



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Optimización de una red de transporte aplicado al sector de cemento a granel en Colombia

Rubén Esneyder Morales Barbosa

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión
Medellín, Colombia
2022

Optimización de una red de transporte aplicado al sector de cemento a granel en Colombia

Rubén Esneyder Morales Barbosa

Trabajo final de Maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Ingeniería de Sistemas

Directora:

Ph.D., Patricia Jaramillo Álvarez

Línea de Investigación:

Investigación de operaciones - Logística y producción

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación Ciencias de la Decisión

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión

Medellín, Colombia

2022

Dedicatoria

*A mi compañera fiel Camila Castro, mi hijo Matías y
mis amados padres Martha y Gerardo*

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Rubén Esneyder Morales Barbosa

16/04/2022

Agradecimientos

A Dios por darme la oportunidad de vivir bajo su protección y bendición.

A mi esposa e hijo, Camila Castro y Matías Morales quienes me han acompañado y apoyado durante este proceso de construcción de la tesis.

A mis padres, Martha Barbosa y Gerardo Morales quienes me han formado desde el ejemplo, responsabilidad, disciplina y amor. A mi familia por su amor y apoyo incondicional.

A mi directora, Patricia Jaramillo por su comprensión, paciencia y el acompañamiento brindado para culminar con éxito este reto personal.

A Sergio Montoya, Fabio Carvajal y Sebastián Atehortúa por su apoyo en el momento de facilitar los espacios para desarrollar las ideas y proyectos. A Transportempo SAS por el apoyo económico y así tener la oportunidad de estudiar.

A la Universidad Nacional de Colombia, por la formación y competencias adquiridas para mi vida profesional con los principios de “Trabajo y Rectitud”.

Y a todas las personas que me expresaron su apoyo durante el tiempo de formulación y desarrollo de esta tesis.

Resumen

OPTIMIZACIÓN DE UNA RED DE TRANSPORTE APLICADO AL SECTOR DE CEMENTO A GRANEL EN COLOMBIA

Esta tesis tiene como finalidad diseñar un modelo que optimice la red de transporte de cemento a granel en Colombia. El estudio, evaluación, modelación y optimización constante de las redes de transporte permiten a las empresas tener ahorros significativos al identificar orígenes-destinos óptimos garantizando altos niveles de servicio en cantidad y tiempo de entrega. Para el desarrollo de esta tesis, se usa como fuente de información los datos de operación de una empresa colombiana de transporte de carga que presta sus servicios a una reconocida compañía productora de cemento a nivel nacional. Los resultados parten desde el análisis descriptivo de la demanda, la construcción de las matrices de kilómetros y costos, la modelación matemática del problema y la estimación del parámetro índice de costos del transporte de carga (ICTC) para hacer uso del software académico en el ejercicio de optimización. Posteriormente, se realiza la validación del modelo con respecto a la realidad de los últimos 10 meses alcanzando un ajuste del 95%. Se modela y optimiza los 3 años siguientes de operación logrando un ahorro potencial cercano al 5% permitiendo apalancar decisiones claves de negocio referente al ingreso y salida de vehículos teniendo en cuenta los dimensionamientos necesarios para atender la demanda.

Palabras clave: Optimización, Red de Transporte, Origen-Destino Óptimo, Dimensionamiento de vehículos, Demanda, Programación Entera Mixta.

Abstract

OPTIMIZATION OF A TRANSPORTATION NETWORK APPLIED TO THE BULK CEMENT SECTOR IN COLOMBIA

The purpose of this thesis is to design a model that optimizes the bulk cement transport network in Colombia. The study, evaluation, modeling, and constant optimization of transport networks allow companies to have significant savings by identifying optimal origins-destinations, guaranteeing high levels of service in terms of quantity and delivery time. For the development of this thesis, the operation data of a Colombian cargo transport company, which provides its services to a recognized cement producer company at the national level, is used as a source of information. The results start from the descriptive analysis of the demand, the construction of the kilometers and cost matrices, the mathematical modeling of the problem and the estimation of the freight transportation cost rate (ICTC) parameter to make use of the academic software in the optimization exercise. Subsequently, the validation of the model is carried out regarding to the reality of the last 10 months, reaching an adjustment of 95%. The following 3 years of operation are modeled and optimized, achieving potential savings close to 5%, allowing leverage of key business decisions regarding the entry and exit of vehicles, considering the vehicle sizing necessary to meet demand.

Keywords: Optimization, Transport Network, Optimal Origin-Destination, Vehicle Sizing, Demand, Mixed Integer Programming.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas	XV
Lista de símbolos y abreviaturas	XVII
Introducción.....	1
1. GENERALIDADES	3
1.1 Motivación	3
1.2 Descripción de la empresa objeto de estudio	5
1.3 Modelo de operación actual	6
1.4 Decisiones claves del negocio.....	6
1.5 Justificación.....	7
1.6 Objetivos	7
1.6.1 Objetivo general.....	7
1.6.2 Objetivos específicos.....	8
1.7 Metodología para el desarrollo del trabajo.....	8
2. ESTADO DEL ARTE	11
2.1 Problemas asociados	12
2.2 Antecedentes	14
2.3 Transporte de cemento a granel.....	16
2.4 Modelación de una red de transporte	17
2.5 Optimización de redes logísticas	18
2.6 Programación entera mixta (MIP).....	20
2.7 Programación entera mixta relajada (RMIP).....	20
3. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS Y SELECCIÓN DE SOFTWARE	23
3.1 Fuentes de datos.....	24
3.2 Matriz de kilómetros	29
3.3 Matriz de costos	34
3.4 Procesamiento de datos.....	37
3.5 GAMS	38
3.5.1 CPLEX.....	39
3.6 Servidor NEOS.....	40
3.6.1 COIN - CBC.....	41

4. FORMULACIÓN DEL MODELO	43
4.1 Descripción general	43
4.2 Modelo de optimización propuesto.....	44
4.2.1 Definición de conjuntos	44
4.2.2 Definición de parámetros matriciales.....	45
4.2.3 Definición de parámetros escalares.....	46
4.2.4 Definición de variables	47
4.2.5 Definición de restricciones.....	48
4.2.6 Función objetivo	52
4.3 Estimación parámetro ICTC.....	53
4.3.1 Proyecciones ICTC 2022 – 2024.....	54
4.4 Validación del modelo propuesto	56
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	63
5.1 Generalidades	63
5.2 Red transporte, dimensionamiento de vehículos y su costo óptimo año 2023... 64	
5.3 Red transporte, dimensionamiento de vehículos y su costo óptimo año 2024... 68	
5.4 Red transporte, dimensionamiento de vehículos y su costo óptimo año 2025... 72	
5.5 Caso aplicado escenario 1: cambio de tripulación.....	75
5.6 Caso aplicado escenario 2: densificación de cargue.....	78
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
6.1 Conclusiones	81
6.2 Recomendaciones	83
A. Anexo: Modelo en GAMS para la red de transporte 2023	85
Bibliografía	101

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Concesiones viales 4G.....	4
Figura 1-2: Ubicación actual de las plantas productoras de cemento a granel.....	5
Figura 2-1: Transporte de cemento a granel.....	17
Figura 2-2: Cadena de suministro.....	19
Figura 3-1: Valores agregados del sistema S/4HANA en ERP SAP. Elaboración propia a partir de información publicada en la web de SAP.....	24
Figura 3-2: Tipos de distribución alrededor de la media.	25
Figura 3-3: Densidad de probabilidad de la demanda en toneladas para el destino Bogotá.....	26
Figura 3-4: Densidad de probabilidad de la demanda en toneladas para el destino CDM en Medellín.....	27
Figura 3-5: Densidad de probabilidad de la demanda en toneladas para el destino Manizales.....	28
Figura 3-6: Densidad de probabilidad de la demanda en toneladas para el destino Puerto Colombia.....	29
Figura 3-7: Recorridos desde los orígenes a destino Bogotá.....	30
Figura 3-8: Recorridos desde los orígenes a destino CDM.....	31
Figura 3-9: Recorridos desde los orígenes a destino Manizales.....	32
Figura 3-10: Recorridos desde los orígenes a destino Puerto Colombia.....	33
Figura 3-11: Proceso ETL. Extraída del blog Bismart https://blog.bismart.com/que-hacemos-etl	37
Figura 3-12. Resultados de procesamiento CPLEX en GAMS.....	39
Figura 3-13: Comparativa de tiempo de solución de solvers matemáticos para un problema entero mixto.....	40
Figura 4-1: Comportamiento histórico y proyección del ICTC en Colombia.	56
Figura 4-2: Comportamiento de ajuste del modelo.	59
Figura 4-3: Resultados GAMS.....	60
Figura 5-1: Mapa de calor del comportamiento de la demanda. Der. Cobertura de red de distribución para el año 2022. Izq. Cobertura de red de distribución para el año 2025. ...	64
Figura 5-2: Flow map y principales resultados GAMS 2023.....	65
Figura 5-3: Desviaciones de flota para la demanda 2023.	68
Figura 5-4: Flow map y principales resultados GAMS 2024.....	69
Figura 5-5: Desviaciones de flota para la demanda 2024.	72
Figura 5-6: Flow map y principales resultados GAMS 2025.....	73

Figura 5-7: Desviaciones de flota para la demanda 2025.....	75
Figura 5-8: Tipos de tripulación. Izq. Tripulación sencilla. Centro. Doble tripulación con cambio en el origen. Der. DTCC – Doble tripulación con cambio en el camino.	77

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Problemas trabajados por autor.	15
Tabla 3-1: Resumen estadísticos en @Risk para las rutas Pareto.	25
Tabla 3-2: Kilómetros en round trip desde los orígenes a destino Bogotá.	30
Tabla 3-3: Kilómetros en round trip desde los orígenes a destino CDM.	31
Tabla 3-4: Kilómetros en round trip desde los orígenes a destino Manizales.	32
Tabla 3-5: Kilómetros en round trip desde los orígenes a destino Puerto Colombia.	33
Tabla 3-6: Componentes del costo/km dentro del modelo.	35
Tabla 3-7: Costo/km para rutas Pareto.	36
Tabla 3-8: Rendimiento (kilómetros/galón) del combustible por tipos de perfiles.	37
Tabla 4-1: Tabla de índices modelo de transporte.	44
Tabla 4-2: Tabla de parámetros matriciales modelo de transporte.	45
Tabla 4-3: Tabla de parámetros escalares modelo de transporte.	46
Tabla 4-4: Tabla de variables modelo de transporte.	47
Tabla 4-5: Tabla de restricciones modelo de transporte.	48
Tabla 4-6: Función objetivo modelo de transporte.	52
Tabla 4-7: Proyecciones ICTC en Colombia.	54
Tabla 4-8: Resultados reales para comparación del modelo antes de cambio de contrato.	57
Tabla 4-9: Resultados reales para comparación del modelo después de cambio de contrato.	58
Tabla 4-10: Resumen modelo GAMS.	60
Tabla 4-11: Resumen de ajuste del modelo.	60
Tabla 5-1: Kilómetros y costos de operación optimizados por mes para el 2023.	65
Tabla 5-2: Ahorro en la red año 2023.	66
Tabla 5-3: Cantidad de vehículos mes a mes para el 2023.	66
Tabla 5-4: Comparación necesidad vs capacidad instalada mes a mes para el 2023.	67
Tabla 5-5: Kilómetros y costos de operación optimizados por mes para el 2024.	69
Tabla 5-6: Ahorro en la red año 2024.	70
Tabla 5-7: Cantidad de vehículos mes a mes para el 2024.	70
Tabla 5-8: Comparación necesidad vs capacidad instalada mes a mes para el 2024.	71
Tabla 5-9: Kilómetros y costos de operación optimizados por mes para el 2025.	73
Tabla 5-10: Ahorro en la red año 2025.	74
Tabla 5-11: Cantidad de vehículos mes a mes para el 2025.	74

Tabla 5-12: Comparación necesidad vs capacidad instalada mes a mes para el 2025... 75
Tabla 5-13: Ahorro potencial aumentando un 10% las tripulaciones en DTCC. 77
Tabla 5-14: Oportunidad mapeada en densificación de cargue. 78

Lista de símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>3PL</i>	Third Party Logistics
<i>ABSC</i>	Advanced Biofuel Supply Chains
<i>COIN-CBC</i>	Computational Infrastructure – OR Branch and Cut
<i>CPLEX</i>	Is a solver for linear, mixed-integer and quadratic programming problems developed by ILOG
<i>EOL</i>	End of Life
<i>FMILP</i>	Fuzzy Mixed Integer Linear Programming
<i>GAMS</i>	General Algebraic Modeling System
<i>ICTC</i>	Índice de Costos del Transporte de Carga
<i>KPI</i>	Key Performance Indicator
<i>MIP</i>	Mixed Integer Programming
<i>RMIP</i>	Relaxed Mixed Integer Programming
<i>SQL</i>	Structure Query Language

Introducción

En la actualidad las grandes, medianas y pequeñas empresas desean enfocarse en su *core* de negocio por lo que encuentran aliados expertos para que diseñen, implementen, operen y optimicen soluciones de operación logística a la medida y garanticen un buen nivel de servicio a sus clientes (Veléz Álvarez, 2017) obteniendo ahorros importantes y además permite que se concentren sus esfuerzos en su razón de ser como organización. Evaluar las redes de transporte de manera recurrente permite, además de ahorros significativos, un cumplimiento excepcional en el nivel de servicio puesto que se ubican los vehículos de manera correcta para dar cobertura a las demandas proyectadas. Las decisiones claves del negocio están fundamentadas en un origen-destino óptimo que permitan una buena rotación¹ y productividad de los equipos para cubrir los costos fijos de operación. Sin embargo, para la empresa objeto de estudio es primordial dimensionar de manera estratégica la cantidad de equipos (cabezotes y tráiler especializados) que deben continuar operando, asegurando que tendrán el suficiente trabajo para cubrir los costos que se tienen anclados o como medida anticipada activar el equipo que forma parte del mercado de usados ya que si se colocan en tiempos de escasez generará un ingreso valioso.

Como el objetivo principal en el sector del transporte es minimizar los costos (Zapata-Cortes et al., 2018) se han establecido 4 modelos básicos que permiten cuantificar y optimizar las redes de cualquier tipo de problema. Éstos son: orígenes-destinos óptimos, ubicación estratégica para modelos de consolidación y desconsolidación, ruteo para la correcta distribución de mercancías y el diseño de redes de servicios (Bettinelli et al., 2011). En la actualidad, las empresas pueden presentar uno o varios de los modelos mencionados con el fin de tener un funcionamiento acorde con su mercado y las exigencias de sus clientes (Ruiz-Moreno et al., 2020).

¹ Rotación es un término que en el sector de transporte aduce productividad. Para efecto del trabajo esta expresión está representada por la cantidad de viajes que realiza un vehículo en un mes.

Para la empresa objetivo de estudio la cantidad de vehículos que trabajan actualmente en cada origen corresponde a conocimientos empíricos y con base en la experiencia de personal que lleva más de 5 años en la empresa y que conoce algunas particularidades del comportamiento de la demanda, sin embargo, el tamaño de flota no se ha definido con la suficiente rigurosidad y análisis que se amerita puesto que no se considera un horizonte de planeación adecuado y esto conlleva a tener equipos totalmente parados en algunos momentos o quizás a realizar movimientos en vacío para compensar el atraso de pedidos en otro origen por alzas de demanda. El modelo de operación actual tiene establecido costos round trip, es decir, que cada vez que sale de un origen regresa al mismo a excepción de los movimientos compensados entre nodos para posicionar la flota de acuerdo con la demanda y así maximizar la rotación de la flota. Cabe resaltar que dentro del factor de disponibilidad de los equipos² bajo el modelo de renting se tiene pactado un 93% para no afectar el componente de productividad de los vehículos por lo que dentro del modelo no se contempla realizar estimaciones sobre este parámetro, sino que, por el contrario, se asume se mantenga dentro de los rangos concertados.

Este trabajo contempla un problema de optimización de la red de distribución de una empresa de cemento a granel basados en el modelo de orígenes-destinos óptimos, logrando disminuir significativamente los costos de transporte y con ello mejorar los niveles de servicio de cara a la competitividad del mercado. Este modelo considera la estructura existente de la red de transporte de la empresa y se encarga de conceder orígenes-destino óptimos y dimensionar los vehículos a los diferentes orígenes para anticipar los movimientos de flota entre nodos que logran disminuir los costos anuales en hasta un 5%. Se plantea un modelo que optimice los costos de transporte para cada año en estudio partiendo de la proyección de la demanda para cada uno de los destinos y se realiza la estimación del parámetro del ICTC³ (Índice de costos del transporte de carga) a partir del cambio de gobierno y sus políticas económicas con el fin de tener orígenes-destinos óptimos y dimensionamientos de flota acordes con la fluctuación estacional de cada uno de los meses.

² El factor de disponibilidad de flota hace referencia al tiempo total en un mes en que un vehículo puede ser productivo realizando viajes, es decir, facturando ingreso. Con el modelo de renting se pactaron mediante contrato que este valor no debe ser inferior al 93% del tiempo, en otras palabras, en un mes de 30 días solamente 2 días estará siendo atendido mecánicamente tanto de manera preventiva como correctiva.

³ ICTC - Índice de Costos del Transporte de Carga permite medir las variaciones promedio de precios de un conjunto representativo de bienes y servicios necesarios, para garantizar la movilización de un vehículo prestador del servicio del transporte de carga por carretera en el país, a lo largo del tiempo. Es un indicador especializado que permite la toma de decisiones por parte de entidades del gobierno y empresas privadas del sector.

1. GENERALIDADES

En este capítulo se resalta la importancia de evaluar constantemente las cadenas de suministro por el alto costo de transporte cuando la demanda migra hacia lugares donde la cobertura es baja, se realiza una descripción de la empresa objeto de estudio y del modelo de operación actual resaltando las decisiones claves del negocio. Posteriormente, se enuncian los objetivos y la metodología para el desarrollo de este trabajo.

1.1 Motivación

A medida que la humanidad avanza en desarrollos tecnológicos y se extiende en la construcción de territorios el enfoque de la optimización en las cadenas de suministro cobra mayor importancia para fortalecer el crecimiento sostenible para las diferentes organizaciones. Los costos de transporte e inventario son los dos componentes principales de la cadena de suministro (Vidović et al., 2014) y estos impactan directamente en la rentabilidad de una empresa, por tanto uno de los KPI's⁴ de las compañías es el costo de distribución (Montoya, 2017).

Dentro de las estadísticas de cemento gris del DANE en Colombia, el cemento a granel representa un 31% de la producción a nivel nacional con comportamientos estacionales ya que se tienen meses de baja demanda como lo son diciembre - enero y el mes que es afectado por semana santa y meses con picos altos en la producción que son septiembre y octubre (Montoya, 2017). Además, cabe resaltar que también afectan factores como la política del país y proyectos de infraestructura (Chain, 2009). En Colombia, se está trabajando en la infraestructura vial autopistas 4G (cuarta generación) que está impactando la logística actual debido a que la demanda está migrando a destinos de difícil

⁴ Un KPI, conocido también como indicador clave o medidor de desempeño o indicador clave de rendimiento, es una medida del nivel del rendimiento de un proceso. El valor del indicador está directamente relacionado con un objetivo fijado previa y normalmente se expresa en valores porcentuales.

cobertura por la nueva construcción de infraestructura vial que conectará a todo el país. La cuarta generación de concesiones como se muestra en la Figura 1-1 trae consigo más de 8.000 km de vías con al menos 1.200 km en doble calzada y se estima generará unos 180.000 empleos (Klau, 2015), sin embargo, esta mega obra nacional se ha visto afectada por la pandemia que generó el Covid-19.

Ante estos nuevos retos del sector se hace importante el diseño de la red de transporte y abastecimiento de cemento (Montoya, 2017) minimizando los costos de transporte aumentando la productividad de los vehículos teniendo en cuenta que la industria posee restricciones tanto en el origen como en el destino porque las plantas productoras están ubicadas lejos de las ciudades principales y en los clientes hay limitaciones en el acceso por lo que toma protagonismo la configuración de los vehículos. Con base en esto, el transporte se convierte en un factor importante en el costo (Wirdianto et al., 2011) y se debe modelar de tal manera que permita planear y tomar decisiones para afrontar la demanda de los próximos 3 años y garantizar que se tiene una red con amplia cobertura (Montoya, 2017).

Los modelos de optimización para el sector de cemento generan grandes ahorros que permiten ser competitivos (Burgos Marrero & Meola, González, 2010) ante la evolución de la economía donde ingresan más oferentes y se contiene directamente por el precio final de transporte. Por esto, resulta pertinente aprovechar la cantidad de información para optimizar e implementar en la red logística actual un nuevo modelo de operación que tenga mayor cobertura y minimice los costos totales del transporte.

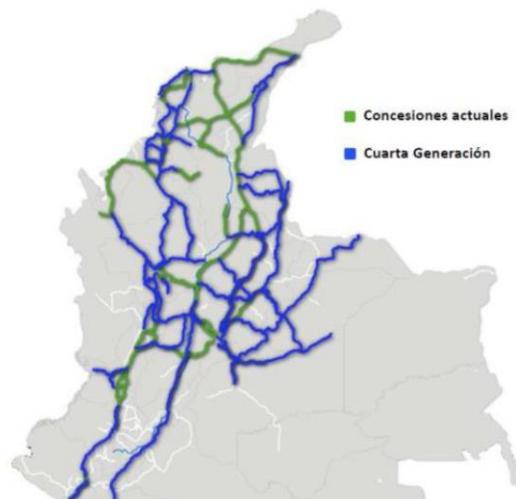


Figura 1-1: Concesiones viales 4G.

1.2 Descripción de la empresa objeto de estudio

Velotransporte (nombre que se usará para la empresa objeto de estudio) es una compañía logística 3PL (conocida como logística tercerizada, que es lo mismo que contratar una empresa experta para delegar la responsabilidad de la logística pudiendo estar en temas de almacenamiento, transporte, manejo de inventarios, entre otras) dedicada a la prestación de servicios a la medida asegurando que la intermediación entre la empresa y sus clientes garantice un buen nivel de servicio. Para este caso puntual, se enfoca en el sector de cemento a granel con su cliente principal Cementol (nombre anónimo que se usará para la empresa a la cual se presta el servicio logístico). En la actualidad, como se muestra en el Figura 1-2 esta operación cuenta con 4 plantas como origen y 4.200 destinos distribuidos en concreteras y clientes de proyectos tanto de infraestructura como inmobiliarios.



Figura 1-2: Ubicación actual de las plantas productoras de cemento a granel.

Velotransporte tiene personal operativo a lo largo del país con el fin de garantizar que la operación cumpla con los exigentes niveles de servicio que tienen los clientes de Cementol. Posee alrededor de 400 profesionales de la conducción que realizan el proceso de transporte de la mercancía en vehículos tipo tractocamión con tolvas graneleras (tráiler especializado para productos volátiles y peligrosos). Para esta operación se tienen asignadas 116 tractomulas y 12 dobletroques distribuidos en los diferentes orígenes. Estos vehículos están bajo modalidad de renting y es una empresa aliada la que ofrece el servicio

que incluye mantenimiento preventivo y correctivo, seguros y pólizas solamente pagando un canon mensual el cual se convierte en el costo fijo principal de la operación.

1.3 Modelo de operación actual

Para cumplir con la programación diaria de pedidos el personal operativo de Velotransporte descarga constantemente del TMS de Cementol la totalidad de solicitudes de sus clientes a un horizonte de tiempo no inferior a 1 semana. Este tipo de previsiones permiten tomar algunas decisiones operativas como posicionar flota de un origen a otro teniendo en cuenta las fluctuaciones de la demanda. Sin embargo, los clientes de Cementol tienen como promesa de servicio que luego de 24 horas de montar su pedido por la plataforma llegará su pedido a sus instalaciones por lo que dificulta prever con exactitud los cambios con anticipación. Dadas las características del negocio y la amplia trayectoria con Cementol (más de 14 años) los períodos donde existen altas y bajas demandas de manera significativa el tamaño de la flota puede llegar a variar mediante la adquisición de nuevos vehículos o la salida de estos para el mercado de usados puesto que el aliado posee el músculo financiero y las unidades de negocio para llevar a cabo estas medidas. Estas decisiones son evaluadas por un grupo de expertos y puede conllevar a incrementar los costos fijos de la operación o deteriorar el nivel de servicio de los clientes de Cementol según sea el caso (Buriticá, 2019).

El esquema de entregas se consolida el día anterior y se empieza a ejecutar calculando los tiempos de cargue y tránsito para llegar sobre las horas previamente estipuladas. Normalmente, las solicitudes son para cumplirlas en horario diurno dadas las condiciones de trabajo en el país, no obstante, cerca del 30% es solicitado en la noche para dar continuidad a proyectos de infraestructura o concreteras (operación que mezcla el cemento con aditivos para obtener concreto en diferentes resistencias que será utilizado normalmente para fundiciones de losas o creación de productos especializados) que requieren subir el nivel de inventario para iniciar labores desde muy temprano sin problemas de escasez de producto.

1.4 Decisiones claves del negocio

El dimensionamiento de vehículos en una empresa de transporte es un factor clave para reducir significativamente los costos fijos de canon ya que éstos representan el 15% de la canasta de costos de operación.

Otra decisión importante es ubicar o mapear de manera anticipada los vehículos en los orígenes para el cumplimiento de la demanda garantizando rotación y mayor productividad lo que genera que se tomen decisiones tácticas para la movilización de los tractocamiones de manera compensada y evitar tránsitos vacíos. Es así, que uno de los criterios para el movimiento de la flota es la cercanía de los destinos en los cuales está el vehículo finalizando la entrega con respecto al origen nuevo al cual se debe realizar el cubrimiento con los equipos.

1.5 Justificación

Las cadenas de suministro se deben evaluar constantemente por los altos costos de transporte e inventario en que se incurren cuando no se buscan alternativas logísticas o cuando éstas pasan a ser obsoletas por lo que se deben generar optimizaciones que permitan competitividad y un buen nivel de servicio (Arroyo Pérez, 2016). Debido al crecimiento de la demanda de cemento a granel en Colombia por las múltiples obras de infraestructura que se tienen en el proyecto de vías 4G es necesario evaluar la red actual y construir un modelo que optimice los flujos entre los nodos para dar mayor cobertura en el territorio nacional (Argueta et al., 2016).

Aunque el modelo de operación contemple algunos destinos bajo esquemas de doble tripulación es normal que en muchas cabeceras municipales se deba acercar el producto a través de CEDIS (Gupta et al., 2018). Para lograr entender las condiciones y acciones se requiere explorar las diferentes relaciones entre nodos teniendo en cuenta las restricciones tanto de origen como de destino para buscar alternativas de operación.

Un nuevo modelo que permita establecer orígenes-destinos óptimos a partir de los cuales sea posible tomar decisiones estratégicas con base en los datos, ayudará a ampliar el rango de cobertura generando mayor rotación de los vehículos en beneficio de cubrir los costos fijos (Gámez-Albán et al., 2017).

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Optimizar el costo de una red de transporte aplicado al sector de cemento a granel en Colombia.

1.6.2 Objetivos específicos

- Identificar las fuentes de datos generados por la empresa en estudio y técnicas junto con software de modelación para la programación matemática.
- Seleccionar la herramienta y los diferentes solver de optimización que se requieran para explicar la correcta modelación.
- Diseñar un modelo que optimice la red de transporte aplicado al sector de cemento a granel en Colombia mediante programación matemática.
- Validar el método propuesto para la optimización de la red de transporte con respecto a trabajos previos encontrados en la literatura y criterios de expertos.

