



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Optimización del Proceso de Abastecimiento de Cemento a Granel en Colombia, Aplicación de IRP con Restricciones Particulares (OPAC)

David Felipe Higueta Alzate

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento Ingeniería de la Organización
Medellín, Colombia
2018

Optimización del Proceso de Abastecimiento de Cemento a Granel en Colombia, Aplicación de IRP con Restricciones Particulares (OPAC)

David Felipe Higueta Alzate

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Industrial

Director:

Ph. D Elkin Rodriguez Velasquez

Codirector:

M. Sc Juan Esteban Calle Salazar

Línea de Investigación:

Optimización en Cadena de Abastecimiento

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento Ingeniería de la Organización

Medellín, Colombia

2018

A mi familia, a mi madre Luz Elena que con su gran voluntad ha sacado toda una familia adelante, a mi hermana Katherine que con su inspiración me ha hecho cumplir cada meta propuesta.

Agradecimientos

Una proporción de la felicidad proviene del sentirse agradecido, y este es el momento de agradecer a todas aquellas personas que hicieron parte de este maravilloso proceso educativo.

Primero agradecerle a Dios por darme la pasión en la búsqueda constante de mis objetivos. A mi familia quién siempre me ha apoyado en cada una de mis decisiones, a mi madre Luz Elena quien me ha demostrado que a pesar de las dificultades hay que tener un inmenso coraje para continuar luchando, a mis hermanas Katherine y Paola que me han aportado con sus conocimientos y actitudes en buscar siempre lo mejor para mí. A mi abuela Romelia que me ha brindado su amor desde que tengo razón. También un agradecimiento a todos los demás familiares que me han apoyado.

A mis queridos amigos que me han apoyado en la ejecución de este gran proyecto de vida, que, con su aporte, han hecho que cada eslabón dentro la construcción de esta tesis funcione, a mi gran amigo y codirector Juan Esteban Calle por su excelente forma de ser y su compromiso en compartir el conocimiento, a Paula Carmona por su bello apoyo incondicional de inicio a fin de este proceso, a Sergio Montoya por su gran interés en el logro mi objetivo, a Natalia Aristizabal, Jorge Madera y todo el equipo de la empresa por su ayuda en la obtención de información que fue insumo vital para este proyecto; también gracias a mis amigas Marisol Valencia, Vanessa Diaz por su apoyo.

A mis queridos tutores, que gracias a sus enseñanzas he llegado hasta este momento y con muchos más kilómetros por recorrer, a Nelfi Gonzalez que me apoyo en la monitoria del curso de estadística III, donde obtuve un gran amor por esta rama. A los profesores de investigación de operaciones Luis Fernando Moreno y Francisco Javier Diaz, que desde un principio me apoyaron en el inmenso y divertido camino de la investigación de operaciones. A mi amigo y director Elkin Rodriguez, que, desde los diferentes cursos tomados con él, el mundo de la optimización se ha hecho una real aplicación en mi vida laboral.

Finalmente, a mi empresa Renting Colombia que me ha permitido explotar todos mis conocimientos en pro de la mejora y optimización de procesos, así como el desarrollo de mis habilidades para ser una mejor persona y profesional.

A todos muchas gracias.

Resumen

Con mayor fuerza la analítica ha entrado a evolucionar los procesos logísticos dentro de la cadena de abastecimiento de múltiples y diversos productos, como el cemento. En esta industria es de gran importancia tener un proceso productivo eficiente a lo largo de su cadena, especialmente en los niveles tácticos y operativos donde se evidencia que los más altos costos provienen del transporte y almacenamiento por ser un producto tan voluminoso, pesado y económico. En este trabajo se realiza la propuesta de analítica prescriptiva a través del desarrollo un modelo integrado de optimización del nivel táctico y operativo conocido como IRP (problema de inventario y ruteo de vehículos) enfocado en las circunstancias de un proceso de distribución de cemento con las condiciones particulares de esta industria, aplicando la metodología VMI (inventario administrado por el proveedor). OPAC (optimización del proceso de abastecimiento de cemento) aborda este problema desde un enfoque táctico y posteriormente operativo, en donde el primer enfoque existen las particularidades de una flota no homogénea de vehículos, múltiples productos que no todos pueden ser producidos en una misma planta, capacidad finita de almacenamiento en clientes y centros de distribución (Hub's), además existe la posibilidad de hacer recirculación, que dependerá de los tiempos de viaje (manejo de tiempo continuo) y el manejo de conductores relevo para hacer más eficiente el uso de los activos fijos desde orígenes que pueden ser distintas plantas y los destinos conocidos como clientes que tienen una demanda de diferente productos por satisfacer en diferentes periodos de tiempo. todo esto realizado en un periodo de planificación que cuenta con varios periodos (días), evidenciando el manejo del tiempo discreto con el objetivo de minimizar los costos totales de la cadena de suministro.

Para el segundo enfoque se toma como base principal los resultados del modelo táctico, en este enfoque se busca incluir las condiciones de ventanas horarias de clientes (horarios de atención), definiendo operativamente como debe realizarse la secuenciación de visitas en cada uno de los periodos del horizonte de planificación con el objetivo de minimizar la penalidad de incumplimiento de las visitas fuera del horario de atención.

Este conjunto de enfoques permite obtener un resultado exacto en el manejo de inventario y ruteo de vehículos mediante la programación matemática, específicamente la rama de programación lineal entera mixta, en un tiempo computacionalmente razonable, esta modelación es implementada en un software de modelación algebraica AIMMS, ejecutándolo para un caso de aplicación de abastecimiento de cemento en Colombia de una empresa transportadora, permitiendo obtener un modelo que abarca el 95% de la realidad mediante esta metodología, logrando un resultado comparable con la realidad del problema.

Palabras clave: Cadena de abastecimiento, IRP, programación entera mixta, Cemento a Granel.

Abstract

With greater force, analytics has begun to evolve the logistic processes within the supply chain of multiple and diverse products, such as cement. In this industry it is of great importance to have an efficient production process along its chain, especially at the tactical and operational levels where it is evident that the highest costs come from transportation and storage because it is such a bulky, heavy and economic product. In this work the prescriptive analytical proposal is made through the development of an integrated model of optimization of the tactical and operational level known as IRP (Inventory Routing Problem) focused on the circumstances of a cement distribution process with the individual's conditions of this industry, applying the VMI methodology (Vendor Managed Inventory). OPAC (optimization of the cement supply process) addresses this problem from a tactical and later operational approach, where the first approach contains the peculiarities of a non-homogeneous fleet of vehicles, multiple products that can not all be produced in the same plant, finite storage capacity in customers and distribution centers (Hub's), there is also the possibility of recirculation, which will depend on travel times (continuous time) and the management of relay drivers to make more efficient the use of fixed assets from Origins that can be different plants and destinations known as customers that have a demand for different products to be satisfied in different periods of time. all this carried out in a planning period that has several periods (days), evidencing the management of discrete time with the objective of minimizing the total costs of the supply chain.

For the second approach, the results of the tactical model are taken as the main base. This approach seeks to include the conditions of client time windows, defining operationally how visits should be sequenced in each of the horizon periods. of planning with the objective of minimizing the penalty of non-compliance of the visits outside the hours of attention. This set of approaches allows to obtain an optimal result in inventory

management and vehicle routing through mathematical programming, specifically the branch of mixed whole linear programming, in a computationally reasonable time, this modeling is implemented in an AIMMS algebraic modeling software, With this, an implementation is carried out in a case of application of cement supply in Colombia of a transport company, allowing to obtain a result that covers 95% of reality through this methodology, obtaining a result comparable with the reality of the problem.

Keywords: Supply chain, IRP, mixed integer programming, Bulk Cement

Contenido

1. Introducción	15
1.1 Planteamiento del problema.....	15
1.2 Justificación.....	16
1.3 Objetivos.....	17
1.3.1 Objetivo General.....	17
1.3.2 Objetivos Específicos.....	17
1.4 Contenido.....	17
2. Marco Teórico.....	19
2.1 Descripción y Análisis de la Cadena de Abastecimiento de Cemento	19
2.2 Cadena de Abastecimiento de Cemento en Colombia	22
2.3 Modelos de Programación Matemática	25
2.3.1 Métodos de Solución	30
3. Estado del Arte.....	33
3.1 Administración de Inventarios	34
3.2 Ruteo de Vehículos.....	35
3.3 Inventario y Ruteo de Vehículos.....	36
4. Modelo de optimización OPAC.....	44
4.1 Formulación Matemática de OPAC	46
4.1.1 Modelo Táctico OPAC	48
4.1.2 Modelo Operativo OPAC	52
4.2 Caso de Estudio.....	55
4.2.1 Planteamiento del Caso.....	55
4.2.2 Solución del Caso.....	61
5. Conclusiones y Recomendaciones.....	68
5.1 Conclusiones.....	68
5.2 Recomendaciones.....	69
6. Referencias.....	70
Anexo 1: Implementación Modelo Táctico en AIMMS.....	75
Anexo 2: Implementación Modelo Operativo en AIMMS.....	81

Lista de ilustraciones

	Pág.
<i>Ilustración 2.1. Fuente (Li et al., 2014)</i>	21
<i>Ilustración 2.2. Producción y despachos nacionales de cemento gris 2010-2017. Fuente: (DANE, 2018) Departamento Administrativo Nacional de Estadística: www.dane.gov.co</i>	23
<i>Ilustración 2.3. Variación y contribución anual de los despachos de cemento gris, según canal de distribución Total Nacional (2017^p / 2016), Fuente: (DANE, 2018) Departamento Administrativo Nacional de Estadística: www.dane.gov.co</i>	23
<i>Ilustración 2.4. Despachos nacionales de cemento gris, según tipo de empaque. Total, Nacional 2017^p / 2016, Fuente: (DANE, 2018) Departamento Administrativo Nacional de Estadística: www.dane.gov.co</i>	24
<i>Ilustración 2.5. Ejemplo de método de ramificación y acotamiento. Fuente: (Hillier et al., 2006)</i>	30
<i>Ilustración 2.6. Tecnología de analítica prescriptiva de AIMMS. Fuente: (Aimms, 2013)</i>	32
<i>Ilustración 2.7. Relacionamiento de sistemas para generar un DSS. Fuente: (Aimms, 2013)</i>	32
<i>Ilustración 3.1. Fuente (Soysal et al., 2015)</i>	37
<i>Ilustración 4.1 Esquema de Recirculación Fuente: Elaboración propia con imágenes de https://www.dreamstime.com/</i>	45
<i>Ilustración 4.2 Esquema de conductor relevo. Fuente: Elaboración propia con imágenes de https://www.dreamstime.com/</i>	46
<i>Ilustración 4.3 Esquema de red de abastecimiento de cemento a nivel nacional de acuerdo con el tamaño del problema del caso de estudio. (Fuente: Elaboración Propia)</i>	61
<i>Ilustración 4.4 Red de abastecimiento de cemento sector centro de Colombia. (Fuente: Elaboración Propia)</i>	62
<i>Ilustración 4.5 GAP vs tiempo de computación. (Fuente: Elaboración Propia)</i>	63
<i>Ilustración 4.6 Resultado para un cliente específico de instancia 2</i>	65
<i>Ilustración 4.7 Diagrama de Gantt Vehículo Vs Ciclo para todos los clientes para la instancia 2</i>	66
<i>Ilustración 4.8 Diagrama de Gantt Vehículo Vs Ciclo para un solo cliente para la instancia 2</i>	67

Lista de tablas

	Pág.
<i>Tabla 2.1. Variación acumulada doce meses de los despachos de cemento gris por departamentos, según tipo de empaque Total Nacional, 2017^p / 2016. Fuente: (DANE, 2018) Departamento Administrativo Nacional de Estadística: www.dane.gov.co.....</i>	25
<i>Tabla 2.2. Datos del modelo ejemplo de programación lineal.....</i>	26
<i>Tabla 4.1 Descripción de conceptos del modelo matemático Fuente: Elaboración propia con imágenes de https://www.dreamstime.com/.</i>	47
<i>Tabla 4.2 índices del Modelo Táctico.....</i>	48
<i>Tabla 4.3 Conjuntos del Modelo Táctico.....</i>	48
<i>Tabla 4.4 Parámetros del Modelo Táctico.</i>	49
<i>Tabla 4.5 índices del modelo operativo.</i>	53
<i>Tabla 4.6 Conjuntos del modelo operativo.</i>	53
<i>Tabla 4.7 Parámetros del modelo operativo.</i>	53
<i>Tabla 4.8 Instancias de Prueba.....</i>	55
<i>Tabla 4.9 Resultados de Instancias de Prueba Modelo Táctico.</i>	62
<i>Tabla 4.10 Resultados de Instancias de Prueba Modelo Operativo.....</i>	64

1. Introducción

1.1 Planteamiento del problema

El problema que se desea abordar se enmarca en la logística dentro de la cadena de suministro en el eslabón distribución, tanto para almacenamiento como transporte en la industria de cemento a granel en Colombia. El problema se plantea a continuación:

En la red de distribución de cemento a granel en Colombia, existen múltiples orígenes productivos considerados como plantas, que producen diversos tipos de producto de cemento, cada uno de estos productos pueden ser transportados directamente a los clientes, o a puntos intermedios conocidos como Hub's y desde estos puntos intermedios (no productivos) se pueden transportar a los clientes. Estos Hub's pueden ser considerados como centros de distribución (CEDIS). Para el transporte de cada uno de los productos se cuenta con una flota de vehículos no homogénea con un único compartimento, cada vehículo sólo puede transportar un único tipo de producto a la vez y todo lo que se carga en éste debe ser entregado al Hub o al cliente asignado. Un viaje se define como la ida y regreso de un vehículo desde el nodo origen (planta o Hub) al nodo destino (cliente o Hub).

Adicionalmente, se tiene un horizonte de tiempo de múltiples periodos, en el cual un mismo vehículo puede hacer uno o más viajes si su tiempo de viaje lo permite dentro del tiempo disponible del periodo, los viajes (también llamados ciclos) de estos vehículos son con Backhaul, es decir, el vehículo regresa sin carga al punto origen dado que en este problema no es posible hacer compensación por las características del producto.

Dentro del problema se tienen presentes ventanas horarias (recepción de producto en horarios restringidos), especialmente para los clientes, y adicionalmente se tienen restricciones de jornada laboral, en este problema es posible utilizar el esquema de doble tripulación o conductor relevo (dos conductores por vehículo) para maximizar la utilización de capital (vehículo). Cada uno de los clientes exige un nivel mínimo de inventario de alguno o múltiples productos, por tanto, no debe existir un desabastecimiento en algún periodo de tiempo dentro de la planificación.

Actualmente los clientes tienen una metodología para hacer pedidos de producto que no está integrada con el método de transporte de este producto, por esta razón se plantea un modelo para el problema de inventario y ruteo de vehículos (IRP: Inventory Routing Problem), con el objetivo de responder varias preguntas, algunas de estas son:

¿Cómo debe ser la asignación de visita a los clientes desde un origen para cada uno de los vehículos de acuerdo con la demanda de cada uno de estos por cada producto, respetando las restricciones anteriores? ¿Cuál debe ser la flota de vehículos adecuada para suplir las necesidades de los clientes de acuerdo con las restricciones a un mínimo costo? ¿En qué periodos de tiempo y con qué cantidad debe ser abastecidos cada uno de los Hub's y clientes, de forma tal que se respeten las condiciones de servicio? Muchas de estas preguntas deben ser respondidas para un horizonte de planeación determinado.

1.2 Justificación

Dentro de todos los componentes del costo que existen en la cadena de suministro, los costos de inventario y de transporte son los más significativos, y estos son los que impactan principalmente el rendimiento de las compañías, es decir, en su rentabilidad (Vidović, Popović, & Ratković, 2013). Tanto así que Roldán, Basagoiti, & Onieva (2014), concluyen en sus estudios que entre los costos de administración, almacenamiento, inventario, transporte y licencias, más del 69% está directamente relacionado con el transporte e inventario. Por tanto, muchas empresas buscan indicadores para medirse en cuanto a su costo, con el fin de ser competitivas con empresas de su mismo sector. Un ejemplo de una medida de rendimiento es el costo logístico unitario (CLU), que informa cuanto le cuesta a la empresa producir, almacenar, transportar y otros costos por una unidad de su determinado producto.

