígenes); esta es la red base sobre la cual se aplicará el modelo de optimización; para esto también se necesita conocer la siguiente información:

- Capacidad Instalada de producción (por tipo de producto): se debe conocer la capacidad de producción de cada planta, importante resaltar que cada planta produce productos diferentes, que varían según sus características físico – químicas y son importantes en la distribución del producto. (Vásquez & Corrales,

2017). Para este modelo, se tiene la premisa que la planta tiene capacidad instalada suficiente para no ser una restricción bajo la proyección de la demanda; generalmente la capacidad de producción de las plantas varia y está sujeta a cambios dadas inversiones en tecnología para mejorar su tasa de producción.

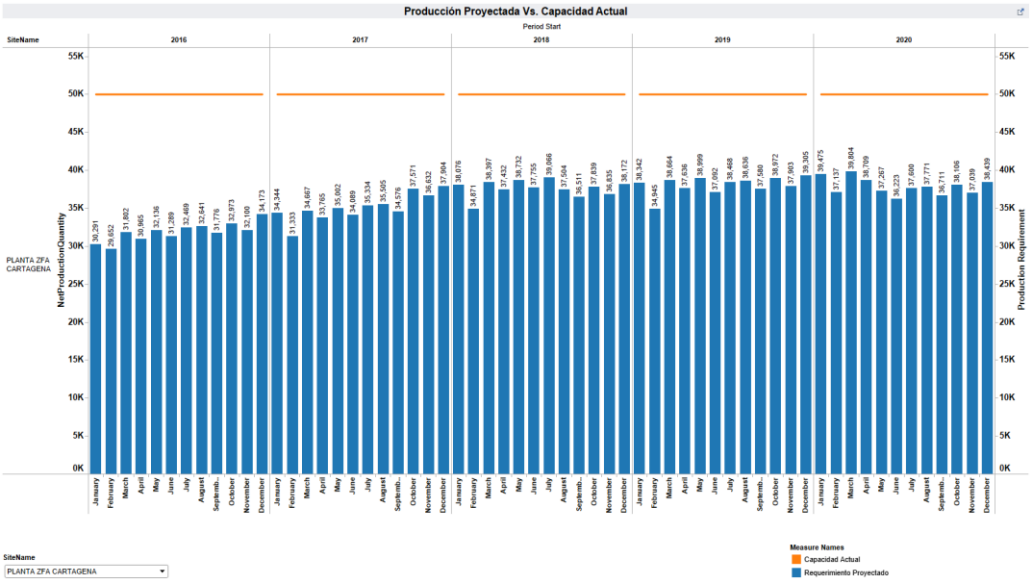


Ilustración 23. Producción proyectada Vs Capacidad instalada por planta (Elaboración propia)

En este trabajo la tasa de atención de las plantas de producción es superior a la demanda, por lo que no se consideran como restricción en el modelo.

- Ventanas Horarias de atención: una de las restricciones más importantes en los modelos de transporte son las ventanas horarias, las cuales son el intervalo de tiempo donde se puede realizar un cargue de producto para su posterior entrega a destino; cada planta maneja su propia ventana horaria y es importante al tener en cuenta esquemas operativos de transporte.

- Tiempos de cargue por tipo de vehículo: con el fin de calcular el tiempo de ciclo expresado en el planteamiento del problema, es importante conocer el tiempo estimado promedio del cargue de un vehículo en cada planta, y así, posteriormente poder calcular el número de ciclos al mes y todo lo que conlleva a los costos de distribución utilizados en el modelo.

Destinos finales (Clientes o Customer):

También conocidos como clientes finales, en el presente trabajo se clasifican en dos tipos: Cabeceras municipales y concreteras; para cada tipo de cliente se tiene la siguiente información:

- Geo-localización: Ubicación geográfica, en Latitud – longitud, que permite tener una ubicación exacta de los nodos donde se produce producto.

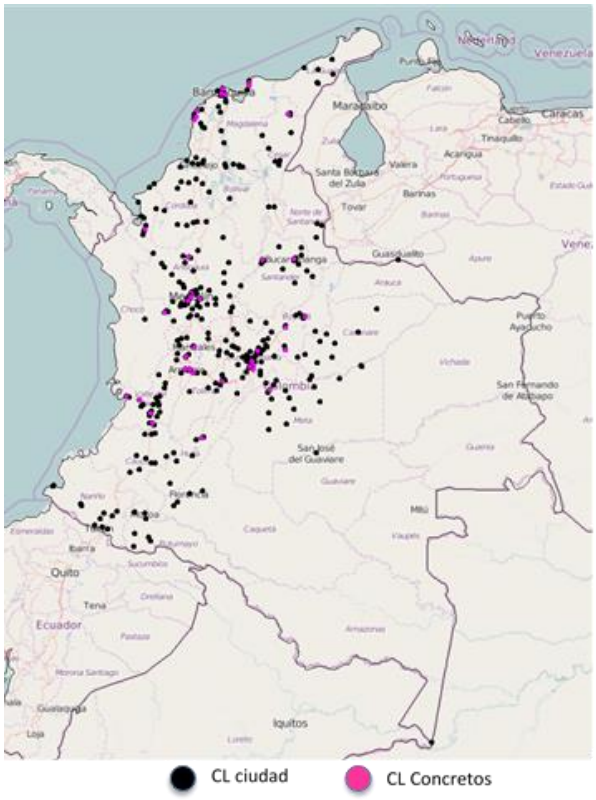


Ilustración 24. Ubicación geográfica por tipo de cliente (Elaboración propia)

Como se observa en la ilustración anterior, se diferencian dos tipos de clientes:

- **Cabeceras municipales:** Son todas aquellas obras que se encuentran ubicadas en un municipio y tienen una ventana horaria de 12 horas para el recibo de producto.

Ilustración 25. Clientes en cabeceras municipales (arqhys, 2017)

Este tipo de clientes es común, y tiene como característica que tiene muchas geo-referencias como se puede observar en la ilustración de ubicación geográfica por tipo de cliente (160 ubicaciones en el presente trabajo), pero su consumo de producto en volumen de demanda no es el pareto; adicional, por su condición de recibir producto en una ventana horaria tan reducida, son una restricción importante para ser atendido en rutas de doble tripulación.