1.7 Metodología para el desarrollo del trabajo

En el desarrollo del trabajo se pretende optimizar una red de transporte en el sector de cemento a granel, para esto en el capítulo 2 se estudia el estado del arte para modelaciones de redes de transporte que impliquen programación entera mixta (MIP) o programación entera mixta relajada (RMIP). Se realiza una revisión a problemas asociados con los respectivos antecedentes literarios enfocados en soluciones cercanas al modelo de operación actual que permitan ampliar el conocimiento y las posibilidades de abordar el problema.

Posteriormente se analizan las temáticas más representativas del problema de lo global a lo particular siendo estas el transporte de cemento a granel, la modelación de una red de transporte, la optimización de redes logísticas y por último los *solver* que se utilizan para este tipo de problemas.

En el capítulo 3 se presenta el análisis exploratorio de datos y la selección del software partiendo de la descripción de la fuente de datos para la proyección de demanda en un horizonte de tiempo de 3 años que reporta Cementol, la construcción de las matrices tanto de kilómetros como de costos dando la importancia a los rubros que forman parte del cálculo para la operación. Se explica el procesamiento de datos para el software GAMS. Posteriormente, se describen y se analizan las bondades del aplicativo y los *solver* que se utilizaron en el desarrollo de los modelos.

En el capítulo 4 se presenta el modelo matemático teniendo en cuenta definición de índices, conjuntos, parámetros, variables y restricciones que se contemplaron en la

ejecución del programa. Adicional, se argumenta la estimación al parámetro ICTC (Índice de Costos del Transporte de Carga por Carretera) y se valida el modelo propuesto con 10 meses de historia (a partir del cambio de contrato con el cliente Cementol).

En el capítulo 5 se presentan los resultados del ejercicio de optimización con una planeación estratégica para los próximos 3 años (2023-2024-2025) teniendo en cuenta las redes óptimas con el dimensionamiento de vehículos que dan el menor costo para la operación de transporte. Se proponen 2 escenarios a partir de la experiencia que contribuyen a mejorar el costo arrojado por el software y que apuntan a maximizar la productividad de la red.

Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones que se generan en el desarrollo de esta tesis.

2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se presenta la revisión del estado del arte en torno a la modelación y optimización de redes logísticas, donde en la sección 2.1 se revisa la literatura con problemas asociados o similares en la estructura para entender la importancia de modelar las cadenas de suministro, el impacto que trae para las organizaciones y la forma adecuada de plantear las respectivas formulaciones matemáticas.

En la sección 2.2 se resumen los 7 artículos y sus respectivos aportes que tienen mayor afinidad y cercanía con el trabajo propuesto, se explora las herramientas de programación que utilizaron para desarrollar la solución con el fin de identificar viabilidad con el problema.

En la sección 2.3 se especifican los conceptos generales que se deben tener en cuenta en el transporte de cemento a granel con el fin de identificar las problemáticas, retos, desarrollos y avances en este sector especializado y poco documentado.

En la sección 2.4 se da continuidad a la exploración de modelos de redes de transporte para determinar el alcance, la complejidad y el nivel de detalle que puedan tener algunos casos reales e ir enfocando los esfuerzos de formulación en las herramientas y solver que se manejan para este tipo de casos.

En la sección 2.5 se enfoca en las optimizaciones de redes logísticas para entender que variable de los modelos se logra minimizar o maximizar, si es el costo, la cantidad de vehículos, el nivel de servicio, la cobertura, entre muchas otras. Teniendo como premisa que el costo de transporte en las cadenas logísticas representa más del 20% en el sector.

Finalmente, en las secciones 2.6 y 2.7 se revisan los solver más comunes dentro de la literatura para modelos de redes de transporte que pretenden optimizar el costo de distribución entre los orígenes y destinos.

2.1 Problemas asociados

Las empresas analizan constantemente la cadena de suministro para mejorar el nivel de servicio al cliente buscando minimizar los costos en los que debe incurrir, por ende, siempre buscan un ciclo de mejora continua para encontrar eficiencias en sus operaciones logísticas (Pacheco Paneque et al., 2021). En sus procesos de transporte, usualmente, las compañías tercerizan esta etapa con el fin de generar flexibilidad y ahorros que conlleven a tener un aliado que brinden soluciones sin ningún tipo de sesgo (Veléz Álvarez, 2017). Esta decisión está respaldada porque se eliminan costos fijos como lo son salarios, depreciación y seguros. Adicional, las empresas pueden enfocar su gestión en temas de producción convirtiéndose en especialistas y logrando invertir en tecnologías modernas y eficientes. Debido a la rápida evolución con que se desarrollan los vehículos se debe buscar cómo se ahorra combustible o cómo se puede cargar más porque el peso tara es mucho menor que los actuales (Suna, 2021).

En general, los costos logísticos en promedio representan el 13.8% del Producto Interno Bruto (PIB) mundial (Gámez-Albán et al., 2017) por lo que las decisiones estratégicas que son para largos horizontes de planeación (años) cumplen un papel fundamental por las financiaciones en términos de monto, volumen, ubicación y ejercicio de los establecimientos del complejo operativo. Por otra parte, las resoluciones a mediano plazo (meses) están enfocadas en áreas útiles que ejecutan planes productivos, de compras, de manejo de inventarios o proyectos logísticos. Por último, están las determinaciones que son a corto plazo (se dan en el día a día) en donde se puede ejemplificar hacia que destino enviar un vehículo que tiene alguna configuración establecida. En este sentido, la optimización de una red logística se convierte en una decisión estratégica y táctica ya que relaciona la atención de una demanda ampliando la cobertura lo que implica la apertura de nuevos centros de distribución con la premisa de que el costo-beneficio satisfaga los objetivos principales: i) minimizar el costo de la red teniendo en cuenta las configuraciones de los vehículos y ii) maximizar los niveles de servicio a los clientes.

Hay muchos escritos y trabajos enfocados en logística que buscan solucionar problemas del sector real con diferentes técnicas y herramientas de modelación matemática que permiten simular la realidad sin incurrir en costos de implementación. Los problemas típicos de redes contemplan orígenes, destinos y tránsitos que forma lo que se conoce como arcos dentro de la investigación de operaciones y maneja una teoría que puede aplicarse al presente trabajo (Argueta et al., 2014). Estos problemas se plantean bajo

modelos de programación entera mixta por la tipología de las variables que intervienen dentro del flujo (variables enteras y reales), sin embargo, la plataforma que se use puede llegar a variar dependiendo del alcance y la potencia que se desea ya que entre más variables y restricciones se involucren mayor será la exigencia computacional (Mohammadi, 2020) (Karimi Dastjerd & Ertogral, 2019).

Un alcance más potente a la teoría de redes es involucrar el lugar donde debe posicionarse los orígenes (Rahmaniani & Ghaderi, 2015). De ahí que, autores como (Zhao & Dou, 2019) amplían el problema en estudio teniendo en cuenta fases importantes como la producción, esto con el fin de que al tener en cuenta los costos de transporte, almacenamiento, construcción de instalaciones y uso de producto en plantas y almacenes el problema adquiera más variables y por ende se acerque más a la realidad. En consecuencia, Zhao & Dou desarrollaron dos algoritmos importantes cuyo objetivo se centra en encontrar las soluciones para diseñar la red logística extendida desde las plantas hasta los centros de distribución. Por su parte (Latha Shankar et al., 2013) entiende el diseño de la red logística mucho más atrás en el proceso adicionando la compra de materia prima a los proveedores y del mismo modo hacia adelante en la distribución del producto hacia las tiendas. En consecuencia, los autores exponen un modelo con dos objetivos, el primero, minimizar el costo total de distribución, y el segundo, maximizar el cumplimiento de la demanda de los clientes, para esto, implementaron el algoritmo *Multi Objective Heuristic Particle Swarm Optimization* llevando a obtener mejores soluciones al problema en estudio con un tiempo computacional moderado.

Los autores (Sanci & Daskin, 2021) y (Aragones et al., 2021) tienen como enfoque el desarrollo de modelos de optimización cuyo fin es la conformación de redes logísticas para la distribución de productos de una serie de centros de almacenamiento a las respectivas tiendas, todo esto con el menor costo posible. En consecuencia, los autores han modificado diferentes algoritmos aprovechando estructuras como *Set Partition* y modelos tipo *Greedy* y relajación lagrangiana para realizar estructuras logísticas acordes a las organizaciones en tiempos prudentes.

Si se examinan redes extendidas, es habitual hacer énfasis en los proveedores o en los clientes, esto depende de las particularidades del problema analizado y de la empresa en estudio. En su trabajo (Çapar, 2013) se enfoca en mejorar los tiempos de entrega de

productos al cliente final, por esto optimiza tiempos y costos de manipulación de productos en las distintas fases de la red, principalmente en el alistamiento teniendo en cuenta periodos entre un tiempo de inicio y finalización. Por consiguiente, se plantea un modelo de optimización dual lagrangiano que permitió evaluar diferentes escenarios y encontrar resultados de alta calidad.

En el trabajo de (Fattahi et al., 2020) se exponen dos planteamientos para el problema de la red de distribución: el primero, orientado en buscar una solución al problema estratégico, en donde se contempla apertura y cierre de instalaciones, y el segundo, el problema táctico que hace referencia a la cantidad de producto a fabricar y a enviar a los diferentes nodos. En este documento, se hace un acercamiento al método estadístico de promedios muestrales que logra indicar la solidez de las soluciones sugeridas, esto a fin de maximizar el cumplimiento de la demanda. En los trabajos de (Nasiri et al., 2014) y (Bieniek, 2015) se presentan planteamientos estocásticos similares utilizando relajación lagrangiana, generación de columnas y búsqueda tabú.

2.2 Antecedentes

El problema de optimización de modelos de redes de transporte ha sido estudiado en diferentes trabajos. Como se ha venido planteando, existen distintas formas de abordarlos y dependerá de la complejidad, las reglas de negocio, las condiciones del modelo, entre otras, que se tomen diferentes caminos para formular matemáticamente y para ejecutarlo a través de los *solver* disponibles en los múltiples softwares. A continuación, en la Tabla 2-1 se muestra los trabajos de algunos autores que tienen cercanía con el trabajo propuesto:

Tabla 2-1: Problemas trabajados por autor.

Artículo	Autor	Aporte
Sustainable reverse logistic network design for end-of-life-use-case study.	Suna, Cinar (2021)	Modelo MILP para determinar una estrategia a largo plazo para productos al final de su vida útil (EOL)
A detailed MILP formulation for the optimal design of advanced biofuel supply chains.	Moretti, Milani, Lozza, Manzolini (2021)	Formulación MILP de la optimización económica del diseño ABSC, que comprende la definición del plan de manejo semanal asociado
Transportation optimization models for intermodal networks with fuzzy node capacity, detour factor, and vehicle utilization constraints.	Wang, Dang, Le, Kewcharoenwong (2020)	Modelo MILP que minimiza los costos totales y un modelo FMILP que minimiza los costos totales imprecisos en condiciones de datos inciertos
Mathematical model for the distribution network optimization of a courier and parcel company.	Ruiz, Arango, Serna, Conrado, Zapata (2020)	Modelo matemático cuyo fin es optimizar los costos logísticos posibilitando la incorporación de variables de decisión relacionadas con la utilización de la infraestructura, la sobrecarga de los vehículos y el envío entre centros logísticos intermedios pertenecientes a la red de distribución
Mixed integer and heuristics model for the inventory routing problem in fuel delivery.	Vidović, Popović, Ratković (2014)	Modelo MIP para resolver el IRP dando un enfoque heurístico que permita analizar una formulación con y sin costos de la cantidad de vehículos y así observar el impacto de estos costos en las soluciones que se obtienen
Route optimization of urban public transportation.	Jaramillo, González, González (2013)	Modelo de optimización para minimizar trasbordos
Mejora de los procesos logísticos de planeación, aprovisionamiento, almacenamiento y distribución de materia prima agregados de una empresa cementera venezolana.	Burgos, González (2010)	Desarrollo de una herramienta en Excel con ayuda de Visual Basic y SQL para mejorar el cumplimiento de la programación

2.3 Transporte de cemento a granel

El cemento es un polvo fino que se obtiene de la calcinación de una mezcla de piedra caliza, arcilla y mineral de hierro. Este es un material muy utilizado en el sector de la construcción alrededor del mundo, ya que aporta como resistencia a la compresión, durabilidad y estética para una diversidad de aplicaciones en este sector (CEMEX, s.f.)

Basado en lo anterior, el cemento cuenta con unas propiedades muy variadas lo que implica que su transporte debe realizarse bajo ciertas condiciones controladas para evitar que éstas puedan alterarse. Adicionalmente, no solo debe controlarse el transporte por lo que ya se mencionó, sino porque las propiedades físicas del cemento implican que si hay una fuga se produce una emisión de material particulado que contiene diversas sustancias químicas que pueden afectar el sistema respiratorio tanto de humanos como de animales y también a las plantas (Sagástegui, 2012).

El tráiler del cemento es una cisterna granelera con capacidades desde 18 hasta 38 toneladas de cemento que funciona mediante presión. Está elaborada en acero o aluminio siendo este último el más eficiente por tener pesos tara que contribuyen a ampliar la capacidad de carga y que es remolcado por un tractocamión que está equipado por un soplador que es utilizado en el descargue del producto. El cargue se realiza desde silos que almacenan el cemento y mediante gravedad permiten el llenado del tráiler. El conductor debe descargar a 14 PSI para evitar polución en los silos del cliente o en las mangueras que se conectan y transportan el material. El acceso a las obras debe contar con terrenos firmes que soporten capacidades de hasta 52 toneladas que suma el conjunto completo y es conocido como peso bruto. Este tipo de vehículos articulados deben tener espacio suficiente para el radio de giro necesario por lo que las obras deben contar con el área libre con el fin de no interferir en el proceso de ingreso, conexión, descargue y salida. Los terrenos de las obras normalmente presentan apilamiento de otros productos y en épocas de lluvia suele tener fango o lodo por lo que cobra importancia adecuar la zona cuando se solicita pedido de cemento con equipos y materiales que permitan fluidez en el proceso de entrega. Las mangueras de conexión suelen tener 6 metros de largo, pero cuando se tiene el silo más distanciado se recomienda habilitar la vía para tener más cercanía y ya en caso de no poder realizarlo se debe hacer uso de más mangueras y aumentar los PSI de descargue, pero según el fabricante este proceso no es garantizado y podría ocasionar daños en los filtros de los silos generando polución excesiva. Desde el

despacho del vehículo en las plantas se disponen de precintos de seguridad para garantizar que la carga no ha sido manipulada por terceros y normalmente en los destinos verifican el estado de los sellos. La presión de descargue juega un papel fundamental para evitar pérdidas de producto o fugas al daño ambiente que generan contaminación.

Como se evidencia en la Figura 2-1 [no ilustra la empresa objeto de estudio] el tráiler es especializado para este tipo de producto que se mueve por un cabezote tipo tractocamión, el área debe estar libre de obstáculos que impidan el acercamiento y conexión de manguera que mediante un sistema de compresión de aire es descargado el producto con las debidas normas de seguridad.



Figura 2-1: Transporte de cemento a granel.

2.4 Modelación de una red de transporte

En la actualidad el transporte se ha convertido en uno de los factores que determinan el nivel de desarrollo de un país, esto se debe a que la capacidad de transporte debe ir de la mano de los niveles de producción, así, un país debe tener la facultad de movilizar sus productos a cualquier lugar del mundo y para cumplir este fin se modelan redes de

transporte como una manera de dirigir la cadena de suministros, esto para que se incorporen todas las actividades a fin de mejorar las relaciones de la cadena y así alcanzar ventajas potenciales sostenibles (Peña-Orozco et al., 2016).

En su artículo, Peña, Urueña & González (2016) resaltan que una red logística debe observarse como un modelo fusionado de manera que se pueda construir una propuesta que integre procesos operativos como la proyección de la demanda y como se pueden aplicar estos datos dentro de un proceso de planeación de recursos, en cuanto a inventario y distribución, y por último el impacto en el tiempo de ciclo, entendido en función del nivel de servicio percibido por el cliente.

En Colombia, la infraestructura vial es precaria, comparada con otros países, y aunque el Gobierno Nacional ha considerado la posibilidad de construir otro tipo de infraestructuras de transporte esto en la actualidad no ha sucedido y en su documento, (Marquez, 2011) resalta la importancia de crear modelos que logren optimizar los costos de transporte tomando como referencia redes de transporte combinado, en donde los diferentes modos de transporte (carretero, ferroviario y fluvial) se complementen.

2.5 Optimización de redes logísticas

Para una empresa, la logística se refiere a la forma en cómo se organiza el aprovisionamiento de materiales, producción, almacén y distribución de productos. Teniendo en cuenta esto, como se puede ver en la Figura 2-2 se puede definir una red logística como un sistema diseñado para el transporte y almacenamiento de productos, y que tiene la finalidad de poner éstos a disposición del cliente (Gomez, 2011) .

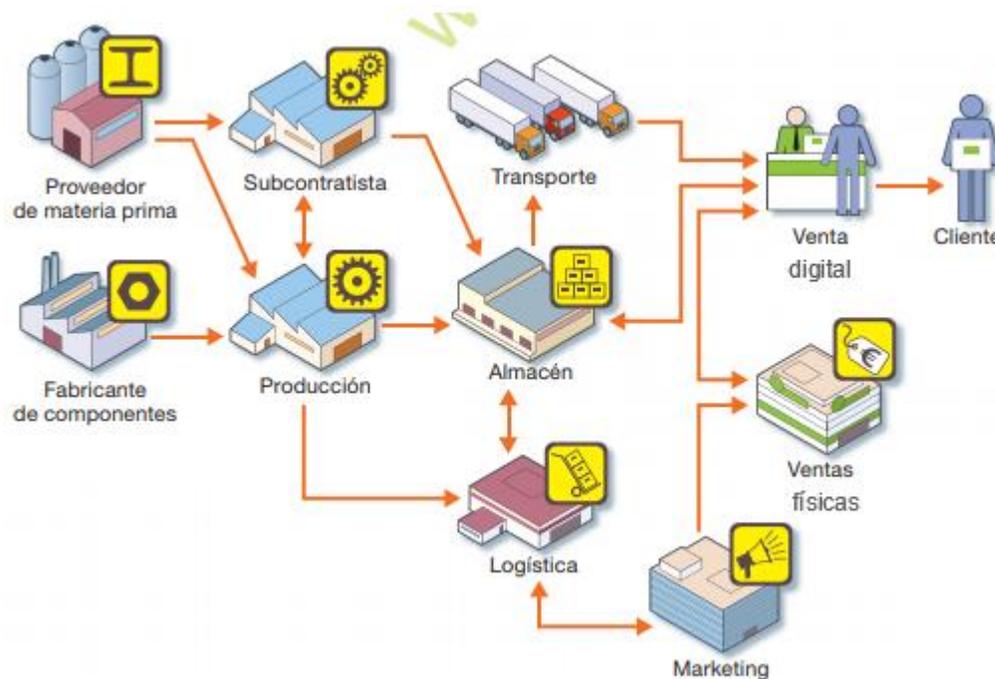


Figura 2-2: Cadena de suministro.

Tradicionalmente, las empresas de producción gestionan su propia red de transporte. Sin embargo, se ha demostrado que esto genera muchas ineficiencias y altos costos permitiendo que este servicio se tercerice a empresas 3PL (Third Part Logistics) que logran consolidar una mayor cantidad de carga en cada ruta de la red ya que suele ajustarse para que la totalidad de la capacidad del vehículo sea ocupada por la mercancía y así haya una disminución de los costos (Estrada, 2007).

En su documento (Bermeo Muñoz & Calderón Sotero, 2009) mencionan que los costos de transporte son de vital importancia para determinar el precio final de un producto y el movimiento de carga equivale a aproximadamente entre $1/3$ y $2/3$ de los costos totales de logística. Esta información cobra importancia, teniendo en cuenta que en Colombia el transporte de carga es una actividad fundamental en la economía por lo que se deben incorporar las principales zonas de producción y de consumo del país, y así poder implementar diferentes métodos para la optimización de redes logísticas en donde se conozca con antelación el tipo de vehículo a utilizar, sus dimensiones, peso máximo permitido, horario de recepción de cada uno de los clientes y con esta información diseñar rutas de transporte para varios vehículos para entregas que se encuentran dispersas geográficamente.

2.6 Programación entera mixta (MIP)

Una programación entera mixta (MIP) resulta cuando algunas de las variables en el modelo tienen valores reales (pueden tomar valores fraccionarios) y algunas de las variables tienen valores enteros. Por lo tanto, el modelo es "mixto". Cuando la función objetivo y las restricciones tienen forma lineal, entonces es un programa lineal de enteros mixtos (MILP). En el lenguaje común, MIP a menudo se interpreta como MILP, aunque también se producen programas no lineales de enteros mixtos (MINLP) y son mucho más difíciles de resolver (Chinneck, 2015) .

Para la compañía NCSS, LLC (s.f) la representación matemática del problema de programación entera mixta (MIP) es maximizar o minimizar.

$$z = \mathbf{C}\mathbf{X}$$

sujeto a:

$$\mathbf{A}\mathbf{X} \leq \mathbf{b}, \mathbf{X} \geq \mathbf{0} \text{ algunos } x_i \text{ están restringidos a valores enteros.}$$

donde,

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= (x_1, x_2, \dots, x_n)' \\ \mathbf{C} &= (c_1, c_2, \dots, c_n) \\ \mathbf{b} &= (b_1, b_2, \dots, b_m)' \\ \mathbf{A} &= \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Las x_i son las variables de decisión (las incógnitas), la primera ecuación se llama función objetivo y las m desigualdades (e igualdades) se llaman restricciones. Los límites de las restricciones, los b_i , a menudo se denominan lados derechos (RHS).

2.7 Programación entera mixta relajada (RMIP)

El problema de programación entera mixta relajada (RMIP) es el mismo que el problema de programación entera mixta (MIP) en todos los aspectos excepto que se relajan todas

las restricciones de enteros, SOS⁵ y semi⁶ . Este tipo de problema a veces es útil cuando se tiene problemas para obtener una solución entera factible (GAMS, s.f)

⁵ SOS - Esta regla se aplica a CPLEX MIP Optimizer. Para especificar conjuntos ordenados especiales, utilice una sección SOS, que va precedida de la palabra clave SOS. La sección SOS debe ir a continuación de las secciones Bounds, General, Binaries y Semi-Continuous.

⁶ Semi - Para especificar cualquiera de las variables como variables semicontinuas, es decir, como variables que pueden tomar el valor 0 o valores comprendidos entre los límites inferior y superior especificados, utilice una sección SEMI-CONTINUOUS. Esta sección debe ir a continuación de las secciones BOUNDS, GENERALS y BINARIES. La sección SEMI-CONTINUOUS va precedida de la palabra clave SEMI-CONTINUOUS, SEMI o SEMIS

3. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS Y SELECCIÓN DE SOFTWARE

En este capítulo se presenta el análisis de los datos, la explicación sobre la creación de las matrices fundamentales del modelo y la selección de software junto con el solver, donde en la sección 3.1 se explora las bondades de la herramienta que utiliza Cementol para las proyecciones de demanda que dentro del ejercicio de simulación se consideran inputs determinísticos.

En las secciones 3.2 y 3.3 se explica cómo se consolidaron las matrices de kilómetros y de costos respectivamente que son utilizadas como valor fundamental dentro de la modelación para determinar los orígenes y destinos óptimos dentro de la red de transporte.

En la sección 3.4 se desarrolla el procesamiento de datos previos antes de ingresar la información a software de modelación y se da visual sobre algunas complejidades presentadas en el trabajo.

En la sección 3.5 se explica las bondades, alcances e historia del software GAMS. Además, se explora los tipos de problemas y *solver* adecuados para ejecutar el ambiente de simulación. Se explora el *solver* CPLEX teniendo en cuenta la información de la plataforma de modelación.

Finalmente, en la sección 3.6 se revisa cómo funciona el servidor NEOS como integrador de GAMS y los *solver* cuando la capacidad propia es limitada por la no accesibilidad a licencias pagas.

3.1 Fuentes de datos

A lo largo de la relación comercial entre Cementol y Velotransporte se han consolidado datos históricos de más de 13 años que son sumamente importantes para la IA, el Machine Learning y analíticas avanzadas que utiliza el organizador de datos de prueba SPN. Esto permite gestionar cambios de negocio con rapidez, organizar recursos internos y externos y utilizar el poder predictivo para el componente de la demanda. Cementol utiliza el sistema S/4HANA en ERP SAP para identificar y ajustar las proyecciones de pedidos de sus clientes y los cruza con las capacidades de recibo, capacidades de producción en sus plantas, comportamiento histórico, tendencias cíclicas, licitaciones de proyectos de infraestructura en el crecimiento de vías 4G, entre otras variables, por lo que puede generar más de 60 escenarios o 1.000 componentes individuales para las pruebas. Dentro de la oferta de valor del sistema como se puede observar en la Figura 3-1 la calidad de los datos toma un valor fundamental para establecer un plan granel que será la guía para los departamentos de producción y logística.

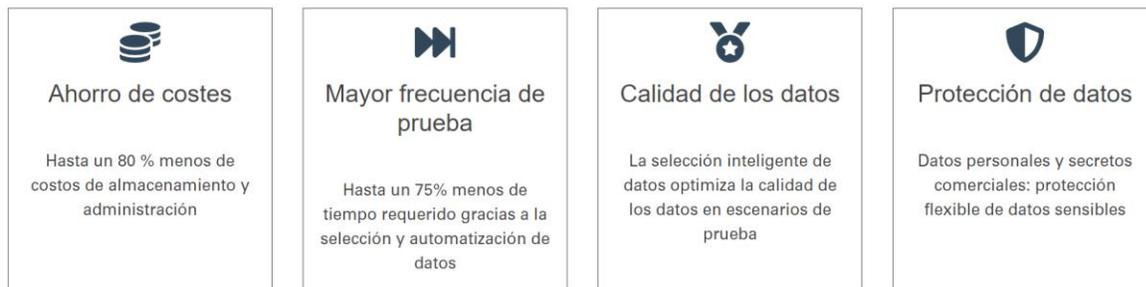


Figura 3-1: Valores agregados del sistema S/4HANA en ERP SAP. Elaboración propia a partir de información publicada en la web de SAP.

En la práctica estos planes se han ajustado a la realidad en un 90% por eso para fines del modelo ejecutado en este trabajo se consideran inputs determinísticos de confianza y a partir de allí, se tomarán algunas decisiones estratégicas, tácticas y operativas con el rigor y la experticia que se espera en este tipo de validaciones.

Los resultados para las rutas Pareto⁷ de la operación logística de cemento a granel se pueden ver en la Tabla 3-1. La curtosis indica que tan apuntada o achatada se encuentra una distribución respecto a un comportamiento normal (distribución normal). Como la curtosis para los 4 principales destinos tienen un valor mayor a 0 los datos están muy concentrados hacia la media, es decir, la distribución es leptocúrtica. Para entender mejor esta apreciación por favor ver la Figura 3-2 donde se encuentran los tipos de distribuciones alrededor de la media de la variable demanda que está dada en toneladas.

Tabla 3-1: Resumen estadísticos en @Risk para las rutas Pareto.

 **Reporte de resumen de datos**
 Generado por: Rubén Esneyder Morales Barbosa
 Fecha: domingo, 22 de mayo de 2022 4:51:35 p. m.