Es por esta razón que se hace el foco en la reducción de costos a lo largo del almacenamiento y transporte en la cadena de suministro, y es allí, donde el IRP (Inventory Routing Problem) aborda, desde una perspectiva holística, dos problemas en conjunto, el manejo de inventario y el ruteo de vehículos. De acuerdo con Vidović et al. (2013), tanto el costo de inventario como el de transporte, son aquellos donde las empresas pueden exponer su mejor forma de cómo tener mejores prácticas para ser más eficientes y productivas. En la industria del cemento, existen ciertas desventajas que hacen encarecer el transporte del producto, algunas de estas son: 1. La geolocalización de las plantas productoras; No están cerca de los puntos de demanda (clientes). 2. Las características del producto; Aunque es considerado un producto económico, es bastante pesado y voluminoso, solo esto, ha provocado que el transporte impacte altamente en el costo y a su vez en la rentabilidad de la compañía (Wirdianto, Qi, & Khan, 2011). Por tal motivo los modelos de optimización en esta industria se enfocan principalmente en este eslabón de la cadena de suministro, buscando optimizar su almacenamiento, distribución y transporte (Christiansen et al., 2011).

Hace pocas décadas ha crecido el interés por aumentar la eficiencia en almacenamiento, distribución y transporte dentro de la cadena de suministro con el objetivo de generar mayor competitividad entre las empresas del sector, sin embargo esto ha hecho que tanto los actores en el proceso productivo de la cadena, como proveedores estén

forzados a un cambio en pro de la optimización de sus propios recursos; punto en el cual las empresas empezaron a formar alianzas estratégicas para promover una cadena de suministros más fuerte y competitiva, generando valor a sus clientes, usando metodologías en administración, como la administración de inventarios (VMI) y optimización en la logística mediante modelación matemática. (Andersson, Hoff, Christiansen, Hasle, & Løkketangen, 2010).

Un ejemplo representativo es la integración Nabisco y Kraft Food Inc. en su cadena de suministro hicieron más eficientes sus procesos y obtuvieron mayores rentabilidades, adicionalmente GILLETTE Re ingenia su cadena de suministros en la cual el inventario y la distribución tenían una gran participación en la torta del costo, desde estos inicios se demuestra la necesidad de integrar el inventario con una distribución adecuada. En este punto las grandes empresas como Wal-Mart, Proctor & Gamble, Campbell y Johnson & Johnson popularizaron la metodología de administración de inventarios (VMI) (Moin & Salhi, 2007), con ello se considera que en Colombia existe un gran potencial en encontrar soluciones cuando se propone un modelo que involucre optimización en almacenamiento y distribución de cemento.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Proponer e implementar un método de optimización en el transporte y almacenamiento de cemento integrando los componentes de inventario y ruteo donde existan múltiples restricciones inherentes a la realidad de la cadena de abastecimiento en almacenamiento y distribución.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Proponer uno o varios modelos matemáticos que representen el sistema.
- Desarrollar un método de modelación y solución mediante programación entera mixta.
- Implementar el modelo matemático en un software de optimización para múltiples instancias.

1.4 Contenido

Definida la introducción, en el capítulo 2 se presenta el marco teórico donde realiza una revisión de la caracterización de la cadena de abastecimiento de cemento desde su producción hasta su distribución y posteriormente en este mismo capítulo se profundiza en este sector en Colombia, este capítulo concluye presentando los conocimientos

necesarios para la modelación matemática, mediante las definiciones de conjuntos, índices, etc., y los métodos de solución aplicables a este problema, así como los sistemas soporte a la decisión. En el capítulo 3 se presenta el estado del arte y los antecedentes sobre los problemas de administración de inventario, ruteo de vehículos y la combinación de ellos conocido como los modelos IRP, ya sea en la industria de cemento o industrias similares que hayan involucrado este tipo de problemas. En el capítulo 4 se presenta la metodología de modelación OPAC (Optimización del proceso de abastecimiento de cemento), que contempla dos fases de modelación, un modelo táctico para minimizar los costos totales de la cadena de suministros y un modelo operativo para minimizar la penalidad en el no cumplimiento de las ventanas horarias, Allí se detallan cada una de las variables y restricciones de los modelos, adicionalmente en este mismo capítulo se presenta el caso de estudio de una empresa del sector de cemento colombiana. Por último, se presentan las conclusiones, recomendaciones donde incluye trabajos futuros y como último ítem las referencias.

2. Marco Teórico

El problema por analizar y resolver tiene cobertura en la etapa de distribución de cemento a granel, la cual es considerada la última dentro del proceso productivo del cemento y de los últimos eslabones en la cadena de abastecimiento.

2.1 Descripción y Análisis de la Cadena de Abastecimiento de Cemento

El cemento como término, significa el nombre que se le da a algunos minerales en polvo, que, cuando se combinan con agua forman un cuerpo plástico, el cual se puede moldear fácilmente y que se endurece de manera gradual para formar un cuerpo resistente. El cemento es el producto principal de la industria del silicato y se fabrica a gran escala, su uso se enfoca en la construcción de viviendas, edificios industriales y otras estructuras (Ajiwe, Okeke, & Akigwe, 2000).

“El cemento es la segunda sustancia más consumida en el mundo después del agua” así lo afirma Noche & Elhasia (2013), dado que es un ingrediente necesario para el día a día en nuestras sociedades, desde infraestructuras civiles hasta proyectos inmobiliarios es necesario este insumo, en adición a la creciente demanda en los últimos años de este insumo, se hace necesario la regulación del desarrollo de este producto ecológica y socialmente sustentable en el tiempo, motivado principalmente por las regulaciones de los países y la escasez en recursos naturales. Este insumo que es fundamental para el desarrollo económico e industrial de un país, se fabrica en más de 150 países (Agudelo, 2009).

De acuerdo con Cortes (2015), Asia es el continente donde más consumo de cemento hay, específicamente China e India, que son el número 1 y 2 respectivamente en el top de los mayores países de consumo de cemento. Se espera un crecimiento alto en los próximos años en ambos países, especialmente el segundo, debido al creciente porcentaje de las necesidades de infraestructura de vivienda y vías. En cuanto a América, Estados Unidos y Brasil son quienes más consumo tienen dentro de este top.

Taxativamente el cemento proviene de una mezcla de recursos naturales tales como caliza, arena, arcilla y hierro, y el tipo más común en el mundo es el cemento Portland, de acuerdo con Portland Cement Association (2008), "el cemento Portland es una combinación química estrechamente controlada de calcio, silicio, aluminio, hierro y

pequeñas cantidades de otros ingredientes a los que se agrega yeso en el proceso final de molienda". El cemento Portland puede ser gris o blanco, pero se pueden generar mezclas basadas en los dos productos.

Siendo este un insumo tan importante también tiene una alta relevancia en el consumo de recursos energéticos, utilizando alrededor del 2% del consumo global de energía, generando por ende una responsabilidad en medio ambiente del 5% de CO₂ a nivel mundial. Es por esta razón que una buena planeación energética contribuye a que el proceso dentro de la cadena productiva sea más eficiente. (Raigoza Loaiza, 2016). La cadena productiva del cemento se presenta a continuación.

La primera etapa es la explotación de materias primas, en este punto se extraen todos los insumos naturales necesarios para su producción, desde las canteras de piedra, la piedra caliza y la arcilla son extraídas mediante el uso de mecanismos como barrenación y detonación que de acuerdo con la tecnología implementada causará mayor o menor impacto ambiental.

Con el insumo obtenido llega la segunda etapa que es el transporte de materias primas, para esto es necesario que las piedras tengan un tamaño adecuado para que sea fácilmente transportada a las plantas, en estas plantas se encuentra la etapa de trituración, en donde las piedras son llevadas a un tamaño máximo de pulgada y media por efectos de impacto y presión, posteriormente estas piedras fragmentadas se llevan a la etapa de prehomogenización en donde se hace la mezcla de los diferentes tipos de materiales, como arcilla o caliza, de acuerdo a la necesidad de las propiedades que requiera el producto final. Concluido esto, en la etapa siguiente se almacenan las materias primas, cada una por separada en un equipo conocido como silo, donde son dosificadas para la elaboración de diferentes tipos de producto de cemento.

Posteriormente llega una de las etapas principales que es la molienda de materias primas, en esta etapa con la ayuda de un molino vertical de acero con rodillos cónicos o un molino horizontal con bolas de acero muele el material a presión con el objetivo de que este quede pulverizado, hecho esto se lleva de nuevo a unos silos donde se procede a la siguiente etapa, la homogenización de harina cruda donde se busca una mezcla homogénea del material, después se lleva a la calcinación, etapa en donde se emplean hornos rotatorios a una alta temperatura alrededor de 1400°C donde la harina se transforma en Clinker, que son pequeños módulos grises de 3 a 4 cm. En la penúltima etapa, molienda de cemento, el Clinker es molido a través de bolas de acero de diferentes tamaños de forma horizontal y agregando yeso para alargar el tiempo de fraguado del cemento. Finalmente, la última etapa es envase y transporte del cemento, el producto terminado es llevado a silos de donde se extraen mediante compresores neumáticos o mecánicos a través de mecanismos envasados a granel o por medio de sacos de papel transportados mediante vehículos, ferrocarriles o barcos (Cemex, 2018; Li et al., 2014).

Lo anterior se resume en la Ilustración 2.1, donde se presenta la producción de cemento. En la parte izquierda se tiene el transporte y la preparación de las materias primas, la homogeneización de estas y el almacenamiento en el Silo, posteriormente se tiene la incineración, combustión de los silos para formar el producto intermedio llamado Clinker y finalmente se tienen los molinos de cemento (Li et al., 2014).

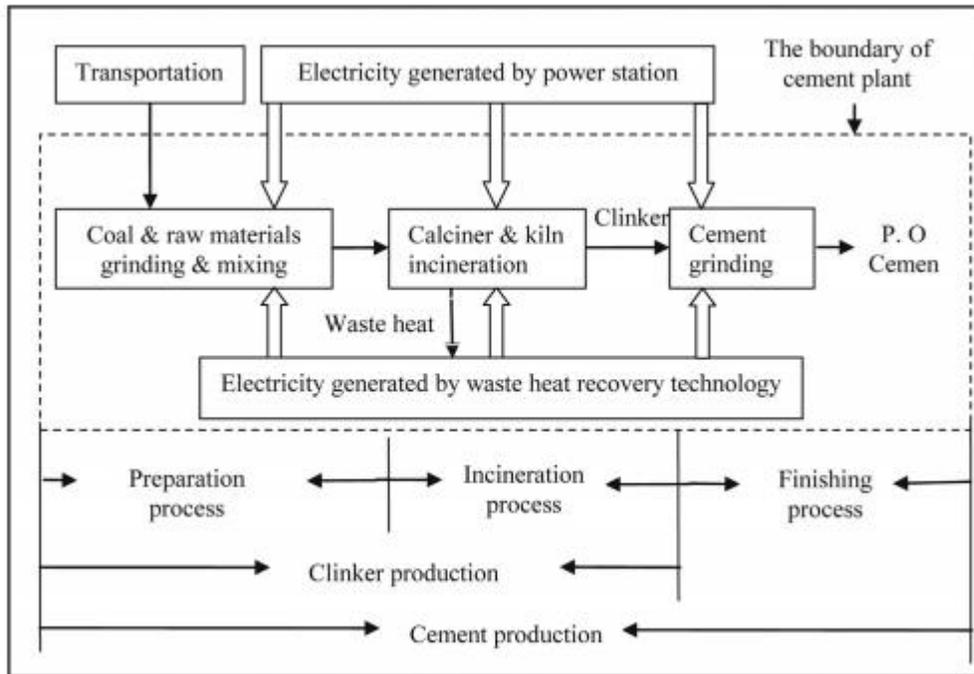


Ilustración 2.1. Fuente (Li et al., 2014)

Uno de los factores más importantes que genera una imagen positiva de este producto a los consumidores es cómo se desarrolla este producto de forma sostenible ambientalmente mediante buenas prácticas manufactureras, dado que de acuerdo con la investigación de Amrina & Vilsu (2015), la producción de cemento tiene tasas de crecimiento anual de alrededor del 6%; Al mismo tiempo, estas industrias causaron alrededor del 6% de las emisiones antropogénicas globales de gases de efecto invernadero.

Dado la limitación de recursos naturales, la creciente demanda del mercado nacional del cemento y la competencia empresarial se hace necesario desarrollar una eficiente cadena de abastecimiento con estrategias que permitan maximizar la rentabilidad y minimizar costos e impactos ambientales. Para lograr este objetivo cada vez más, múltiples compañías cooperan de forma integrada entre proveedores y clientes, aumentando la producción, desarrollando productos que cumplan con los estándares principalmente ambientales, optimizando sus tiempos en los procesos y mejorando continuamente en cada una de las etapas de la cadena de suministro. Esto permitirá tener una mayor productividad y un medio para el alcance de los objetivos.

2.2 Cadena de Abastecimiento de Cemento en Colombia

La industria cementera nació hace más de un siglo en la región iberoamericana, aproximadamente en el año 1895, que hasta la actualidad sigue creciendo en grandes proporciones, creciendo alrededor de un 5.10% anual de las empresas que están ubicadas en las regiones tanto en América Latina, el Caribe, España y Portugal (Guzmán, Chacón, & Sañay, 2016).

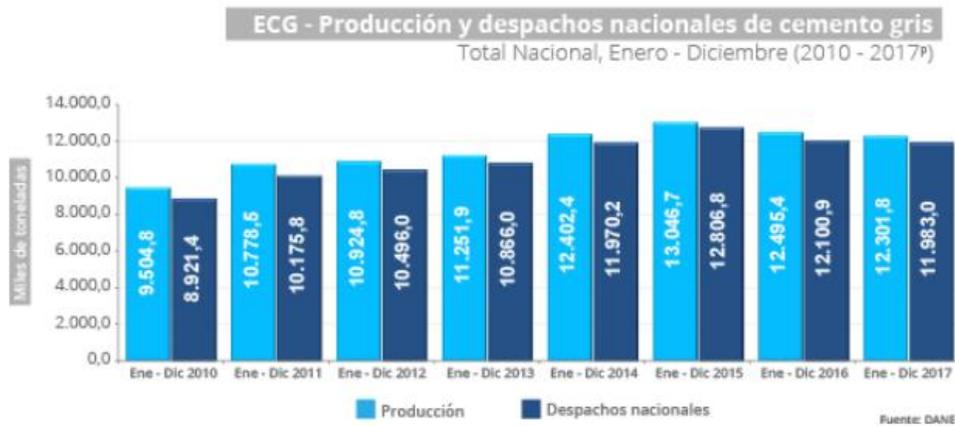
Haciendo un enfoque nacional, el sector de la construcción en Colombia que es uno de los más demandantes del producto cemento, es bastante dinámico e impacta fuertemente en el empleo y la actividad de otros sectores relacionados. Entre los años 1990 y 2010 la construcción impactó el PIB en un porcentaje significativo del 5% al 7%, siendo en el 2013 un impacto del 6% afectando fuertemente los indicadores de empleo en un porcentaje similar, a su vez impactando numerosamente en el medio ambiente (Ríos-Ocampo & Olaya Morales, 2016).

Adicionalmente en los últimos años, la minería ha sido un factor importante en la producción de cemento, este sector minero ha tenido una fuerte acogida en exportaciones, principalmente por el carbón, otros materiales dentro de la minería se explotan en diferentes regiones de Colombia debido a sus cualidades particulares que tiene cada región, algunas de estas son Sabana de Bogotá (Arenas y Arcillas), Luruaco, Ataco-Payande (Arena, Caliza y Arcillas), Oriente y Nordeste Antioqueño (Arenas, Calizas y Arcillas), Paz del Rio (Calizas) y Puerto Nare (Caliza) (Gómez & Correa, 2011).

De acuerdo con el DANE (2018)¹, en 2017 la producción de cemento gris fue de 12.301.800 toneladas presentando una variación de 1.5% por debajo con respecto al 2016. En cuanto a los despachos de este mismo producto en el territorio nacional se registraron un total de 11.983.100 toneladas transportadas, teniendo una variación de -1,0% con respecto al año anterior. Este comportamiento se explica, principalmente, por la variación del canal Concreteras dado que es uno de los principales aportantes en el despacho de cemento con una disminución del 4,9%; por su parte, el canal Prefabricados presentó una variación de 15,1%. Esto se puede ver detalladamente en la Ilustración 2.2.