Este tipo de clientes utiliza el cemento como materia prima para producir en la misma obra la producción de concreto premezclado, generalmente se mezcla el cemento con agregados y agua de una manera muy manual, una vez creado el concreto es bombeado directamente sobre la obra a construir.

- **Concretera:** Son todas aquellas obras que se encuentran ubicadas en un municipio, pero tienen como característica principal el almacenamiento en gran cantidad de cemento para luego convertirlo de una manera más avanzada en concreto premezclado mediante una planta concretera (mt, 2017), es importante resaltar que existen muchas fórmulas de concreto y varían en características físico-químicas, como lo puede ser su resistencia, color, fraguado y tiempo de secado (Guzmán, 2001); y logísticamente en el modelo tienen una ventana horaria de 24 horas para el recibo de producto; estas plantas están categorizadas específicamente como clientes ya que tienen restricciones particulares por tipos de vehículo y su gran volumen de demanda, que hace que sean parte importante en el modelo a optimizar.

Ilustración 26. Clientes concreteras (Sitsa, 2017)

En el modelo, se tiene como clientes a 55 plantas concreteras, especificando para cada una la demanda, características y restricciones asociadas.

- Ventana Horaria: como se nombró anteriormente, se denota como Ventana Horaria, aquel intervalo de tiempo donde es hábil realizar un cargue y/o un descargue según el nodo en que se realice el análisis, en este modelo se están representado dos tipos de ventana horaria: 12 horas, es decir, se tiene una restricción de atención de 12 horas diurnas, y 24 horas, donde se puede laborar todo el día sin restricción.

- Restricción de atención por tipo de vehículo: cada destino puede recibir producto en ciertas configuraciones de vehículo, estas restricciones están asociadas a movilidad, radios de giro y acceso a los destinos finales, restricciones de distribución en cada municipio, y si requiere de algún vehículo en específico para realizar el descargue; en el modelo, se analizan las restricciones de las obras ubicadas en una cabecera municipal y se toma como restricción para todo el municipio el escenario más ácido, es decir, el que cumple con todas las restricciones de las obras a ser atendidas, mientras para cada una de las

concreteras se detalla los tipos de vehículos que pueden ingresar a realizar el descargue.

- Tiempos de descargue por tipo de vehículo: al igual que los tiempos de cargue en planta, se incorpora en el modelo los tiempos de descargue estimados por destino asociado a cada tipo de vehículo, con el fin de estimar los tiempos de ciclo y poder calcular los costos logísticos de distribución.

- Pronóstico de Demanda: Se tiene por agregación mensual; diferenciando por tipo de producto (origen donde debe ser producido), la fluctuación mensual y la cantidad a ordenar, importante resaltar que la cantidad y la fluctuación están correlacionadas con la vida útil de los clientes obras y proyectos de infraestructura) y estacionalidad del mercado.

  Como se ilustra en la imagen “Demanda de los clientes por volumen” dada en la sección 1; se tiene la proyección de la demanda por cliente, se tiene la premisa de una demanda determinística y que fluctúa mes a mes con un comportamiento conocido, con una tendencia a incrementar en los próximos años; la demanda es por tipo de producto, entonces, independiente si se abastece directamente desde planta o se tiene un paso intermedio por un centro de distribución, e independiente del tipo de vehículo y tipo de tripulación en que es transportado para minimizar los costos, la demanda por tipo de producto esta correlacionada con la tasa de producción de cada planta.

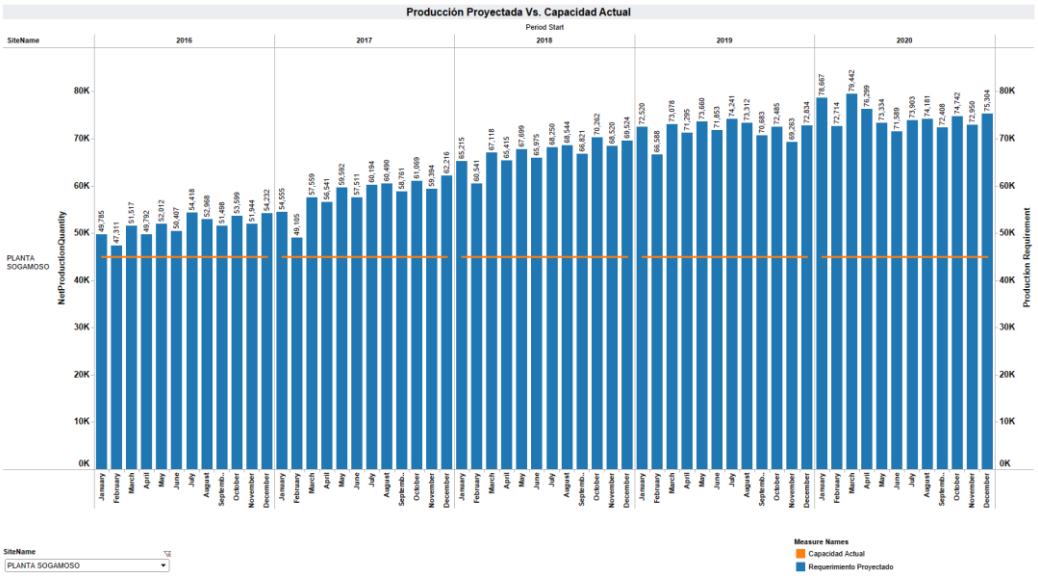


Ilustración 27. Proyección de la demanda para un origen mes a mes (Elaboración propia)

Así, se tiene la proyección mensual de cada origen para abastecer la necesidad de cada cliente.

Centros de distribución (Cedis, Hub o Facility):

Son aquellos nodos intermedios que se utilizan para vencer restricciones horarias y/o de distancias y para potenciar el uso de la doble tripulación; tienen como restricción principal que un centro de distribución solo puede entregar producto a un cliente final y no a un nodo de su misma categoría.

Como se observa en la ilustración 22 “Ubicación de orígenes y Cedi, red actual”, inicialmente se tienen 8 centros de distribución para lograr la cobertura ilustrada en la gráfica “Cobertura en doble tripulación y modelo eficiente, red actual” de la sección 1.