Nombre	Gráfico	Mínimo	Máximo	Media	Desv. estándar	Asimetría	Curtosis	5%	95%	Contei
bogota		8,169.76	12,139.20	10,645.51	1,082.78	-0.776	2.57	8,491.61	11,935.89	36
cdm		8,463.92	16,335.99	12,807.93	2,365.94	-0.593	2.24	8,531.95	16,131.71	36
manizales		8,345.08	10,485.59	9,573.22	592.47	-0.406	2.29	8,433.58	10,423.60	36
puerto-colombia		7,487.66	9,349.11	8,224.63	461.63	0.458	2.71	7,487.66	9,165.74	36

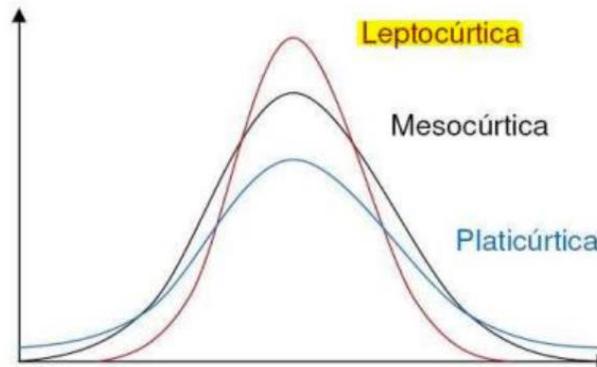


Figura 3-2: Tipos de distribución alrededor de la media.

⁷ Término creado por Vilfredo Pareto y conocido también como distribución ABC, gráfico de Pareto o curva 80-20, esta herramienta nos permite separar los problemas más relevantes de aquellos que no tienen importancia, mediante la aplicación del principio 80-20 o principio de Pareto, que a nivel general dice así: El 20% de las causas genera el 80% de las consecuencias. Para este caso puntual, estas rutas generan más del 70% del volumen de carga.

A continuación, se mostrará los principales resultados estadísticos para las rutas Pareto arrojados por el sistema @Risk. Los comportamientos de demanda están aplicados para todos los destinos analizados en el modelo y están dados por el sistema S/4HANA.

- Bogotá: Este destino contempla iniciar con la mega obra del metro por lo que resulta interesante entender sus estadísticos. El comportamiento de la demanda se asemeja a una distribución normal con un desplazamiento de la media hacia la derecha como se puede ver en la Figura 3-3. La demanda promedio mes es de 10.683 toneladas que representa aproximadamente 315 viajes. El proyecto puede tardar algunos años en terminarse por lo que cobra importancia modelar constantemente cambios en la red para estresarla sin generar sobrecostos significativos.

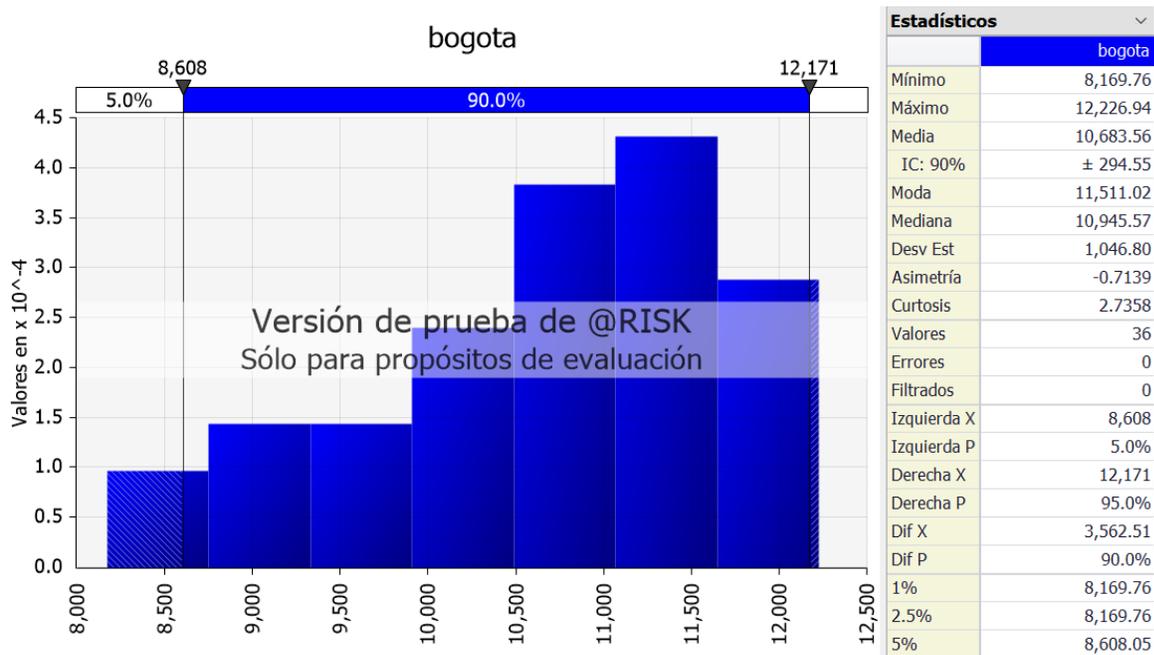


Figura 3-3: Densidad de probabilidad de la demanda en toneladas para el destino Bogotá.

- CDM: Abreviación a Centro de Distribución de Medellín actualmente localizado en inmediaciones de la avenida regional entre la estación del metro industriales y poblado, pero se espera este pulmón sufra una reubicación por las obras de vivienda que se adelantan contiguo al lugar.

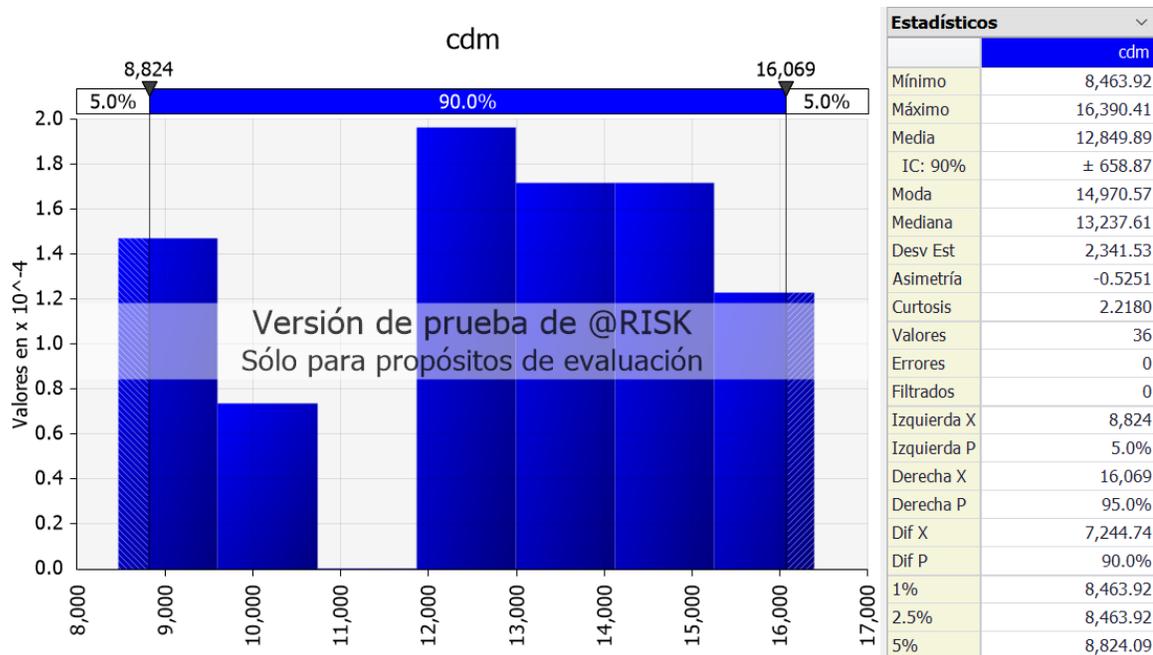


Figura 3-4: Densidad de probabilidad de la demanda en toneladas para el destino CDM en Medellín.

Como se explica anteriormente, se tiene concentración mayoritaria por encima de las 12.000 toneladas/mes como se puede observar en la Figura 3-4. La operación urbana del área metropolitana se realiza con vehículos tipo dobletrque con capacidades máximas de 28.000 kilogramos en peso bruto. Esta operación se encuentra regulada bajo 3 viajes por vehículo y segmentada a obras de vivienda.

- **Manizales:** Este destino concentra la recepción de pedidos de manera nocturna que permite que la flota logre mayor rotación y utilización puesto que a no ser por fallas mecánicas o eventualidades no pararía. Se asemeja a una distribución normal con media de 9.653 toneladas y una desviación estándar de 694 toneladas.

En la Figura 3-5 podemos observar que las colas de la distribución están más anchas en la parte izquierda, es decir, hacia valores inferiores de la media.

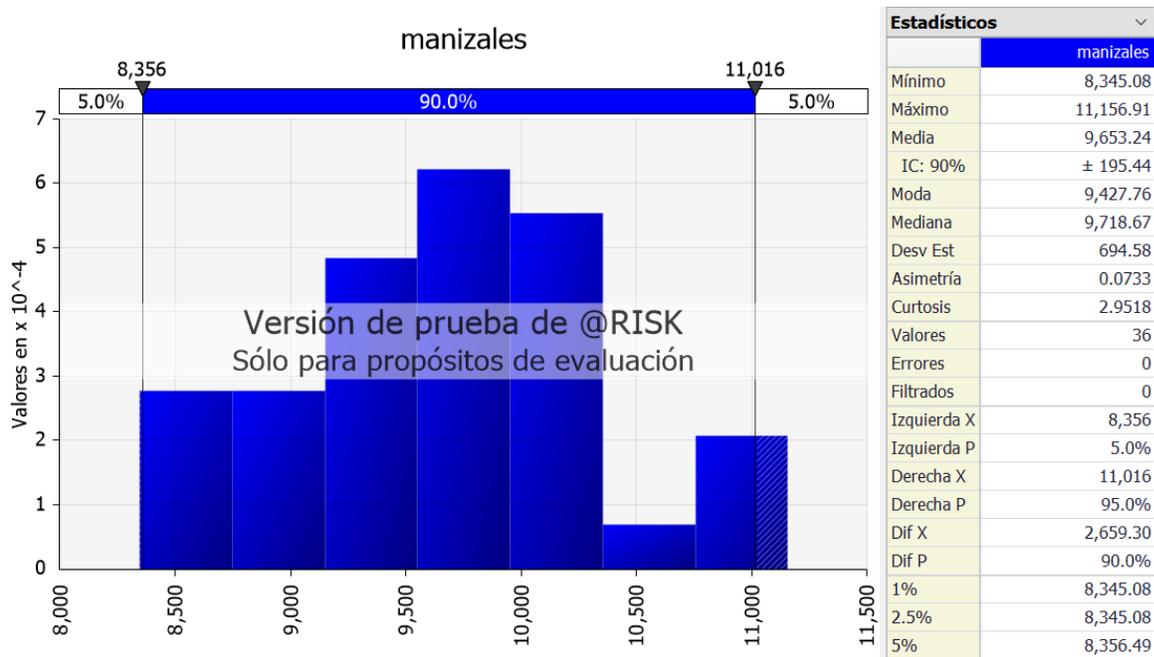


Figura 3-5: Densidad de probabilidad de la demanda en toneladas para el destino Manizales.

- Puerto Colombia: Ubicado a tan sólo 18 km del centro de Barranquilla concentra el crecimiento urbanístico hacia las afueras de la ciudad permitiendo que no se presente congestión vehicular en las vías de la población barranquillera. Según la Figura 3-6 no es tan simple determinar la distribución de probabilidad. Sin embargo, podría ser similar a la distribución logística ya que tiene las colas mucho más pesadas que la distribución normal.

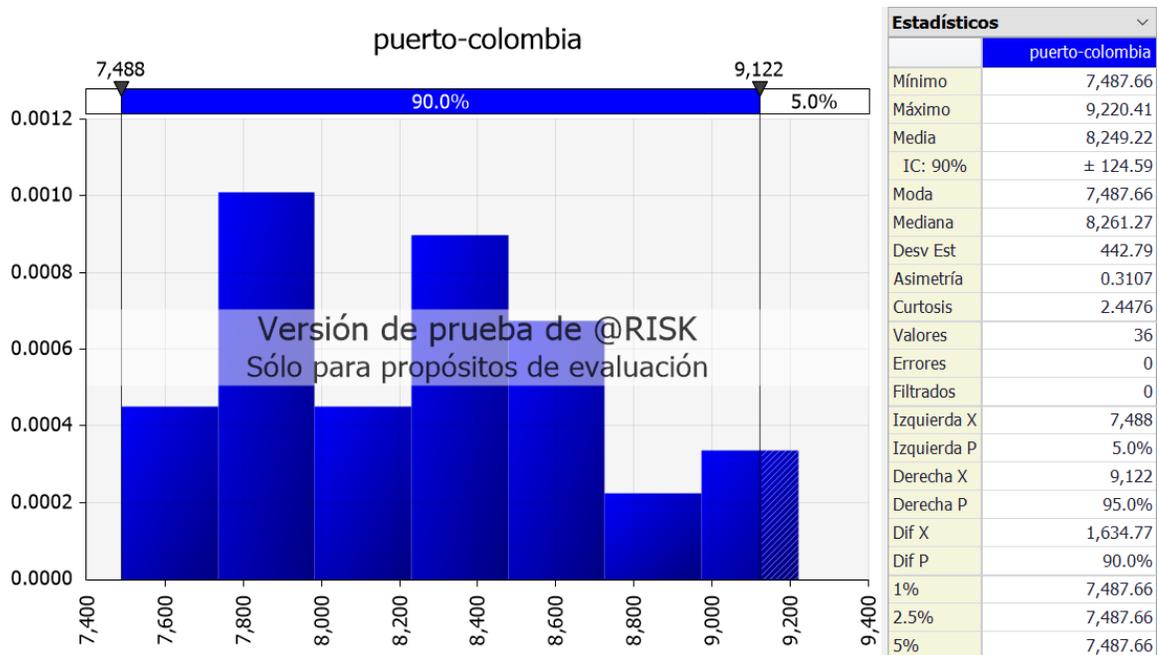


Figura 3-6: Densidad de probabilidad de la demanda en toneladas para el destino Puerto Colombia.

3.2 Matriz de kilómetros

Actualmente Velotransporte cuenta con una herramienta en Excel que se conecta mediante programación en VBA con la API de Google Maps (geolocalización). El funcionamiento consiste en incorporar el origen y destino con sus respectivas latitudes y longitudes. Luego, con la conexión mencionada se trae la elevación con respecto al nivel del mar por cada kilómetro trazado, logrando así categorizar tramos por perfiles montañoso (pendiente mayor a 6%), plano (pendiente menor a 3%) y ondulado (pendiente mayor e igual que 3% y menor e igual que 6%). Adicional, esta herramienta encuentra los peajes que se deben pagar por la ruta trazada. Si la ruta que arroja por defecto Google Maps no se ajusta a lo deseado se pueden colocar puntos intermedios con el fin de garantizar flexibilidad en el momento de determinar la cantidad total de kilómetros bajo los perfiles que afectan drásticamente el rendimiento de combustible de los equipos. Este ejercicio se conoce como el cálculo de altimetrías para las rutas y se convierte en el input del proceso de cotización de un origen-destino.

A continuación, se mostrarán los resultados del ejercicio para las rutas Pareto en términos de kilómetros recorridos:

- Bogotá: Es el destino ubicado en el centro del país y que cuenta con alrededor de 20 frentes de trabajos distribuidos entre clientes y concretos. En la Tabla 3-2 se puede ver la cantidad de kilómetros desde cada uno de los orígenes que se ingresaron a modelar en el ejercicio y en la Figura 3-7 se puede ver, de manera gráfica, los recorridos necesarios.

Tabla 3-2: Kilómetros en round trip desde los orígenes a destino Bogotá.

Destino	Rioclaro	Sogamoso	Yumbo	Cartagena
Bogotá	730	421	872	2076

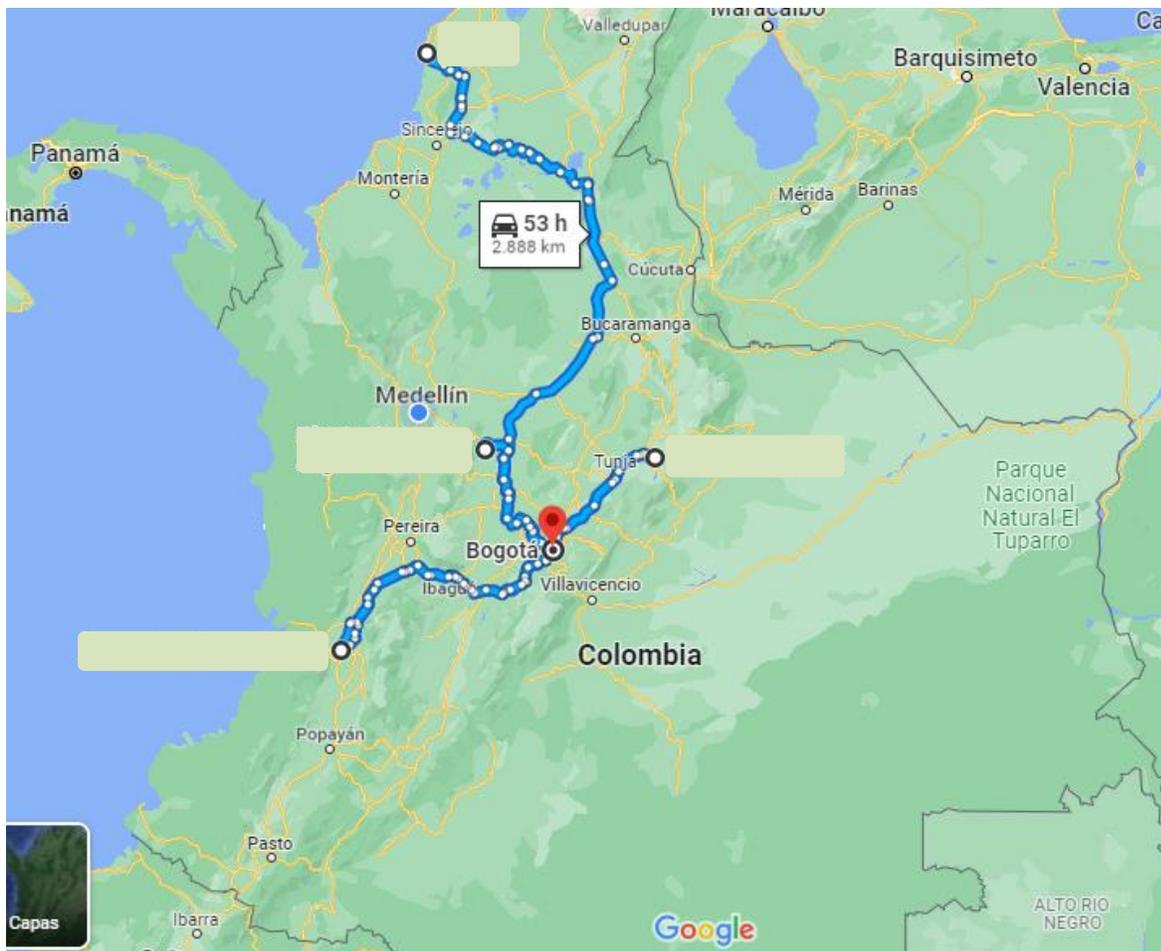


Figura 3-7: Recorridos desde los orígenes a destino Bogotá.

- CDM: Este centro de distribución cuenta con recepción 24 horas y permite realizar operación urbana en el área metropolitana. En la Tabla 3-3 se puede visualizar la cantidad de kilómetros necesarios para atender el centro de distribución desde cada

uno de los orígenes. Además, en la Figura 3-8 podemos ver en el mapa los tramos trazados desde Google Maps.

Este destino tiene capacidad máxima de 3.400 toneladas dadas por 3 silos que logra abastecer las obras de vivienda y algunas concreteras donde atienden fundidas con cierta regularidad.

Tabla 3-3: Kilómetros en round trip desde los orígenes a destino CDM.

Destino	Rioclaro	Sogamoso	Yumbo	Cartagena
CDM	323	936	852	1285

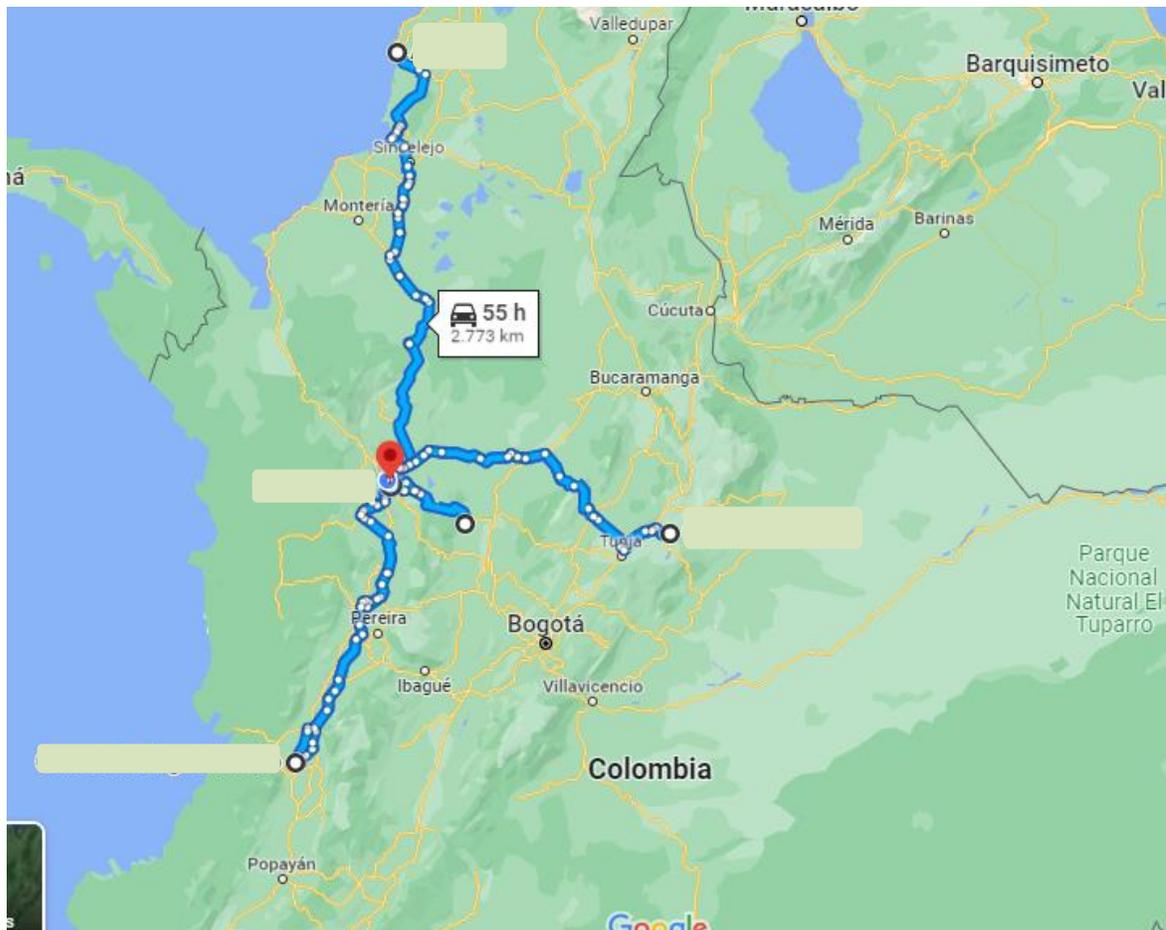


Figura 3-8: Recorridos desde los orígenes a destino CDM.

- Manizales: Este destino agrupa 4 frentes de trabajo: 2 concreteras y 2 clientes los cuales poseen consumos en toneladas significativos y poseen recepción nocturna. En la Tabla 3-4 se resume la cantidad de kilómetros en round trip y en la Figura 3-9 se ve de manera gráfica los recorridos.

Los tiempos de descargue suelen ser demorados ya que reciben producto tanto de Cementol como de otras cementeras por su volumen de producción.

Tabla 3-4: Kilómetros en round trip desde los orígenes a destino Manizales.

Destino	Rioclaro	Sogamoso	Yumbo	Cartagena
Manizales	535	985	1030	1692

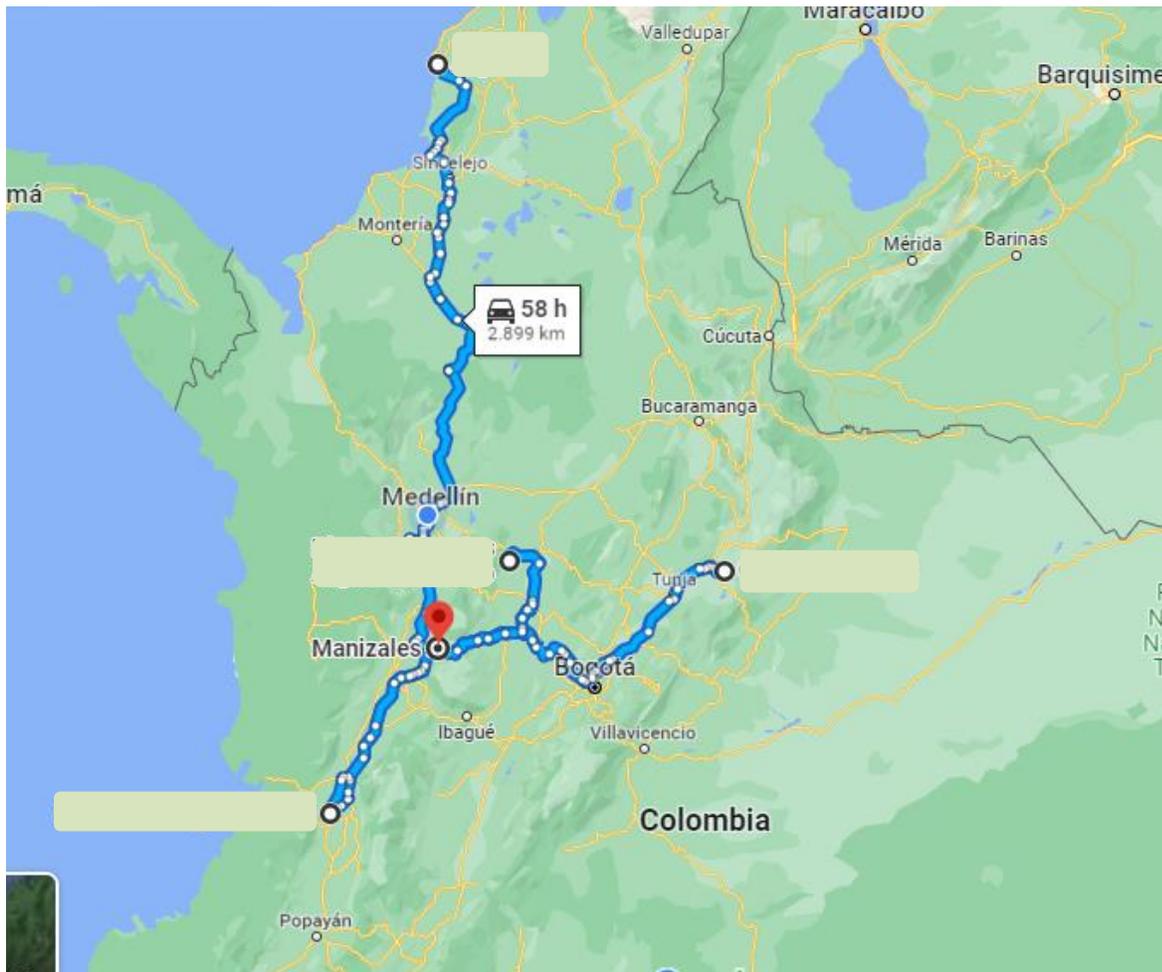


Figura 3-9: Recorridos desde los orígenes a destino Manizales.

- Puerto Colombia: Este destino está ubicado cerca de la ciudad de Barranquilla en la zona norte del país. En la Tabla 3-5 se resume la cantidad de kilómetros necesarios para atender esta cabecera municipal desde cada uno de los orígenes y en la Figura 3-10 se trazan los tramos necesarios según Google Maps.