Los principales canales que contribuyeron con una variación negativa de despachos de cemento gris en el año 2017 con respecto al año 2016 fueron las Concreteras con 4.9% lo que equivale al 1.1% de la variación total, seguido de las Constructores y Contratistas con un aporte del 0.5% a la variación total. Por otro lado, las que más aportaron a una variación positiva del total fueron Prefabricados con un 15.5% aportando 0.3% a la variación total seguido del segmento comercialización aportando el mismo valor a la variación total (DANE, 2018). Esto se puede ver en detalle en la Ilustración 2.3.

¹ Departamento Administrativo Nacional de Estadística: www.dane.gov.co



2

Ilustración 2.2. Producción y despachos nacionales de cemento gris 2010-2017. Fuente: (DANE, 2018) Departamento Administrativo Nacional de Estadística: www.dane.gov.co

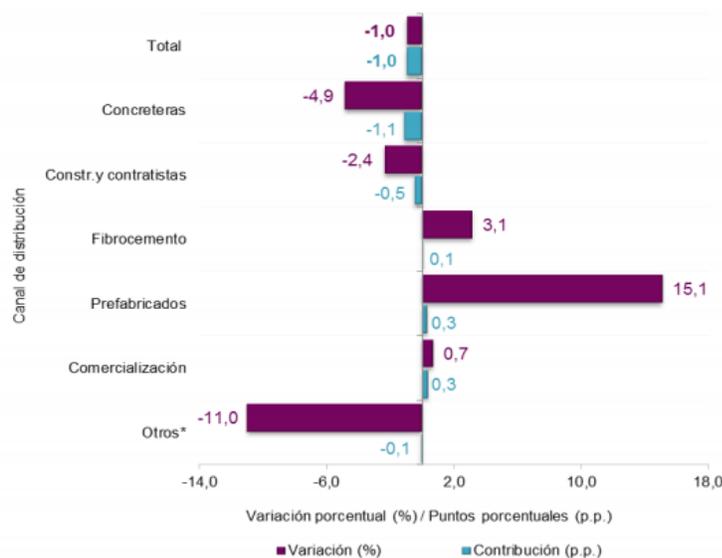


Ilustración 2.3. Variación y contribución anual de los despachos de cemento gris, según canal de distribución Total Nacional (2017^p / 2016), Fuente: (DANE, 2018) Departamento Administrativo Nacional de Estadística: www.dane.gov.co

La composición por tipo de despacho es un factor clave en esta industria debido a la forma de cómo transportarse, para el año 2017 la proporción de despachos de cemento gris realizados a granel fue del 31.96% mientras empacado fue del 68.04% que con

² EGC: Estadísticas del cemento gris.

respecto al año 2016 se redujo la proporción en un 0.51% en granel (DANE, 2018). El detalle en unidades de toneladas por tipo de empaque se presenta a continuación en la Ilustración 2.4.

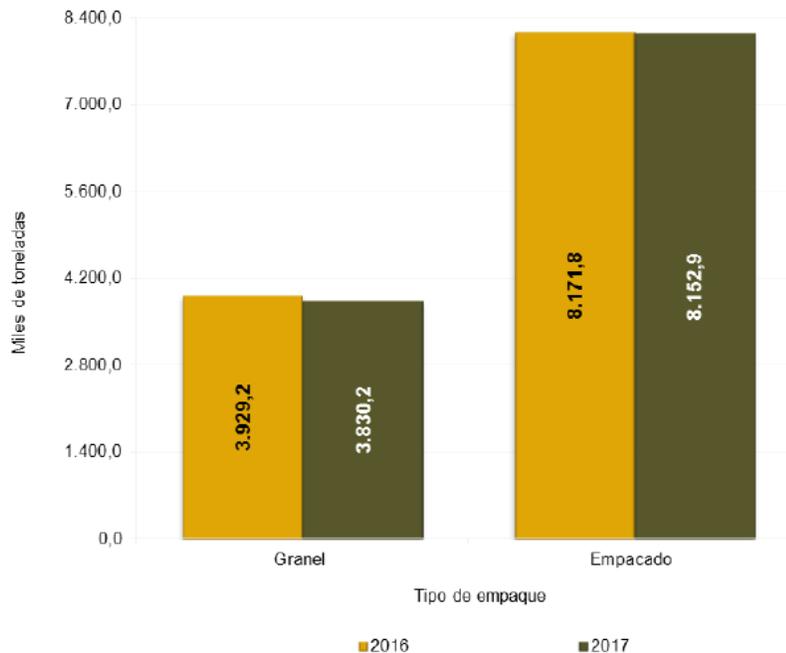


Ilustración 2.4. Despachos nacionales de cemento gris, según tipo de empaque. Total, Nacional 2017^p / 2016, Fuente: (DANE, 2018) Departamento Administrativo Nacional de Estadística: www.dane.gov.co

Finalmente, en el año 2017, hubo una disminución de 2,5% en los despachos de cemento gris a granel con respecto al año anterior, dado principalmente por el departamento de Santander, con una reducción de despachos en 23,5% con respecto al 2016 y el área de Bogotá con una reducción de 5,8%, los cuales restaron en conjunto 2,7 puntos porcentuales a dicha variación. Así mismo, el cemento gris empacado presentó una disminución de 0,2% como resultado de las reducciones registradas en 11 de 21 departamentos (DANE, 2018). Estos resultados se presentan en la tabla 2.1

El segmento de enfoque en esta tesis es los despachos a granel, mediante el uso de vehículos con tráileres conocidos como tolvas.

Tabla 2.1. Variación acumulada doce meses de los despachos de cemento gris por departamentos, según tipo de empaque Total Nacional, 2017^p / 2016. Fuente: (DANE, 2018) Departamento Administrativo Nacional de Estadística: www.dane.gov.co

Departamentos	Granel		Empacado		TOTAL	
	Variación doce meses (%)	Contribución (ptos. Porcentuales)	Variación doce meses (%)	Contribución (ptos. Porcentuales)	Variación doce meses (%)	Contribución (ptos. Porcentuales)
TOTAL	-2,5	-2,5	-0,2	-0,2	-1,0	-1,0
Córdoba	-18,3	-0,3	-15,1	-0,4	-15,9	-0,4
Santander	-23,5	-1,4	2,3	0,1	-7,4	-0,4
Casanare	-24,2	-0,2	-30,9	-0,5	-29,5	-0,4
Bogotá*	-5,8	-1,3	2,3	0,2	-2,4	-0,3
Atlántico	1,5	0,1	-7,6	-0,4	-4,2	-0,3
N. de Santander	-20,0	-0,3	-4,0	-0,1	-6,9	-0,2
Boyacá	-5,7	-0,1	-6,7	-0,2	-6,5	-0,2
Meta	1,5	0,0	-7,3	-0,3	-5,2	-0,2
Valle del Cauca	-14,1	-0,8	1,9	0,2	-1,9	-0,2
Cesar	-27,1	-0,4	-0,3	0,0	-5,9	-0,1
Tolima	-1,4	0,0	-6,0	-0,2	-4,5	-0,1
Bolívar	-8,8	-0,5	0,9	0,0	-2,4	-0,1
Cundinamarca	4,8	0,6	-5,0	-0,4	-0,5	0,0
Cauca	21,8	0,3	-1,9	-0,1	2,3	0,1
Risaralda	26,2	0,3	0,5	0,0	5,6	0,1
Huila	-35,7	-0,5	14,3	0,4	4,9	0,1
Magdalena	-10,1	-0,2	16,8	0,5	10,9	0,3
Nariño	9,3	0,1	18,1	0,5	17,1	0,4
Caldas	23,5	0,8	9,8	0,2	16,0	0,4
Antioquia	14,3	2,2	1,9	0,3	5,7	0,9
Resto**	-22,8	-0,8	-2,4	-0,2	-5,8	-0,4

2.3 Modelos de Programación Matemática

Desde el inicio de la investigación de operaciones, el uso de modelos matemáticos que permitan describir la realidad de un problema ha hecho que múltiples áreas crezcan en su productividad y eficiencia, inclusive desde la época de la segunda guerra mundial hasta hoy es indispensable utilizar mecanismos de este tipo para tomar decisiones. Basta con tener un problema donde existan actividades necesarias por ejecutar y unos recursos limitados que deben ser asignados a estas actividades con el fin de maximizar o minimizar uno o varios objetivos. Para este problema la respuesta que da la programación matemática es una solución óptima, mientras que otros métodos como simulación y estadística dan respuestas a escenarios con soluciones planteadas, o basados en probabilidades e históricos (Taha & González Pozo, 2004).

La metodología de programación matemática, permite describir un sistema real mediante un modelo, que, a partir de una serie de ecuaciones, abstrae la realidad del problema que se quiere resolver. Dependiendo de la complejidad de la formulación del problema se determina la naturaleza del método de solución (Taha & González Pozo, 2004).

La base mínima requerida para el planteamiento de un problema general de optimización se presenta a continuación.

1. Definición de variables de decisión.
2. Definición de función objetivo.
3. Definición de restricciones.

En general la formulación matemática que busca representar un sistema real requiere de una representación de ecuaciones mediante el uso de conjuntos, índices y especialmente sumatorias debido al gran tamaño de variables y restricciones que pueden existir. A continuación, se presenta un ejemplo de un modelo trabajado en forma de conjuntos (implícita) y de forma extendida.

El problema por presentar es muy conocido dentro del área la investigación de operaciones, especialmente en el área de transporte, dado que proviene de un problema de diseño de red, Este problema busca satisfacer los requerimientos (demanda) de varios destinos desde uno o varios orígenes (oferta). El objetivo radica en satisfacer toda la demanda de los destinos con toda la oferta de los orígenes al menor costo posible que puede estar dado en función de distancia. Este también es un problema conocido dentro de la programación lineal.

Ejemplo1:

Se tienen 2 plantas ubicadas en Medellín y Cali, para distribuir determinado producto a tres mercados específicos de demanda, estos son Bogotá, Tunja e Ibagué, el objetivo es identificar cuál es la ruta de cada origen que minimice los costos de transporte. Cualquier origen puede llevar a cualquier destino, y cualquier destino puede recibir de cualquier origen. La información se presenta en la a continuación en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Datos del modelo ejemplo de programación lineal.

Distancias (en Kilómetros)				
Mercado Planta	Bogotá	Tunja	Ibagué	Oferta Máxima
Medellín	420	422	413	350
Cali	461	602	265	600
Demanda Mínima	325	300	275	

Adicionalmente se tiene un flete, es decir el costo por unidad por kilómetro transportado de 120 pesos. $F = \$ 120$. Así que el objetivo es minimizar el costo total de distribuir el producto desde las 2 plantas a los 3 mercados.

Para este ejemplo existen dos conjuntos, uno de plantas y otro de mercados, Plantas: {Medellín, Cali} y Mercados: {Bogotá, Tunja, Ibagué}. Por tanto, se definen los siguientes dos índices asociados a los conjuntos.

Índices: $i = \text{plantas}, j = \text{mercados}$ con esta definición se crea la variable de decisión.

$X_{i,j}$: Cantidad de producto transportado desde la planta i al mercado j

Dónde $i = 1 \rightarrow \text{Medellín}, \quad i = 2 \rightarrow \text{Cali}$

Dónde $j = 1 \rightarrow \text{Bogotá}, \quad j = 2 \rightarrow \text{Tunja}, \quad j = 3 \rightarrow \text{Ibagué}$

Por tanto, la función objetivo quedaría de la siguiente forma presentada en la ecuación (2.1):

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & 120 \times 420 \times X_{1,1} + 120 \times 422 \times X_{1,2} + 120 \times 413 \times X_{1,3} \\ & + 120 \times 461 \times X_{2,1} + 120 \times 602 \times X_{2,2} + 120 \times 265 \times X_{2,3} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Y finalmente las restricciones del problema planteado.

Sujeto a:

$$X_{1,1} + X_{1,2} + X_{1,3} \leq 350 \quad (2.2)$$

$$X_{2,1} + X_{2,2} + X_{2,3} \leq 600 \quad (2.3)$$

$$X_{1,1} + X_{2,1} \geq 325 \quad (2.4)$$

$$X_{1,2} + X_{2,2} \geq 300 \quad (2.5)$$

$$X_{1,3} + X_{2,3} \geq 275 \quad (2.6)$$

$$X_{1,1}, X_{1,2}, X_{1,3}, X_{2,1}, X_{2,2}, X_{2,3} \geq 0 \quad (2.7)$$

La ecuación (2.1) representa todos los costos de transporte de todas las combinaciones posibles. Las restricciones (2.2) y (2.3) garantizan que no se envíen más de la capacidad de cada una de las plantas. Las restricciones (2.4), (2.5) y (2.6) garantizan que se distribuya la cantidad de producto mínima requerida para cada mercado. Finalmente, la restricción (2.7) garantiza la no negatividad en las variables de decisión.

Este esquema de formulación presentado anteriormente se considera explícito, dado que no hay una agrupación en sumatorias para las restricciones y función objetivo, una de sus ventajas es su fácil entendimiento, sin embargo, este tipo de formulación explícita no resulta adecuado cuando los problemas tienen grandes cantidades de variables y

restricciones, por tanto, se prefiere una representación implícita del modelo o de forma canónica.

En principio se deben definir los siguientes parámetros para poder comprender la formulación implícita.

F : flete

$d_{i,j}$: distancia de la planta i al mercado j en kilómetros

O_i : Capacidad de la planta i

D_j : Demanda del mercado j

Con estas definiciones, la representación se presenta a continuación.

La función objetivo se define mediante un producto cartesiano de los elementos del conjunto Plantas y los elementos del conjunto Mercados, así existe una interacción entre cada distancia y cada cantidad de producto a entregar, esto se presenta en la ecuación (2.8).

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 F \times d_{i,j} \times X_{i,j} \quad (2.8)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^3 X_{i,j} \leq O_i, \quad \forall i \quad (2.9)$$

$$\sum_{i=1}^2 X_{i,j} \geq D_j, \quad \forall j \quad (2.10)$$

$$X_{i,j} \geq 0, \quad \forall_{i,j} \quad (2.11)$$

La restricción (2.9) representa la capacidad máxima de despachos de la planta. La restricción (2.10) representa la demanda requerida por los mercados y finalmente la restricción (2.11) la no negatividad en las variables de decisión.

Observe que la representación anterior facilita la formulación de los problemas de programación matemática, sin embargo, esta representación mediante conjuntos y sumatorias como la anterior tiene una desventaja y se puede entender con la siguiente

pregunta ¿qué sucede si no se puede llevar producto desde la planta Medellín al mercado Tunja? En este caso la representación anterior no sería correcta completamente, dado que está asumiendo que todas las plantas pueden atender todos los mercados y todos los mercados pueden ser atendidos por todas las plantas. A pesar de que, una solución simple para este problema puede ser aumentar la cantidad de kilómetros en esta conexión para que pese más en la función objetivo y esta conexión no sea escogida, no resulta ser adecuado del todo y menos cuando se tienen otras condiciones reales. Por esta razón se plantea lo siguiente

Para los casos en que no todas las conexiones existen entre los orígenes y destinos, en este caso entre plantas y mercados se debe formular el problema mediante una representación de conjuntos indexados, dónde se especifique cuáles son realmente las conexiones posibles.

Se define: $PM(j) = \{i \in \text{Planta} / \text{El mercado } j \text{ se puede abastecer de la planta } i\}$

Cuando $j = \text{Bogotá} \rightarrow PM(1) = \{\text{Medellín, Cali}\}$

Cuando $j = \text{Tunja} \rightarrow PM(2) = \{\text{Cali}\}$

Cuando $j = \text{Ibagué} \rightarrow PM(3) = \{\text{Medellín, Cali}\}$

Así con esta generación del conjunto indexado la formulación matemática del problema cambia un poco. Este cambio se presenta a continuación.

Función Objetivo:

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^3 \sum_{i \in PM(j)} F \times d_{i,j} \times X_{i,j} \quad (2.12)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^3 X_{i,j} \leq O_{i/i \in PM(j)}, \quad \forall i \quad (2.13)$$

$$\sum_{i \in PM(j)} X_{i,j} \geq D_j, \quad \forall j \quad (2.14)$$

$$X_{i,j} \geq 0, \quad \forall i \in PM(j), j \quad (2.15)$$

Con esta formulación es permitido no tener todas las conexiones cuando se realiza un producto cartesiano entre los elementos de diferentes conjuntos, otorgando así las restricciones que realmente son necesarias (Aimms, 2013).