Como se explicó en el planteamiento del problema; el mayor reto es analizar si estos centros de distribución se deben de cerrar, se deben de mantener, reducir e inclusive, si es necesario abrir nuevos centros de distribución para optimizar la función objetivo del modelo. Además de saber en dónde deben de estar en definitiva los centros de distribución de la red optima, se debe definir su configuración, ya sea un Cedi formado por tolvas o por silos; en la tabla a continuación se presentan las generalidades e información utilizada en el modelo:

HUB (Creado con Tolvas desenganchadas)	CEDI (Creado con Silos de almacenamiento)
• Demanda mensual de los clientes • Dimensionar # de tolvas por tipo de producto • Un producto por Tolva • Inventario Inicial • $ Tolvas total del HUB + Terreno + personal de operación del nodo • $ de desmontar una tolva • Un solo tamaño de tolva S2; cada una con capacidad de 33.6 toneladas	• Demanda mensual de los clientes • Dimensionar # de silos por tipo de producto. • Un producto por Silo. • Inventario Inicial • $ Silo + montaje + Terreno + Personal de operación del nodo. • $ de desmontar un silo • Dos tamaños de Silo (1000 y 2000 toneladas). • Plazo del proyecto y estacionalidad de la demanda.

Tabla 3. Tipos de Cedi a modelar (Elaboración propia)

Como se describió en la sección 1, además de hallar la ubicación de los centros de distribución, se debe de analizar la mejor configuración para cada nodo, es allí donde se debe de evaluar mediante los costos y la demanda la mejor decisión, ya que si la demanda fluctúa mucho en los clientes que van a ser abastecidos por un hub, se incurre en costos de incrementar o disminuir la capacidad mes a mes como es el caso de las tolvas, o de tener una capacidad instalada ociosa como lo son los silos.

Importante resaltar que si el centro de distribución concentra varios tipos de producto; cada tipo de producto debe ser almacenado en un dispositivo diferente, por ejemplo, en un silo solo se puede almacenar producto del mismo tipo, si hay dos tipos de producto, se requieren dos silos, o un silo y tolvas etc; adicional, el abastecimiento a los silos desde la planta siempre se realiza en vehículos SCS3, mientras el abastecimiento a tolvas siempre se debe realizar en equipos CCS2, además los equipos dobletroque solo se abastecen de silos en caso de cargar en un Centro de distribución.

Todos los viajes que salen de un centro de distribución hacia clientes se deben de realizar en tolvas S2.

Red Actual:

A continuación, se presenta un resumen de la esquematización del problema a resolver:

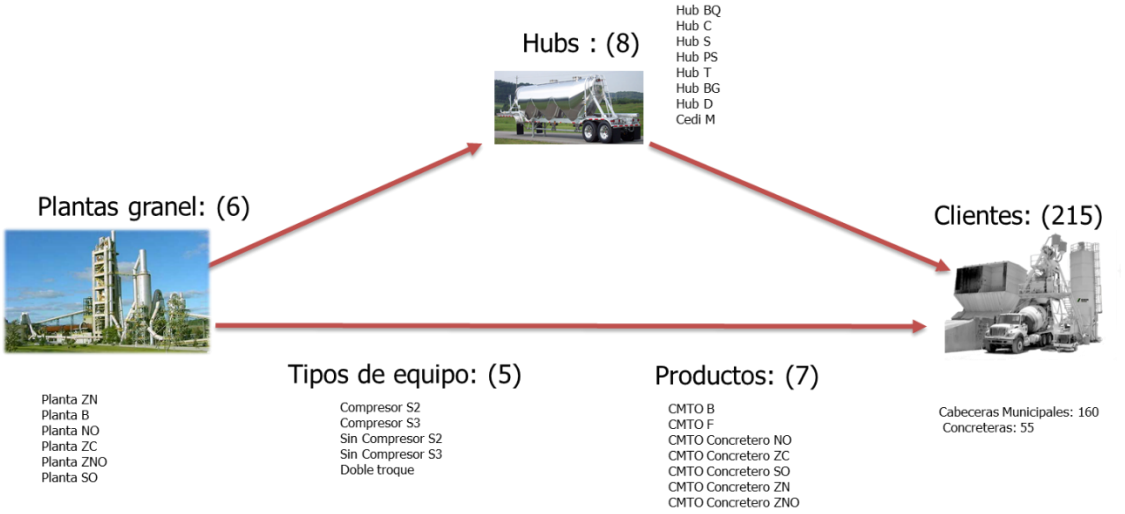


Ilustración 28. Red actual. (Elaboración propia)

La ilustración anterior, representa la complejidad de la red de transporte modelada. donde se tienen más de 20.000 ecuaciones asociadas a las restricciones y 77.000 posibles conexiones.

Restricciones:

- PL B sólo abastece Hub PS
- El cemento B sólo se produce en Planta B.
- El cemento B solo se transporta en tracto camión.
- El cemento F sólo se produce en planta SO.
- El único cliente que demanda cemento F es Manizales.
- Se especifica para cada cliente que restricción de tipo de vehículo tiene.
- Se especifica la restricción de ventana horaria que tiene cada cliente.
- Clientes que tienen como restricción tolva S2, solo se puede atender con S2, pero los clientes que tienen como restricción tolva S3 se pueden atender con S2 o S3.
- Clientes que tienen como restricción el compresor solo se puede abastecer con cabezotes con este accesorio, pero lo clientes que no necesitan compresor se pueden atender con o sin compresor.
- Clientes que solo se pueden abastecer en dobletroque se deben atender con esta configuración, pero esta configuración puede atender cualquier otro cliente.
- Los equipos dobletroque solo se pueden abastecer desde plantas o centros de distribución con configuración de Silo.
- Se tienen las condiciones para montar doble tripulaciones asociadas a las ventanas de origen y destino, y tiempos de ciclo de la operación, traducidos a una distancia entre un origen y un destino en términos de distancia (kilómetros).
- Una Planta puede abastecer un Cedi o un cliente final directamente, pero no hay conexiones entre plantas
- Un Cedi sólo puede abastecer clientes finales, no hay abastecimiento de producto a planta ni entre Cedis.

- No se puede mezclar tipo de producto dentro de una tolva o de un silo
- Los centros de distribución conformados por tolvas, solo pueden trabajar con la configuración S2.
- El abrir un centro de distribución trae consigo un costo asociado al montaje, al igual que la decisión de disminuir la capacidad instalada para ajustarla a la demanda, ya que también se tiene penalidad por el desmonte o reducción de capacidad instalada de almacenamiento del centro de distribución.