Tabla 3-5: Kilómetros en round trip desde los orígenes a destino Puerto Colombia.

Destino	Rioclaro	Sogamoso	Yumbo	Cartagena
Puerto Colombia	1693	1870	2294	287

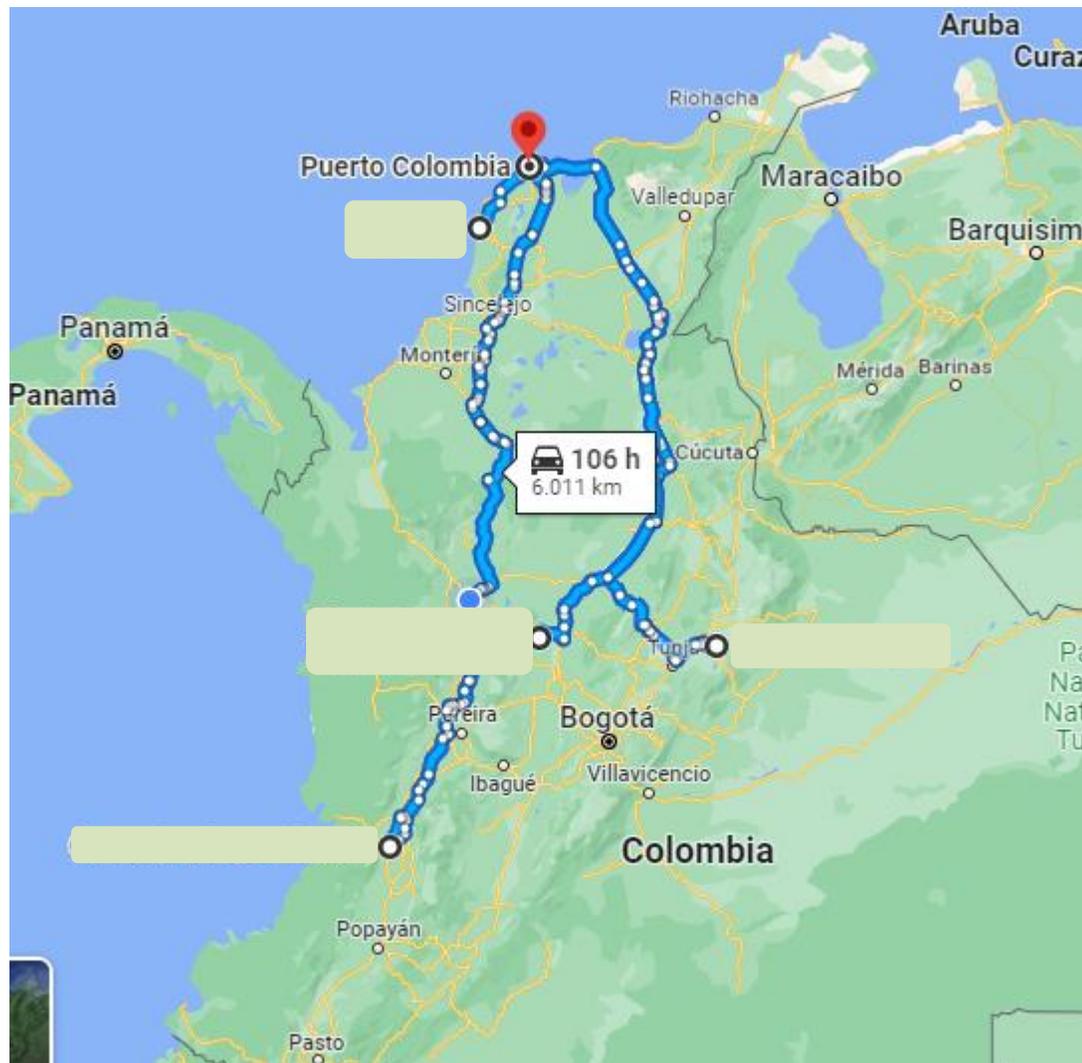


Figura 3-10: Recorridos desde los orígenes a destino Puerto Colombia.

Este proceso se realizó para 113 cabeceras municipales que agrupan alrededor de 1.000 frentes de trabajo divididos entre clientes y concreteras de Cementol. La base de datos consolidada tomó alrededor de cuatro semanas teniendo en cuenta que la combinación entre orígenes y destinos que completan 452 posibles rutas a evaluar dentro del modelo de optimización.

3.3 Matriz de costos

Luego del proceso de consolidación de la matriz de kilómetros se procede a realizar las cotizaciones de las 452 posibles combinaciones de rutas basados en un desarrollo en Excel por parte de la empresa Velotransporte. Este proceso tiene 8 inputs por cada cotización realizada los cuales son:

- Tipo de vehículo: Las configuraciones del vehículo están dadas por la capacidad a movilizar en cada viaje ya que a mayor capacidad tengo la opción de prorratear los costos/mes mucho más rápido que con un vehículo de menor capacidad. Para este modelo se contempla tractocamiones con tráiler S2 y S3 (2 y 3 ejes).
- Tipo de tripulación a realizar el viaje: Pueden ser dos N=sencilla (1 sólo conductor) o D=doble que a su vez tiene dos subdivisiones, una es con cambio en el origen (1 conductor que alcanza a ir y volver dentro de sus 12 horas productivas) y la otra con cambio en el camino (2 conductores para destinos que superan las 12 horas parametrizadas de conducción).
- Origen: Es el lugar donde se carga el vehículo y donde inicia el proceso.
- Tiempo de cargue: Corresponde al tiempo requerido para que el vehículo pueda realizar todo el proceso de alistamiento, papeleo y abarrotar el tráiler que se moverá al destino. Para el ejercicio y por historia este tiempo se parametriza en 2 horas.
- Tiempo de descargue: Por lo general, es un tiempo de 2 horas. Sin embargo, cuando se excede Cementol reconoce un tiempo de stand by del vehículo.

- Destino: Hace alusión a la cabecera municipal donde se entregará el producto transportado.
- Kilómetros totales por perfiles: Es el resultado del ejercicio anterior conectado con el API de Google Maps (matriz de kilómetros) diferenciada por los tipos de perfiles plano, ondulado y montañoso.
- Peajes: Este dato también es extraído del ejercicio anterior, pero estos se deben duplicar ya que los recorridos son completos, es decir, en round trip.

Luego de diligenciar estos campos se procede a correr la macro que conecta los componentes del costo los cuales se pueden entender a mayor detalle en la Tabla 3-6 y así logramos determinar el costo total del viaje completo. Por último, dividimos este costo total sobre los kilómetros totales para consolidar la matriz de costo que será fundamental en el modelo de optimización.

Tabla 3-6: Componentes del costo/km dentro del modelo.

Concepto	Explicación
Salario (con todo)	Salario con factor prestacional según el vehículo y el tipo de tripulación*Factor conductores relevos) / Número de ciclos.
Peajes	Suma del costo de los peajes de la ruta de acuerdo con la categoría del vehículo.
Alimentación	Si se hacen más ciclos que los días disponibles al mes, se haría alimentación nacional/número de ciclos.
Lavada	Costo de las lavadas al mes/número de ciclos.
Juagada	Costo de enjuague por viaje.
Otros gastos	Cargue, descargue, ferry, taxis, básculas, etc.
Hospedaje	Si la ruta es nacional y en tripulación sencilla: hospedaje al mes/número de ciclos.
Montallantas	Costo montallantas por km multiplicado por la distancia.
Parqueadero	Si la tripulación es sencilla: Costo parqueadero al mes según el tipo de vehículo/número de ciclos.
Nómina operaciones	Prorrateso de operaciones por tipo de vehículo al mes/número de ciclos.
Administración	Prorrateso de admón. por tipo de vehículo al mes/número de ciclos.

Casino	Prorrateso de GV admón. y casino por tipo de vehículo al mes/número de ciclos.
SISO Y CES	Prorrateso de SISO y CES (Conductor Eficiente y Seguro) por tipo de vehículo al mes/número de ciclos.
Buses y stand by	Prorrateso de buses y stand by por tipo de vehículo al mes/número de ciclos.
Sobre kilometraje	Si la ruta hace más de 9.627 km/mes, se multiplican los kilómetros excedentes por el costo de sobre kilometraje y se divide entre el número de ciclos al mes.
Costos extras nodo	Costos extras del nodo (arrendamiento, patios, etc.)
Canon	Canon según el tipo de vehículos + factor de tolva en stand by del nodo.
Mantenimiento	Costo mantenimiento correctivo/número de ciclos.
Efectos del sindicato y pendientes judiciales	Prorrateso de pendientes judiciales por tipo de vehículo al mes/número de ciclos.
Dotación	Costo de la dotación del (los) conductor(es) al mes/número de ciclos.
Comunicaciones	Costo de las comunicaciones/número de ciclos.
Combustible	Costo más significativo de la cuenta y es calculado así: $(\text{Km}/\text{Rendimiento}) * \text{Costo galón combustible}$.
Impuestos	Costo asociado a la operación logística.

En la Tabla 3-7 se resumen los costos/km para los destinos Pareto de la operación actual desde cada uno de los orígenes. Cabe resaltar que este ejercicio es el más crucial, por lo tanto, la consolidación de la matriz tomó alrededor de 2 meses con el fin de tener las rutas parametrizadas de manera correcta.

Tabla 3-7: Costo/km para rutas Pareto.

Destino	Rioclaro	Sogamoso	Yumbo	Cartagena
Bogotá	\$5.504	\$4.477	\$4.434	\$4.636
CDM	\$4.783	\$3.787	\$4.169	\$5.167
Manizales	\$6.643	\$5.413	\$5.011	\$5.027
Puerto Colombia	\$4.947	\$4.757	\$5.034	\$5.149

Los costos asociados dentro de la matriz tienen la sensibilidad de operación de más de 13 años con el cliente Cementol y contempla algunos destinos en doble tripulación y otros en sencilla dados por la distancia. La cuenta de combustible contiene el rendimiento para

tránsitos cargados y vacíos con una data de más de 1.000.000 de viajes por lo que tiene una confianza del 98% y está categorizada para los perfiles plano, ondulado y montañoso como se puede observar en la Tabla 3-8. Cuando el vehículo se encuentra cargado el rendimiento baja al 50% aproximadamente ya que el tráiler y la carga requieren mayor esfuerzo del motor.

Tabla 3-8: Rendimiento (kilómetros/galón) del combustible por tipos de perfiles.

Tipo de vehículo	¿Cargado?	Plano	Ondulado	Montañoso
TRACTOCAMIÓN	CARGADO	6.12	5.13	3.45
	VACÍO	11.25	9.18	6.66

3.4 Procesamiento de datos

Los datos del modelo de optimización se realizaron bajo los procesos ETL (Extract, Transform and Load) los cuales se pueden visualizar en la Figura 3-11 ya que tenían múltiples fuentes y se deseaba una calidad significativa de los datos e información que fue suministrada dentro del ejercicio.

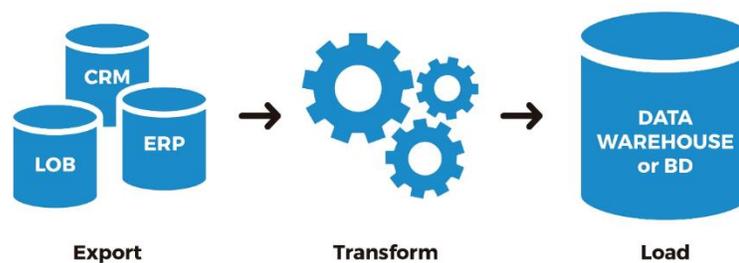


Figura 3-11: Proceso ETL. Extraída del blog Bismart <https://blog.bismart.com/que-hacemos-etl>

Entender el modelo de operación actual permite identificar desviaciones de los datos para entrar a revisar los outliers que se pueden generar como la pandemia COVID-19 entre marzo-junio del 2020 y el paro nacional de abril de 2021. Estos puntos críticos no permitieron tener una operación normalizada por lo que se tienen altos costos y poca rotación de los vehículos, es decir, un alto costo/km.

Luego del manejo de datos y la consolidación de matrices para el software de modelación, el procesamiento computacional presentó novedades por la cantidad de variables y restricciones. Por esta razón, se buscó en la ayuda de GAMS como correr problemas complejos y se encontró la solución para ejecutar las múltiples versiones del problema tratado a lo largo de este trabajo.

En los próximos títulos se revisará GAMS y el servidor NEOS junto a los solver más frecuentes y con mayor popularidad por su desempeño computacional en tipos de problemas de redes de transporte. Cabe resaltar que a modo de validar los demás solver se ejecutaron: Lindo, Gurobi, Krestel, Xa y Xpress encontrando unos tiempos de procesamiento un poco más altos, pero no siendo significativos, sin embargo, la solución óptima se mantenía en cualquier solucionador.

3.5 GAMS

GAMS (General Algebraic Modeling System) es una herramienta que permite diseñar modelos de programación matemática que permiten resolver problemas de optimización. Esta plataforma que es utilizada en más de 120 países está diseñada para vincularse a software desarrollado por terceros que contienen solucionadores tan potentes que modelan y resuelven dentro de un marco simple y contundente problemas complejos de la vida real en la ciencia e ingeniería mediante lenguajes algebraicos. Adicional, GAMS es la configuración principal que ingresa al servidor NEOS para utilizar algunos o la combinación de varios de los motores de solución que están disponibles a toda la comunidad. Lo anterior, porque GAMS tiene dos versiones gratuitas: una enfocada en manejo académico personal con capacidad de modelar problemas de hasta 2.000 variables y restricciones y la otra con foco comunitario para fortalecer la red de usuarios que tiene capacidad de 5.000 variables y restricciones. El manual de usuario se puede encontrar en la página oficial de GAMS y no es un documento difícil de interiorizar porque busca la simplicidad en la forma de explicar las bondades y alcances de la plataforma.

Para el problema MIP o RMIP, GAMS proporciona CPLEX como solucionador de alto rendimiento cuando no se supera las 5.000 variables y restricciones bajo la licencia comunitaria logrando resolver en 0.02 segundos como se muestra en la Figura 3-12. Sin embargo, cuando se supera la capacidad GAMS se conecta al servidor NEOS para realizar la optimización del modelo bajo el solucionador CBC.

```

                S O L V E      S U M M A R Y

MODEL   transport          OBJECTIVE   z
TYPE    RMIP              DIRECTION  MINIMIZE
SOLVER  CPLEX            FROM LINE  399

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE    10158162425.5588

RESOURCE USAGE, LIMIT      0.156 10000000000.000
ITERATION COUNT, LIMIT    113   2147483647
--- *** This solver runs with a community license. No commercial use.
--- GMO setup time: 0.00s
--- Space for names approximately 0.02 Mb
--- Use option 'names no' to turn use of names off
--- GMO memory 0.57 Mb (peak 0.57 Mb)
--- Dictionary memory 0.00 Mb
--- Cplex 20.1.0.1 link memory 0.01 Mb (peak 0.04 Mb)
--- Starting Cplex

--- LP status (1): optimal.
--- Cplex Time: 0.02sec (det. 0.50 ticks)

Optimal solution found
Objective: 10158162425.558826

```

Figura 3-12. Resultados de procesamiento CPLEX en GAMS.

En términos generales, la herramienta GAMS proporciona la facilidad de correr modelos complejos en servidores externos que desarrollan solucionadores de acuerdo con la teoría que los rige y es por esta razón que enriquece mucho más la solución.

3.5.1 CPLEX

Es un solucionador desarrollado por ILOG para problemas lineales, cuadráticos y enteros mixtos. Utiliza un algoritmo dual simplex de última generación que tiene el concepto de Benders en la descomposición como estrategia. Cuando se presenta un problema lineal este solver requiere de mucha memoria ya que ejecuta en paralelo algoritmos alternativos (simplex primario, de barrera, de tamizado, optimizador de red) y la solución está dada por el que termine primero. Para el caso del trabajo, tenemos un problema con enteros mixtos

por lo que CPLEX utiliza un algoritmo de ramificación y corte que resuelve mediante una serie de subproblemas lineales.

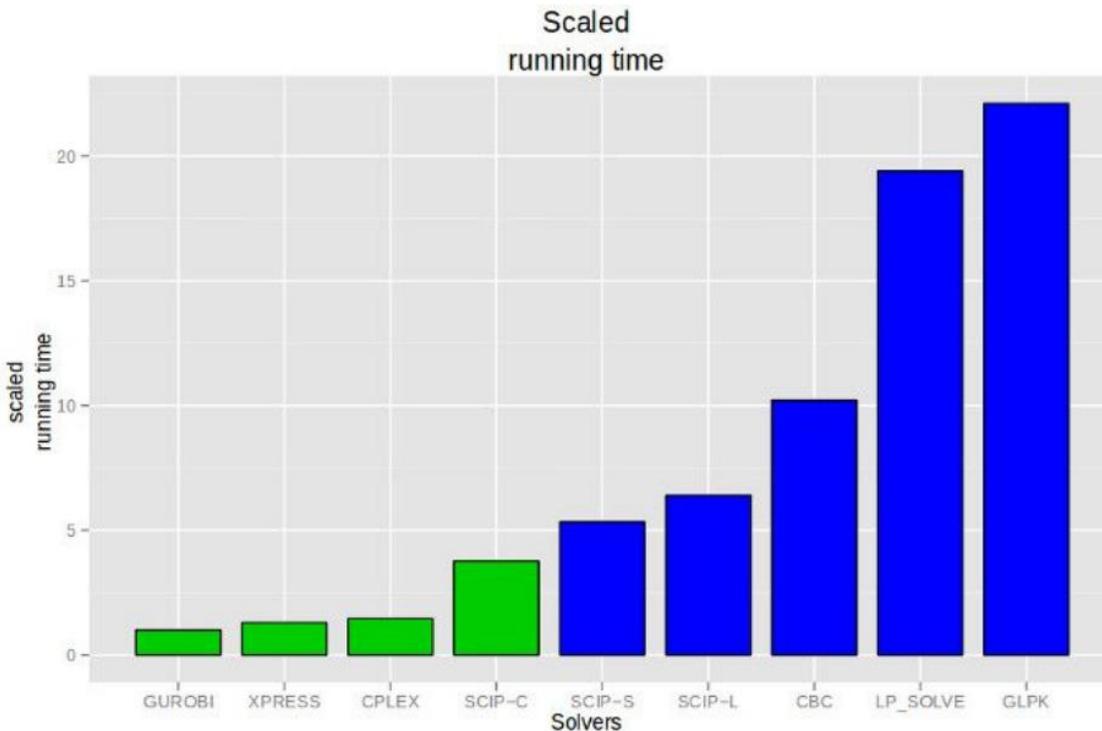


Figura 3-13: Comparativa de tiempo de solución de solvers matemáticos para un problema entero mixto.

Como se puede evidenciar en la Figura 3-13 el solver CPLEX tiene un tiempo de computación óptimo ya que su metodología de descomposición permite que el procesamiento sea rápido y prudente. Sin embargo, (Meindl & Templ, 2012) demuestran experimentalmente que los solver comerciales presentan mejor rendimiento en tiempo de solución que los solver no comerciales.

3.6 Servidor NEOS

El servidor NEOS es un servicio gratuito de última generación para resolver optimizaciones numéricas respaldado por Wisconsin Institute for Discovery de la Universidad de Wisconsin en Madison. Los problemas se ejecutan en máquinas de alto rendimiento localizadas en Estados Unidos, Austria y Portugal. El sitio web ofrece diversas opciones para entender

cómo se conectan con GAMS y que cosas deben tener los formatos antes de ser enviados. Adicional, constantemente están realizando actualizaciones con los desarrolladores de los solver con el fin de generar un buen nivel de servicio y ampliar la red de colaboradores que se distribuyen a nivel mundial.

Las convenciones que debe cumplir el modelo en formato GAMS para resolver el problema de enteros mixtos ya sea bajo el solver CPLEX o CBC son:

- Debe ser autónomo, es decir, sin declaraciones \$include o \$bainclude.
 - No puede ejecutar programas externos, es decir, no puede contener \$call o ejecutar sentencias similares.
 - No puede crear archivos excepto por los resultados.txt que son los outputs del modelo.
- Lo interesante de correr estos modelos en el servidor NEOS es que ofrece la alternativa de revisar los resultados luego de un tiempo determinado mediante un “Job number” y una “password” que llega al correo suministrado y que luego será utilizado para fines promocionales por parte de IBM.

3.6.1 COIN - CBC

CBC (COIN-OR Branch and Cut) es un solucionador para problemas de programación de enteros mixtos que deben relajarse por la complejidad (RMIP). Es código abierto escrito en C++ para los usuarios enfocados en la investigación de operaciones. Fue liderado por John Forest de IBM. El funcionamiento del algoritmo se muestra a continuación:

- Como CBC necesita un solucionador LP entonces accede a la interfaz OSI (OSISolverInterface) de COIN para conectarse usualmente a CLP. Sin embargo, cuando eso no puede suceder se conectará a cualquier solucionador LP que tenga la interfaz OSI.
- Luego de la conexión CBC debe hacer uso de cortes por lo que utilizará CGL (generador de corte Gomory)
- Paso 1: basados en un modelo MIP para minimizar hace que las variables “enteras” sean continuas y soluciona con LP y si dentro de la solución se obtienen valores enteros entonces se termina, de lo contrario, sigue con el paso 2.
- Paso 2: Cuando se tiene un valor no integral se hace una ramificación y se crea dos nodos con un límite inferior y superior para construir un árbol de búsqueda.

- Paso 3: Elije un nodo del árbol.
- Paso 4: Crea una relajación LP y resuelve.
- Paso 5: Pregunta si la solución LP óptima supera la del otro nodo. Puede presentar 3 escenarios posibles. Primero, que no se tenga solución óptima entonces elimine el nodo. Segundo, que se encuentra solución óptima por encima del límite superior por lo que debe eliminarse el nodo. Y tercero, la solución óptima no supera el límite superior por lo que deben actualizarse los límites y volver a correr con árbol de búsqueda.
- Paso 6: Si no se puede eliminar el nodo entonces ramifique creando dos nodos al árbol de búsqueda inicial.

Para el caso en estudio cuando se amplía la cantidad de variables debido a que la demanda se toma para los 12 meses del año GAMS recurre al servidor NEOS para ejecutar el solucionador de COIN – CBC teniendo como premisa que el problema es para variables enteras positivas. La metodología del algoritmo es correcta en el sentido de diversificar las posibilidades tanto de origen-destino que logra obtener el costo óptimo y adicional entrega la matriz de sobrecostos.

4. FORMULACIÓN DEL MODELO

En este capítulo se presenta la formulación matemática del modelo con su respectiva descripción de sus componentes, la explicación de la estimación del parámetro ICTC (Índice de Costos del Transporte de Carga por Carretera) y, por último, la validación del modelo propuesto. En la sección 4.1 se describe el modelo de manera general haciendo alusión al típico problema del transporte.

En la sección 2.24.2 se presenta el modelo matemático de forma detallada desde la definición de índices, conjuntos (matrices), parámetros, variables, restricciones y función objetivo. En la sección 2.34.3 se explica la estimación del parámetro ICTC de acuerdo con los ejercicios calculados por parte del DANE y las proyecciones realizadas para los horizontes del modelo propuesto. Finalmente, en la sección 4.4 se valida el modelo planteado de acuerdo con la realidad de la operación logística teniendo como premisa la historia y el reciente cambio de contrato.

4.1 Descripción general

Después de las generalidades, la revisión del estado del arte, el análisis exploratorio de datos y la selección del software a utilizar en el problema que busca optimizar la red logística de la empresa objeto de estudio se desarrolla el modelo matemático que explica el funcionamiento a través de codificación en GAMS y no mediante caja negra como lo hacen algunos programas comerciales con el fin de encontrar una solución óptima que satisfaga las restricciones de demanda y oferta. Es importante aclarar que el tamaño de flota para cada origen varía constantemente y con el trabajo se desea tener una proyección estratégica para la toma de decisiones de más alto nivel, pero también se espera dar un formalismo a los movimientos de vehículos para apoyar otras zonas cuando se tengan alzas de demanda. Con el código que puede verse en los anexos de este trabajo se realizará una capacitación al personal operativo de la empresa con el fin de que puedan

correr el modelo constantemente y puedan tomar decisiones basadas en los datos y así generar mayor confianza con el cliente.

4.2 Modelo de optimización propuesto

Este ejercicio contempla una demanda determinística para los meses de los años 2023, 2024 y 2025 dada por las condiciones de mercado y las proyecciones con las vías 4G. Para Velotransporte es importante ajustar el tamaño de flota de acuerdo con las necesidades de Cementol con el fin de limpiar el costo fijo de operación. A continuación, se mostrará el detalle del ejercicio de optimización.

4.2.1 Definición de conjuntos

En la Tabla 4-1 se muestra los conjuntos con sus respectivos índices que se utilizaron para el modelo que optimiza la red de transporte para el cliente Cementol.

Tabla 4-1: Tabla de índices modelo de transporte.

ÍNDICES		
ÍNDICE	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
j	Plantas	Rioclaro, Sogamoso, Yumbo, Cartagena
i	Clientes	aguachica, agustin-codazzi, amaga, anserma, armenia, astrea, barrancabermeja, barranquilla, belalcazar, bello, betulia, bogota, bosconia, briceno, bucaramanga, buenaventura, buritica, cajica, cali, canasgordas, candelaria, cartagena, cdm, chia, chibolo, chiriguana, cienaga, cisneros, copacabana, cota, cucuta, dos-quebradas, duitama, el-carmen-de-atrato, el-tambo, fundacion, funza, gachancipa, galapa, giraldo, girardota, guadalajara-de-buga, guaduas, guamo, guarne, ipiales, ituango, jamundi, la-calera, la-virginia, lebrija-la-paz, lebrija-la-sorda, lebrija-rio-sucio, madrid, malambo, manaure, manizales, maria-la-baja, marinilla, medellin, mosquera, nemocon, nueva-granada, ocana, pailitas, palermo, palestina, palmira, pasto, pereira, piedecuesta, popayan, puerto-colombia, puerto-tejada, quibdo, riohacha, rionegro, sabanalarga, sabaneta, san-andres-de-tumac, san-gil, sanjose, san-luis-de-gaceno, san-onofre, san-pedro, santa-marta, santo-domingo, sj-rio-seco, soacha, sogamoso, soledad, suarez, tado, tenjo, tibu, titiribi, tocancipa, toloro, tulua, tunja, turbaco, turbana, ubate, uraba, uramita, valle-del-guamuez, valledupar, venecia, vijes, villavicencio, villeta, yopal, yumbo
t	Períodos de tiempo	t1, t2, t3, t4, t5, t6, t7, t8, t9, t10, t11, t12, t13, t14, t15, t16, t17, t18, t19, t20, t21, t22, t23, t24, t25, t26, t27, t28, t29, t30, t31, t32, t33, t34, t35, t36

El horizonte del ejercicio son 36 meses contados a partir de enero de 2023 y finalizados en diciembre de 2025. Se tienen agrupados los clientes y concretos de Cementol en 113 cabeceras municipales que están a lo largo y ancho del país. Adicional, se localizan las 4 plantas productoras de cemento que se encargan de satisfacer la demanda nacional.

4.2.2 Definición de parámetros matriciales

Como se muestra en la Tabla 4-2 los parámetros o matrices construidas para el modelo son los datos más cruciales al momento de consolidar ya que requieren experticia por parte del analista para que en la validación se tenga un ajuste lo más cercano a la realidad.

Tabla 4-2: Tabla de parámetros matriciales modelo de transporte.