2.3.1 Métodos de Solución

Existen infinidad de métodos de solución para los modelos de programación matemática, sin embargo, la selección del método de solución debe ser coherente con el tipo de formulación propuesta dentro del modelo, por ejemplo los métodos de solución tradicionales como simplex son aplicables cuando el problema es de programación lineal, es decir contiene todas las variables continuas cuya función objetivo y restricciones son lineales, Se considera de programación entera cuando al mismo caso anterior las variables pasan de ser continuas a enteras y lo demás continúa igual, y finalmente se considera de programación entera mixta cuando, pueden existir variables continuas y enteras con las demás condiciones iguales.

Dado que el problema a tratar está dentro del grupo de programación entera mixta, se debe elegir un método adecuado que permita encontrar una solución óptima global para este problema. Uno de los métodos más conocidos para resolver este tipo de problemas es llamado algoritmo de ramificación y acotamiento o en inglés Branch and Bound (Wolsey & Nemhauser, 2014). De forma breve, este algoritmo ejecuta el método simplex consecutivamente a múltiples subproblemas, empezando inicialmente por el problema relajado, es decir sin restricciones de variables enteras, donde elige dos subproblemas uno de ellos con la restricción mayor o igual al entero próximo y el segundo problema con la restricción menor o igual al entero del número actual, este primer paso es llamado ramificación (Hillier, Lieberman, & Murrieta Murrieta, 2006). Esta explicación se presenta en la Ilustración 2.5.

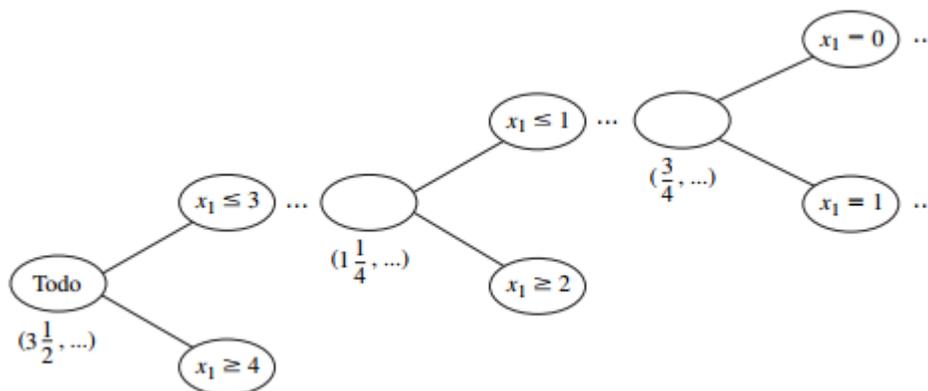


Ilustración 2.5. Ejemplo de método de ramificación y acotamiento. Fuente: (Hillier et al., 2006)

El acotamiento busca la no exploración de todas las ramas posibles, dado que esto computacionalmente sería un problema. Esta metodología deja de buscar por una rama si el valor de la aproximación de las variables enteras da como valor de la función objetivo-obtenida peor que el mejor valor de la función objetivo-encontrada previamente con las variables enteras. Este método se repite hasta que encuentra el valor entero de la variable que maximice o minimice el valor de la función objetivo (Hillier et al., 2006).

Por otro lado, existe también softwares de soporte a la toma de decisiones, también conocidos como sistemas soporte a la decisión DSS por sus siglas en inglés Decision Support System. Muchos de estos sistemas permiten encontrar soluciones a problemas de programación matemática mediante *Solvers*, de acuerdo con Rothlauf (2011), un solver es un mecanismo de solución que usa algún tipo de algoritmo para realizar un conjunto definido de tareas, básicamente encontrar la solución a un problema de programación matemática. Como se mencionó anteriormente el solver dependerá del tipo de problema, y existe una gran cantidad de solvers que tienen diferentes algoritmos. Entre los más conocidos están: Gurobi de Gurobi Optimization. CPLEX de IBM y XPress de FICO, estos principalmente para optimización de problemas de programación entera mixta, sin embargo, estos solvers necesitan una forma adecuada de recibir los problemas de programación matemática, es decir la comunicación entre la escritura del modelo matemático y solver. Esto se logra mediante el modelado de forma implícita, dado que, a través de este tipo de modelado, como se presentó anteriormente, se evitará que el solver deba interpretar las miles o millones de ecuaciones escritas de forma explícita. Por esta razón los softwares DSS tienen una metodología de modelación implícita o algebraica. Entre los principales softwares para la modelación algebraica existen Lingo de LINDO SYSTEMS, Gams de GAMS Development Corp, AMPL de AMPL Optimization inc, OPL de IBM, AIMMS, de AIMMS B.V. Además, de que estos softwares permiten la modelación algebraica, algunos de ellos tienen la ventaja de tener una modelación también mediante una interfaz, que permite generar gráficos para análisis y validación de datos y modelos.

AIMMS es un software que busca resolver preguntas desde el carácter prescriptivo, este software además de permitir la modelación de programación matemática mediante lenguaje algebraico y la inclusión de múltiples solvers para resolverlo, posee la ventaja de tener herramientas de creación de interfaces de usuario para el entendimiento rápido de modelos complejos. AIMMS, de acuerdo con la estrategia de su compañía, pretende responder preguntas de optimización como: ¿qué debería hacer?, empezando desde los datos hasta llegar a la acción, minimizando la interacción con entrada de información humana (Aimms, 2013). Esto se representa en la Ilustración 2.6

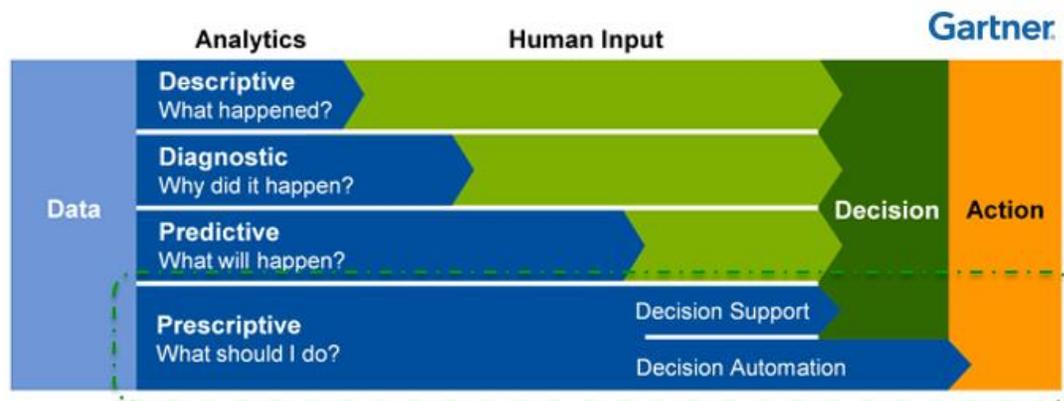


Ilustración 2.6. Tecnología de analítica prescriptiva de AIMMS. Fuente: (Aimms, 2013).

Por tanto, el software AIMMS provee en resumen las siguientes características para resolver modelos de programación matemática: Lenguaje de modelado matemático, Interfaz de usuario, Herramientas de productividad, Herramientas de diagnóstico, Gestión de datos, Despliegue del modelo, solvers. En la Ilustración 2.7 se presenta como AIMMS define la interacción entre la interfaz gráfica de usuario, con la modelación matemática, entrada de información y resolución de los modelos a través de solvers.

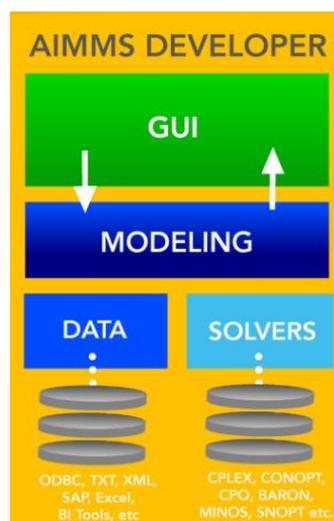


Ilustración 2.7. Relacionamiento de sistemas para generar un DSS. Fuente: (Aimms, 2013).

3. Estado del Arte

El planteamiento del problema tiene cobertura en la etapa de distribución de cemento a granel la cuál es considerada la última dentro del proceso productivo del cemento. Siendo esta etapa el foco del proyecto de tesis, específicamente en la distribución de cemento mediante transporte vehicular con camiones o tractocamiones de sistema a granel, es decir uso de tráileres tipo tolva.

Cada año, aumenta cada vez más la industrialización y sistematización en los procesos empresariales y a su vez en integraciones tecnológicas entre múltiples organizaciones dentro de la cadena de suministro proveedor, fabricante y cliente. Con esto han desarrollados diferentes metodologías que logran obtener buenas prácticas en cada uno de los entes implicados, así en los últimos años tanto las empresas manufactureras como de servicios le dan mayor importancia a metodologías como la administración de inventarios por el proveedor donde busca mejorar y obtener soluciones a problemas enfocados dentro de su cadena de suministros (Vidović et al., 2013).

La metodología Vendor Managed Inventory (VMI) ha sido aplicada por múltiples empresas en la búsqueda de integrar cada vez más los procesos entre proveedores y clientes, una forma de hacerlo es mediante los modelos de optimización conocidos desde la rama de Inventory Routing Problem (IRP). Este tipo de modelación matemática ha logrado integrar dos procesos: La administración de inventarios y el ruteo de vehículos, que por mucho tiempo se trataban de forma aislada, ignorando su interrelación en la cadena de suministro, principalmente debido a su complejidad en la obtención de su solución.

Recientemente se le ha dado mayor fuerza al estudio del problema de inventario y ruteo conocido (IRP) desde la metodología administrativa: inventario administrado por el proveedor (VMI), en donde se integran los problemas de administración de inventario y ruteo de vehículos, de acuerdo con Bertazzi & Speranza (2012), han existido miles de artículos en administración de inventarios y miles más en ruteo de vehículos y a partir de los años ochenta sobresalen atribuciones con este enfoque y desde entonces se han desarrollado diferentes modelos y variaciones desde este problema visto de forma combinada.

Aunque el problema de abastecimiento de cemento a granel en transporte terrestre mediante una metodología integrada de modelación de inventario y ruteo de vehículos ha sido poco tratado, esta misma metodología ha sido enfocada a otros problemas como

optimizaciones de inventario y transporte de combustibles fósiles, transporte marítimo de cemento y almacenamiento en silos, etc., existiendo una gran cantidad de artículos de estos tipos, como se presenta en el siguiente párrafo. Esta mencionada integración ha encontrado beneficios que no se pueden obtener al modelar separadamente ambos problemas.

Dentro de los primeros ejemplos de esta implementación se resalta en la aplicación de la distribución combustible y derivados de petróleo, también se destaca en entrega y programación de rutas en la industria de gas natural (Mutlu, Msakni, Yildiz, Sönmez, & Pokharel, 2016) y más casos de estudio se puede encontrar en: (Arango, Zapata, & Jaimes, 2011; Waller, Johnson, & Davis, 1999; Yao, Evers, & Dresner, 2007). Además esta metodología IRP ha sido utilizada en la industria marítima, resolviendo problemas a gran escala e inclusive dentro de la industria del cemento donde existe un gran potencial para minimizar los costos de todo el sistema, al ver el problema de forma integrada (Andersson et al., 2010; Christiansen et al., 2011). Sin embargo, para entender más en detalle de los modelos IRP se debe realizar una descripción de los modelos de ruteo de vehículos, así como de administración de inventarios y las cualidades que tiene al ver integradamente ambos problemas.

3.1 Administración de Inventarios

Los modelos de administración de inventario son comúnmente usados hoy en las compañías, los cuales pueden tener múltiples variaciones, como incertidumbre en la demanda, mercados volátiles y donde básicamente este problema se centra en tener un balance entre objetivos en conflicto como la producción, la demanda, las compras y por supuesto el nivel de servicio. En estos modelos existe una gran cantidad de artículos de investigación de operaciones, cómo ciencias administrativas y sistemas soporte a la toma de decisiones, también en la actualidad existen gran cantidad de software que permite la planeación de inventario de forma eficiente para diferentes sistemas de inventarios en múltiples industrias (Andersson et al., 2010).

De acuerdo con Andersson et al. (2010), se sugieren unos pasos básicos en la aplicación de la metodología de administración de inventarios:

1. Formular un modelo matemático que represente el problema.
2. Encontrar la solución óptima al modelo.
3. Utilizar un sistema de información que mantenga los registros de nivel de inventario.
4. Con los registros aplicar la política óptima encontrada para decidir cuándo y cuánto reponer de inventario.

El principal interés para los investigadores en las ciencias como la Investigación de Operaciones radica en los pasos 1 y 2, dado que allí se puede encontrar cualquier tipo de

particularidad de acuerdo con el tipo de sistema por modelar y solucionar con diferentes metodologías. A pesar de su gran utilidad, este modelo no abarca las decisiones de ruteo, sino que son adquiridas como parámetros dentro del costo de transporte. Más información sobre estos modelos de administración de inventarios se puede encontrar en (Fredendall & Hill, 2011; Na & Progame, 2010; Vrat, 2014; Zipkin, 2000).

3.2 Ruteo de Vehículos

Por otro lado, se encuentra la metodología de ruteo de vehículos, la cual es evidentemente complementaria con la metodología de administración de inventarios descrita anteriormente. Este problema es uno de los más estudiados en la literatura en Investigación de Operaciones, el cual consiste en tomar decisiones de qué clientes deben ser visitados, en qué orden, con qué tipo de vehículos y su respectiva cantidad, además en qué periodos de tiempo; para minimizar el costo total de distribución. De este problema existen una innumerable cantidad de variaciones y particularidades, lo que ha hecho que sea un problema muy apetecido por todas las ramas de la investigación de operaciones, simulación y optimización (Andersson et al., 2010).

Cada variación puede ser fácilmente tema por tratar para la realización de investigaciones, tanto en su modelación como metodología de solución. En general el modelo básico del ruteo de vehículos es conocido por sus siglas en inglés como VRP (Vehicle Routing Problem). Este problema considera un conjunto de nodos orígenes (por ejemplo: plantas), nodos destinos (por ejemplo: clientes), y una flota de vehículos homogénea con una capacidad limitada, donde cada uno de estos vehículos debe visitar exactamente una vez cada nodo destino sin superar su capacidad y regresar al origen; generando una única ruta. La cuestión radica en responder preguntas como: ¿cuál debe ser el tamaño de la flota de vehículos? ¿Cómo deben ser las rutas de cada vehículo?, todo con el fin de que se minimicen los costos totales de transporte. Al ser un problema combinatorio, éste es considerado difícil de resolver y está incluido dentro de la familia de los problemas *NP – Hard* (Bertazzi & Speranza, 2012; Hoff, Andersson, Christiansen, Hasle, & Løkketangen, 2010).

Sin embargo, el VRP es un caso más general del problema del agente viajero conocido por sus siglas en inglés TSP (Travelling Salesman Problem). Dado que este problema sólo cuenta con un único vehículo o recurso. En general el VRP puede tener diferentes variaciones, por ejemplo, algunas de ellas son: se tienen múltiples nodos orígenes, ventanas horarias de los clientes, flota heterogénea de vehículos, con capacidades limitadas, múltiples productos, clientes donde se puede entregar y recoger producto, múltiples viajes durante el mismo periodo de tiempo, vehículos con múltiples compartimentos, entre otras variaciones. Así como existen una gran cantidad de variaciones, existen también gran cantidad de métodos para solucionarlos, desde un enfoque de programación matemática y diversas heurísticas (Andersson et al., 2010).

3.3 Inventario y Ruteo de Vehículos

Una definición precisa para el IRP está dada por Dror, Ball, & Golden (1985).

“El IRP involucra un conjunto de clientes, donde cada cliente tiene una demanda diferente cada día. El objetivo es reducir al mínimo los costos anuales de entrega, mientras que se asegura que el cliente contará con la mercancía en cualquier momento que la necesite”.

No obstante, esta definición se ha ampliado a lo largo del tiempo, y por supuesto en la realidad existe mayor cantidad de información y restricciones, además de contar con factor crítico como lo es la incertidumbre, por esta razón en la literatura en muchas ocasiones se ha llevado a una forma simple o determinística que pueda ser modelable y se pueda obtener una solución. A pesar de esto, este tipo de metodologías han ofrecido ventajas competitivas a las empresas al tomar decisiones de forma conjunta, aunque sea un problema difícil de resolver de forma exacta (Coelho, Laporte, & Cordeau, 2012).