Para realizar el modelo, se deben de trabajar todos los costos en unidad de pesos por tonelada-kilómetro, es decir, se deben de llevar todos los costos fijos y variables descritos en la sección 1 a la unidad de CLD para poderlos ingresar en la herramienta por tipo de vehículo.

El primer paso en la modelación es tener la ubicación de los centros de distribución de acuerdo al cumplimiento de la proyección de la demanda, para esto se realizan los siguientes pasos en el Software “Supply Chain Guru”, modulo: “Greenfield Optimization”.

Los pasos que se realizaron son:

1) Realizar una validación del modelo actual, sin incluir costos, sólo ingresando demanda histórica y analizando la confiabilidad del sistema frente a los flujos de productos; una vez calibrado el modelo, se puede continuar con el próximo paso.

   Según los resultados, el modelo cumplió con un 99.9% de asertividad, frente al flujo de producto.

2) Ingresar la demanda pronosticada y los nodos origen (plantas), sin ingresar ningún Cedi actual, con el fin de conocer los puntos ideales para ubicar los centros de distribución bajo la premisa de que no existiese ninguno.

3) Se crea un segundo escenario, esta vez incorporando los Cedi actuales y sin contemplar la opción de cerrarse un nodo ya existente, se analiza la nueva propuesta de cobertura y nuevos nodos que se sugiere abrir.

4) Se crea un tercer escenario, uniendo los lugares que salieron como Cedi potenciales en los dos escenarios anteriores, en cada ubicación se crea una configuración de tolva y una configuración de silos.

5) Se ingresan los costos asociados al modelo, los costos de cerrar un Cedi actual, además de los costos de abrir un nuevo Cedi de cada configuración, y los costos de todas las rutas por tipo de vehículo, se procede a realizar una segunda validación de los costos, y se analiza el comportamiento mediante simulaciones controladas para corroborar el comportamiento correcto y lógico del modelo; en la validación de los costos fijos se tuvo una desviación de +0.7%; mientras la desviación de los costos variables fue de 0.1%; importante resaltar que según (Llamasoft, 2017) su herramienta permite tomar decisiones confiables si la desviación es $\pm$ 7%; teniendo en el modelo realizado una precisión extremadamente confiable.

6) Una vez validado el modelo en flujo de producto y costos, y teniendo todos los candidatos a Cedi con la información, restricciones y costos requeridos, se optimiza utilizando el módulo de “Network Optimization”; obteniendo así una red con los orígenes fijos, pero con nueva ubicación y configuración de los centros de distribución.

7) Finalmente, mediante “Product Flow Optimization” crea el flujo de producto, teniendo en cuenta que en el modelo existen varios tipos de producto; tiene un balance entre el valor de las rutas, la frecuencia de abastecimiento, el costo de inventario y el tiempo de abastecimiento requerido

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Validación del modelo:

Como se nombró en la sección anterior, se realizaron dos validaciones para conocer el comportamiento del modelo base y analizar que tanto reflejaba la realidad histórica, y que tan acertado era el comportamiento.

La primera validación se realizó respecto a los flujos de producto, es decir, dada una demanda histórica, que tan bien se asignaban los flujos de producto, la asignación de vehículos, su respectiva configuración, el cumplimiento de restricciones de ventanas horarias, de tipo de producto etc., obteniendo una desviación de 0.1% con respecto al comportamiento real obtenido en el intervalo de tiempo de datos ingresados (12 meses correspondientes a enero – diciembre del 2016).

Ilustración 29. Validación y análisis de flujo de producto, Red Actual (Elaboración propia)

La ilustración anterior valida el comportamiento de flujo de producto y lo traza sobre la malla vial de las vías principales de Colombia, garantizando la medición de distancias entre nodos y el correcto uso de las vías primarias aptas para el transporte de carga pesada en el país. (Mintransporte, 2017)

La segunda validación se realiza respecto a los costos, y se realizan escenarios para comprobar que los costos fijos de la red y de los vehículos y los costos variables se ingresaron de manera correcta a las tablas, además de ingresar los costos de abrir y cerrar un Cedi según su configuración, la desviación frente a los costos fijos fue de 0.1% y la de los costos variables fue de 0.7% con respecto a la realidad en el intervalo de tiempo que fueron tomados los datos (mismos meses de la primera validación).

Ilustración 30. Resultados de validación del Baseline (Elaboración propia)

Según (Llamasoft, 2017), para tomar decisiones estratégicas basados en su software comercial, se sugiere que la desviación sea inferior a un 7%; por lo que el modelo tiene una alta confianza y se procede a realizar las optimizaciones y tomas de decisiones a futuro basados en el modelo propuesto.

Análisis de Greenfield:

Al tener el modelo calibrado y validado, se procede con el primer paso de la optimización, donde se ingresa todo el pronóstico de la demanda para los periodos a evaluar, en este caso; los 48 meses comprendidos entre el año 2017 al 2020. Para eso se realizan dos escenarios en este módulo:

- Escenario 1: Propuesta de nuevos Cedis sin contemplar cobertura actual:

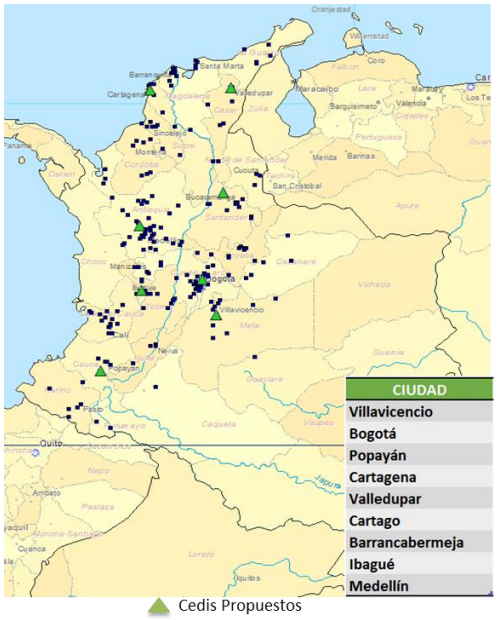


Ilustración 31. Propuesta nuevos Cedis sin cobertura actual (Elaboración propia)

Se ingresa toda la información requerida en el módulo, principalmente la que corresponde a los clientes, su ubicación y volumen de demanda; la herramienta realiza un análisis de centros de masa y sugiere una ubicación para evaluar posibles centros de distribución, cumpliendo con la restricción de tener la demanda cubierta en un rango de abastecimiento inferior a 140 kilómetros de radio.