PARÁMETROS MATRICIALES							
CONJUNTO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN PARCIAL					
$a_{j,t}$	capacidad de producción de la planta j en toneladas en el período t		t1	t2	t3	...	t36
		rioclaro	74850	74850	...	...	74850
		sogamoso	26395	26395	...	...	26395
		yumbo	30801	30801	...	...	30801
		cartagena	37806	37806	...	...	37806
$r_{j,t}$	rotación ⁸ de la flota en origen j en viajes en el período t		t1	t2	t3	...	t36
		rioclaro	35.1	38.1	...	...	35.4
		sogamoso	31.5	36.9	...	...	33.6
		yumbo	43.5	48.3	...	...	48.0
		cartagena	48.9	53.4	...	...	50.1
$b_{i,t}$	demanda en toneladas en el cliente i en el período t		t1	t2	t3	...	t36
		aguachica	94	102	...	...	116
		agustin-codazzi	365	394	...	...	420
	
		yumbo	3650	3762	...	...	4317
$d_{i,j}$	distancia entre cliente i y		rioclaro	sogamoso	..	cartagena	
		aguachica	818	996	..	914	

⁸ Dentro del cálculo de rotación para el modelo se consolidaron los despachos nacionales del 2021 por cada origen. Luego se determinó por día la cantidad de viajes que realizó en promedio cada vehículo. Finalmente, se calculó la cantidad de viajes por mes por vehículo para cada origen.

	planta j en kilómetros	agustin-codazzi	1253	1430	..	823
	
		yumbo	1023	1324	..	2075
$f_{i,j}$	costo por kilómetro en pesos colombianos de transportar de planta j a cliente i		rioclaro	sogamoso	..	cartagena
		aguachica	5315	3586	..	3534
		agustin-codazzi	3576	4623	..	3808
	
		yumbo	5852	5566	..	5136

La capacidad de producción de las plantas se mantiene constante y está bajo el conjunto $a_{j,t}$ ya que para el horizonte de tiempo del trabajo el cliente Cementol no tiene mapeado mejoras en sus plantas por el alto costo y el tiempo improductivo que implica realizar las intervenciones. El conjunto de rotación $r_{j,t}$ cambia conforme el comportamiento cíclico del año ya que no es lo mismo en enero cuando se tienen vacaciones colectivas con respecto a septiembre-octubre donde se tienen los mayores picos de pedidos. La demanda $b_{i,t}$ se considera determinística y apunta a lograr mayor cobertura por los proyectos viales 4G en el país. El conjunto de distancia $d_{i,j}$ es la consolidación de kilómetros en round trip desde cada origen a cada destino considerando que algunos tránsitos deben realizarse por vías aptas para el peso de 48.000 kg o 52.000 kg dependiendo de la configuración del tráiler. Finalmente, la matriz de costos está dada por el conjunto $f_{i,j}$ a partir de los costos revisados previamente en la Tabla 3-6 y la matriz de distancias calcula el costo/km desde cada planta hacia cada destino.

4.2.3 Definición de parámetros escalares

En la Tabla 4-3 se resumen los escalares y parámetros considerados en el modelo, éstos fueron incluidos dada la importancia para tener cercanía con la realidad.

Tabla 4-3: Tabla de parámetros escalares modelo de transporte.

PARÁMETROS ESCALARES			
PARÁMETRO	NOMBRE	VALOR	UNIDADES
cap	capacidad por viaje en toneladas	34	toneladas

<i>ICTC</i>	Índice de costos de transporte de carga 2022, 2023 y 2024	4.19% - Dic 2022 3.35% - Dic 2023 3.55% - Dic 2024	adimensional
<i>sizing</i>	tamaño de flota actual	116	#vehículos
<i>available</i>	disponibilidad de los vehículos	93%	adimensional
<i>sale</i>	disposición para venta vehículo mercado usados	\$20.000.000	\$ - pesos
<i>rent</i>	costo fijo de canon para ingreso de vehículo por mes	\$12.500.000	\$ - pesos
$c_{i,j}$	costo de transporte en pesos colombianos de origen j a destino i	$c_{i,j} = f_{i,j} \times d_{i,j} + (f_{i,j} \times ICTC) \times d_{i,j}$	costo/viaje

La capacidad de carga de los vehículos se establece en 34 toneladas teniendo como premisa que es el valor con el que se cotizan las rutas dentro de la empresa objeto de estudio. El tamaño de flota actual para la operación con Cementol está en 116 tractocamiones distribuidos a lo largo del territorio nacional. El porcentaje de disponibilidad se fija en 93% el cual es el pactado con el aliado que suministra los vehículos mediante renting y que también permite la disposición para la venta en el mercado de usados dejando para Velotransporte un ahorro por \$20 millones de pesos ya que el canon es prorrateado con 120.000 kilómetros/año y a un contrato de mínimo 5 años de operación cuando eso no sucede se reconoce ese valor por incumplimiento a lo previamente firmado entre las partes. Además, cuando se requiere ingresar un vehículo adicional solamente es acordar la fecha de inicio de operación para empezar a pagar el canon o la renta que está estipulada en \$12.5 millones de pesos/mes. El cálculo del costo/viaje tiene contemplado el incremento del ICTC de cada año el cual se explicará en secciones posteriores ya que la estimación no es algo trivial.

4.2.4 Definición de variables

Como se puede observar en la Tabla 4-4 las variables son enteras las cuales representan viajes, #vehículos y pesos colombianos.

Tabla 4-4: Tabla de variables modelo de transporte.

VARIABLES			
VARIABLE	NOMBRE	TIPO	UNIDADES
$X_{i,j,t}$	cantidad de viajes de origen j a cliente i en el tiempo t	Entera	#viajes
$cars_{j,t}$	cantidad de carros por origen j en el tiempo t	Entera	#vehículos

$sizing_t$	tamaño de flota en el tiempo t	Entera	#vehículos
$newcars_t$	cantidad de carros nuevos en el tiempo t	Entera	#vehículos
$costonewcars_t$	costo por carros nuevos en el tiempo t	Entera	\$ - pesos
FRS_t	cantidad de carros salientes en el tiempo t	Entera	#vehículos
$ingresoFRS_t$	ahorro por carros salientes en el tiempo t	Entera	\$ - pesos

La variable $X_{i,j,t}$ es la que se optimiza y nos indica la cantidad de viajes que deben realizarse por cada origen para minimizar el costo de transporte para la demanda previamente calculada en los 3 años siguientes. Las demás variables responden al ejercicio de dimensionamiento de vehículos por mes y las decisiones estratégicas que deben tomarse para garantizar un buen nivel de servicio.

Por ejemplo, si en el mes 2 la cantidad de vehículos necesaria que nos indica el software supera los 116 tractocamiones actuales se debe revisar la opción de ingresar flota a la operación teniendo como premisa que costará \$12.5 millones de pesos por cada vehículo. Pero si, por el contrario, el dimensionamiento está por debajo de 116 la decisión será disponer los vehículos en el mercado de usados y así lograr permear el ahorro de \$20 millones de pesos. La clave será entonces analizar todos los meses de cada año para identificar desviaciones y tomar algunas decisiones de manera anticipada para impactar positivamente el costo de operación logística. Este proceso se espera sea automático siempre y cuando se actualice la información de demanda.

4.2.5 Definición de restricciones

En la Tabla 4-5 se explican las limitaciones con descripción y las respectivas unidades:

Tabla 4-5: Tabla de restricciones modelo de transporte.

RESTRICCIONES		
RESTRICCIÓN	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
$supply_{j,t}$	<p>Límite de suministro en la planta j en el período t La sumatoria de viajes calculados para cada origen y por cada tiempo deben ser menor o igual que las capacidades de las plantas productoras de cemento a nivel nacional.</p> $\sum_i X_{i,j,t} \leq a_{j,t} / cap$ $\forall j, \forall t \in a_{j,t}$	#viajes

	<p>Parámetros $a_{j,t}$: capacidad de la planta j en toneladas en período t [toneladas] cap: capacidad por viaje en toneladas [toneladas/viaje]</p> <p>Variables $X_{i,j,t}$: cantidad de viajes de origen j a cliente i en período t [viajes]</p>	
<p>$demand_{i,t}$</p>	<p>Satisfacer demanda del mercado i en el período t La sumatoria de viajes calculados por parte del software que optimizan la red para cada origen y por cada tiempo deben ser mayor o igual que la demanda para cada destino que solicita cemento a nivel nacional.</p> $\sum_j X_{i,j,t} \geq b_{i,t} / cap$ $\forall i, \forall t \in b_{i,t}$ <p>Parámetros $b_{i,t}$: demanda en toneladas en el cliente i en el período t [toneladas] cap: capacidad por viaje en toneladas [toneladas/viaje]</p> <p>Variables $X_{i,j,t}$: cantidad de viajes de origen j a cliente i en período t [viajes]</p>	<p>#viajes</p>
<p>$car_{j,t}$</p>	<p>Carros por planta j en el período t La cantidad de vehículos por cada origen y período corresponde a la cantidad de viajes que optimizan la red divididos por la rotación y la disponibilidad de cada vehículo.</p> $cars_{j,t} + \sum_i X_{i,j,t} / r_{j,t} / available \geq 0$ $\forall j, \forall t \in b_{i,t}, cars_{j,t}$ <p>Parámetros $r_{j,t}$: rotación de la flota en planta j en viajes en período t [viajes/vehículo] $available$: disponibilidad de los vehículos [adimensional]</p> <p>Variables $X_{i,j,t}$: cantidad de viajes de origen j a cliente i en período t [viajes]</p>	<p>#vehículos</p>

	<p>$cars_{j,t}$: cantidad de carros por origen j en el tiempo t [vehículos]</p>	
$newcar_t$	<p>Carros nuevos en el período t La cantidad de vehículos nuevos por cada período se dará si la sumatoria de vehículos de cada uno de los orígenes es mayor que el tamaño de flota actual. Adicional, se tendrá en cuenta la cantidad de vehículos que salieron en el período inmediatamente anterior.</p> $newcars_t - sizing_t + \sum_j cars_{j,t} - FRS_{t-1} \leq 0$ $\forall t \in newcars_t, sizing_t, FRS_{t-1}$ <p>Variables $newcars_t$: cantidad de carros nuevos en el tiempo t [vehículos] $sizing_t$: tamaño de flota en el tiempo t [vehículos] $cars_{j,t}$: cantidad de carros por origen j en el tiempo t [vehículos] FRS_{t-1}: cantidad de carros salientes en el tiempo t-1 [vehículos]</p>	#vehículos
$costnewcar_t$	<p>Costo de carros nuevos en el período t El costo de ingresar nuevos vehículos por cada período es igual a la cantidad de carros nuevos que ingresan por el canon que debe pagarse al aliado renting.</p> $costnewcars_t = newcars_t \times rent$ $\forall t \in costnewcars_t, newcars_t$ <p>Parámetros $rent$: costo fijo de canon para ingreso de vehículo [\$ - pesos/vehículo]</p> <p>Variables $costnewcars_t$: costo por carros nuevos en el tiempo t [\$ - pesos] $newcars_t$: cantidad de carros nuevos en el tiempo t [vehículos]</p>	\$ - pesos
FR_t	<p>Carros salientes en el período t La cantidad de vehículos salientes por cada período se dará si la sumatoria de vehículos de cada uno de los orígenes es menor que el tamaño de flota actual. Adicional, se tendrá en cuenta la cantidad de vehículos que ingresaron en el período inmediatamente anterior.</p>	#vehículos

	$FRS_t - sizing_t + \sum_j cars_{j,t} + newcars_{t-1} \geq 0$ $\forall t \in FRS_t, sizing_t, newcars_{t-1}$ <p>Variables <i>FRS_t</i>: cantidad de carros salientes en el tiempo t [vehículos] <i>sizing_t</i>: tamaño de flota en el tiempo t [vehículos] <i>cars_{j,t}</i>: cantidad de carros por origen j en el tiempo t [vehículos] <i>newcars_{t-1}</i>: cantidad de carros nuevos en el tiempo t-1 [vehículos]</p>	
<p><i>ingresoFR_t</i></p>	<p>Ahorro de carros salientes en el período t El ahorro por los vehículos salientes ya que se exponen en el mercado de usados por cada período es igual a la cantidad de carros salientes por el valor de amortización del canon.</p> $ingresoFRS_t = FRS_t \times sale$ $\forall t \in ingresoFRS_t, FRS_t$ <p>Parámetros <i>sale</i>: disposición para venta vehículo mercado usados [\$ - pesos /vehículo]</p> <p>Variables <i>ingresoFRS_t</i>: ahorro por carros salientes en el tiempo t [\$ - pesos] <i>FRS_t</i>: cantidad de carros salientes en el tiempo t [vehículos]</p>	<p>\$ - pesos</p>

La restricción *supply_{j,t}* garantiza que el modelo no sobrepase las capacidades máximas de producción de las plantas. Es importante aclarar que para el período de optimización (36 meses – 3 años) el cliente Cementol no tiene proyecciones de mejoras en sus plantas por el alto costo y el tiempo improductivo que implica realizar las intervenciones. Las unidades están dadas por #viajes máximos que pueden suministrarse desde cada origen. La restricción *demand_{i,t}* permite cumplir las proyecciones de demanda determinísticas dadas por Cementol para sus clientes y concretos agrupadas dentro de 113 cabeceras municipales. Las unidades corresponden a #viajes necesarios para cada frente de trabajo. La restricción *car_{j,t}* hace referencia al dimensionamiento necesario por cada origen y por

cada período de tiempo, es decir, indica la cantidad de vehículos que deben estar operativos para cumplir las exigencias del mercado sin sobrepasar las capacidades de las plantas y las unidades son #vehículos. Las restricciones $newcar_t$ y $costnewcar_t$ calculan la cantidad de vehículos que deben ingresar a la operación por cada tiempo para dar cumplimiento a los niveles de servicio y el costo que implica dichos ingresos respectivamente. Cuando se habla de newcars se hace referencia a rentarlos con el aliado. Finalmente, las restricciones FR_t y $ingresoFR_t$ calculan la cantidad de vehículos que sobran en la operación por cada tiempo comparados con el tamaño de flota actual y el ahorro que implica dichas salidas al mercado de usados respectivamente.

4.2.6 Función objetivo

Tabla 4-6: Función objetivo modelo de transporte.

FUNCIÓN OBJETIVO
Descripción: Minimizar el costo total dado por z Unidades: [\$] pesos colombianos
<p>Cost</p> $z = \sum_i \sum_j \sum_t (c_{i,j} \times X_{i,j,t}) + \sum_t costnewcars_t - \sum_t ingresoFRS_t$ <p>Parámetros matriciales $a_{j,t}$: capacidad de la planta j en toneladas en período t [toneladas] $r_{j,t}$: rotación de la flota en planta j en viajes en período t [toneladas/viaje] $b_{i,t}$: demanda en toneladas en el cliente i en el período t [toneladas] $d_{i,j}$: distancia entre cliente i y planta j en kilómetros [kilómetros] $f_{i,j}$: costo por kilómetro en pesos colombianos de transportar de planta j a cliente i [\$ - pesos / kilómetro]</p> <p>Parámetros escalares cap: capacidad por viaje en toneladas [toneladas/viaje] $ICTC$: Índice de costos de transporte de carga 2022, 2023 y 2024 [adimensional] $sizing$: tamaño de flota actual [vehículos] $avaible$: disponibilidad de los vehículos [adimensional] $sale$: disposición para venta vehículo mercado usados [\$ - pesos] $rent$: costo fijo de canon para ingreso de vehículo [\$ - pesos] $c_{i,j}$: ⁹costo de transporte en pesos colombianos por origen j a destino i [\$ - pesos/viaje]</p>

⁹ Se refiere al costo unitario por viaje teniendo en cuenta la matriz de costos vista en el **Tabla 3-6**

Variables

$X_{i,j,t}$: cantidad de viajes de origen j a cliente i [viajes]

$cars_{j,t}$: cantidad de carros por origen j en el tiempo t [vehículos]

$sizing_t$: tamaño de flota en el tiempo t [vehículos]

$newcars_t$: cantidad de carros nuevos en el tiempo t [vehículos]

$costnewcars_t$: costo por carros nuevos en el tiempo t [\$ - pesos]

FRS_t : cantidad de carros salientes en el tiempo t [vehículos]

$ingresoFRS_t$: ahorro por carros salientes en el tiempo t [\$ - pesos]

En la Tabla 4-6 se muestra la función objetivo para el modelo planteado que optimiza la red de transporte, la cual representa el costo total de operación y por eso su sentido es de minimización. En esta ecuación se calcula primero los costos de transportar los viajes desde los orígenes óptimos hacia los respectivos destinos. Segundo, los costos de ingresar más vehículos a la operación para cumplir los niveles de servicio y, por último, el ingreso por disponer de los vehículos para su respectiva venta en el mercado de usados (como estamos minimizando en la fórmula se resta este valor).

4.3 Estimación parámetro ICTC

El ICTC (Índice de Costos del Transporte de Carga por Carretera) mide todos los cambios promedio de precios de una bolsa representativa de bienes y servicios, con el fin de generar un punto de partida en la movilización de un vehículo que presta sus servicios de transporte de carga en el país. Es un medidor sofisticado y técnico que sirve como guía en los precios de los fletes pactados entre transportador y generador de carga (DANE, 2022). Por los constantes cambios en el mercado se hace necesario que el Ministerio de Transporte se reúna con los principales generadores de carga y transportadores con el fin de unir conocimientos y establecer mediciones reales que aporten al fortalecimiento de formalizar el sector de transporte en Colombia. Los usuarios pueden acceder a la información mediante la página WEB del DANE ya que desde abril de 2016 se están actualizando los valores mes a mes con la referencia del año 2015 para generar comparaciones y determinar las desviaciones (DANE, 2022).

La unidad de observación que utiliza el DANE hace referencia a los lugares donde los dueños de los vehículos adquieren productos y servicios que son necesarios para ejercer las funciones como transportador de carga en el país. Adicional, contempla empresas de financiamiento, aseguradoras, secretarías de hacienda, alcaldías, peajes ubicados a nivel

nacional. Dentro del tipo de investigación se clasifica como encuesta no probabilística y maneja un período de observación de 20 a 22 días por mes y se compara con el diciembre de 2015. Se realiza desagregación del total nacional mediante 8 principales corredores según: el tipo de vehículo (de 2 a 6 ejes), modelos¹⁰ (< 10 años, 10 < entre <19 años y > 20 años), grupos, subgrupos y clases de costo. La formulación para calcularlo está dada por la variante de los índices tipo Laspeyres el cual utiliza medias geométricas en el nivel básico y promedios aritméticos ponderados en los niveles agregados (DANE, 2022). Los componentes de la estructura contienen dos niveles:

- Nivel fijo: aplica el índice asociada a una ponderación de costos fijos y se actualiza a partir de encuestas básicas y de caracterización en el transporte.
- Nivel flexible: se modifica por cambios en los modelos recurrentes de consumo calculando sobre una escala más amplia de artículos y se actualiza con mayor velocidad el patrón de seguimiento de precios.

4.3.1 Proyecciones ICTC 2022 – 2024

Dentro del ejercicio de modelación se debe contemplar que cada año se incrementan las tarifas con el cliente y los costos que están anclados a la canasta del transporte por cambios en la política del país, incrementos de los productos básicos según IPC, apertura de nuevos peajes, inversión extranjera, entre otros. A continuación, en la Tabla 4-7 se comparten los resultados de un ejercicio de medias móviles para los 33 meses siguientes que son claves en la optimización de la red ya que con el acumulado mes de cierre de cada año se incrementarán los costos asociados al transporte el próximo año. Por ejemplo, el ICTC acumulado de diciembre de 2022 será el incremento esperado en los costos de la red para el 2023.

Tabla 4-7: Proyecciones ICTC en Colombia.¹¹

Mes	Variación porcentual
abr-22	3.68%

¹⁰ La desagregación por modelo contempla que un vehículo entre más tiempo es más propenso a sufrir novedades mecánicas por lo que su costo de transporte es más alto

¹¹ Las variaciones que se muestran mes a mes corresponden al acumulado, por ejemplo, entre abril y mayo de 2022 la variación de un mes a otro es de tan sólo de 0.34%, sin embargo, se suman para tener el impacto a cierre de año ya que ese valor será tenido en cuenta como el ICTC.

may-22	4.02%
jun-22	4.00%
jul-22	3.80%
ago-22	3.60%
sep-22	3.80%
oct-22	3.97%
nov-22	4.18%
dic-22	4.19%
ene-23	1.81%
feb-23	2.01%
mar-23	2.06%
abr-23	2.11%
may-23	2.34%
jun-23	2.39%
jul-23	2.95%
ago-23	3.39%
sep-23	3.73%
oct-23	3.73%
nov-23	3.53%
dic-23	3.35%
ene-24	3.56%
feb-24	3.73%
mar-24	3.96%
abr-24	3.96%
may-24	1.60%
jun-24	1.80%
jul-24	1.86%
ago-24	1.91%
sep-24	2.15%
oct-24	2.21%
nov-24	2.77%
dic-24	3.55%

Como se puede observar en la Figura 4-1 se espera un comportamiento similar de años históricos ya que el 2020 tiene el efecto pandemia COVID-19 que altera la normalidad del ICTC en el país por alcanzar cifras negativas. El comportamiento cíclico está fundamentado en vacaciones colectivas por calendarios académicos, cambios de legisladores, variaciones en exportaciones e importaciones, cambios arancelarios, e-commerce, entre otros.

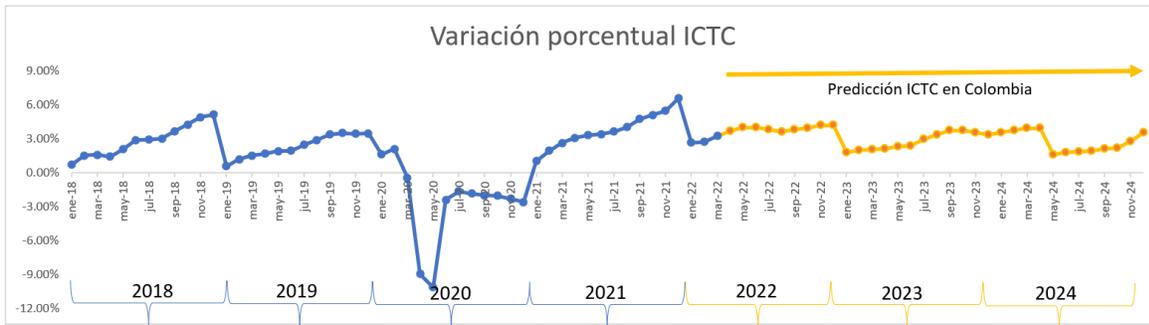


Figura 4-1: Comportamiento histórico y proyección del ICTC en Colombia.

Las proyecciones del ICTC son conservadoras y reflejan un comportamiento similar al cálculo realizado por parte del DANE. Para fines del modelo no se contemplan impactos significativos como una postpandemia o algún fenómeno natural de tal envergadura. Se espera el indicador se establezca a raíz del crecimiento de la economía del país.

4.4 Validación del modelo propuesto

Dentro del proceso de validación es importante resaltar que se consolidó la data real de la operación logística desde febrero de 2019 hasta el cierre de marzo de 2022 con el fin de identificar el ajuste histórico pese a dos hitos importantes: COVID-19 entre marzo-abril-mayo de 2020 y paro nacional convocado por los diferentes gremios en abril-mayo de 2021.

Durante 12 años el contrato de operación logística entre Velotransporte y Cementol fue denominado “libros abiertos” en los cuales todas las novedades como derrumbes, paros armados, cancelaciones de pedidos, fenómenos naturales, entre otros, eran reconocidos mediante un ajuste a Velotransporte por su fidelización en el servicio. Lo anterior, comprometía que se mantuvieran los indicadores de operación hacia los clientes de Cementol por encima del 98% de cumplimiento. Sin embargo, luego de varios acercamientos por el alto costo que implica este modelo se acordó aumentar las tarifas lo necesario para que Velotransporte asumiera todas las novedades que se llegasen a presentar en el día a día. Desde el 01 de junio de 2021 el contrato pasó a ser tarifa fija o “libros cerrados” donde prácticamente todos los sobrecostos deben ser asumidos por el transportador. Por esta razón, cobra mayor importancia realizar este tipo de ejercicios que pretenden optimizar la red completa. En la Tabla 4-8 se consolidó la información real de

operación de febrero 2019 a mayo 2021, es decir, un total de 28 meses antes del cambio de contrato y en la Tabla 4-9 se consolidaron 10 meses luego del cambio de contrato, el cual es vigente y tiene una duración de 2 años.

Tabla 4-8: Resultados reales para comparación del modelo antes de cambio de contrato.

REALIDAD ANTES DE CAMBIO DE CONTRATO					
Mes	Toneladas	Costo total	KM totales	Costo/km	% ajuste realidad
feb-19	167,580	\$ 8,275,484,075	1,432,674	\$ 5,776	90%
mar-19	173,024	\$ 8,766,580,688	1,594,025	\$ 5,500	95%
abr-19	157,027	\$ 8,552,429,920	1,486,889	\$ 5,752	91%
may-19	176,192	\$ 8,842,330,972	1,673,132	\$ 5,285	99%
jun-19	163,072	\$ 8,363,253,226	1,464,940	\$ 5,709	91%
jul-19	165,432	\$ 8,789,212,540	1,609,914	\$ 5,459	95%
ago-19	162,554	\$ 8,642,191,759	1,579,486	\$ 5,472	95%
sep-19	157,200	\$ 8,711,730,146	1,548,269	\$ 5,627	93%
oct-19	162,044	\$ 8,859,832,179	1,614,811	\$ 5,487	95%
nov-19	141,399	\$ 8,546,721,426	1,490,459	\$ 5,734	91%
dic-19	139,564	\$ 8,741,278,194	1,425,257	\$ 6,133	85%
ene-20	125,232	\$ 8,201,781,183	1,287,741	\$ 6,369	82%
feb-20	154,275	\$ 8,646,462,238	1,498,356	\$ 5,771	90%
mar-20	108,087	\$ 8,027,742,867	1,094,785	\$ 7,333	71%
abr-20	14,423	\$ 3,282,483,813	215,678	\$ 15,219	34%
may-20	99,796	\$ 4,770,807,758	1,103,365	\$ 4,324	121%
jun-20	119,028	\$ 7,335,944,775	1,273,303	\$ 5,761	90%
jul-20	139,075	\$ 7,952,203,776	1,393,634	\$ 5,706	91%
ago-20	140,202	\$ 8,107,423,932	1,380,579	\$ 5,872	89%
sep-20	144,928	\$ 8,149,501,934	1,437,301	\$ 5,670	92%
oct-20	143,124	\$ 8,217,895,478	1,450,362	\$ 5,666	92%
nov-20	130,913	\$ 8,007,429,684	1,357,944	\$ 5,897	88%
dic-20	116,587	\$ 7,773,897,832	1,263,274	\$ 6,154	85%
ene-21	115,336	\$ 7,652,414,482	1,250,134	\$ 6,121	85%
feb-21	131,429	\$ 7,939,679,442	1,364,633	\$ 5,818	90%
mar-21	140,056	\$ 8,181,168,492	1,429,961	\$ 5,721	91%
abr-21	121,714	\$ 7,915,758,115	1,295,020	\$ 6,112	85%
may-21	97,281	\$ 7,370,449,654	1,055,682	\$ 6,982	75%

Si omitimos el outliers principal que nos dejó la pandemia en los meses de marzo-abril-mayo el modelo tiene un ajuste del 91% con respecto a la realidad como se puede ver en la Tabla 4-11. No obstante, el ajuste del modelo se validó para los 10 primeros meses de

entrada en vigor del nuevo contrato y el ajuste logró ser del 95%, siendo mucho más acertado a las condiciones actuales de operación.

Tabla 4-9: Resultados reales para comparación del modelo después de cambio de contrato.