El IRP aborda la coordinación de dos componentes de la cadena de suministro, la administración de inventarios y el ruteo de vehículos, dónde el objetivo tradicional es minimizar el costo total de distribución e inventario en un horizonte de planificación sin pérdida de existencias para cada cliente, es allí donde los proveedores tienen que tomar tres decisiones 1. Cuando entregar a cada cliente, 2. Qué cantidad entregar a cada cliente en cada visita, 3. Cómo combinar los pedidos de varios clientes en un vehículo. A diferencia del VRP tradicional que tiene la condición de que el cliente es quien decide la cantidad y la frecuencia mediante su propia estimación de demanda. Una representación de esta metodología se presenta en la Ilustración 3.1. Allí el proveedor es quién decide la cantidad de inventario de cada cliente y la forma de distribuirlo, necesitando tal vez menor cantidad de vehículos en un conjunto de periodos, evitando que en un mismo periodo pueda ocurrir que muchos clientes soliciten una gran cantidad de producto, lo que forzaría a tener una mayor capacidad de vehículos para satisfacer la demanda en ese periodo, y también ocasionando que en otros periodos pueda existir flota ociosa por los bajos pedidos de los clientes (Soysal, Bloemhof-Ruwaard, Haijema, & Van Der Vorst, 2015).

Uno de los grandes problemas de esta metodología es la complejidad en obtener una solución exacta u óptima, debido a que éste contempla el ruteo de vehículos, lo que ya por sí mismo es conocido como un problema *NP – Hard*, por tanto, el IRP también lo será (Popović, Vidović, & Radivojević, 2011).

Los primeros pasos del IRP surgen en condiciones donde se tiene un único vehículo, y puede ser visto desde dos perspectivas: 1) como una extensión de un problema de ruteo involucrando variables de inventario de los clientes con sus respectivas restricciones, y 2) desde un problema de control de producción e inventario donde los vehículos tienen un

papel de sistema de producción. Ambos buscando minimizar costos y maximizar utilidades (Roldán et al., 2014).

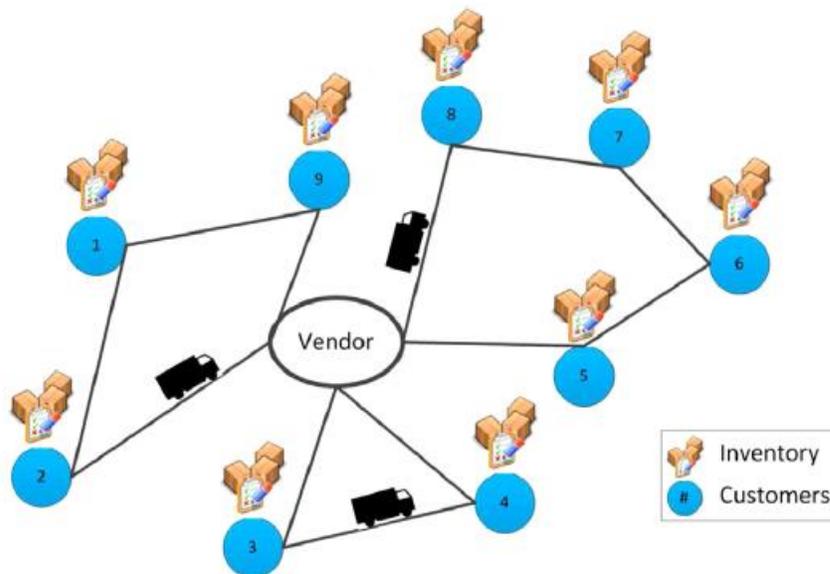


Ilustración 3.1. Fuente (Soysal et al., 2015)

En el transcurso del tiempo cada vez más los modelos se han visto direccionados desde el primer enfoque, añadiendo más y más restricciones que permitan al modelo de ruteo tener una mayor aproximación al problema en la realidad.

Posteriormente, se empiezan a desarrollar modelos con flota de múltiples vehículos conocido como MIRP que por sus siglas en inglés significa Multiple Vehicle Inventory Routing Problem, sin embargo, es posible confundir con la metodología también llamada problema de inventario y ruteo marítimo por siglas MIRP (Maritime Inventory Routing Problem) siendo este último enfocado en el transporte marítimo considerando múltiples supuestos y restricciones como en transporte terrestre (Papageorgiou, Nemhauser, Sokol, Cheon, & Keha, 2014).

También se han propuesto diferentes esquemas de IRP, como Zheng, Chu, Zhan, & Xu (2009), que proponen un modelo IRP cíclico para una tasa de demandas constantes de cada cliente, este fue analizado en un horizonte de tiempo donde la flota de vehículos es variable, además donde un vehículo puede realizar varias rutas en diferentes frecuencias, este problema se ha conocido como CIRP por sus siglas en inglés que significa Cyclic Inventory Routing Problem, además de tener en cuenta algo particular como las restricciones de tiempo de conducción, generando a partir de este enfoque una

buena planificación, disminuyendo la incertidumbre y variabilidad en la demanda de cada cliente.

En un contexto similar Qin, Miao, Ruan, & Zhang (2014), proponen un modelo de ruteo periódico donde se define la política de reabastecimiento óptimo teniendo en cuenta la construcción de rutas, las cantidades de entrega y las frecuencias, y esta política obtenida será la que se repite de forma periódica, en adición, los autores proponen un método innovador para calcular el costo de inventario dentro de la función objetivo y un algoritmo de búsqueda local para la optimización con la condición sin nivel de seguridad para el inventario, finalizando con un algoritmo de búsqueda tabú para encontrar la solución al ruteo de vehículos.

Sin embargo, Vidović et al. (2013), menciona que en la realidad asumir los problemas con una visión determinística no resulta adecuado en ciertos casos y es por ello por lo que surge la necesidad de ver estos problemas con un enfoque estocástico. En principio Kleywegt, Nori, & Savelsbergh (2002), propusieron un proceso de decisiones Markoviano para encontrar una solución de un IRP con un solo producto, con entregas directas y demandas de cada cliente descritos mediante una función de distribución de probabilidad.

Yu, Chu, & Chen (2006), proponen un modelo de ruteo e inventario estocástico con entregas divididas conocido en inglés como Stochastic Inventory Routing Problem with Split Delivery (SIRPSD) donde la demanda de cada cliente en cada periodo es estocástica y debe satisfacerse al menos con una probabilidad dada especificada por un nivel de servicio, por esta razón aproximan a un modelo determinístico con una restricción de nivel de servicio, eliminando la componente estocástica. Planteado el problema de esa forma, se utiliza un método de relajación lagrangiana para descomponer en dos problemas, el primero de control de inventario (IC) y el otro de ruteo de vehículos (VR) donde el primer problema se soluciona con método simplex con una aproximación a un problema lineal, mientras el segundo problema se utilizó el algoritmo de flujo de costo mínimo (MCF) por sus siglas en inglés Minimum Cost Flow. Finalmente se integran ambas soluciones. Con esta metodología se logra encontrar buena solución a problemas reales de gran tamaño.

Sin embargo, la integración de este tipo de modelos puede llegar hasta un nivel más estratégico, como lo propuso Wang (2010), mediante un modelo que permite tener en cuenta los tres niveles de decisiones: estratégico, táctico y operativo. Primero, el nivel estratégico, donde se toman decisiones en cuanto a la ubicación de localizaciones o centros de distribución. El segundo, táctico, por medio de la administración de inventarios. Finalmente, el operativo, mediante el ruteo de vehículos. En este modelo se tiene una demanda estocástica, y para ello propone un modelo de regresión no lineal para ser solucionado con relajación lagrangiana en varios subproblemas.

Posteriormente, Chen & Lin (2009), propusieron un sistema de ruteo y manejo de inventario estocástico basado en cobertura HSIRS por sus siglas en inglés que significan Hedge-based Stochastic Inventory-Routing System y el modelo Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity por sus siglas en inglés GARCH para el pronóstico de demanda estocástica, donde HSIRS fue capaz de generar una política de reposición de varios productos y múltiples períodos con capacidad limitada para cada vehículo y restricciones de ventanas de tiempo.

Popović et al. (2011), proponen un modelo y solución para el problema IRP con características multi-producto y multi-periodo a través de un modelo de programación entera mixta con una aproximación estocástica, mediante el uso de un algoritmo heurístico que tiene como entrada de información las demandas promedio diarias. Finalmente compara esta metodología estocástica con la determinística, con lo que comprueban que con este algoritmo pueden reducir en un 7% el costo total de operación y el tiempo computacional es significativamente mucho menor que una solución exacta de la programación entera mixta (MIP).

Los mismos autores en el siguiente año propusieron una metodología de solución para resolver el problema IRP de multi-producto, multi-periodo y multi-compartimento para vehículos homogéneos asumiendo demandas determinísticas, utilizando un algoritmo de búsqueda de vecindario variable o en inglés Variable Neighborhood Search (VNS), la cual es comparada con dos metodologías, una solución MIP exacta, y un algoritmo de transferencia de compartimento, donde demuestran que este algoritmo de búsqueda variable propuesto resulta ser más eficiente en 87 de 90 casos probados (Popović, Vidović, & Radivojević, 2012).

Existen trabajos con modelos más complejos desde este enfoque al no asumir un comportamiento determinístico, como el problema de ruteo dinámico y estocástico DSIRP (por sus siglas en inglés Dynamic and Stochastic Inventory Routing). Muchos de estos problemas y sus variaciones han sido solucionados desde un enfoque exacto mediante la programación lineal y la programación lineal entera mixta, así como por métodos heurísticos y metaheurísticos (Coelho et al., 2012).

En cuanto a las aplicaciones del IRP, estas aparecen en todos los sectores industriales, empezando en el transporte líquido de combustibles y gas natural, distribución de materias primas para la industria de papel, alimentos para las cadenas de suministros de múltiples supermercados, distribución en componentes de automóviles, comestibles, cemento, aceite orgánico, e inclusive en el transporte de sangre (Soysal et al., 2015).

En el sector de alimentos también ha sido necesario aplicar diferentes modelos de optimización en la distribución con objetivos como disminuir el desperdicio y consumo de combustible, es por esta razón que Soysal et al. (2015), proponen un modelo basado en un IRP tradicional con las restricciones necesarias para esta industria, el cual se define

como un IRP multi-periodo con un método de cargue dependiente, con una condición de demanda incierta, para un caso de aplicación en empresas de tomates frescos, donde esta metodología fue capaz de obtener ahorros del 24% de forma integrada comparados con otros modelos vistos de forma aislada.

Así como en el caso de los alimentos, las empresas de combustibles han necesitado estas metodologías de optimización para mejorar sus procesos y obtener mayores rentabilidades. Un ejemplo es el transporte del gas natural, para el cual Shao, Furman, Goel, & Hoda (2015), provenientes del equipo de investigación de la compañía ExxonMobil, buscaron desarrollar una metodología heurística que lograra obtener un buen resultado en un tiempo de computación razonable para el problema de distribución de gas natural, dado que el hallazgo de una solución mediante un método exacto, a pesar de ser por descomposición, no era factible para un problema de IRP en esta industria. En este punto proponen un modelo de LNG-IRP por sus siglas en inglés (Liquefied Natural Gas Inventory Routing Problem) que puede ser considerado como un caso especial de un MIRP, en donde se construye una heurística Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) para obtener una solución y posteriormente se aplica un algoritmo de búsqueda local para mejorarla. Con esta metodología de solución del problema, se encuentra una mejora con respecto a otros métodos tradicionales en un 78% en promedio en la función objetivo. Además, logra una eficiencia computacional para la solución de los problemas que es 3.94 veces mayor que el promedio.

En cuanto al principal enfoque de esta tesis, que es la industria de cemento, han existido diferentes metodologías que buscan optimizar en todos los eslabones de la cadena de suministro. Como ejemplos de ello se encuentra la metodología IRP de Hertz, Uldry, & Widmer (2012), quienes proponen el planteamiento de un modelo matemático por programación lineal entera mixta con bases en el modelo clásico de SDVRP por sus siglas en inglés Split Delivery Vehicle Routing Problem, con múltiples variaciones para el problema de entrega de cemento, donde se tiene el objetivo de minimizar la duración total de las entregas y como objetivos adicionales definir la cantidad óptima de vehículos para el respectivo problema. Como método de solución, los autores plantean una solución exacta para el planteamiento del problema de programación lineal entera mixta sin utilización de metaheurísticas. Esta estrategia logró obtener buenos resultados. En destalle la solución propuesta resuelve primero el subproblema de asignar el conjunto de entregas a un único vehículo y posteriormente la determinación de la secuencia de las entregas es hallada mediante el ruteo de los vehículos.

Otro ejemplo interesante en la industria de cemento se presente en Tailandia, donde se realizó un estudio de optimización de la cadena de suministros de una de las empresas cementeras más grandes de este país, mediante una metodología de problema de programación de entrega de camiones con posible compensación, conocido como TDBSP por sus siglas en inglés Truckload Delivery with Backhaul Scheduling Problem. Este problema involucra restricciones de un VRP con ventanas horarias, además de que

busca minimizar también dentro de su misma función objetivo los regresos en vacío de un vehículo (sin compensación) a los puntos de orígenes que, de acuerdo con la formulación matemática, se transforma en un VRPBTW por sus siglas en inglés Vehicle Routing Problem with Backhauls and Time Windows, finalmente se resolvió a partir del algoritmo de colonia de hormigas ACO. (Paraphantakul, 2013).

Adicionalmente, Christiansen et al. (2011), proponen un modelo MIRP para la logística de transporte de cemento de plantas a silos mediante barcos, con restricciones de flota heterogénea, donde los productos no se pueden mezclar, y tienen restricciones de límites inferiores y superiores en nivel de inventario de los silos además de los picos de demanda. Para ello se propone una solución mediante una heurística dentro del campo de los algoritmos genéticos el cual obtiene buenos resultados en corto tiempo para un problema real de uno de los más grandes productores de cemento en Noruega, donde el tamaño del problema se puede resumir en 60 silos y dos plantas productivas.

Por otro lado, dentro de la misma industria del cemento existe el concreto, en donde se encuentran múltiples estudios relacionados con la optimización, en principio Payr & Schmid (2009), proponen un modelo para este sector por medio de "Split Delivery Multi Depot Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Time Windows" donde se añade un asistente de carga para penalizar entregas consecutivas, la solución fue propuesta mediante una metodología heurística de Variable Neighborhood Search (VNS). Este método permite ser lo suficientemente flexible para acomodarse a la realidad, demostrando unas ganancias potenciales al obtener una mejor programación de envíos especialmente en instancias grandes y complejas, donde el factor humano no llega a ser capaz de realizarlo.

El Concreto es considerado un producto perecedero que necesita de un alto porcentaje de cemento y por tanto involucra una ágil programación para evitar pérdidas de producto. y la satisfacción del cliente a un costo mínimo. De acuerdo con Zhang, Li, & Liu (2011), la operación de preparación de concreto tiene cinco importantes etapas: producción, cargue, entrega, descargue, regreso. Todas ellas se pueden alinear desde un problema de optimización. Sin embargo, estas cinco etapas, aunque son relacionados con el ruteo de vehículos, difieren en gran proporción del VRP tradicional. Los mismos autores proponen un modelo de programación matemática involucrando restricciones, tanto de flota heterogénea, múltiples nodos clientes y en especial las restricciones de producto, ya que este es un producto perecedero, el cual tiene un tiempo de vida útil de aproximadamente 1.5 a 2 horas, lo que hace más compleja la programación. Finalmente, los autores proponen una solución mediante el uso de algoritmos genéticos.

Para estos tipos de problemas han existido múltiples métodos de solución, el enfoque de esta tesis radica en encontrar una solución exacta, tal como lo encontró Laporte & Coelho (2012), quienes proponen metodologías de solución exactas para resolver el problema de IRP. Un ejemplo de tales metodologías es la propuesta de un algoritmo

Branch and Cut cuando se tienen múltiples productos y múltiples vehículos, problema conocido como el MMIRP cuyas siglas provienen del inglés Multi-product Multi-vehicle Inventory Routing Problem. Con esta metodología se logra obtener un óptimo o una solución bastante buena para problemas de mediano tamaño. Identificando cual o cuales son los parámetros que impactan mayormente en términos de dificultad computacional, este algoritmo es comparado con otros métodos heurísticos tradicionales, donde el algoritmo propuesto obtuvo resultados óptimos para pruebas entre 10 y 50 clientes, 7 periodos de tiempo, 5 vehículos y 5 productos, confirmando que el algoritmo logra ser exitoso en problemas de tamaño mediano.