Se obtiene como resultados unas ubicaciones de centros de distribución a evaluar como posibles candidatos.

- Escenario 2: Propuesta de nuevos Cedis contemplando cobertura actual:

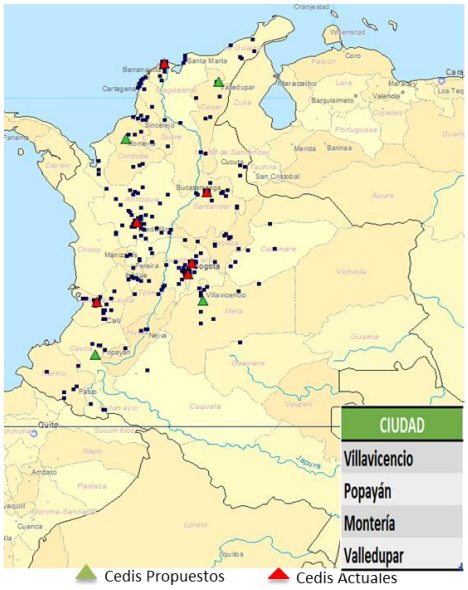


Ilustración 32. Propuesta de nuevos Cedis contemplando cobertura actual (Elaboración propia)

Se incorpora al modelo la ubicación actual de las plantas para obtener un escenario de donde sería ideal tener los centros de distribución si no existieran costos de cerrar los centros de distribución actuales ni de abrir nuevos centros de distribución.

Network Optimization:

Luego de tener los candidatos sugeridos en el módulo de Greenfield, el cual toma decisiones basados en centros de masa y demandas, se procede a ingresar toda la información al módulo de Network; este módulo requiere la información completa descrita en tablas nombradas en la sección 3.6; donde tienen en cuenta todos los nodos actuales, además de los nodos candidatos sugeridos en los dos escenarios en Greenfield, incorpora todos los costos de apertura y cierre, y además de decidir la ubicación, se debe de definir la configuración de cada centro de distribución, obteniendo el siguiente resultado:

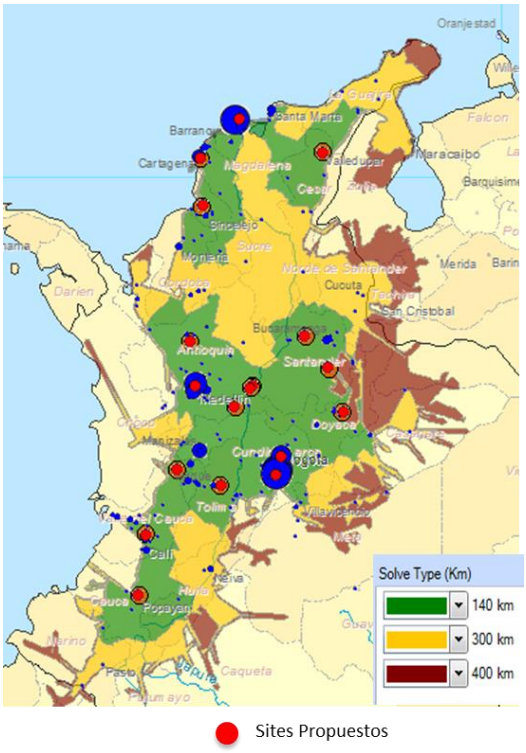


Ilustración 33. Cobertura de red optimizada (Elaboración propia)

Nótese en la ilustración de “Cobertura de red optimizada”, que cada círculo rojo representa las 6 plantas iniciales (las cuales no se sometieron a evaluación de apertura o cierre de nuevos orígenes, debido al alto costo asociado a esta operación ya que la inversión a 4 años con la información con la que se cuenta no es suficiente para este tamaño de inversiones); pero adicional a los 6 orígenes, se tienen 11 centros de distribución, donde se resalta la permanencia de 7 de los 8 centros de distribución con lo que cuenta actualmente la red; y la apertura de 4 nuevos centros de distribución.

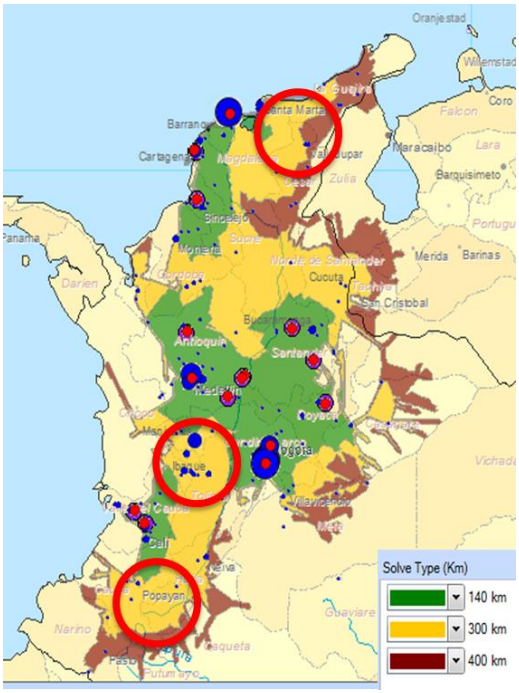


Ilustración 34. Cobertura de la Red Base (Elaboración propia)

Obsérvese que, al comparar la nueva red, con la actual, se tiene una cobertura fortalecida para cubrir la zona norte del país, la zona sur, y principalmente la zona del eje cafetero; adicional, el modelo optimo no cubre el 100% del volumen de la demanda en zona verde (doble tripulación), ya que para implementar este esquema en ciertas zonas el costo de invertir en la apertura de un centro de distribución que permita este abastecimiento no se justifica pero se compensa al abastecer el cliente en tripulación sencilla, principalmente por el bajo volumen de demanda de estos clientes.