REALIDAD DESPUÉS DE CAMBIO DE CONTRATO					
Mes	Toneladas	Costo total	KM totales	Costo/km	% ajuste realidad
jun-21	120,297	\$ 6,671,818,869	1,266,406	\$ 5,268	99%
jul-21	135,774	\$ 7,110,297,395	1,378,624	\$ 5,158	101%
ago-21	130,482	\$ 7,548,373,828	1,343,095	\$ 5,620	93%
sep-21	131,246	\$ 6,651,048,649	1,300,559	\$ 5,114	102%
oct-21	129,401	\$ 7,250,392,038	1,304,839	\$ 5,557	94%
nov-21	133,413	\$ 7,261,350,652	1,313,773	\$ 5,527	94%
dic-21	129,793	\$ 7,030,428,970	1,285,643	\$ 5,468	95%
ene-22	113,273	\$ 6,682,899,791	1,130,546	\$ 5,911	88%
feb-22	132,069	\$ 7,716,243,607	1,375,479	\$ 5,610	93%
mar-22	141,098	\$ 8,077,374,516	1,451,648	\$ 5,564	94%

En la Figura 4-2 vemos el comportamiento mes a mes de ajuste del modelo a la realidad de la operación logística. La desviación más significativa se presentó en enero de 2022 con un 88% puesto que el costo/km real quedó en \$5.911 y el modelo en GAMS como se puede ver en la Figura 4-3 arrojó un costo total de \$10.158.162.425 con unos kilómetros totales dados por el resumen del ejercicio en la Tabla 4-10 de 1.948.618 lo que nos da un costo/km modelo de \$5.213. Lo anterior, puede explicarse por la lenta reactivación económica del país debido a las vacaciones colectivas de los diferentes sectores y a que las obras de infraestructura debían esperar que algunas instituciones del gobierno aprobarán proyectos de las vías 4G.

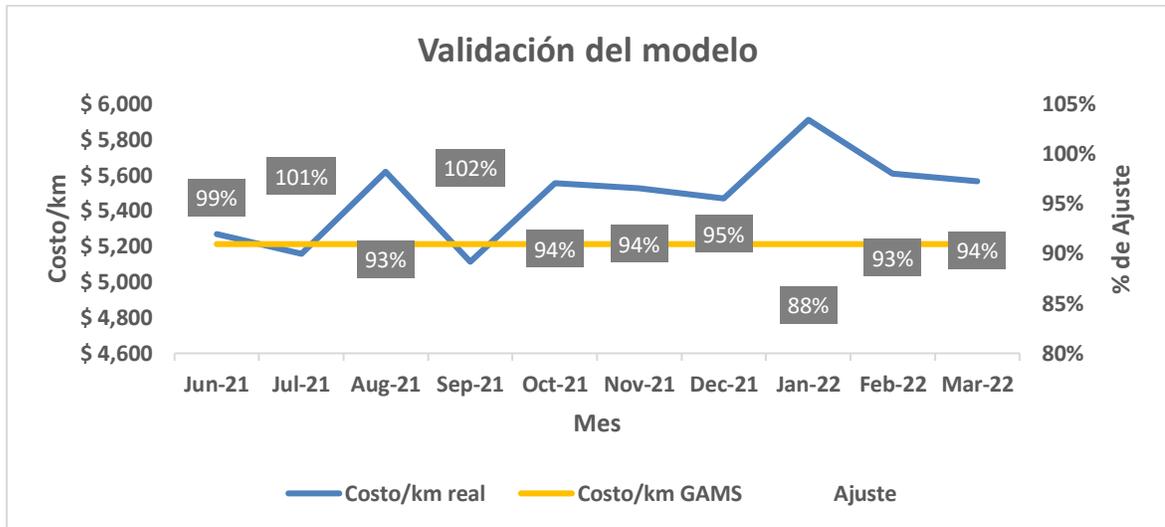


Figura 4-2: Comportamiento de ajuste del modelo.

Los resultados del modelo ejecutado en el servidor NEOS corresponden a un problema de tipo RMIP (variables enteras mixtas) y solucionado con CPLEX bajo la licencia comunitaria como se puede ver en la Figura 4-3. Se exportaron los datos a Excel para realizar el cruce de orígenes-destinos determinando la cantidad de toneladas y kilómetros que estipuló GAMS como resultado óptimo de operación dadas en la Tabla 4-10. Un dato de no menor importancia es que dichas toneladas representan aproximadamente 4.368 viajes que es a la actualidad un ajuste del 97%.

Tabla 4-10: Resumen modelo GAMS.

MODELO GAMS			
Toneladas modelo	Costo óptimo modelo	KM totales	Costo/km
148,525	\$ 10,158,272,903	1,948,618	5,213

```

S O L V E      S U M M A R Y

MODEL  transport      OBJECTIVE  z
TYPE   RMIP           DIRECTION  MINIMIZE
SOLVER CPLEX         FROM LINE  399

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE    10158162425.5588

RESOURCE USAGE, LIMIT      0.156 10000000000.000
ITERATION COUNT, LIMIT    113   2147483647
--- *** This solver runs with a community license. No commercial use.
--- GMO setup time: 0.00s
--- Space for names approximately 0.02 Mb
--- Use option 'names no' to turn use of names off
--- GMO memory 0.57 Mb (peak 0.57 Mb)
--- Dictionary memory 0.00 Mb
--- Cplex 20.1.0.1 link memory 0.01 Mb (peak 0.04 Mb)
--- Starting Cplex
    
```

Figura 4-3: Resultados GAMS.

Un modelo que refleje un comportamiento del 95% de la realidad permite hacer conjeturas a un horizonte de tiempo mayor y aporta de manera clave a la toma decisiones estratégicas de cara a la continuidad del contrato o apertura de nuevas negociaciones. Así, Velotransporte garantiza que los vehículos tengan la productividad necesaria para cubrir los costos fijos que se tienen anclados y además generar la alerta temprana cuando eso no suceda dentro del horizonte del ejercicio.

Tabla 4-11: Resumen de ajuste del modelo.

Ajuste del modelo con data histórica	91%
Ajuste del modelo con cambio de contrato	95%

Finalmente, luego de la validación se procede con las modelaciones para los 3 años siguientes de operación buscando que las sinergias con el cliente puedan llevar a capturar

mayor participación del mercado y por ende permitan optimizar el costo de la operación logística.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta el análisis de resultados y los casos aplicados como contribución a la solución del problema planteado. En la sección 5.1 se habla sobre las generalidades de las soluciones a lo largo del período de modelación. En las secciones 5.3, 5.4 y 5.4 se analizan los resultados de la red logística para los años 2023, 2024 y 2025 respectivamente.

Finalmente, en las secciones 5.6 y 5.6 se presentan dos casos aplicados: cambios de tripulación y densificación de cargue que aportan significativamente a los modelos inicialmente planteados.

5.1 Generalidades

En la Figura 5-1 se puede evidenciar mediante un mapa de calor cómo evoluciona la cobertura a nivel nacional entre el año 2022 y 2025. Es importante resaltar que se tiene un incremento del 20% en los frentes de trabajo y hace sentido con los proyectos de infraestructura para las vías 4G. El país desea conectar a través de autopistas amplias los puertos marítimos con las principales ciudades para fortalecer la economía, razón por la cual se concentran en mayor proporción en la Costa Caribe: La Guajira, Santa Marta, Ciénaga, Barranquilla, Cartagena, Golfo de Morrosquillo y Urabá; y en el Pacífico: Buenaventura y Tumaco. Si bien, los dos últimos puertos presentan alteraciones de orden público con regularidad, se desea propender hacia un transporte terrestre óptimo que permita un ahorro por desgaste de los vehículos. Esto, además, apalanca la instalación de nuevos peajes para contribuir al mantenimiento de la malla vial a través de consorcios privados o públicos dejando así un nuevo reto en la modelación de la red por el incremento en la canasta de costos puesto que el concepto de peajes representa alrededor del 15% de los costos totales.

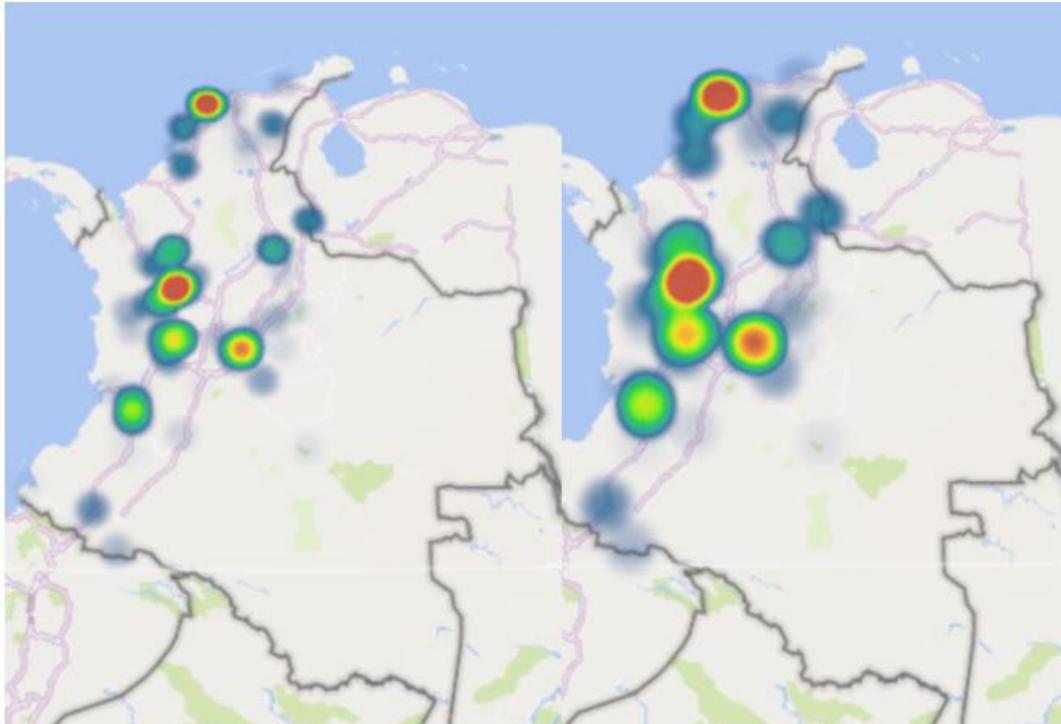


Figura 5-1: Mapa de calor del comportamiento de la demanda. Der. Cobertura de red de distribución para el año 2022. Izq. Cobertura de red de distribución para el año 2025.

Por lo anterior, un ejercicio de optimización periódico permite identificar algunas desviaciones del modelo de operación para corregir y poder garantizar buenos resultados a la compañía. Los altos costos de transporte deben ir acordes con el crecimiento de la economía del país, el fortalecimiento de las instituciones locales, públicas y privadas, la descentralización de las decisiones operativas de negocio con el fin de contribuir de manera rápida a las utilidades esperadas.

5.2 Red transporte, dimensionamiento de vehículos y su costo óptimo año 2023

Como se puede observar en la Figura 5-2 la demanda total para el año 2023 es de 1.782.267 toneladas, donde luego de la optimización GAMS asignó lo siguiente por cada origen: Cartagena con 438.779 toneladas que representa un 25%, Rioclaro con 758.317 toneladas que es aproximadamente el 42%, Sogamoso con 269.439 toneladas que representa el 15% y finalmente, Yumbo con 315.732 toneladas representando el 18%. Referente a la cantidad de cabeceras municipales atendidas por origen, Cartagena

atenderá 24 de 113 lo que refleja un 21%, Rioclaro 42 destinos que representa un 37%, Sogamoso 25 cabeceras municipales que son el 22% y, por último, Yumbo 30 destinos que representan un 27%. Es importante resaltar que la participación de atención de cada una de las cabeceras municipales da un total de 107% esto corresponde a que el software determinó que ese 7% que son 8 destinos tengan más de un origen en algún momento del año, esto por el comportamiento de la demanda y por las capacidades de las plantas.

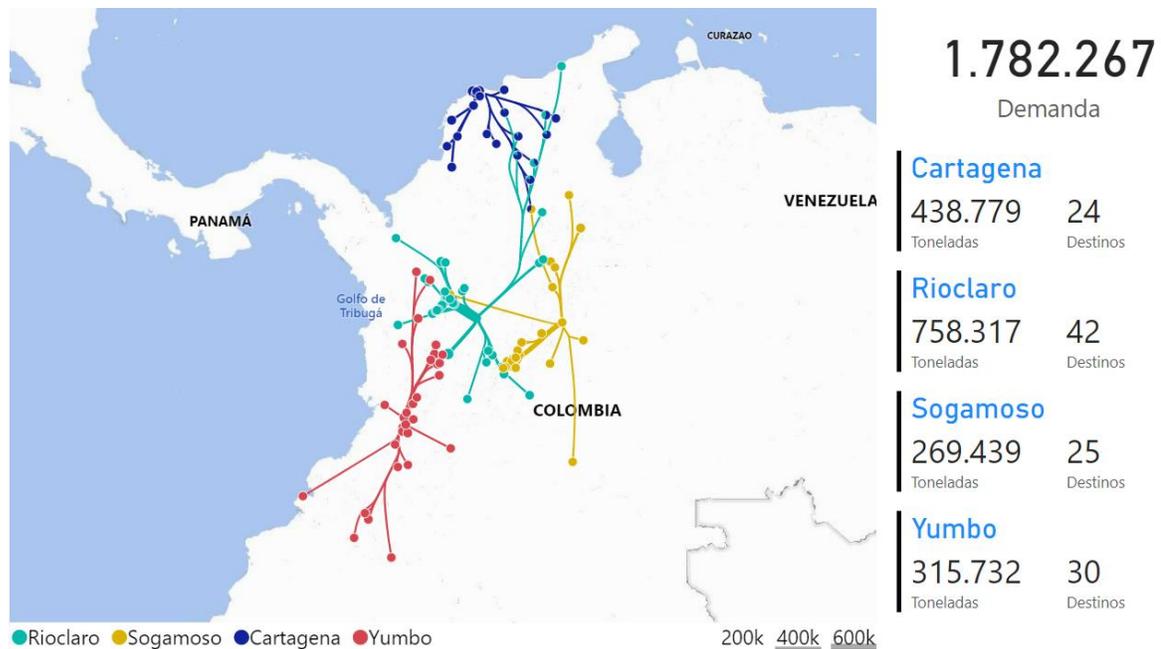


Figura 5-2: Flow map y principales resultados GAMS 2023.

Adicional, como se puede observar en la Figura 5-2 la red presenta algunos solapes entre líneas, esto hace referencia a que en algún(os) mes(es) dentro del año analizado los destinos serán atendidos por otro origen diferente al recurrente con el fin de garantizar el cumplimiento de las restricciones de oferta de las plantas sin generar mayores sobrecostos dentro del servicio de transporte.

Tabla 5-1: Kilómetros y costos de operación optimizados por mes para el 2023.

Mes	Kilómetros totales	Costo total	Costo/km
t1	1,709,763	\$ 9,273,524,352	\$ 5,424
t2	1,853,360	\$ 10,089,699,981	\$ 5,444
t3	1,949,176	\$ 10,667,641,597	\$ 5,473
t4	1,845,037	\$ 10,045,674,364	\$ 5,445
t5	1,962,215	\$ 10,667,522,776	\$ 5,436
t6	1,905,677	\$ 10,324,077,276	\$ 5,418

t7	2,003,598	\$ 10,937,697,961	\$ 5,459
t8	2,017,281	\$ 11,028,012,851	\$ 5,467
t9	2,113,377	\$ 11,513,922,342	\$ 5,448
t10	2,088,796	\$ 11,400,324,738	\$ 5,458
t11	2,003,719	\$ 10,901,548,382	\$ 5,441
t12	1,931,643	\$ 10,496,582,984	\$ 5,434
TOTALES	23,383,642	\$ 127,346,229,604	\$ 5,446

En la Tabla 5-1 se presenta la cantidad de kilómetros, el costo total y el costo/km mes a mes para la optimización de la red realizada por GAMS para el año 2023 donde se resalta que el costo/km promedio **\$5.446** y si se compara con los últimos 10 meses de operación da un ajuste del 99% (**\$5.480**). Para el primer año de ejercicio de simulación tenemos un acercamiento a la realidad para tomar decisiones claves de negocio enfocadas en el ingreso o salida de vehículos.

Tabla 5-2: Ahorro en la red año 2023.

Costo/km GAMS 2023	\$ 5,227
Costo/km real	\$ 5,480
Ahorro en pesos por km	\$ 253
Ahorro en pesos totales	\$ 5,911,212,919
Ahorro en %	4.84%

Dentro del ejercicio optimizado para la red del 2023 se logra un ahorro del 4.84% como se puede ver en la Tabla 5-2. El ahorro por km es de \$253 y se espera recorrer bajo los orígenes-destinos óptimos 23.383.642 kilómetros lo que nos da un potencial de ahorro de \$5.911.212.919. Sin embargo, más allá del ahorro de la red es importante dimensionar la cantidad de vehículos necesarios para mantener la operación con los niveles de servicio exigidos por el cliente sin afectar las utilidades de la compañía por lo que como se observa en la Tabla 5-3 la cantidad de vehículos por zona varía dependiendo del mes y están acordes con el comportamiento cíclico de la demanda anual.

Tabla 5-3: Cantidad de vehículos mes a mes para el 2023.

DIMENSIONAMIENTO												
ORIGEN	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12
Planta Rioclaro	53	53	64	51	57	55	62	62	69	68	59	56
Planta Sogamoso	15	16	16	17	18	17	18	19	19	19	18	17

Planta Yumbo	16	17	17	17	17	16	17	18	18	18	18	17
Planta Cartagena	14	20	20	20	21	20	20	20	19	19	21	20
Totales	98	106	117	106	113	109	119	119	126	125	116	111

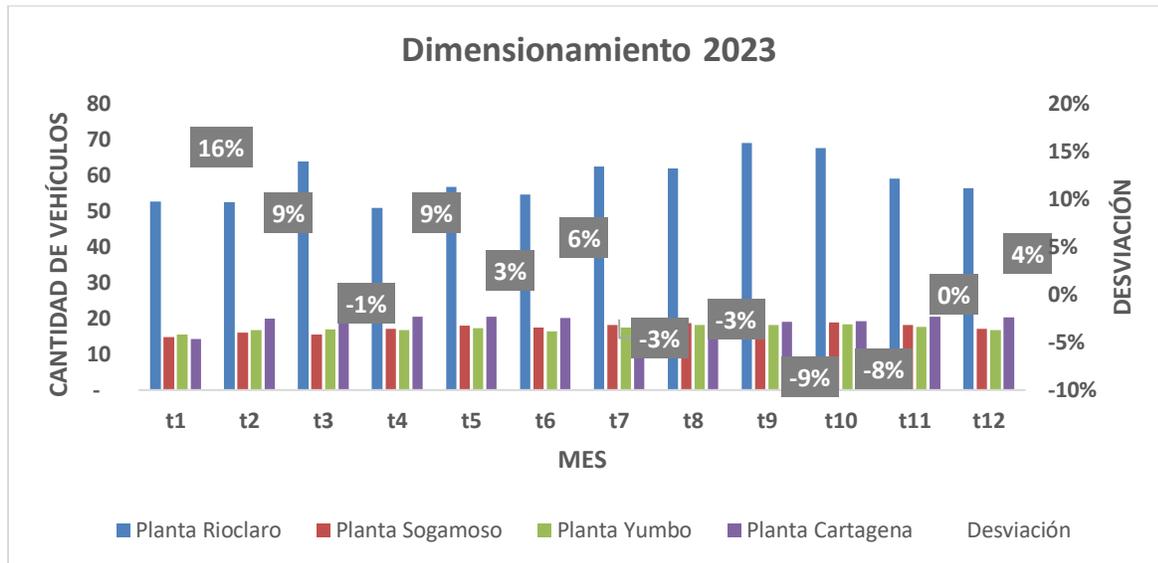
El análisis de capacidad que se muestra en la Tabla 5-4 da cuenta de que en 5 de los 12 (42%) meses se necesitan en promedio 6 carros adicionales por mes para cumplir con los niveles de servicio, por otro lado, en 6 de los 12 meses (50%) son improductivos 9 carros y finalmente, en 1 de los 12 meses (8%) puntualmente en noviembre la cantidad de vehículos cubre la asignación de carga a nivel nacional.

Tabla 5-4: Comparación necesidad vs capacidad instalada mes a mes para el 2023.

ANÁLISIS DE CAPACIDAD												
Mes	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12
Dimensionamiento	98	106	117	106	113	109	119	119	126	125	116	111
Capacidad actual	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116
Faltantes			1				3	3	10	9		
Sobrantes	18	10		10	3	7						5
Desviación	16%	9%	-1%	9%	3%	6%	-3%	-3%	-9%	-8%	0%	4%

En la Definir mejor **los ejes Cantidad de vehículos y desviación)**

Figura 5-3 se puede ver gráficamente lo expresado anteriormente, donde el promedio de desviación es el 2%. Sin embargo, solamente analizar promedios resulta hacer conjeturas de la realidad totalmente fuera de contexto. Revisando el comportamiento mes a mes de los vehículos faltantes y sobrantes se sugiere disponer en el mercado de usados 3 vehículos cuando el precio del dólar sea representativo con el fin de capturar \$20 millones/carro que apuntan directamente a las utilidades de la compañía. No obstante, esto debe ir acompañado del crecimiento del proyecto de terceros el cual tiene como objetivo buscar en el mercado de transportadores vehículos sin carga para hacer cubrimientos puntuales a nombre de la empresa. De esta manera, Velotransporte deberá dimensionarse para los pisos de demanda y los picos serían cubiertos por otros transportadores donde claramente se cobrará una tasa de intermediación por la consecución de carga y por la administración del viaje desde sus inicios hasta su fin.



Definir mejor los ejes Cantidad de vehículos y desviación)

Figura 5-3: Desviaciones de flota para la demanda 2023.

Como se puede observar en la Definir mejor **los ejes Cantidad de vehículos y desviación)**

Figura 5-3 existe una desviación mes a mes que podría estar en $\pm 10\%$ pero está el outlier del mes de enero ya que las obras presentan vacaciones colectivas y los ingresos a laborar suelen ser un poco más lentos.

5.3 Red transporte, dimensionamiento de vehículos y su costo óptimo año 2024

Como se puede observar en la Figura 5-4 la demanda total para el año 2024 de 1.830.137 toneladas, donde luego de la optimización GAMS asignó lo siguiente por cada origen: Cartagena con 442.848 toneladas que representa un 24%, Rioclara con 785.186 toneladas que es aproximadamente el 43%, Sogamoso con 277.427 toneladas que representa el 15% y finalmente, Yumbo con 324.676 toneladas representando el 18%. Referente a la cantidad de cabeceras municipales atendidas por origen, Cartagena atenderá 24 de 113

lo que refleja un 21%, Rioclaro 44 destinos que representa un 39%, Sogamoso 25 cabeceras municipales que son el 22% y, por último, Yumbo 30 destinos que representan un 27%. Es importante resaltar que la participación de atención de cada una de las cabeceras municipales da un total de 109% esto corresponde a que el software determinó que ese 9% que son 11 destinos tengan más de un origen en algún momento del año, esto por el comportamiento de la demanda y por las capacidades de las plantas.

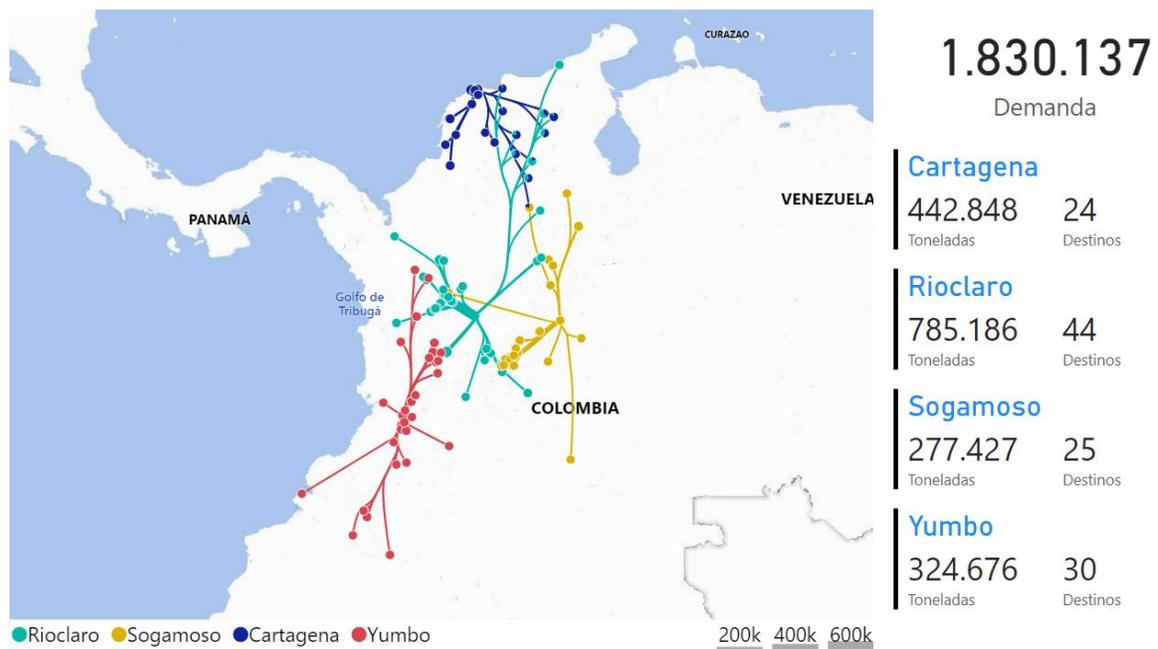


Figura 5-4: Flow map y principales resultados GAMS 2024.

Dentro de la Tabla 5-5 están consignados los valores para los kilómetros y costos totales mes a mes y en la última columna reposa el costo/km que arroja GAMS luego de la optimización de la red para el año 2024. Es importante resaltar que dichos valores contienen el incremento del ICTC (4.19% del 2022 + 3.35% del 2023).

Tabla 5-5: Kilómetros y costos de operación optimizados por mes para el 2024.

Mes	Kilómetros totales	Costo total	Costo/km
t13	1,759,267	\$ 9,848,212,688	\$ 5,598
t14	1,894,469	\$ 10,654,973,293	\$ 5,624
t15	2,020,608	\$ 11,386,725,460	\$ 5,635
t16	1,894,325	\$ 10,678,402,421	\$ 5,637
t17	2,012,611	\$ 11,336,950,490	\$ 5,633
t18	1,954,000	\$ 10,920,587,889	\$ 5,589

t19	2,070,232	\$ 11,652,919,300	\$ 5,629
t20	2,069,487	\$ 11,680,437,552	\$ 5,644
t21	2,199,531	\$ 12,364,964,562	\$ 5,622
t22	2,148,398	\$ 12,065,366,027	\$ 5,616
t23	2,057,304	\$ 11,608,515,524	\$ 5,643
t24	1,988,311	\$ 11,142,926,506	\$ 5,604
Totales	24,068,543	\$ 135,340,981,711	\$ 5,623

En la Tabla 5-6 se resume el ahorro de la red de transporte que se estima sea del 4.46% teniendo en cuenta que se espera recorrer 24.068.543 kilómetros en el año y el ahorro por km es de \$251 por lo que nos da un total de \$6.037.537.314. Si lo comparamos con el año anterior en ahorro es inferior en 0.38% debido a que la demanda crece y se debe hacer uso de orígenes diferentes a los habituales, pero siempre garantizando el menor costo posible.

Tabla 5-6: Ahorro en la red año 2024.