Más allá del alcance del problema, se han visto modelos que involucran incluso el problema de producción dentro del problema de ruteo de vehículos. Los autores Adulyasak, Cordeau, & Jans (2014), presentan el problema de producción y ruteo de vehículos como de inventario y ruteo de vehículos. En ambos problemas proponen una técnica de solución tanto por una heurística de búsqueda de vecindario adaptativa para una solución inicial y un algoritmo de ramificación y corte (Branch and Cut). Con esta metodología encuentran que pueden hallar soluciones óptimas para instancias de hasta de 45 clientes, tres periodos de tiempo y tres vehículos, con una política de máximo nivel de inventario, en un tiempo aproximado de dos horas, con Procesadores multi-núcleos y con método de procesamiento en paralelo.

De forma similar Desaulniers, Rakke, & Coelho (2016), proponen un nuevo algoritmo de ramificación por precio y corte conocido en inglés como branch-price-and-cut para resolver el problema de inventario y ruteo de vehículos. Este algoritmo incorpora nuevas condiciones como la capacidad máxima de vehículos. Para probar la eficacia de este algoritmo, se contemplaron 640 escenarios diferentes de problemas IRP, donde existían instancias entre dos y cinco vehículos. Con ello lograron demostrar que esta metodología propuesta obtenía mejores resultados que los algoritmos similares tradicionales.

Finalmente, en los últimos 30 años se le ha dado mayor atención a este tipo de problemas y es evidente que gracias a los avances tecnológicos se ha logrado encontrar soluciones más precisas o hasta exactas a problemas de gran escala. Otros casos de éxitos importantes de mencionar son: la eficiencia obtenida de acuerdo con Miyamoto and Kubo's (2001), en un estudio de empresas de bebidas, donde se obtuvo un ahorro en más del 40% del total de horas de trabajo. Gaur & Fisher (2004), se presenta un caso de estudio en Holanda donde se ahorró 4% del costo total de distribución en el primer año y finalmente en FU y FU (2010), un modelo integrado IRP logra ahorrar en un 7.3% del costo en comparación con el modelo de ruteo y administración de inventario vistos de forma separada (Qin et al., 2014).

Muchos de estos artículos se pueden encontrar resumidos en un único artículo por parte de Coelho et al. (2013), celebrando los 30 años del problema de inventario y ruteo de vehículos. En este artículo se realiza un comparativo entre diferentes artículos relacionados con el IRP donde identifican si tienen en cuenta o no criterios como horizonte del tiempo, estructura del problema, si incluye ruteo y/o políticas de inventario, decisiones de almacenamiento y finalmente composición y tamaño de flota, empezando desde el año 1983 con el artículo de distribución de gas a través de camiones con tanques de (Bell et al., 1983) hasta (Hewitt, Nemhauser, Savelsbergh, & Song, 2013) que propone un algoritmo de solución para una solución rápida del IRP con una metodología de ramificación y precio. En estos artículos presentando problemas de diferentes industrias complementando el estudio realizado por Andersson et al. (2010). En estos dos artículos se puede encontrar más información sobre las versiones básicas del IRP, las variaciones sobre estas versiones básicas, e inclusive desde un enfoque estocástico. (Andersson et al., 2010; Coelho et al., 2013; Hoff et al., 2010)

A partir de la revisión de la literatura realizada y con el soporte de Andersson et al. (2010), y Coelho et al. (2013), se identifica una falta de artículos con un enfoque de integración entre estas metodologías para la industria de cemento específicamente en el transporte terrestre a granel con las restricciones inherentes de este enfoque. Por esta razón se presenta la metodología combinada de administración de inventario y ruteo de vehículos para esta industria. Una de las motivaciones para pensar en una metodología integrada surge en las dependencias que existen entre ambos y las ventajas que se tienen al dejar de ver estos procesos como sistemas autónomos, además que esta metodología propuesta a continuación genera mayores beneficios en el orden táctico y estratégico de la cadena de suministros y más cuando se tienen constante contratos o alianzas con proveedores, tal como lo mencionó Vidović et al. (2013), donde los más altos costos están en la distribución y almacenamiento.

4. Modelo de optimización OPAC

Este modelo, optimización del proceso de abastecimiento de cemento (OPAC) es desarrollado con la base tradicional de un IRP, involucrando modelación de tiempo discreto mediante un horizonte de planificación de periodos $\{t_1, t_2, \dots, t_t\}$, donde existe la posibilidad de almacenamiento en cada uno de ellos. Por otro lado, también contempla la modelación de tiempo continuo, por el ruteo de vehículos, donde en cada uno de los periodos cuenta con un tiempo máximo en que se pueden realizar viajes de diferentes vehículos y para un mismo vehículo diferentes viajes, el cual, cada uno de los viajes puede contar con diferentes tiempos (tiempos de ciclo). En adición, se cuenta con horarios de atención, tanto en centros de distribución como en clientes, conociendo esta condición como ventanas horarias de atención, lo que crea una restricción adicional al problema de IRP y por ende aumenta su complejidad para encontrar una solución óptima.

Dicho lo anterior, se busca aplicar una metodología IRP al sector cemento específicamente para optimizar el proceso de distribución del mismo, teniendo en cuenta múltiples condiciones y particularidades de esta industria que se resumen a continuación: Se cuenta con un conjunto de nodos dónde existen múltiples plantas productoras de cemento $\{NPA_1, NPA_2, \dots, NPA_n\}$, centros de distribución $\{NCD_1, NCD_2, \dots, NCD_d\}$, y clientes $\{NCL_1, NCL_2, \dots, NCL_l\}$, todos estos pertenecientes al conjunto nodos.

Las plantas pueden producir uno o más productos $\{m_1, m_2, \dots, m_m\}$, cuyos productos pueden ser transportados a múltiples centros de distribución conocidos como Hub's o también distribuidos directamente a los clientes. Este transporte está dado por un conjunto de vehículos no homogéneos en capacidades $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, y un conjunto de tipos de tripulaciones $\{TP_1, TP_2, \dots, TP_r\}$ que pueden usar este recurso para hacer efectivo el transporte. Al manejar inventario en cada uno de los clientes y Hub's se debe planificar para dos o más periodos de tiempo $\{t_1, t_2, \dots, t_t\}$. No todos los productos pueden ser producidos en todas las plantas y cada cliente tiene ventanas horarias de recepción de producto. Adicionalmente, existen condiciones particulares de este sistema que no han sido tratadas en los problemas presentados anteriormente en la revisión de literatura. Esos esquemas son:

- Existe posibilidad de realizar múltiples viajes $\{c_1, c_2, \dots, c_c\}$ en un mismo periodo de tiempo t_1, t_2, \dots, t_t , dado que el tiempo de viaje es inferior al tiempo del periodo, esto permite que exista recirculación o recargas en centros de distribución o

plantas. Esto involucra que se puedan realizar 1 o más ciclos, teniendo claro que un ciclo se refiere a ida y regreso de un vehículo.

- Hay opción de asignar dos conductores a un único vehículo con el fin de maximizar la utilización del vehículo y reducir los costos fijos dentro del costo logístico de distribución, está la posibilidad de conductor relevo o doble tripulación dependerá de las ventanas horarias de los puntos orígenes y destinos, de la disponibilidad del conductor y vehículo, de los tiempos de viaje, etc. Por tal razón se quiere agregar al IRP la asignación adecuada de conductores a vehículos buscando encontrar dónde es más eficiente usar estos esquemas.

Para ejemplificar las condiciones particulares a abordar en este problema, se presentan los siguientes esquemas. El primer esquema es la recirculación. Este esquema se presenta a continuación en la siguiente Ilustración 4.1.

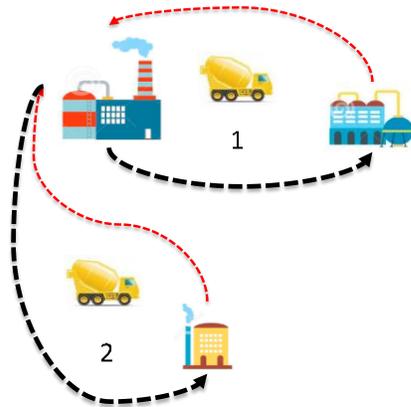


Ilustración 4.1 Esquema de Recirculación Fuente: Elaboración propia con imágenes de <https://www.dreamstime.com/>

El segundo esquema, es aquel en el que pueden existir dos conductores asociados a un único vehículo, En este caso un conductor puede hacer un trayecto (ida) y el otro conductor puede hacer otro trayecto (regreso). También puede estar ligado al esquema anterior dado que un conductor puede llegar hasta el punto de pernoctación y el otro conductor empezar desde allí su recorrido. Este esquema se presenta a continuación en la Ilustración 4.2.



Ilustración 4.2 Esquema de conductor relevo. Fuente: Elaboración propia con imágenes de <https://www.dreamstime.com/>

Dada la explicación del modelo, para desarrollarlo de forma que permita obtener un alcance a un problema real se presenta la siguiente propuesta de metodología de desarrollo. En principio el objetivo base radica en construir un modelo matemático que aborde el problema desde un nivel táctico, donde se obtengan, de forma óptima, las asignaciones de productos a clientes desde un Hub (CEDI) o planta con un vehículo en algún ciclo posible dentro de algunos de esos periodos de planificación, además de que permita asignar un tipo de manejo de conductores para el uso de los vehículos, con la posibilidad de utilizar un conductor relevo.

Con este modelo táctico desarrollado, se genera un modelo de carácter operativo que involucra las condiciones de ventanas horarias donde, de acuerdo con las asignaciones hechas por el modelo anterior, este modelo permitiría tener una programación de rutas dentro del periodo de planificación, incluyendo el modelamiento de tiempo continuo. En adición, este modelo contará con restricciones de carácter operativo que permitan acercar esta metodología a la realidad.

Con esta metodología se busca aplicar la formulación matemática a un problema real y poder comparar la eficiencia de este modelo con la realidad. La formulación matemática del modelo se presenta a continuación.

4.1 Formulación Matemática de OPAC

Para entender adecuadamente la formulación se deben tener claro los siguientes conceptos que se presenta en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Descripción de conceptos del modelo matemático Fuente: Elaboración propia con imágenes de <https://www.dreamstime.com/>.

Ilustración	Concepto	Descripción
	Planta	Origen donde se producen diferentes productos para enviar a clientes y centros de distribución.
	CEDI	Centro de distribución, es un nodo intermedio que no produce, pero si almacena, donde pueden salir y entrar productos.
	Cliente	Destino final del producto, nodo donde también se puede almacenar.
	Producto	Elemento que se pueden producir en plantas y demandan los diferentes clientes.
	Periodo	Unidad de tiempo donde se realiza la planificación de rutas y almacenamiento.
	Vehículo	Activo en el cual se realiza el transporte de productos entre plantas, CEDIS y clientes.
	Ciclos	Viaje que puede realizar un vehículo de un origen a destino con regreso dentro de un mismo periodo de tiempo.
	Tipo de Tripulación	Es la metodología de uso de conductores para satisfacer la demanda de cliente a través de los vehículos.

Una vez descritos estos conceptos, se debe proceder a definir los tipos de variables y restricciones que tiene este problema para entender con facilidad sus ecuaciones. Como el problema es considerado MIP, existen diferentes tipos de variables, tales como variables de asignación, las cuales son estrictamente binarias, que son utilizadas para decidir un sí o un no en alguna pregunta o condición; variables de cantidad, las cuales

pueden ser enteras o continuas, que representan entrada y salida de productos, como inventario y entrega de producto.

Del mismo modo, existen diferentes tipos de restricciones que involucran relaciones entre una o varias variables con uno o varios parámetros, entre los tipos de relaciones están las de capacidad de carga, almacenamiento, producción, etc., es decir, restricciones que limitan la utilización de un recurso. Otro tipo de restricción es la de permitir una única opción entre múltiples, dado que sólo una puede ser válida. También, están presentes las restricciones de balance, dónde hay entrada y salida de flujo, también conocidas como restricciones de flujo, finalmente muchas restricciones son relacionales, es decir que relacionan múltiples variables para que haya coherencia entre las decisiones del modelo matemático.

4.1.1 Modelo Táctico OPAC

A continuación, se definen los índices en la Tabla 4.2, conjuntos asociados a sus respectivos índices en la Tabla 4.3 y parámetros en la Tabla 4.4.

Tabla 4.2 índices del Modelo Táctico.

Índice	Descripción
i, j	Nodo
k	Vehículo
t	Periodo
m	Producto
c	Ciclo
r	Tipo de tripulación

Tabla 4.3 Conjuntos del Modelo Táctico.

Índice	Conjunto	Descripción	Fórmula	Tipo
i, j	<i>NOD</i>	Nodos		Básico
i, j	<i>NPA</i>	Nodos Planta de abastecimiento		Básico
i, j	<i>NCL</i>	Nodos Clientes		Básico
i, j	<i>NCD</i>	Nodos Centros de Distribución		Básico
i, j	<i>NPC</i>	Nodos Orígenes	$NPA+NCD$	Calculado
i, j	<i>NCC</i>	Nodos Destinos	$NCD+NCL$	Calculado
r, j	<i>NCR</i>	Nodos Destinos que pueden ser visitados desde j con r		Calculado
k	<i>VEH</i>	Vehículos		Básico
k	<i>VPC</i>	Nodos orígenes que pueden usar el vehículo k		Calculado
t	<i>PER</i>	Periodos		Básico
t	<i>PHO</i>	Periodos		Básico
t	<i>PPPA</i>	Periodos de planificación	$t \mid t > 0$	Calculado
m	<i>PRO</i>	Productos		Básico

c	CIC	Ciclos		Básico
i, j	CIN	Ciclos que se pueden hacer desde j a i		Calculado
r	TRP	Tipo de tripulación		Básico
m	NPP	Nodos orígenes que pueden producir el producto m		Calculado

Tabla 4.4 Parámetros del Modelo Táctico.

Parámetros		
Parámetro	Descripción	Unidad
$DEMA_{i,m,t}$	Demanda en el nodo cliente i del producto m en el periodo t	[Ton]
$INVS_{i,m}$	Inventario de seguridad en el nodo destino i del producto m	[Ton]
$INVI_{i,m}$	Inventario inicial en el nodo destino i del producto m	[Ton]
$CAPN_{i,m}$	Capacidad máxima de almacenamiento en el nodo i del producto m	[Ton]
$TIVI_{j,i,r}$	Tiempo de ciclo del origen j al destino i con el tipo de tripulación r	[h]
$CAPV_k$	Capacidad en peso del vehículo k	Ton
$PEPA$	Periodos de planificación	[días]
$TJOR$	Tiempo de Jornada (unidad tiempo del periodo)	[h]
$CCIC_{j,i,r}$	Costo de ciclo de ir de origen j a destino i con el tipo de tripulación r	[\$]
$CVEH_k$	Costo de usar un vehículo k	[\$]
$CINV_i$	Costo de inventario del nodo i	[\$]
$MAXV_k$	Parámetro alto para restricción de asignación vehículo k en el periodo	
$MAXM_{i,j,k,t}$	Parámetro alto para restricción de asignación vehículo de i a j en t	

Con los índices, conjuntos y parámetros definidos previamente se presentan a continuación la definición de las variables y restricciones del modelo:

Variables:

Variables de asignación:

- $AVC_{j,i,m,k,c,r,t}$ (Asignación Vehículo Ciclo)

$$\begin{cases} 1, & \text{Si se asigna el producto } m \text{ con el vehículo } k \text{ del nodo origen } j \in VPC_k \cap NPP_m \text{ al nodo} \\ & \text{destino } i \in NCR_{r,j} \text{ en el ciclo } c \in CIN_{j,i}, \text{ con el tipo de tripulación } r \text{ en el periodo } t. \\ 0, & \text{Otro caso} \end{cases}$$
- AVP_k (Asignación Vehículo Planificación)

$$\begin{cases} 1, & \text{Si se asigna el vehículo } k \text{ en el periodo de planificación.} \\ 0, & \text{Otro caso} \end{cases}$$

Variables de cantidad:

- $CPE_{j,i,m,k,c,r,t} \in \mathbb{R}^+$ (Cantidad de Producto Entregada)

Cantidad de producto m entregado con el vehículo k del nodo origen $j \in VPC_k \cap NPP_m$ al nodo destino $i \in NCR_{r,j}$ en el ciclo $c \in CIN_{j,i}$ con el tipo de tripulación r en el periodo t

- $INV_{i,m,t} \in \mathbb{R}^+$ (Inventario)