De los 11 centros de distribución se obtienen 3 con configuración de Silo:

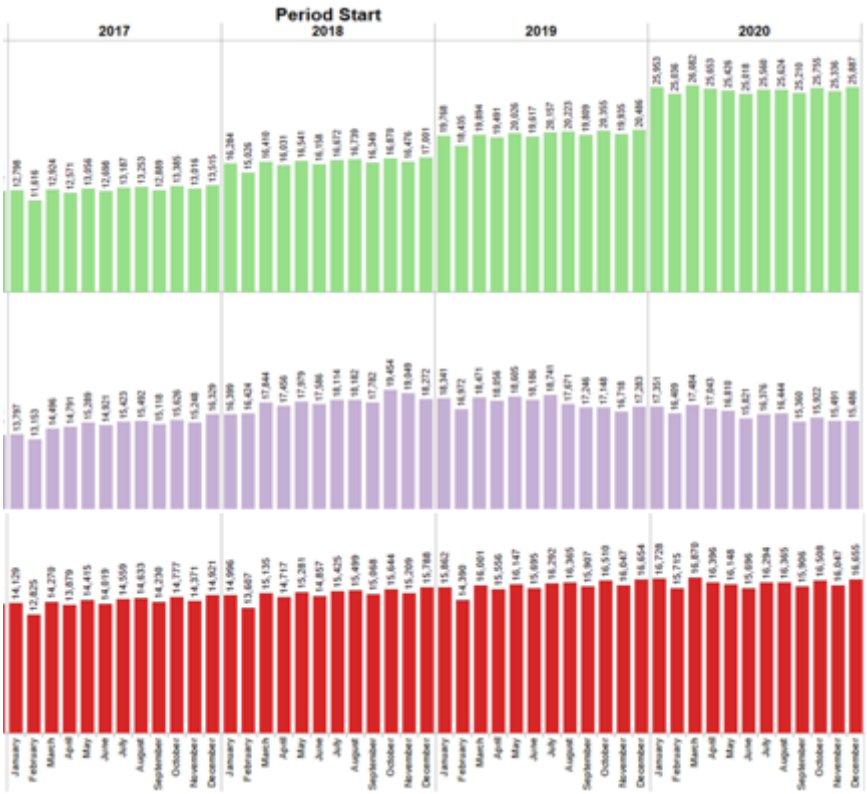


Ilustración 35. Comportamiento de la demanda mes a mes de los Cedis de configuración Silos (Elaboración Propia)

Estas tres configuraciones están ubicadas para atender el 60% de la demanda a nivel nacional, tiene en cuenta la proyección de crecimiento acelerado de volumen de demanda en algunas zonas, principalmente a partir del año 2018. El software sugiere tener la instalación desde el año 2017 y tener capacidad ociosa en el Silo hasta llegar a la capacidad requerida.

Se debe de resaltar que estos tres centros de distribución ya estaban en la red actual, pero el centro de distribución representado con las barras de color verde y el centro de distribución representado con las barras rojas estaban formados por tolvas, y la decisión es cerrar esa configuración y conformar un centro de distribución formado por silos, y mantener con la configuración actual el centro de distribución de color morado.

Analizando a detalle mes a mes los resultados de la configuración de tolvas se tienen:

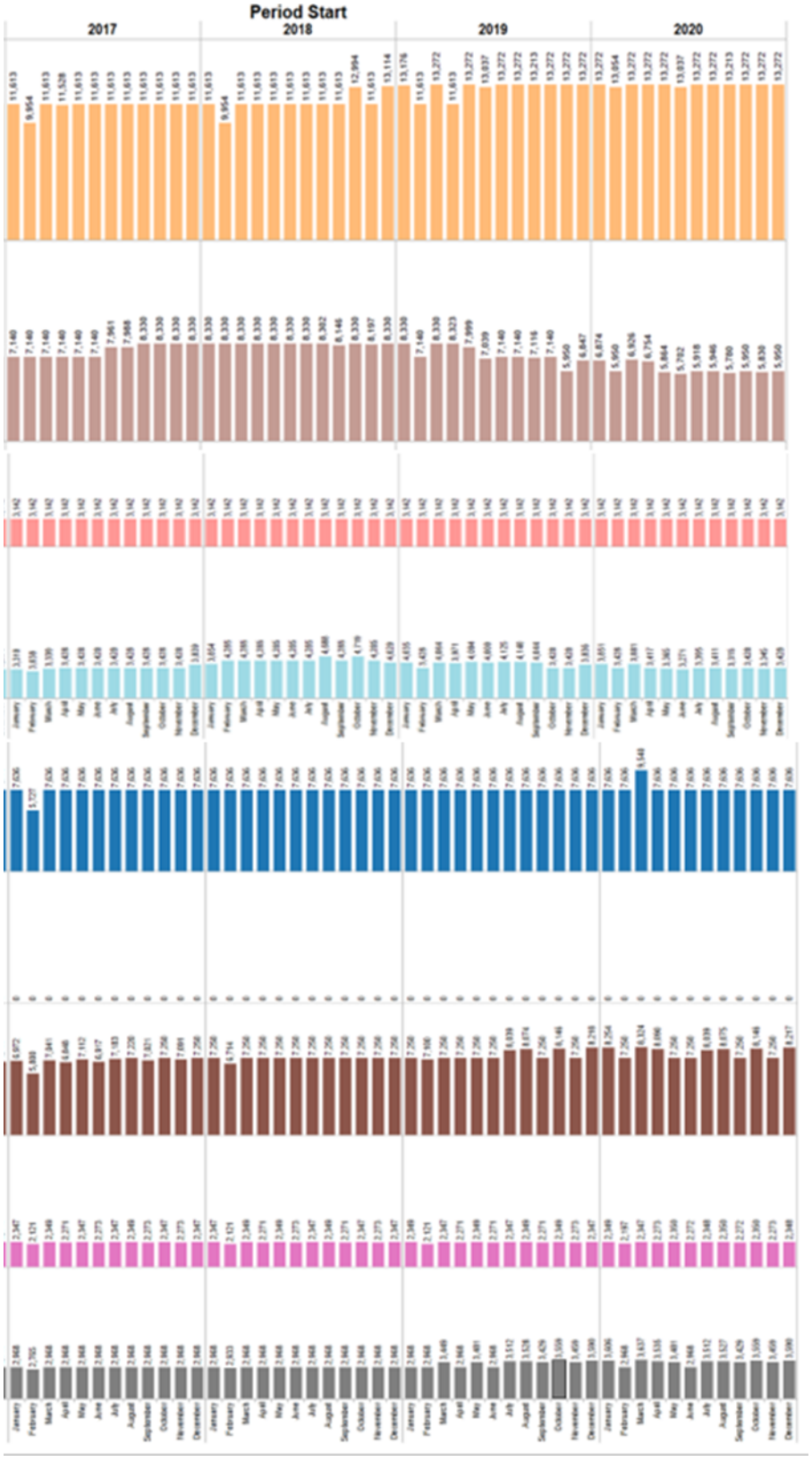


Ilustración 36. Comportamiento de la demanda mes a mes de los Cedis de configuración Tolvas (Elaboración Propia)

Al analizar la ilustración anterior, se observa que los centros de distribución conformados por tolvas tienen un volumen muy inferior comparado con los silos (hasta 10 veces

inferior en demanda), además se puede notar que desaparece el volumen del sexto centro de distribución, lo que sugiere el cierre de dicho nodo.