Costo/km GAMS 2024	\$ 5,229
Costo/km real	\$ 5,480
Ahorro en pesos por km	\$ 251
Ahorro en pesos totales	\$ 6,037,537,314
Ahorro en %	4.46%

Es importante determinar el dimensionamiento de vehículos para ese incremento de demanda los cuales están dados por la Tabla 5-7 donde esta categorizado por cada uno de los orígenes. Los meses de septiembre y octubre representarán vehículos faltantes para atender el requerimiento proyectado, sin embargo, diciembre y enero son los meses donde la flota queda obsoleta.

Tabla 5-7: Cantidad de vehículos mes a mes para el 2024.

DIMENSIONAMIENTO												
ORIGEN	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
Planta Rioclaro	51	51	64	51	59	53	63	62	71	66	62	55
Planta Sogamoso	14	16	15	17	18	17	18	18	19	18	18	17
Planta Yumbo	15	16	16	16	17	16	17	18	18	18	17	16
Planta Cartagena	14	19	18	19	19	20	18	18	17	18	19	19
Totales	95	102	114	104	113	106	116	117	125	121	116	108

Dentro del análisis de capacidad para el año 2024 que está dado en la Tabla 5-8, 3 de los 12 meses (25%) tendrán en promedio un déficit de 5 carros para cumplir con las exigencias del mercado, 7 de los 12 meses (58%) en promedio 10 carros por mes sobran, sin embargo, es importante revisar el detalle mes a mes ya que tomar decisiones solo con promedio elimina la objetividad del ejercicio de optimización. Finalmente, 2 de los 12 meses (17%) dan un ajuste del 0% ya que necesitan exactamente la cantidad de vehículos que operan actualmente en la red.

Tabla 5-8: Comparación necesidad vs capacidad instalada mes a mes para el 2024.

ANÁLISIS DE CAPACIDAD												
Mes	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
Dimensionamiento	95	102	114	104	113	106	116	117	125	121	116	108
Capacidad actual	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116
Faltantes								1	9	5		
Sobrantes	21	14	2	12	3	10						8
Desviación	18%	12%	2%	10%	3%	9%	0%	-1%	-8%	-4%	0%	7%

También nos podemos apoyar en la Figura 5-5 para ver gráficamente el comportamiento y lo analizado anteriormente, donde se resalta que la concentración fuerte de demanda estará en septiembre. Adicional, si bien la demanda aumentó en el total del año la cantidad de vehículos obsoletos aumentan, este fenómeno sucede ya que los orígenes con mayor volumen de toneladas tienen mejor rotación y por ende se pueden hacer más viajes con la misma cantidad de vehículos.

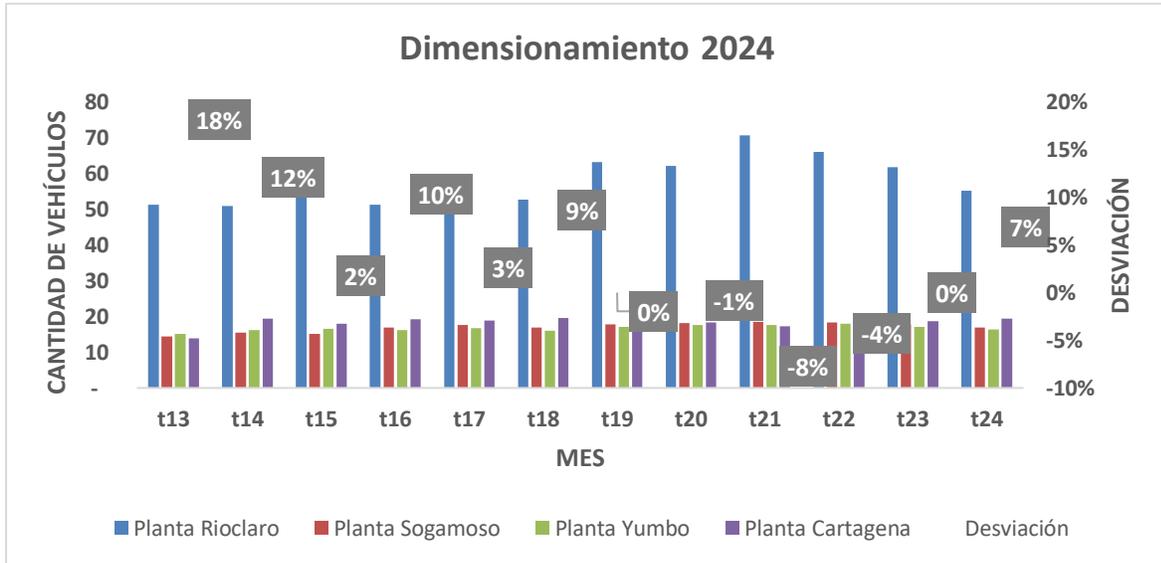


Figura 5-5: Desviaciones de flota para la demanda 2024.

5.4 Red transporte, dimensionamiento de vehículos y su costo óptimo año 2025

Como se puede observar en la Figura 5-6 la demanda total para el año 2025 es de 1.894.668 toneladas, donde luego de la optimización GAMS asignó lo siguiente por cada origen: Cartagena con 444.415 toneladas que representa un 23%, Rioclaro con 824.513 toneladas que es aproximadamente el 44%, Sogamoso con 287.297 toneladas que representa el 15% y finalmente, Yumbo con 338.443 toneladas representando el 18%. Referente a la cantidad de cabeceras municipales atendidas por origen, Cartagena atenderá 24 de 113 lo que refleja un 21%, Rioclaro 47 destinos que representa un 42%, Sogamoso 26 cabeceras municipales que son el 23% y, por último, Yumbo 32 destinos que representan un 28%. Es importante resaltar que la participación de atención de cada una de las cabeceras municipales da un total de 114% esto corresponde a que el software determinó que ese 14% que son 16 destinos tengan más de un origen en algún momento del año, esto por el comportamiento de la demanda y por las capacidades de las plantas.

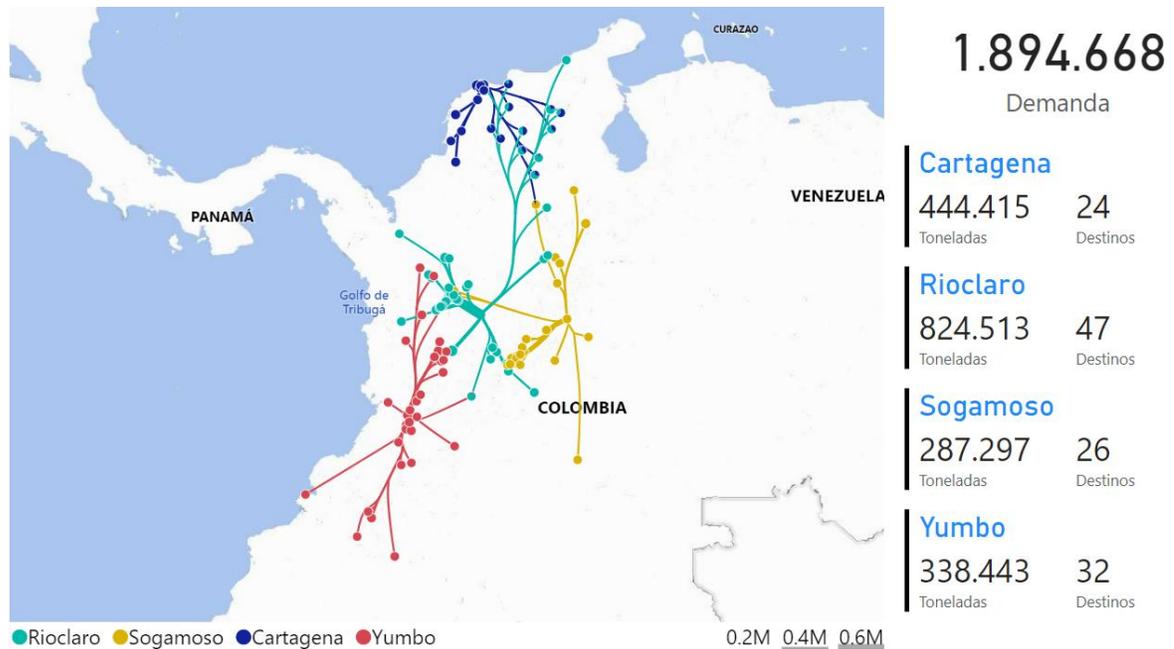


Figura 5-6: Flow map y principales resultados GAMS 2025.

Como se puede observar en la Figura 5-6 la red presenta algunos cruces entre líneas, esto hace referencia a que en algún(os) mes(es) dentro del año analizado los destinos serán atendidos por otro origen diferente al recurrente con el fin de garantizar el cumplimiento de las restricciones de oferta de las plantas sin generar mayores sobrecostos dentro del servicio de transporte. En la Tabla 5-9 se resume mes a mes el costo/km para el año 2025 donde cabe resaltar que posee los incrementos de ICTC proyectados dentro del ejercicio de simulación (4.19% del 2022 + 3.35% del 2023 + 3.55% del 2024).

Tabla 5-9: Kilómetros y costos de operación optimizados por mes para el 2025.

Mes	Kilómetros totales	Costo total	Costo/km
t25	1,824,323	\$ 10,553,917,437	\$ 5,785
t26	1,959,969	\$ 11,394,588,694	\$ 5,814
t27	2,135,016	\$ 12,403,558,178	\$ 5,810
t28	1,955,998	\$ 11,450,788,592	\$ 5,854
t29	2,090,406	\$ 12,154,213,747	\$ 5,814
t30	2,014,370	\$ 11,683,237,793	\$ 5,800
t31	2,184,499	\$ 12,674,480,312	\$ 5,802
t32	2,179,920	\$ 12,673,496,214	\$ 5,814
t33	2,340,723	\$ 13,513,323,668	\$ 5,773
t34	2,247,530	\$ 13,034,968,635	\$ 5,800
t35	2,138,932	\$ 12,438,890,108	\$ 5,815
t36	2,046,191	\$ 11,882,199,469	\$ 5,807

Totales	25,117,878	\$ 145,857,662,847	\$ 5,807
----------------	-------------------	---------------------------	-----------------

El ahorro de la red para el año 2025 se estima sea del 4.35% y se puede visualizar en la Tabla 5-10 donde el impacto total es de \$6.342.531.398 recorriendo 25.117.878 kilómetros a nivel nacional.

Tabla 5-10: Ahorro en la red año 2025.

Costo/km GAMS 2025	\$ 5,227
Costo/km real	\$ 5,480
Ahorro en pesos por km	\$ 253
Ahorro en pesos totales	\$ 6,342,531,398
Ahorro en %	4.35%

Referente al dimensionamiento se puede observar en la Tabla 5-11 que para el año 2025 el comportamiento por nodo es homogéneo y no presentan alteraciones significativas, excepto por el mes de septiembre donde Rioclaro alcanza los 79 vehículos para lograr cumplir con las proyecciones de demanda.

Tabla 5-11: Cantidad de vehículos mes a mes para el 2025.

DIMENSIONAMIENTO												
ORIGEN	t25	t26	t27	t28	t29	t30	t31	t32	t33	t34	t35	t36
Planta Rioclaro	53	54	70	58	64	59	69	67	79	71	66	60
Planta Sogamoso	15	16	16	17	18	18	18	19	20	19	18	17
Planta Yumbo	16	17	17	17	17	17	18	18	20	19	18	17
Planta Cartagena	15	19	18	18	18	19	18	18	17	18	18	19
Totales	99	106	121	111	118	113	123	122	135	127	121	114

El análisis de capacidad que se muestra en la Tabla 5-12 da cuenta de que en 7 de los 12 (58%) meses se necesitan en promedio 8 carros adicionales por mes para cumplir con los niveles de servicio, por otro lado, en 5 de los 12 meses (42%) 7 carros en promedio son improductivos. Este último año de simulación si presenta muchas alteraciones que deben soportarse en el proyecto de tercerización para evitar sobrecostos en la operación.

Tabla 5-12: Comparación necesidad vs capacidad instalada mes a mes para el 2025.

ANÁLISIS DE CAPACIDAD												
Mes	t25	t26	t27	t28	t29	t30	t31	t32	t33	t34	t35	t36
Dimensionamiento	99	106	121	111	118	113	123	122	135	127	121	114
Capacidad actual	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116
Faltantes			5		2		7	6	19	11	5	
Sobrantes	17	10		5		3						2
Desviación	15%	9%	-4%	4%	-2%	3%	-6%	-5%	-16%	-9%	-4%	2%

Finalmente, en la Figura 5-7 se puede ver gráficamente lo enunciado anteriormente, donde es importante resaltar que Velotransporte no es capaz de soportar tanta inestabilidad y debe prepararse para atender el piso de demanda y propender de los picos en diferentes transportadores, pero cobrándoles una tasa de intermediación que pueda ayudar a fortalecer el cierre óptimo de utilidades.

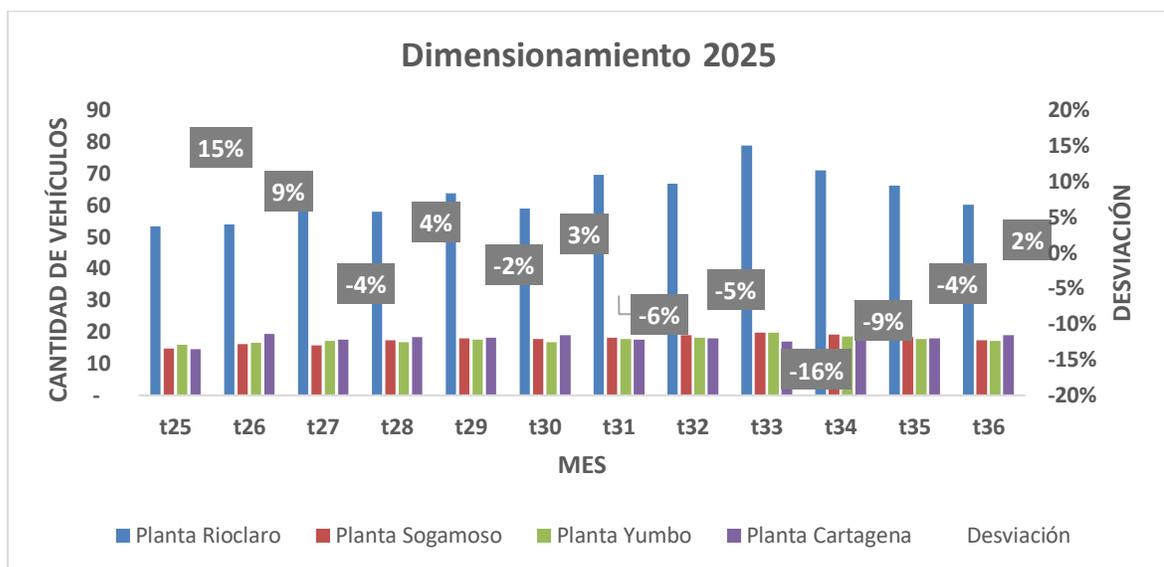


Figura 5-7: Desviaciones de flota para la demanda 2025.

5.5 Caso aplicado escenario 1: cambio de tripulación

Cuando se habla de aumentar la productividad de los vehículos se espera sea mediante figuras como las de doble tripulación, la cual consiste en disponer de dos conductores en jornadas de 12 horas de trabajo cada uno. De esta manera, los carros trabajan las 24 horas

del día, sin embargo, no es posible garantizar que se mantenga este ritmo por los 7 días de la semana. Si bien, en Velotransporte algunos destinos son atendidos de esta manera, no se tiene cobertura total en las cabeceras municipales en donde puede realizarse, por lo que se realiza la revisión minuciosa para establecer la atención y el manejo mediante esta técnica que aumenta la rotación de los equipos que al final se traduce en más viajes que terminan diluyendo el costo fijo de la operación. Como se puede observar en la Figura 5-8 los tipos de tripulación utilizados en Velotransporte son 3 donde daremos el contexto de cada uno de ellos a continuación:

- Tripulación sencilla: Usualmente son despachos con destinos a más de 24 horas contando los tiempos de tránsito de ir y volver más los tiempos de cargue (2) y descargue (2) por lo que un vehículo puede llegar a tardar varios días en regresar al origen para cargar de nuevo un viaje por las diferentes pernoctas que debe tener el conductor para llevar a cabo su labor sin ningún problema ni riesgo como actor vial.
- Tripulación doble con cambio en el origen: Hace referencia a destinos “cercanos” y da la posibilidad que el conductor dentro de su jornada laboral pueda completar el viaje y a su regreso un nuevo conductor arranque con el siguiente viaje sin mayores complicaciones.
- Tripulación doble con cambio en el camino (DTCC): Son destinos que están alrededor de 24 horas donde con 2 conductores realizando cambio en un punto intermedio se puede culminar la entrega.

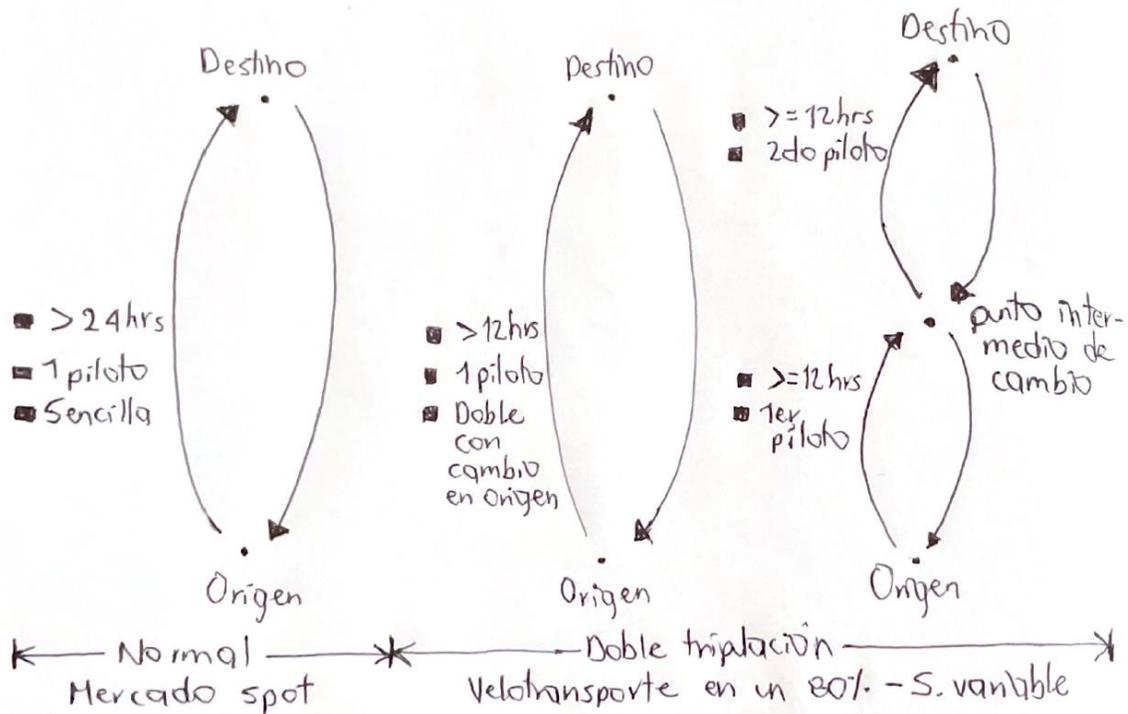


Figura 5-8: Tipos de tripulación. Izq. Tripulación sencilla. Centro. Doble tripulación con cambio en el origen. Der. DTCC – Doble tripulación con cambio en el camino.

La revisión mencionada anteriormente hace referencia a las atenciones de destinos mediante el esquema de DTCC con el fin de aumentar los ciclos y por ende la capacidad de viajes por vehículo. Se vuelven a recotizar esos destinos dentro de la herramienta de costeo de Velotransporte teniendo en cuenta las premisas dadas en la Tabla 3-6 y que fueron expuestas en el capítulo 3 de esta tesis.

Luego de la recotización se procede con la incorporación de los modelos dentro del software GAMS para determinar el potencial ahorro en la red para cada uno de los años en evaluación.

Como se puede observar en la Tabla 5-13 el ahorro potencial puede llegar a estar por encima del 4% que aportarían a los ahorros calculados dentro del ejercicio de orígenes-destinos óptimos realizados en el punto anterior.

Tabla 5-13: Ahorro potencial aumentando un 10% las tripulaciones en DTCC.

Costo/km GAMS	\$ 5,265
---------------	----------

Costo/km real	\$ 5,480
Ahorro en pesos por km	\$ 215
Ahorro en pesos totales	\$ 5,132,631,574
Ahorro en %	4.08%

Inclusive este ejercicio es parte fundamental del equipo de analistas que forman parte de Velotransporte con el fin de determinar circuitos completos y que pueda generar confianza, disponibilidad y buen servicio al cliente.

5.6 Caso aplicado escenario 2: densificación¹² de cargue

Dentro de la estrategia operacional la densificación de cada viaje es un tema primordial ya que es un costo de oportunidad el cual afecta directamente la utilidad. Los costeos que realiza la empresa objeto de estudio tienen contemplado cargar la capacidad máxima del vehículo, pero cuando esto no sucede no se percibe el ingreso total parametrizado más los costos si se mantienen full. El gran inconveniente que se presenta es que las básculas suelen estar descalibradas por el volumen de producto que cae en ellas por el tránsito continuo de vehículos y por el cemento que cae en el proceso de cargue.

Como se puede observar en la Tabla 5-14 la oportunidad por concepto de densificación alcanza los \$3.347.875.060 que representa un **2.66%** comparado con el ingreso total anualizado. El nodo que más impacta es Rioclaro puesto que tiene la mayor cantidad de viajes según el modelo optimizado a través de GAMS con un total de 22.303, además, estas básculas con frecuencia presentan desajuste en calibración. La oportunidad anualizada y totalizada representa alrededor de 67.000 toneladas que puede traducirse en el despacho normal de un mes en Rioclaro. Para impactar y capturar este ahorro debe existir compromiso tanto de Cementol – generador de carga como de Velotransporte – transportador en el sentido de reportar a tiempo las dificultades para inspeccionar y limpiar las básculas cuando sea necesario.

Tabla 5-14: Oportunidad mapeada en densificación de cargue.

Origen	Densificación por viaje	Cantidad de viajes/año GAMS	Costo de oportunidad anual
Cartagena	98%	12,905	387,157,830

¹² Densificación hace referencia a garantizar el uso máximo de capacidad de los tráiler que llevan los vehículos.

Rioclaro	95%	22,303	2,007,309,870
Sogamoso	97%	7,925	396,233,200
Yumbo	96%	9,286	557,174,160

Las mesas constantes de trabajo y la medición en tiempo real de la densificación permitirán tomar acciones rápidas y no tomar el resultado como una sorpresa, sin embargo, no sólo basta con la proactividad por parte de unos pocos. Contagiar la mayor cantidad de personas fortalecerá el proceder correcto, es útil construir un árbol de decisión para generar los caminos en caso de cambiarse las personas interlocutoras existentes.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo optimiza una red de transporte aplicado al sector de cemento a granel en Colombia con el objetivo de tomar decisiones claves de negocio de cara a los próximos 3 años de operación garantizando orígenes-destinos óptimos y generando una formalización en el estudio de la demanda para realizar los movimientos de flota necesarios.

A continuación, se enuncian los resultados encontrados y el trabajo futuro que se propone.

6.1 Conclusiones

- Cuando las empresas tercerizan su logística en compañías expertas pueden concentrar sus esfuerzos en el *core* de negocio con el fin de ir a la vanguardia de la tecnología y de la competitividad del sector. Ese aliado no sólo se encargará de velar por el cumplimiento de las entregas, sino que dentro de las licitaciones o las actualizaciones del contrato pueden incluirse la implementación de proyectos que busquen eficiencias en las puntas (cargue/descargue) o en el tránsito de los viajes. Para garantizar perdurabilidad se deben comprometer tanto el transportador a realizar de la mejor manera sus actividades y el generador de carga para dar prioridades al aliado en el proceso de cargue-descargue pagando de manera justa por el servicio logístico recibido.
- Dentro de la revisión de la literatura se abordan miles de problemas prácticos o del sector real donde la mayor dificultad es llevarlos a una programación matemática que responda con los comportamientos “normales” para poder simular escenarios y determinar que sería lo más conveniente para dichas empresas. Cuando se presentan problemas similares al planteado en esta tesis según la literatura se

desarrolla bajo la programación entera mixta ya que contienen valores enteros o reales.

- La evaluación, modelación y optimización de las redes de transporte permiten obtener ahorros significativos, para este caso se contempla un problema de optimización de la red de distribución de una empresa de cemento a granel basados en el modelo de orígenes-destinos óptimos, logrando disminuir significativamente los costos de transporte y con ello mejorar los niveles de servicio de cara a la competitividad del mercado. Este modelo considera la estructura existente de la red de transporte de la empresa y se encarga de conceder orígenes-destino óptimos y dimensionar los vehículos a los diferentes orígenes para anticipar los movimientos de flota entre nodos que logran disminuir los costos anuales en hasta un 5% respecto al ingreso total anual.
- Los dimensionamientos calculados dentro del ejercicio de optimización tienen en cuenta la rotación de cada uno de los orígenes y permiten establecer el tamaño de flota adecuado en cada nodo durante los 36 meses simulados. La dinámica de ingreso y salida de vehículos está determinada por la cantidad de carros dados en el período anterior y los necesarios en el período analizado para cubrir la demanda.
- En el desarrollo de los objetivos de la tesis, primero se identificaron las fuentes de datos generados por la empresa en estudio mediante análisis descriptivo de la demanda y además se exploran las bondades del software que utilizan para proyectar volúmenes de carga. Segundo, se seleccionó la herramienta y se exploraron los diferentes *solver* que aplican para este tipo de problemas donde se evidencia una leve mejora en el tiempo computacional cuando se hace uso del *solver* CPLEX en modelos RMIP (programación entera mixta). Posteriormente, se diseñó el modelo matemático que explica y optimiza la red de transporte aplicado al sector de cemento a granel en Colombia con las dificultades ya mencionadas. Finalmente, se validó el método propuesto con la historia real de la operación encontrando un ajuste del 95% de la realidad.

- Referente al caso aplicado de cambio de tripulación permite que se tenga un impacto del 4.08% respecto al ingreso total anual que representan \$5.132.631.574 aproximadamente cuando realizamos un ajuste del 10% en las tripulaciones en DTCC (doble con cambio en el camino). El potencial es alto y deben gestionarse las alternativas en búsqueda de personal para dar el cubrimiento esperado. Este proceso aplica solamente al transportador y por ende podría realizarlo sin ningún inconveniente.
- Para el caso aplicado de densificación de cargue el impacto es del 2.66% respecto al ingreso total anual que representan \$3.347.875.060 aproximadamente solamente cuando garantizamos cargar la capacidad máxima de los vehículos. Para capturar este ahorro debe existir compromiso tanto del transportador como del generador de carga para monitorear constantemente el estado de las básculas, quizás puedan presentarse algunas negociaciones para determinar quién debe o en qué porcentaje asumen la limpieza periódica de éstas. Adicional, como trabajo futuro se podría analizar el potencial con el área de ingeniería para incorporar tráileres con mayor capacidad con el ánimo de apuntarle directamente a incrementar el ingreso incurriendo en los mismos costos operativos.