Cantidad de producto m almacenado en el nodo destino $i \in NCC$ al final del periodo t

Restricciones:**Restricciones de relación de variables:**

- $RUVE_k$ (Restricción de Uso de Vehículo)

La cantidad de producto entregada no puede superar la capacidad del vehículo si se usa.

$$\sum_{j \in VPC_k} \sum_{i \in NCR_{r,j}} \sum_{m \in PRO} \sum_{c \in CIC} \sum_{r \in TRP} \sum_{t \in PPLA} AVC_{j,i,m,k,c,t} \leq MAXV_k \times AVP_k, \quad \forall_k \quad (4.1)$$

- $RVCC_{j,i,m,k,c,t}$ (Restricción de Vehículo con Cantidad de Cemento)

Si se asigna una cantidad de producto m entregada del nodo origen j al nodo destino i con la asignación de vehículo k al ciclo c en el periodo t entonces se debe llevar producto.

$$CPE_{j,i,m,k,c,r,t} \leq CAPV_k \times AVC_{j,i,m,k,c,r,t}, \quad \forall_{j \in VPC_k, i \in NCR_{r,j}, m, k, c, r, t} \quad (4.2)$$

- $RCIC_{k,c,t}$ (Restricción de Ciclos)

Sólo se puede ir a un nodo destino i con único producto m por vehículo k en un único ciclo c .

$$\sum_{j \in VPC_k} \sum_{i \in NCC} \sum_{m \in PRO} \sum_{r \in TRP} AVC_{j,i,m,k,c,r,t} \leq 1, \quad \forall_{k,c,t} \quad (4.3)$$

Restricciones de capacidad:

- $BALI_{i,m,t}$ (Balance de Inventarios)

El inventario final del cliente debe ser igual al inventario anterior más las entregas menos la demanda de producto de cada periodo.

$$INV_{i,m,t} = INV_{i,m,t-1} + \sum_{j \in NPP_m} \sum_{k \in VEH} \sum_{c \in CIC} \sum_{r \in TRP} CPE_{j,i,m,k,c,r,t} - DEMA_{i,m,t}, \quad (4.4)$$

$$\forall_{i \in NCL, m, t}$$

- $BACD_{i,m,t}$ (Balance en CEDIS)

El inventario final del Hub debe ser igual al inventario anterior más las entregas menos los envíos a los clientes en cada periodo.

$$\begin{aligned}
 INV_{i,m,t} = & INV_{i,m,t-1} + \sum_{j \in NPP_m} \sum_{k \in VEH} \sum_{c \in CIC} \sum_{r \in TRP} CPE_{j,i,m,k,c,r,t} \\
 & - \sum_{j \in NCL} \sum_{k \in VEH} \sum_{c \in CIC} \sum_{r \in TRP} CPE_{j,i,m,k,c,r,t}, \quad \forall i \in NCD_{m,t}
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

- $CNOD_{i,m,t}$ (Capacidad en Nodos)

Capacidad de almacenamiento de los nodos destinos.

$$INV_{i,m,t} \leq CAPN_{i,m}, \quad \forall i \in NCC_{m,t} \tag{4.6}$$

- $RINV_{i,m,t}$ (Restricción en Inventario)

Inventario debe ser mayor al inventario de seguridad.

$$INV_{i,m,t} \geq INVS_{i,m}, \quad \forall i \in NCC_{m,t} \tag{4.7}$$

Restricciones de tiempo:

- $CAPT_{k,t}$ (Capacidad de Tiempo)

Se pueden hacer tantas entregas como el tiempo de periodo lo permita.

$$\sum_{j \in j \in VPC_k \cap NPP_m} \sum_{i \in NCR_{r,j}} \sum_{m \in PRO} \sum_{c \in CIN_{j,i}} \sum_{r \in TRP} TIV_{j,i,r} \times AVC_{j,i,m,k,c,r,t} \leq TJOR, \quad \forall k,t \tag{4.8}$$

Función Objetivo:

- MCT (Minimizar los Costos Tácticos)

$$\begin{aligned}
 & \sum_{j \in NPC} \sum_{i \in NCR_{r,j}} \sum_{m \in PRO} \sum_{k \in VEH} \sum_{c \in CIC} \sum_{r \in TRP} \sum_{t \in PPLA} CCIC_{j,i,r} \times AVC_{j,i,m,k,c,r,t} \\
 & + \sum_{k \in VEH} CVEH_k \times AVP_k + \sum_{i \in NCC} \sum_{m \in PRO} \sum_{t \in PPLA} CINV_i \times INV_{i,m,t}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Observaciones:

Al definir las variables dentro de un conjunto previamente calculado reduce el dominio de posibilidades en la variable, generando menos cantidad de combinaciones entre las interacciones de cada uno de los elementos de los diferentes conjuntos. En consecuencia, la ecuación (4.1) representa la utilización de un vehículo en el horizonte de planificación, lo que permite obtener un dimensionamiento de flota mediante esta restricción en combinación con la función objetivo. Las ecuaciones (4.2) y (4.3) permiten transportar la cantidad de producto con un único ciclo respectivo, siendo el máximo transportado la capacidad del vehículo; las ecuaciones (4.4) y (4.5) representan los balances de inventario para los clientes y los centros de distribución (Hub's) respectivamente. Las ecuaciones (4.6) y (4.7) representan los valores máximos y mínimos que puede tomar el inventario en cada uno de los clientes y centros de distribución. La ecuación (4.8) representa el modelamiento del tiempo continuo, donde restringe la cantidad de ciclos y su tiempo de ciclo de acuerdo con el tiempo de jornada laboral o del periodo. Finalmente, la ecuación (4.9) representa la minimización de todos los costos de la cadena de abastecimiento, donde incluye el costo de los ciclos, el costo de usar los vehículos dentro del periodo de planificación y los costos de inventario. La implementación del modelo táctico en el software algebraico AIMMS se presentan en el Anexo 1: Implementación Modelo Táctico en AIMMS.

4.1.2 Modelo Operativo OPAC

Posterior al planteamiento del modelo táctico, con la solución de este modelo se propone un modelo operativo que involucre la modelación de ventanas horarias, es decir, este modelo operativo permitirá definir los tiempos de salida de cada uno de los vehículos asignados para cumplir con las condiciones de tiempo de llegada dentro de las ventanas de atención de cada uno de los clientes.

La metodología de modelación operativa radica que el insumo principal proviene de la modelación táctica, donde previamente hubo una asignación de visita del nodo origen j al nodo destino i con el vehículo k en el ciclo c con la tripulación r llevando el producto m en el periodo t . Con un algoritmo se construyen algunos de los siguientes parámetros. Sin embargo, existe un requerimiento importante que se debe presentar a continuación.

- Debido a que la solución del modelo táctico no tiene en cuenta las ventanas horarias, explicado previamente por la complejidad del problema, este modelo buscará minimizar una penalidad de no cumplir las ventanas horarias de cada cliente con el fin de encontrar una solución factible al problema operativo.

Adicional a la definición de índices y conjuntos del modelo táctico definido en la sección Modelo Táctico OPAC se definen los siguientes índices en la Tabla 4.5, los conjuntos adicionales en la

Tabla 4.6 y los parámetros adicionales en la Tabla 4.7 para el planteamiento del modelo MIP operativo.

Tabla 4.5 índices del modelo operativo.

Índice	Descripción
$c, c1$	Ciclo

Tabla 4.6 Conjuntos del modelo operativo.

Índice	Conjunto	Descripción	Fórmula	Tipo
i, k, c, t	NVK	Nodos clientes asignados en el modelo táctico		Calculado
$c1$	PRE	Nodos predecesores de c	$c1 < c$	Calculado

Tabla 4.7 Parámetros del modelo operativo.

Parámetros		
Parámetro	Descripción	Unidad
$TMIN_{i,t}$	Tiempo de inicio de ventana horaria del cliente i en el periodo t	[h]
$TMAX_{i,t}$	Tiempo de fin de ventana horaria del cliente i en el periodo t	[h]
$TVIAJ_{i,k,c,t}$	Tiempo de viaje de clientes i en el periodo t con el vehículo k en ciclo c	[h]
$PORC$	Porcentaje del tiempo de viaje para el trayecto de ida	[%]
$MAXT$	Parámetro alto para restricción de precedencia de ciclos	

Variables:

Variables de asignación:

- $SEC_{k,c,c1,t}$ (Secuencia de Ciclos)
- $\begin{cases} 1, & \text{Si se asinga el ciclo } c1 \text{ previamente al ciclo } c \text{ con el vehículo } k \text{ en el periodo } t. \\ 0, & \text{Otro caso} \end{cases}$

Variables de cantidad:

- $TSL_{i,k,c,t} \in \mathbb{R}^+$ (Tiempo de Salida)
- Tiempo de salida del origen o ciclo anterior con el vehículo k en el ciclo c en el periodo t donde $i \in NVK_{k,c,t}$, sólo los clientes que fueron asignados en el modelo táctico.
- $PEN_{i,k,c,t} \in \mathbb{R}^+$ (Penalización)

Valor de penalización en el cliente i con el vehículo k en el ciclo c en el periodo t donde $i \in NVK_{k,c,t}$, sólo los clientes que fueron asignados en el modelo táctico.

Restricciones:

Restricciones límites de tiempo:

- $RMIN_{i,k,c,t}$ (Restricción Mínimo)

Restricción de límite de tiempo inferior de llegada al cliente i con el vehículo k en el ciclo c en el periodo t .

$$TSL_{i,k,c,t} + PORC \times TVIAJ_{i,k,c,t} \geq TMIN_{i,t}, \quad \forall i \in NVK_{k,c,t,k,c,t} \quad (4.10)$$

- $RMAX_{i,k,c,t}$ (Restricción Máximo)

Restricción de límite de tiempo superior de llegada al cliente i con el vehículo k en el ciclo c en el periodo t .

$$TSL_{i,k,c,t} + PORC \times TVIAJ_{i,k,c,t} - PEN_{i,k,c,t} \leq TMAX_{i,t}, \quad \forall i \in NVK_{k,c,t,k,c,t} \quad (4.11)$$

Restricciones de secuencialidad:

- $SCIC1_{k,c,c1,t}$ (Secuenciación de Ciclos 1)

Restricción 1 para cumplir con secuencialidad de ciclos.

$$\sum_{i \in NCC} TSL_{i,k,c,t} + \sum_{i \in NCC} TVIAJ_{i,k,c,t} \leq \sum_{i \in NCC} TSL_{i,k,c1,t} + MAXT \times (1 - SEC_{k,c,c1,t}) \quad (4.12)$$

$$\forall_{k,c \text{ in } PRE_{c1,c1,t}}$$

- $SCIC2_{k,c,c1,t}$ (Secuenciación de Ciclos 2)

Restricción 2 para cumplir con secuencialidad de ciclos.

$$\sum_{i \in NCC} TSL_{i,k,c1,t} + \sum_{i \in NCC} TVIAJ_{i,k,c1,t} \leq \sum_{i \in NCC} TSL_{i,k,c,t} + MAXT \times SEC_{k,c,c1,t} \quad (4.13)$$

$$\forall_{k,c \text{ in } PRE_{c1,c1,t}}$$

Función Objetivo:

- MTO (Minimización de Tiempos Operativos)

$$\sum_{i \in NCC} \sum_{k \in VEH} \sum_{c \in CIC} \sum_{t \in PPLA} PEN_{i,k,c,t} \quad (4.14)$$

De la Tabla 4.5 se presenta el nuevo índice $c1$, el cual hace parte del mismo conjunto de ciclos, ese se usa con el fin de identificar un par de elementos de ciclos. Asimismo, en la Tabla 4.6 se crea el conjunto indexado a partir de estos dos índices, donde se define que para cada elemento tenga relación únicamente con un conjunto de predecesores.

En cuanto al modelo, las ecuaciones (4.10) y (4.11) presentan las restricciones de visita horaria de los clientes. Las ecuaciones (4.12) y (4.13) representan que exista una precedencia, es decir sólo se puede ejecutar un ciclo en cada momento y sólo empezará otro ciclo a partir de la finalización del anterior. Lo anterior crea un conjunto de ecuaciones de precedencia entre un par de ciclos $C1 \leq C2, C2 \leq C3, C5 \leq C4$ y así sucesivamente, la decisión dependerá evidentemente de buscar el mínimo valor de la función objetivo. Esto garantiza que en un mismo instante no empezarán dos ciclos.

Finalmente, la función objetivo descrito en la ecuación (4.14) busca minimizar la penalidad de no cumplir con la ventana horaria de cada cliente, medido en cantidad de horas de incumplimiento. La implementación del modelo operativo en el software algebraico AIMMS se presentan en el Anexo 2: Implementación Modelo Operativo en AIMMS

4.2 Caso de Estudio

Para el caso de estudio, se toma un problema en el sector real de una transportadora de cemento, donde se proveen los datos suficientes para estimar un modelo a mediana y gran escala. Sin embargo, es necesario presentar algunas definiciones y supuestos para concertar los datos reales a los parámetros del modelo.

4.2.1 Planteamiento del Caso

La aplicación del caso de estudio se realiza a través de la ejecución del enfoque 1 modelo táctico y el enfoque 2 modelo operativo. Estos modelos cuentan con las siguientes instancias. En donde se varió en número de productos, periodos, clientes, plantas, centros de distribuciones y demandas. Estas instancias se presentan a continuación en la Tabla 4.8

Tabla 4.8 Instancias de Prueba

Instancia	Nodos			Productos	Vehículos	Ciclos	Periodos	Tipo Tripulación
	Plantas	CEDIS	Clientes					

1	2	1	5	2	10	5	3	2
2	2	1	5	2	50	5	7	2
3	2	2	36	3	137	11	7	2
4	2	4	41	3	150	11	7	2
5	5	8	80	3	261	11	7	2
6	2	1	5	2	10	5	3	2
7	2	1	5	2	50	5	7	2
8	2	2	36	3	137	11	7	2
9	2	4	41	3	150	11	7	2
10	5	8	80	3	227	11	7	2

Las instancias de uno a cinco presentan un escenario con baja demanda, mientras que las instancias de seis a diez presentan un escenario con demanda estable y más cercana a la realidad. En general, el objetivo es ejecutar la instancia diez, ya que esta es la que más se aproxima a la realidad del problema a tratar, para ello se presentan las siguientes condiciones:

Estimación de Conjuntos

- Se toma una muestra con una historia de seis meses desde agosto de 2017 hasta enero de 2018.
- Se identifican los clientes más importantes a partir de seis meses de historia de despachos de cemento, en la instancia diez estos son 80 clientes, los cuales representan el 95% de la cantidad de despachos totales.
- La cantidad total de plantas es cinco, el total de centros de distribución es ocho, los cuales representan los más utilizados de la operación en los últimos seis meses.
- Existen múltiples productos de cemento, inclusive el cemento producido por una planta es en muchos casos considerado como un producto diferente. Sin embargo, se presentan los productos con mayor demanda y que abarcan más del 98% de la cantidad transportada.
- La cantidad de vehículos, a pesar de que es una decisión que se debe tomar, existe una capacidad instalada en la realidad y por tanto se varía las capacidades de diferentes formas que depende de cada instancia, dando una holgura para encontrar rápidamente solución factible.
- La cantidad de periodos se realiza con un límite de siete días, es decir en la instancia diez de modelación es posible realizar una planeación semanal.

- En la realidad del problema existen dos tipos de tripulación, cuando un vehículo está asociado a un único conductor y cuando un vehículo está asociado a dos conductores, esto es llamado transporte sencillo (SN) cuando sucede el primer caso o transporte con doble tripulación o conductor relevo (DT) cuando sucede el segundo caso.
- El número de ciclos que puede existir entre un origen j y un destino i depende directamente del tiempo de ciclo³ y del tiempo máximo de jornada del periodo, dado que este modelo permite modelar tiempo discreto y continuo, los periodos pueden ser también semanas o meses y por tanto el tiempo máximo del periodo puede ser 24 horas si los periodos son días o pueden ser 168 horas si los periodos son semanas, etc. Por esta razón algunas conexiones entre el origen j y el destino i se pueden hacer tantos ciclos como su tiempo de ciclo lo permita dentro del tiempo de jornada del periodo, de acuerdo con el cálculo de la formula (4.15). donde SN Significa tripulación sencilla (1 conductor por vehículo) y DT Significa tripulación doble o conductor relevo (2 conductores por vehículo).

$$\# \text{ de Ciclos Ruta} = \left\lfloor \frac{TJOR}{\text{MIN}(\text{Tiempo Ciclo SN}, \text{Tiempo Ciclo DT})} \right\rfloor \quad (4.15)$$

Estimación de Parámetros.