Se garantiza un cubrimiento del 95% de la demanda en doble tripulación, y basado en los resultados se obtiene una disminución en el CLD del 7%.

Tiempo Computacional:

El modelo se implementó en Supply Chain Guru de la casa Llamasoft (Llamasoft, 2017) y las corridas son realizadas en un computador Lenovo Core i5-4300U Cpu @2.49 Ghz con 16 Gb de RAM en un sistema operativo de 64 bits; teniendo un tiempo de procesamiento en la optimización de 12 horas.

6. CONCLUSIONES

Debido a la complejidad del problema de optimización (ver sección 3.2 y 3.3) y teniendo en cuenta que el problema de diseño de redes de distribución de basa en el problema de localización de instalaciones con restricción de capacidad, y este se encuentra en la categoría de complejidad matemática $NP-Hard$, se utiliza un software comercial especializado en la solución de este problema, el cual no garantiza un óptimo global pero genera muy buenos resultados en las decisiones involucradas en el modelo.

Este trabajo no se enfoca en generar una metodología de solución (algoritmo de optimización) pero si contempla al detalle los componentes del sistema de la red de transporte de cemento a granel para una cementera, y lo modela de forma precisa teniendo en cuenta los costos y restricciones que permiten tomar decisiones a nivel estratégico. Más allá del uso de una herramienta para su solución, el trabajo representa una muestra precisa de todos los componentes que deben tenerse en cuenta para modelar la red de transporte de este tipo de producto y para implementarla y obtener los resultados de un caso de aplicación real.

En los resultados de validación del presente trabajo se obtiene que el modelo tiene una alta capacidad de reflejar la realidad del transporte y los costos asociados al sistema real, además se obtiene una propuesta de red de transporte que cumple con las restricciones planteadas y un resultado de ahorro muy interesante en términos de costo logístico de distribución, el cual es altamente confiable dados los excelentes resultados de la validación histórica

7. TRABAJO FUTURO

Integrar al modelo de planeación de operaciones la cadena de suministro completa del cemento, iniciando por la producción de agregados donde se integren los procesos de producción y transporte, así como el tiempo de almacenamiento, ya que el problema modelado asumía procesos continuos en una misma instalación y capacidad de producción ilimitada en cada origen.

Modelar la red de abastecimiento completa, desde la explotación de agregados hasta la entrega final de concreto premezclado, ya que el transporte del cemento es el eslabón intermedio en dicho proceso que pasamos de una materia prima a un verdadero producto terminado.

Ingresar en el modelo una demanda estocástica, ya que realmente se puede presentar variabilidad que este parámetro, reflejando así la representación de un sistema más real para tomar las mejores decisiones.

Incluir temas y políticas de manejo de inventario como lo puede ser el VMI (Vendor Managed Inventory) en los centros de distribución, para poder optimizar la integración entre transporte y almacenamiento en el mundo del cemento en Colombia.

Modelar el dimensionamiento de flota para cumplir con la proyección de la demanda, y todas las restricciones del modelo, dada la red de distribución óptima obtenida en este trabajo.

Modelar la parte operativa detallada, día a día de las rutas de los vehículos y conductores y de los consumos de tiempos y recursos de vehículos y conductores, con el fin de obtener indicadores de eficiencia operativa para su control.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ambrosino, D., & Scutella, M. G. (2005). Distribution network desing: New problems and related models. *European Journal of operational research* , 610 - 624.

ANI. (08 de 04 de 2017). *Agencia Nacional de Infraestructura*. Obtenido de https://www.ani.gov.co/proyecto/general/cuarta-generacion-de-concesiones-1068

Argueta, C. M., Agudelo, I., & Cardona, O. C. (2016). Planeación por escenarios: un caso de estudio en una empresa de consultoría logística en Colombia. *Estudios Gerenciales*, 96-107.

arqhys. (13 de 03 de 2017). *arqhys*. Obtenido de http://www.arqhys.com/construccion/obras-construccion-edificios.html

Banco Mundial . (6 de 10 de 2016). Obtenido de http://datos.bancomundial.org/indicador/LP.LPI.OVRL.XQ

CAÑÓN, A. L. (2008). *LA INDUSTRIA DEL CEMENTO EN COLOMBIA DETERMINANTES Y COMPORTAMIENTO DE LA DEMANDA.*

Carmextrailers. (14 de 4 de 2017). *Carmex Trailers*. Obtenido de http://www.carmextrailers.com/about.asp

Correa Espinal, A. A., Cogollo Flórez, J. M., & Salazar López, J. C. (2010). Evaluación del efecto de la conducción eficiente en el consumo de combustible en vehículos de transporte de carga pesada usando diseño de experimentos. *Producción + Limpia, 5*(1).

DANE. (20 de 02 de 2017). *Estadísticas de cemento gris - ECG*. Obtenido de https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/estadisticas-de-cemento-gris

Eskandarpour, M., Dejax, P., & Péton, O. (2016). A large neighborhood search heuristic for supply chain network design. *Computers and Operations Research*, 23-37. Obtenido de www.elservier.com/locate/cor

Fara-internacional. (14 de 4 de 2017). Obtenido de http://fara-internacional.com/archivos/635

Gartner. (27 de 02 de 2017). *Gartnet Technology*. Obtenido de http://www.gartner.com/technology/home.jsp

GIFFORD, T. L. (2010). OPERATIONS RESEARCH APPLICATIONS IN TRUCKLOAD FREIGHT TRANSPORTATION NETWORKS. *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*.

Guzmán, D. S. (2001). Tecnología del concreto y del mortero. *Biblioteca de la cosntrucción*.