6.2 Recomendaciones

- Dentro de las modelaciones de redes de transporte se desea incorporar la mayor cantidad de variables que sean posibles con el ánimo de fortalecer el ejercicio y pueda tener una mayor confianza en las decisiones que puedan tomarse a partir de éste. Para este problema, se simplificaron varias variables por la complejidad y el costo computacional en el software de modelación. Sin embargo, para encontrar mayor alcance se puede hacer uso de una licencia comercial más sofisticada que tenga la potencia computacional y que tenga el concepto de caja negra en la manipulación del código que resuelve el problema. Una empresa que cuenta con este tipo de servicios es COUPA SUPPLY CHAIN DESIGN & PLANNING con una gran trayectoria a nivel mundial (antes conocidos como Llamasoft Inc.) donde su enfoque es crear un gemelo digital de la cadena de suministro de sus clientes para

probar escenarios hipotéticos, analizar compensaciones y capacitar a personas para tomar decisiones basadas en datos logrando ahorros promedio del 8.1%.

- Dada la diversidad de las dificultades y cambios que se presentan en las operaciones de transporte, es demasiado útil contar con un área fidelizada dentro de la compañía objeto de estudio dedicada a la modelación de las redes de transporte con el fin de garantizar periodicidad en el ejercicio y así mantener las utilidades esperadas por parte de los *stakeholders*.
- Con el nuevo cambio de contrato que se llevó a cabo entre Velotransporte y Cementol es importante empezar a determinar las probabilidades de ocurrencia de eventos que afecten la normalidad de la operación tales como: derrumbes, paros armados, accidentes, entre otros. Lo anterior, con el fin de involucrar nuevos conceptos en el costeador y que permitan además amortizar cuando uno de éstos se presente y no genera impacto a las utilidades.

A. Anexo: Modelo en GAMS para la red de transporte 2023

\$title A Transportation Problem (TRANSPORT,SEQ=1)

\$onText

Este problema es aplicado al sector del transporte de cemento a granel en Colombia en el cual se encuentra una solución con el menor costo que cumple con la demanda de los mercados

y las capacidades de las plantas.

La finalidad será evaluar los impactos y eficiencias de un modelo matemático a través la investigación de operaciones. Se plantearán escenarios luego de corrido el modelo en GAMS para obtener más ahorros en la red logística.

Palabras claves: problema de redes de transporte, programación, costos, demanda.

Año: 2023

\$offText

Set

j 'plantas' / rioclaro, sogamoso, yumbo, cartagena /

i 'clientes' / aguachica, agustin-codazzi, amaga, anserma, armenia, astrea, barrancabermeja, barranquilla, belalcazar, bello, betulia, bogota, bosconia, briceno, bucamanga, buenaventura,buritica,cajica,cali,canasgordas,candelaria,cartagena, cdm, chia, chibolo, chiriguana, cienaga, cisneros, copacabana, cota, cucuta, dos-quebradas, duitama, el-carmen-de-atrato, el-tambo, fundacion, funza, gachancipa, galapa, giraldo,

chia	221	238	242	237	251	228	250	264	268	269	256	247
chibolo	63	68	69	68	71	65	71	75	76	77	73	71
chiriguana	64	69	70	69	72	66	72	76	78	78	74	72
cienaga	530	572	582	569	602	547	600	634	644	645	615	594
cisneros	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
copacabana	426	691	719	680	688	686	719	725	728	723	728	463
cota	1093	1180	1200	1813	1241	1128	1237	1306	1327	1330	1268	1891
cucuta	2225	2402	2444	2390	2526	2297	2518	2659	2702	2708	2582	2492
dos-quebradas	31	34	34	34	36	32	35	37	38	38	36	35
duitama	411	444	451	441	467	424	465	491	499	500	477	460
el-carmen-de-atrato	1437	1551	1578	1543	1631	1483	1626	1717	1745	1748	1667	
1609												
el-tambo	95	103	105	102	108	98	108	114	116	116	110	107
fundacion	284	307	312	305	322	293	321	339	345	346	330	318
funza	94	102	104	101	107	97	107	113	115	115	109	106
gachancipa	249	268	273	267	282	257	281	297	302	302	288	278
galapa	1059	1144	1164	1138	1202	1094	1199	1266	1286	1289	1229	1187
giraldo	693	643	664	634	634	644	816	814	816	809	822	909
girardota	464	501	509	498	526	479	525	554	563	564	538	519
guadalajara-de-buga	121	131	133	130	137	125	137	145	147	147	140	136
guaduas	1599	1767	385	0	0	0	0	0	0	0	0	0
guamo	125	135	138	135	142	129	142	150	152	153	145	140
guarne	185	200	203	199	210	191	210	221	225	225	215	207
ipiales	157	169	172	168	178	162	177	187	190	191	182	175
ituango	4548	4910	4995	4884	5162	4694	5147	5435	5523	5534	5278	5094
jamundi	2208	2259	2258	2180	2179	2051	2007	1900	1924	2024	1902	1806
la-calera	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
la-virginia	753	813	827	809	855	777	852	900	914	916	874	843
lebrija-la-paz	1594	1761	1140	1498	1550	1628	1628	1628	1634	1623	1587	
1470												
lebrija-la-sorda	63	68	69	67	71	65	71	75	76	76	73	70
lebrija-rio-sucio	1177	1300	1839	1296	1341	1409	1409	1409	1414	1404	1374	
1273												
madrid	1753	1932	1845	1737	1801	1867	2039	2043	2065	2047	1995	1841

malambo	95	102	104	102	107	98	107	113	115	115	110	106
manaure	305	330	335	328	347	315	346	365	371	372	354	342
manizales	8345	9009	9189	8951	9415	8651	9435	9914	10062	10072	9662	9312
maria-la-baja	183	198	201	197	208	189	207	219	223	223	213	205
marinilla	1549	1952	2041	1915	1915	1955	2025	2018	2023	2002	2044	1662
medellin	5107	5951	6885	6122	6417	6565	7138	6799	7131	7048	6893	5528
mosquera	94	102	103	101	107	97	107	113	114	115	109	105
nemocon	187	201	205	200	212	193	211	223	227	227	216	209
nueva-granada	63	68	69	68	71	65	71	75	76	77	73	70
ocana	32	35	36	35	37	33	37	39	39	39	38	36
pailitas	30	32	33	32	34	31	34	36	36	36	35	33
palermo	347	374	381	372	394	358	393	415	421	422	403	389
palestina	94	102	103	101	107	97	107	113	114	115	109	105
palmira	48	52	53	51	54	49	54	57	58	58	55	54
pasto	1339	1446	1471	1438	1520	1382	1516	1601	1626	1630	1554	1500
pereira	1471	1581	1639	1699	1608	1815	1830	1807	1824	1843	1577	1512
piedecuesta	125	135	137	134	142	129	141	149	151	152	145	140
popayan	126	136	138	135	143	130	143	151	153	153	146	141
puerto-colombia	188	7488	8585	7936	7948	7928	8269	7959	8607	8285	7953	7705
puerto-tejada	1648	1752	1929	1728	1734	1723	1723	2022	1797	1723	1916	1490
quibdo	737	796	809	791	836	761	834	881	895	897	855	825
riohacha	496	536	545	533	563	512	562	593	603	604	576	556
rionegro	614	663	674	659	697	634	695	734	746	747	712	688
sabanalarga	905	977	994	972	1028	934	1024	1082	1099	1102	1051	1014
sabaneta	1500	2000	2000	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
san-andres-de-tumac	191	206	209	205	216	197	216	228	231	232	221	214
san-gil	314	339	345	338	357	324	356	376	382	382	365	352
san-jose	191	206	210	205	217	197	216	228	232	232	221	214
san-luis-de-gaceno	284	306	312	305	322	293	321	339	345	345	329	318
san-onofre	544	588	598	584	618	562	616	650	661	662	632	610

Table d(i,j) 'distancia entre cliente-planta en kilómetros'

	rioclaro	sogamoso	yumbo	cartagena
aguachica	818	996	1652	914
agustin-codazzi	1253	1430	2086	823
amaga	589	1002	780	1351
anserma	673	1208	474	1643
armenia	709	982	380	1830
astrea	1201	1382	2037	685
barrancabermeja	509	683	1338	1287
barranquilla	1649	1826	2257	592
belalcazar	669	1148	415	1662
bello	318	911	875	1260
betulia	550	1167	817	1417
bogota	730	421	872	2076
bosconia	1240	1417	2073	533
briceno	638	1097	1225	1110
bucaramanga	666	727	1500	1246
buenaventura	1133	1434	295	2185
buritica	856	1121	946	1354
cajica	559	379	915	1973
cali	1041	1343	91	2094
canasgordas	555	1158	985	1287
candelaria	1030	1331	64	2082
cartagena	1724	1901	2107	22
cdm	323	936	852	1285
chia	574	389	902	2085
chibolo	1455	1635	2132	410
chiriguana	1096	1273	1929	706
cienaga	1509	1686	2342	410
cisneros	513	782	1005	1229
copacabana	331	900	887	1249
cota	533	408	882	2066
cucuta	1141	767	1900	1427
dos-quebradas	622	1066	398	1720

duitama	900	44	1258	1881
el-carmen-de-atrato	719	1203	838	1551
el-tambo	1364	1646	418	2417
fundacion	1385	1562	2218	542
funza	526	444	850	2055
gachancipa	598	337	955	2004
galapa	1672	1849	2241	222
giraldo	651	1113	954	1332
girardota	641	888	901	1237
guadalajara-de-buga	912	1213	104	1964
guaduas	293	642	809	1833
guamo	608	770	612	2123
guarne	267	941	916	1289
ipiales	1962	2134	1122	3015
ituango	642	1184	1232	1272
jamundi	1085	1386	217	2137
la-calera	624	435	931	2095
la-virginia	699	1109	383	1692
lebrija-la-paz	628	697	1461	1330
lebrija-la-sorda	628	697	1461	1330
lebrija-rio-sucio	628	697	1461	1330
madrid	479	985	852	2016
malambo	1656	1833	2220	247
manaure	1806	1983	2638	932
manizales	535	985	1030	1692
maria-la-baja	1401	1863	1994	135
marinilla	578	978	973	1327
medellin	658	931	856	1588
mosquera	513	449	843	2052
nemocon	624	388	979	1943
nueva-granada	1360	1537	2193	414
ocana	909	1086	1742	1027
pailitas	987	1156	1803	817
palermo	941	1078	919	2430

palestina	587	1040	447	1660
palmira	1015	1316	136	2067
pasto	1792	1976	1693	2845
pereira	631	1060	400	1751
piedecuesta	691	633	1524	1283
popayan	1300	1582	355	2353
puerto-colombia	1693	1870	2294	287
puerto-tejada	1083	1384	124	2135
quibdo	769	1386	828	1735
riohacha	1737	1914	2570	1822
rionegro	582	981	907	1330
sabanalarga	1733	1910	2179	188
sabaneta	588	959	826	1308
san-andres-de-tumac	2349	2521	1369	3402
san-gil	850	474	1527	1442
san-jose	1319	1219	1602	2858
san-luis-de-gaceno	864	501	1222	2169
san-onofre	1317	1774	1904	234
san-pedro	367	959	918	1206
santa-marta	1557	1734	2390	485
santo-domingo	499	821	989	1293
sj-rio-seco	421	612	751	1960
soacha	566	998	823	2105
sogamoso	933	26	1290	1914
soledad	1646	1823	2240	270
suarez	1216	1519	325	2260
tado	930	1423	695	1857
tenjo	514	412	894	2053
tibu	1214	987	2047	1210
titiribi	460	1041	780	1390
tocancipa	590	357	948	2005
totoro	1328	1521	374	2374
tulua	858	1160	158	1911
tunja	795	142	1152	1796

turbaco	1706	1881	2117	135
turbana	1707	1884	2090	28
ubate	673	467	1028	1860
uraba	466	1490	1053	1093
uramita	840	1204	1044	1228
valle-del-guamuez	1794	1978	1125	3324
valledupar	1379	1556	2211	1550
venecia	441	1044	737	1393
vijes	982	1283	41	2034
villavicencio	766	2739	1049	2305
villeta	371	582	876	1898
yopal	1225	328	1583	2206
yumbo	1023	1324	42	2075 ;

Table f (i,j) 'costo cliente-planta en pesos colombianos por kilómetro'

	rioclaro	sogamoso	yumbo	cartagena
aguachica	5315	3586	4952	3534
agustin-codazzi	3576	4623	4763	3808
amaga	5454	5089	4169	5202
anserma	4356	5511	4643	5079
armenia	4443	5589	4728	5088
astrea	3605	4653	4788	3794
barrancabermeja	4226	3853	5147	4621
barranquilla	4806	4630	4914	4560
belalcazar	4353	5484	4624	5052
bello	5424	3800	4146	5200
betulia	5626	5045	4166	4765
bogota	5504	4477	4434	4636
bosconia	3635	4678	4794	4065
briceno	4472	5005	5354	5171
bucaramanga	4827	3994	5144	4822
buenaventura	5577	5360	4768	5022
buritica	5153	5262	3953	4793
cajica	4379	4824	4482	4613

cali	5795	5527	12085	5130
canasgordas	4992	5247	3945	4800
candelaria	4310	5407	11546	5056
cartagena	4691	4526	5021	43983
cdm	4783	3787	4169	5167
chia	5036	4429	4509	4635
chibolo	4744	4563	4966	4237
chiriguana	3669	4720	4837	5243
cienaga	4812	4630	4753	6112
cisneros	5104	3793	4086	4983
copacabana	5148	3817	4141	5208
cota	4787	4661	4529	4629
cucuta	4783	5353	5061	4693
dos-quebradas	4598	5589	4677	5082
duitama	4255	14827	5497	4626
el-carmen-de-atrato	5306	4989	4107	5099
el-tambo	5426	4935	6093	4995
fundacion	4833	4645	4773	4024
funza	4943	4683	4490	4593
gachancipa	4450	6426	4396	4645
galapa	4800	4621	4926	6786
giraldo	5363	5271	3975	4794
girardota	5351	3808	4124	5223
guadalajara-de-buga	4385	5478	6635	5080
guaduas	5226	4184	4416	4553
guamo	4486	4208	4513	4714
guarne	7030	3933	4239	5300
ipiales	5278	4886	5226	4966
ituango	6792	4944	5269	5117
jamundi	5745	5482	6430	5102
la-calera	4890	5839	4364	4630
la-virginia	4450	5520	4717	5068
lebrija-la-paz	4159	4063	5125	4682
lebrija-la-sorda	4159	4063	5125	4682

lebrija-rio-sucio	4159	4063	5125	4682
madrid	5009	5109	4464	4662
malambo	4806	4631	4946	6478
manaure	4654	4491	4636	4047
manizales	6643	5413	5011	5027
maria-la-baja	5251	4487	5046	8694
marinilla	5065	3874	4196	5252
medellin	5270	3781	4141	5010
mosquera	4338	4546	4493	4590
nemocon	4226	5940	4371	4623
nueva-granada	4856	4663	4782	4221
ocana	3847	4890	4956	3557
pailitas	3752	4811	4905	3526
palermo	4188	4034	4180	4701
palestina	6228	5468	6126	5056
palmira	4357	5433	8002	5051
pasto	5306	4891	4676	4974
pereira	4567	5593	4641	5034
piedecuesta	4085	4057	5123	4785
popayan	5492	4978	4657	5025
puerto-colombia	4947	4757	5034	5149
puerto-tejada	5572	5350	6155	5019
quibdo	4032	4917	5798	5014
riohacha	4678	4515	4655	4532
rionegro	5188	5193	4143	5249
sabanalarga	4808	4630	4946	7094
sabaneta	5162	5054	4200	5148
san-andres-de-tumac	5130	4778	5609	4880
san-gil	4112	4344	5336	4822
san-jose	5454	5278	5416	4725
san-luis-de-gaceno	4329	5433	5547	4645
san-onofre	5233	4547	5029	5282
san-pedro	4949	5091	4206	5105
santa-marta	4790	4610	4739	4428

santo-domingo	5020	3771	4132	5110
sj-río-seco	4932	4259	4215	4665
soacha	4199	4590	4524	4589
sogamoso	4205	14222	5462	4618
soledad	4811	4634	4937	5118
suarez	5470	5271	4535	5002
tado	5614	5238	5672	4938
tenjo	4337	4240	4519	4606
tibu	5023	4851	4873	4774
titiribi	5129	5099	4230	5165
tocancipa	4486	4808	4429	4647
totoro	5288	5006	6265	5008
tulua	4375	5488	5918	5057
tunja	4341	7741	5580	4614
turbaco	4685	4523	5031	5327
turbana	4721	4550	5048	13055
ubate	4307	4481	4388	4590
uraba	4631	4992	4125	3914
uramita	4941	5178	3891	4828
valle-del-guamuez	5017	4795	5059	4582
valledupar	4806	4622	4755	3864
venecia	5110	5096	4301	5170
vijes	4391	5475	16301	5085
villavicencio	4773	4688	6046	4831
villeta	4921	4265	4329	4550
yopal	5377	6589	5307	4618
yumbo	5852	5566	13255	5136 ;

Scalar cap 'capacidad por viaje en toneladas' / 34 /;

Scalar ICTC 'Índice de costos de transporte de carga 2022 (4.19%)' /0.0419/;

Scalar sizing 'tamaño de flota actual' / 116 /;

Scalar available 'disponibilidad de los vehículos' / 0.93 /;

Scalar sale 'disposición para venta vehículo mercado usados'/20000000/;

Scalar rent 'costo fijo de canon para ingreso de vehículo'/12500000/;

Parameter $c(i,j)$ 'costo de transporte en pesos colombianos por origen-destino';

$$c(i,j) = f(i,j)*d(i,j)+(f(i,j)*ICTC)*d(i,j);$$

Variable

$x(i,j,t)$ 'cantidad de viajes origen-cliente'

$cars(j,t)$ 'cantidad de carros por origen'

$sizing(t)$ 'tamaño de flota en el tiempo t'

$newcars(t)$ 'cantidad de carros nuevos en cada tiempo'

$costnewcars(t)$ 'costo por carros nuevos en cada tiempo'

$FRS(t)$ 'cantidad de carros salientes en cada tiempo'

$ingresoFRS(t)$ 'ahorro por carros salientes en cada tiempo'

z 'costos totales de transporte en pesos colombianos';

Integer Variable x , $cars$, $newcars$, $costnewcars$, FRS , $ingresoFRS$;

Equation

$cost$ 'función objetivo'

$supply(j,t)$ 'límite de suministro en la planta j en el período t'

$demand(i,t)$ 'satisfacer la demanda en el mercado i en el período t'

$car(j,t)$ 'carros por planta j en el período t'

$newcar(t)$ 'carros nuevos en el período t'

$costnewcar(t)$ 'costo de carros nuevos en el período t'

$FR(t)$ 'carros salientes en el período t'

$ingresoFR(t)$ 'ahorro de carros salientes en el período t' ;

$$cost.. \quad z = e = \sum((i,j,t), (c(i,j)*x(i,j,t))) + \sum(t, costnewcars(t)) - \sum(t, ingresoFRS(t)) ;$$

$$supply(j,t).. \quad \sum(i, x(i,j,t)) = a(j,t)/cap;$$

demand(i,t).. sum(j, x(i,j,t)) =g= b(i,t)/cap;

car(j,t).. cars(j,t) + ((sum(i, x(i,j,t)))/(r(j,t)))/(available) =g= 0;

newcar(t).. newcars(t) - sizing(t) + sum(j, cars(j,t)) - FRS(t-1) =l= 0;

costnewcar(t).. costnewcars(t) =l= newcars(t)*rent;

FR(t).. FRS(t) - sizing(t) + sum(j, cars(j,t)) + newcars(t-1) =g= 0;

ingresoFR(t).. ingresoFRS(t) =l= FRS(t)*sale;

Model transport / all /;

option RMIP = CPLEX;

solve transport using RMIP minimizing z;

display x.l, x.m;

Bibliografía

- Aragones, D. G., Calvo, G. F., & Galan, A. (2021). A heuristic algorithm for optimal cost design of gravity-fed water distribution networks. a real case study. *Applied Mathematical Modelling*, 95, 379–395. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.02.015>
- Argueta, C. M., Agudelo, I., & Cardona, O. C. S. (2016). Scenario planning: A case study in a Colombian logistics consulting firm. *Estudios Gerenciales*, 32(138), 96–107. <https://doi.org/10.1016/j.estger.2015.12.004>
- Argueta, C. M., Iniestra, J. G., & López, M. del P. E. A. (2014). Un enfoque multicriterio para el diseño de una red para el transporte de embarques internacionales. *Contaduría y Administración*, 59(4), 193–221. [https://doi.org/10.1016/s0186-1042\(14\)70160-3](https://doi.org/10.1016/s0186-1042(14)70160-3)
- Arroyo Pérez, R. (2016). Problemas en la gestión de la cadena de suministro en las pymes de la construcción: Una revisión de la literatura. *1Ra Edición*. <https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=CEg2gkQ421wC&oi=fnd&pg=IA3&dq=competitividad&ots=LNsqMwG8i1&sig=POW3Ri5zYvI77tQX1kkKMPZ7rrc#v=onepage&q=competitividad&f=false%0A>
- Bermeo Muñoz, E. A., & Calderón Sotero, J. H. (2009). Diseño de un modelo de optimización de rutas de transporte. *El Hombre y La Máquina*, 32, 52–67.
- Bettinelli, A., Ceselli, A., & Righini, G. (2011). A branch-and-cut-and-price algorithm for the multi-depot heterogeneous vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(5), 723–740. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.07.008>
- Bieniek, M. (2015). A note on the facility location problem with stochastic demands. *Omega (United Kingdom)*, 55, 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.02.006>
- Burgos Marrero, M. I., & Meola, González, S. (2010). *Mejora de procesos logísticos de planeación, aprovisionamiento, almacenamiento y distribución de materia prima agregados de una empresa cementera venezolana* (p. 92). 2010.

- Buriticá, J. (2019). *Optimización de los costos de operación de una empresa de renta de vehículos en Colombia*.
- Çapar, I. (2013). Joint shipment consolidation and inventory decisions in a two-stage distribution system. *Computers and Industrial Engineering*, 66(4), 1025–1035. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.08.013>
- Chain, C. S. (2009). *Closed-loop supply chain en la industria del cemento - el caso de Holcim en Colombia*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/11159/u402362.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chinneck, J. W. (2015). Chapter 13: Binary and Mixed-Integer Programming. *Practical Optimization: A Gentle Introduction*, 1–10.
- DANE. (2022). *Boletín Técnico ICTC - DANE*. 1–14.
- Estrada, M. (2007). Gestión de almacenes y transporte. *Análisis de Estrategias Eficientes En La Logística de Distribución de Paquetería, 2007*, 7–34. https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6625/03MER_Capitol1.pdf?sequence=3
- Fattahi, M., Govindan, K., & Maihami, R. (2020). Stochastic optimization of disruption-driven supply chain network design with a new resilience metric. *International Journal of Production Economics*, 230(September 2019), 107755. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107755>
- Gámez-Albán, H. M., Mejía-Argueta, C., & León Espinosa de los Monteros, R. A. (2017). Diseño de una red de distribución a través de un modelo de optimización considerando agotados. *Ingeniare*, 25(4), 619–632. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052017000400619>
- Gomez, J. (2011). La gestión logística y comercial. *Gestión Logística y Comercial*, 8–27.
- Gupta, P., Mehlawat, M. K., Aggarwal, U., & Charles, V. (2018). An integrated AHP-DEA multi-objective optimization model for sustainable transportation in mining industry. *Resources Policy*, 01, 101180. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.04.007>
- Karimi Dastjerd, N., & Ertogral, K. (2019). A fix-and-optimize heuristic for the integrated fleet sizing and replenishment planning problem with predetermined delivery frequencies. *Computers and Industrial Engineering*, 127(September 2018), 778–787. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.014>
- Klau, R. O. (2015). Perfil Logístico del Sector Cemento en Colombia. *Ekp*, 13.
- Latha Shankar, B., Basavarajappa, S., Kadadevaramath, R. S., & Chen, J. C. H. (2013).

- A bi-objective optimization of supply chain design and distribution operations using non-dominated sorting algorithm: A case study. *Expert Systems with Applications*, 40(14), 5730–5739. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.03.047>
- Marquez, L. G. (2011). Optimización De Una Red De Transporte Combinado Para La Exportación Del Carbón Del Interior De Colombia Otimização De Uma Rede De Transporte Combinado Para a Exportação Do Carvão Do Interior Da Colômbia Optimization of a Combined Export Coal Transport Net. *Revista EIA*, 8(16), 103–113.
- Meindl, B., & Templ, M. (2012). Analysis of commercial and free and open source solvers for linear optimization problems. *ESSnet on Common Tools and Harmonised Methodology for SDC in the ESS*, 1(1), 1–14.
- Mohammadi, M. (2020). Designing an integrated reliable model for stochastic lot-sizing and scheduling problem in hazardous materials supply chain under disruption and demand uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122621. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122621>
- Montoya, S. (2017). *OPTIMIZACIÓN DE UNA RED DE TRANSPORTE DEL CEMENTO A GRANEL EN COLOMBIA*.
- Nasiri, G. R., Zolfaghari, R., & Davoudpour, H. (2014). An integrated supply chain production-distribution planning with stochastic demands. *Computers and Industrial Engineering*, 77, 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.08.005>
- Pacheco Paneque, M., Bierlaire, M., Gendron, B., & Sharif Azadeh, S. (2021). Integrating advanced discrete choice models in mixed integer linear optimization. *Transportation Research Part B: Methodological*, 146, 26–49. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.02.003>
- Peña-Orozco, D. L., Uruña-Villamil, J. F., & González-Valencia, L. A. (2016). Diseño de una red logística para una comercializadora ferretera en el centro del Valle del Cauca. *Entramado*, 12(1), 304–330. <https://doi.org/10.18041/entramado.2016v12n1.23130>
- Rahmaniani, R., & Ghaderi, A. (2015). An algorithm with different exploration mechanisms: Experimental results to capacitated facility location/network design problem. *Expert Systems with Applications*, 42(7), 3790–3800. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.12.051>
- Ruiz-Moreno, S., Arango-Serna, M. D., Serna-Urán, C. A., & Zapata-Cortes, J. A. (2020). Mathematical model for the distribution network optimization of a courier and parcel

company. *DYNA (Colombia)*, 87(214), 248–257.

<https://doi.org/10.15446/DYNA.V87N214.84679>

Sagástegui, A. (2012). *Propuesta para reducir las emisiones de polvo fugitivo en el proceso productivo de una empresa cementera*. 125.

http://repositorioacademico.upc.edu.pe/upc/bitstream/10757/322410/2/Sagastegui_D A.pdf

Sanci, E., & Daskin, M. S. (2021). An integer L-shaped algorithm for the integrated location and network restoration problem in disaster relief. *Transportation Research Part B: Methodological*, 145, 152–184. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.01.005>

Suna, C. (2021). SUSTAINABLE REVERSE LOGISTIC NETWORK DESIGN FOR END-OF-LIFE USE-CASE STUDY. *RAIRO Operations Research*, 55, 503–521.

<https://doi.org/10.1051/ro/2019069>

Veléz Álvarez, J. W. (2017). *Plan de mejoramiento del proceso actual de distribución primaria de cemento a través de un modelo de outsourcing fidelizado*. 13–14.

Vidović, M., Popović, D., & Ratković, B. (2014). Mixed integer and heuristics model for the inventory routing problem in fuel delivery. *International Journal of Production Economics*, 147(PART C), 593–604. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.04.034>

Wirdianto, E., Qi, H. S., & Khan, M. K. (2011). *Simulation Model of Maritime Inventory Routing Problem with Particular Application to Cement Distribution*. March, 22–25.

Zapata-Cortes, J. A., Arango-Serna, M. D., & Serna-Urán, C. A. (2018). Comparison of three IRP-based models to reduce logistics costs and greenhouse gas emissions. *DYNA (Colombia)*, 85(205), 199–204. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n205.68282>

Zhao, X., & Dou, J. (2019). Bi-Objective integrated supply chain design with transportation choices: A multi-objective particle swarm optimization. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 15(3), 1263–1288. <https://doi.org/10.3934/jimo.2018095>