HEIL. (14 de 10 de 2016). *HEIL TRAILER.* Obtenido de http://www.heiltrailer.com/products/aluminum-dry-bulk/

I&DL, E. (2016). *Canasta de costos Transportempo.* Medellín.

I&DL, E. (2016). *Canon de arrendamiento de Renting Colombia.* Medellín.

I&DL, E. (2016). *Distancia entre nodos para implementar doble tripulación.* Medellín.

Kaligari, E. P., & Rueda, W. J. (2015). OPTIMIZATION METHODS FOR THE INVENTORY ROUTING PROBLEM WITH HARD TIME WINDOWS. *revista Ingeniería Industrial*, 31-49.

Kenworth. (14 de 4 de 2017). *Kenworth Colombia*. Obtenido de http://kenworthcolombia.com/vehiculos/tractocamiones/t800

Laporte, G. (1988). Location - Routing problems. *B.L. Golden, A.A. Assad (Eds.), Vehicle Routing: Methods and studies*, 163-198.

Llamasoft. (27 de 02 de 2017). *Llamasoft Supply Chain By Design*. Obtenido de http://llamasoft.com/es/

LÓPEZ, D. M. (2011). CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE DISTRIBUCIÓN DE LAS EMPRESAS PROVEEDORAS DE CEMENTO Y MATERIALES AGREGADOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE PEREIRA. *Trabajo de investigación para optar por el título de Administrador de empresas*.

Magnanti, T. L., & Wong, R. T. (2016). Network Design and Transportation Planning: Models and Algorithms. *INFORMS*.

Mattes Insights. (6 de 10 de 2016). Obtenido de http://jonatasmattes.blogspot.com.co/2015/05/planejamento-estrategico.html

Mintransporte. (16 de 4 de 2017). *Ministerio de Transporte de Colombia*. Obtenido de https://www.mintransporte.gov.co/Glosario

Mirledy, T.-O. E., Fredy, F.-B. J., & Alfonso, G.-R. R. (2016). Mathematical Model for Capacitated Location Routing Problem with Private Fleet and Common Carrier. *Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XVII (número 3)*, 357-369.

Montoya, J. A., Vélez, M. C., & Villegas, J. G. (2012). CAPACITATED FACILITY LOCATION PROBLEM WITH GENERAL OPERATING AND BUILDING COSTS. *CLAIO-SBPO*, 1628-1637.

mt, R. (14 de 04 de 2017). Obtenido de http://www.revistamt.com.br/index.php?view=article&catid=21%3Aespanol&id=28%3Aplantas-de-hormigon&format=pdf&option=com_content

O.ME.P.S. (14 de 10 de 2016). *O.ME.P.S. Silotrailers.* Obtenido de http://www.omeps.it/home.asp

Odette. (6 de 10 de 2016). *Técnicas para la Optimización de Rutas de Transporte y Distribución* . Obtenido de http://www.odette.es/SGC/downloads/CAM/Vigilancia_Tecnologica_Tecnicas_Optimizacion_Rutas.pdf

Ogunbanwo, A., Williamson, A., Veluscek, M., Izsak, R., Kalganova, T., & Broomhead, P. (2014). Transportation network optimization. . *Encyclopedia of Business Analytics and Optimization*, 2570-2583.

Portafolio. (14 de 4 de 2017). Obtenido de http://www.portafolio.co/economia/gobierno/evidencias-en-el-caso-de-corrupcion-de-odebrecht-en-colombia-502898

RAE, R. A. (14 de 10 de 2016). *Diccionario de la lengua española.* Obtenido de http://dle.rae.es/?id=ZzMhmEV

Rancourt, M., Cordeau, J., & Laporte, G. (2010). Long-Haul Vehicle Routing and Scheduling with Working Hour Rules. *CIRRELT*.

RemolquesCruz. (14 de 4 de 2017). *Remolques Cruz* . Obtenido de http://remolquescruz.com.mx/tolvas/

Rezapour, S., Zanjirani Farahani, R., & Zhang, D. (2016). Strategic design of a competing supply chain network for markets with deterministic demand. *IMA Journal of Management Mathematics*, 109-141.

Romarco. (14 de 10 de 2016). *Romarco S.A.* Obtenido de http://www.romarco.co/

SCUTTI. (14 de 10 de 2016). *SCUTTI.* Obtenido de http://www.scuttinicola.com/

SICETAC. (4 de 10 de 2016). Obtenido de http://190.217.54.197:8080/sirtccWeb/costoOperacion.jsf

Sitsa. (13 de 03 de 2017). *Sitsa*. Obtenido de http://www.sitsa.com.mx/marcas/schwing-stetter/productos/plantas-mezcladoras-de-concreto

SNCCTI. (6 de 10 de 2016). Obtenido de http://www.colombiacompetitiva.gov.co/prensa/2016/Paginas/Indice-de-Desempeno-logistico-del-Banco-Mundial.aspx

TURBOSQUID. (14 de 10 de 2016). *TURBOSQUID.* Obtenido de http://www.turbosquid.com/3d-models/3d-chicken-silo-feed-model/682534

Üster, H., & Kewcharoenwong, P. (2011). Strategic Design and Analysis of a Relay Network in Truckload Transportation. *INFORMS*, 505-523.

Vásquez, B., & Corrales, S. (2017). Industria del cemento en México: Análisis de sus determinantes. *Revista Problemas del Desarrollo*, 113-138. Obtenido de http://probdes.iiec.unam.mx

Veluscek, M., Kalganova, T., Broomhead, P., & Grichnik, A. (2015). Composite goal methods for transportation network optimization. *Expert Systems with Applications*, 3852-3867.

Vidović, M., Popović, D., & Ratković, B. (2013). *Mixed integer and heuristics model for the inventory routing problem in fuel delivery.* International Journal of Production Economics.

Webb, M. (1968). Cost Functions in the location of depots for multiple delivery journeys. *Operational Research Quarterly* , 311-328.

Wirdianto, E., Qi, H. S., & Khan, M. K. (2011). *Simulation Model of Maritime Inventory Routing Problem with Particular Application to Cement Distribution.*

Wu, P., Hartman, J. C., & Wilson, G. R. (2015). An Integrated Model and Solution Approach for Fleet Sizing with Heterogeneous Assets. *INFORMS*, 87-103.