En la realidad obtener la gran cantidad de datos necesarios para el modelo, y que estos datos cuenten con una confiabilidad ha sido un problema durante mucho tiempo, sin embargo, gracias a la empresa transportadora que compartió la información, se obtuvo una gran cantidad de datos con una alta confiabilidad para lograr estimar los parámetros necesarios para la ejecución del modelo de optimización tanto enfoque 1 como enfoque 2.

- El parámetro $DEMA_{i,m,t}$ fue estimado con un histórico de demandas (despachos) de los últimos 6 meses (agosto 2017 a enero 2018) donde se observaba la cantidad de producto enviado por cada día a cada cliente, con esto se estima un escenario promedio donde se calcula para una semana de lunes a domingo las demandas, observando también el patrón estacional en algunos clientes.

³ También llamado tiempo de viaje, este depende de la distancia en kilómetros entre el origen y destino y de la altimetría que puede existir entre estos puntos, dado que de acuerdo a la altimetría se tendrá una velocidad de viaje, que al final realizando la división se obtiene el tiempo de ciclo.

- El parámetro $CAPN_{i,m}$ se estima de acuerdo con las capacidades promedio de cada zona donde están los clientes, obtenida desde la empresa que otorga la información.
- El parámetro $TIVI_{j,i,r}$ se estima de acuerdo con un modelo de cotización de rutas de la empresa, que permite obtener de acuerdo con la altimetría y velocidades promedio debido a la altimetría una duración que dependa de la distancia en kilómetros y por cada tipo de tripulación.
- La capacidad del vehículo $CAPV_k$ está determinada por el modelo técnico de la construcción de la tolva.
- Los costos de ciclo $CCIC_{j,i,r}$ están definidos de acuerdo con el modelo de cotización de rutas, donde sólo tienen en cuenta todos los costos asociados a las trayectorias de recorrido, es decir costos variables, dentro de estos se encuentran por ejemplo los costos de combustibles, de hospedaje, viáticos y salario de conductor(es).
- Los costos del vehículo $CVEH_k$ involucran todos los costos fijos asociados al vehículo, estos costos son canon de arrendamiento tanto para el tractocamión como el tráiler tipo tolva, además de los costos de administración de la flota que está prorrateados para cada vehículo.
- Los costos de inventario $CINV_i$ son estimados de acuerdo con el tipo de almacenamiento que generalmente es en silos y tolvas, y al promedio de inventario que se tiene un cierto periodo para cada cliente, donde se tienen en cuenta los costos de canon de arrendamiento sea de tipo silo o tolva, sumando con los costos de arriendo del lugar, los costos de seguridad y administración.

Se debe tener en cuenta que muchos de los costos están definidos de carácter mensual por eso se deben estimar para el periodo de planificación del modelo que se define de manera semanal y adicionalmente para el costo de inventario este se debe obtener por unidad de medida la cual es tonelada.

Los demás parámetros son necesarios ya sea para la creación de conjuntos o para la validación en las restricciones, dentro de la metodología desarrollada se ejecuta una reducción de dominio importante y significativa. Dado que solo por la cantidad de combinaciones que existen entre los diferentes conjuntos no sería viable encontrar una solución en un tiempo computacional razonable, es por eso que se identifican un número de ciclos variables para cada par de nodos (orígenes y destinos) y una posibilidad de conexiones entre un par de orígenes y destinos dependiendo del tipo de tripulación, porque en la realidad existen nodos orígenes que deben visitar nodos destinos pero por

los tiempos de ciclos y condiciones operativas no es posible realizar con dos conductores o doble tripulación.

Condiciones no Consideradas

Dado que la complejidad en la red de abastecimiento de cemento es alta y es un problema a gran escala algunas condiciones no fueron tomadas en cuenta, a pesar de que estas pueden ser tenidas en cuenta dentro de la metodología de programación matemática propuesta, no se tomaron por no ser de carácter significativo en la realidad de este problema específico.

- Existen combinaciones de orígenes y destinos en donde el tiempo de ciclo es mayor al tiempo máximo de jornada del periodo, y para este problema los periodos son considerados de días, es decir 24 horas, por tanto, se descartan los destinos y conexiones con tiempos de ciclos mayores a este parámetro, esto se podría resolver con una modificación en el tiempo máximo de periodo, pero esto involucraría los cambios en los demás parámetros que dependan del periodo, como la demanda.
- Se excluyen clientes y conexiones que no tengan una demanda estable en los últimos seis meses o que tengan una demanda esporádica con algún tipo de producto.
- En la realidad, un pequeño porcentaje suceden viajes sin ser un ciclo, es decir sólo un trayecto ya sea cargado con producto o en vacío. Estas condiciones se pueden dar en la realidad esporádicamente principalmente por contingencias, por esta razón no son tenidas en cuenta en este modelo.
- Los tiempos de viaje son calculados con el modelo de cotización de rutas de la empresa, el cual usa un aplicativo de georreferenciación mediante coordenadas de cada uno de los orígenes y destinos, a pesar de que en la realidad el tiempo de ruta es de carácter estocástico, se asume los tiempos de forma determinística bajo este modelo de cotización.
- Como se mencionó anteriormente existen diversos tipos de productos que casi se pueden diferenciar dependiendo del lugar de producción, en este caso sólo se modelan los tres tipos de productos más demandados y se descartan aquellos que son mínimamente demandados para proyectos especiales.
- La cantidad de ciclos se define como un número entero de acuerdo con la ecuación (4.15) esto puede afectar la rotación normalmente que se realiza en un mes, dado que al ser un número entero en un día se limitan los decimales que pueden generar más ciclos dentro de un periodo de un mes, además de que este

tiempo disponible de un periodo después de realizar un ciclo no se acumula al periodo siguiente.

- Finalmente, los clientes considerados en la modelación se pueden categorizar en dos grandes segmentos, clientes concreteros y clientes normales, en donde generalmente se diferencian por su capacidad de almacenamiento y por sus ventanas atención, en este caso la restricción de ventanas horarias aplica para los clientes normales ya que los clientes concreteros laboran 24 horas al día.

En la Ilustración 4.3 se presenta el esquema general del problema de distribución de cemento a granel en Colombia donde se pueden ver gráficamente todos los tipos de nodos, plantas, clientes y centros de distribución además de las conexiones que existen, desde las plantas con centros de distribución, plantas con clientes y centros de distribución con clientes.

La Ilustración 4.3 permite ver el tamaño y la complejidad del problema dado que abarcan las principales zonas y ciudades de Colombia, en especial se logra ver en la Ilustración 4.4 toda la zona centro del país, la cual tiene las plantas con mayor capacidad y mayor cantidad de conexiones con diferentes clientes y centros de distribución, esto es debido al método de producción de cemento y los materiales necesarios, de estos gráficos se observa que las plantas productivas quedan en las afueras de las zonas urbanas.

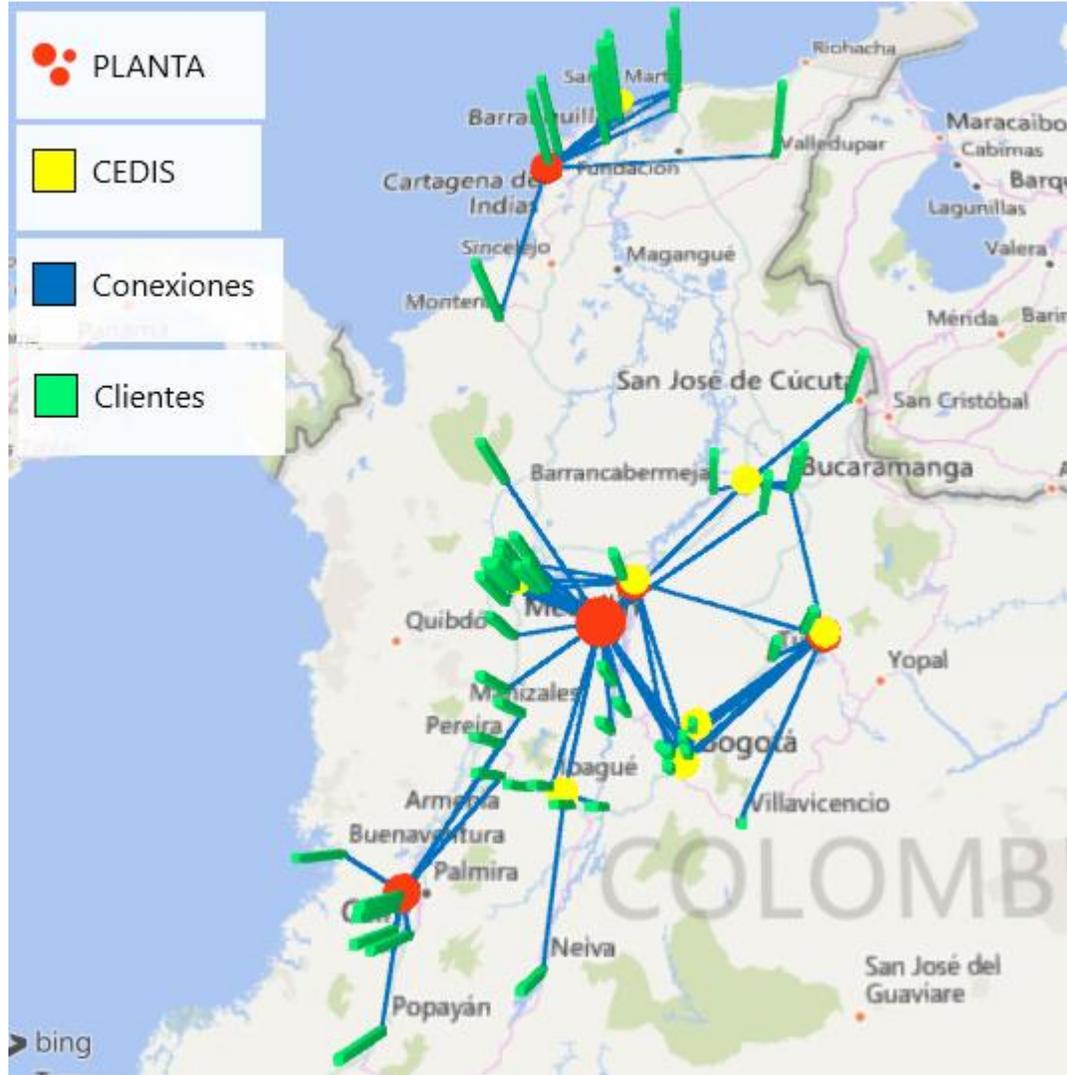


Ilustración 4.3 Esquema de red de abastecimiento de cemento a nivel nacional de acuerdo con el tamaño del problema del caso de estudio. (Fuente: Elaboración Propia)

4.2.2 Solución del Caso

De acuerdo con la tecnología de solución presentada anteriormente en el subcapítulo Métodos de Solución, se estima tanto el modelo táctico y operativo, ambos dentro del ámbito de programación lineal entera mixta (MIP) con el *solver* de CPLEX 12.7 ejecutado en la versión 4.4 de AIMMS.

Para la resolución de las instancias se utiliza una máquina tradicional con procesador Intel® Core™ i5-5200U CPU @2.20GHz (4 procesadores lógicos) con una memoria RAM de 8 GB y un sistema operativo Windows de 64 bits.

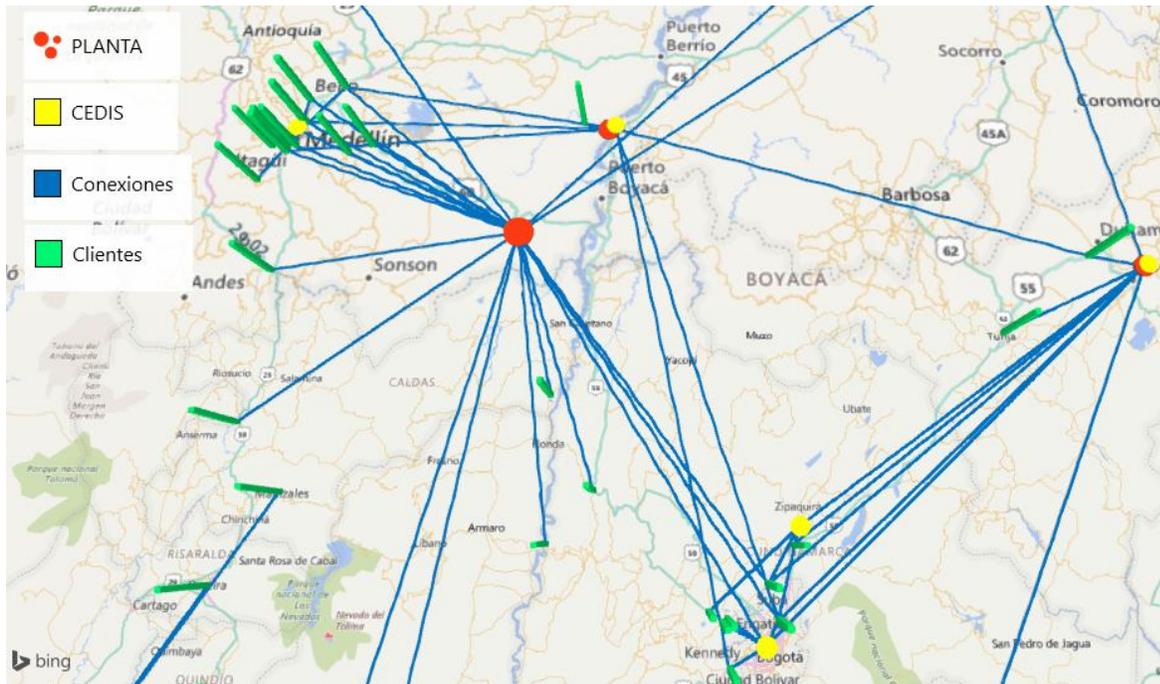


Ilustración 4.4 Red de abastecimiento de cemento sector centro de Colombia. (Fuente: Elaboración Propia)

En principio se presentan los resultados del modelo táctico y posteriormente los del modelo operativo, Los resultados de las instancias con el modelo táctico se presentan a continuación en la Tabla 4.9 solucionadas con la máquina propuesta.

Tabla 4.9 Resultados de Instancias de Prueba Modelo Táctico.

Instancia	Cantidad Variables	Cantidad Variables Enteras	Cantidad Restricciones	Tiempo Computación [Segundos]	Mejor GAP Obtenido
1	1,367	670	851	3	0.00%
2	23,277	11,600	13,113	9,690	0.85%
3	138,780	69,050	75,521	19,860	3.56%
4	138,016	68,610	76,087	26,901	4.36%
5	239,908	119,143	131,555	14,884	23.01%
6	1,367	670	851	2.50	0.00%
7	23,277	11,600	13,113	6,478	0.21%
8	138,780	69,050	75,521	27,395	1.49%
9	138,016	68,610	76,087	30,207	1.79%
10	278,526	138,469	152,337	46,663	9.38%

De acuerdo con la Tabla 4.9 es evidente que a medida que el tamaño del problema crece, la cantidad de variables, restricciones y el tiempo computacional crece de manera

exponencial, debido a que este problema pertenece a la familia $NP - Hard$ cómo se mencionó anteriormente. No obstante, en cada una de las instancias probadas el modelo logra encontrar solución factible al problema, en unas con mayor tiempo de computación. Adicionalmente se muestra la columna con mejor GAP obtenido, es decir, la brecha entre la solución encontrada con la mejor solución obtenida en un problema relajado. Esta muestra que es necesario mayor cantidad de tiempo computacional o una máquina más robusta para obtener una solución óptima. En la Ilustración 4.5 se observa gráficamente el resultado del GAP obtenido vs los tiempos de computación para cada una de las instancias y para los dos bloques existentes donde **B** representa baja demanda y **A** representa alta demanda. En las pruebas realizadas se observa que para las instancias del bloque **B** no mejoraba el GAP significativamente en un tiempo alto de computación, extrañamente a pesar de ser de una menor demanda de los diferentes productos resultaba con mayores problemas en su optimización, esto tal vez a que el dimensionamiento de los conjuntos eran los mismos que para el problema de alta demanda (más cercano a la realidad). En el caso de alta demanda se observa que a pesar de que el tiempo de computación crece el gap crece, aunque en una proporción menor, logrando obtener resultados aceptables dentro de la realidad.

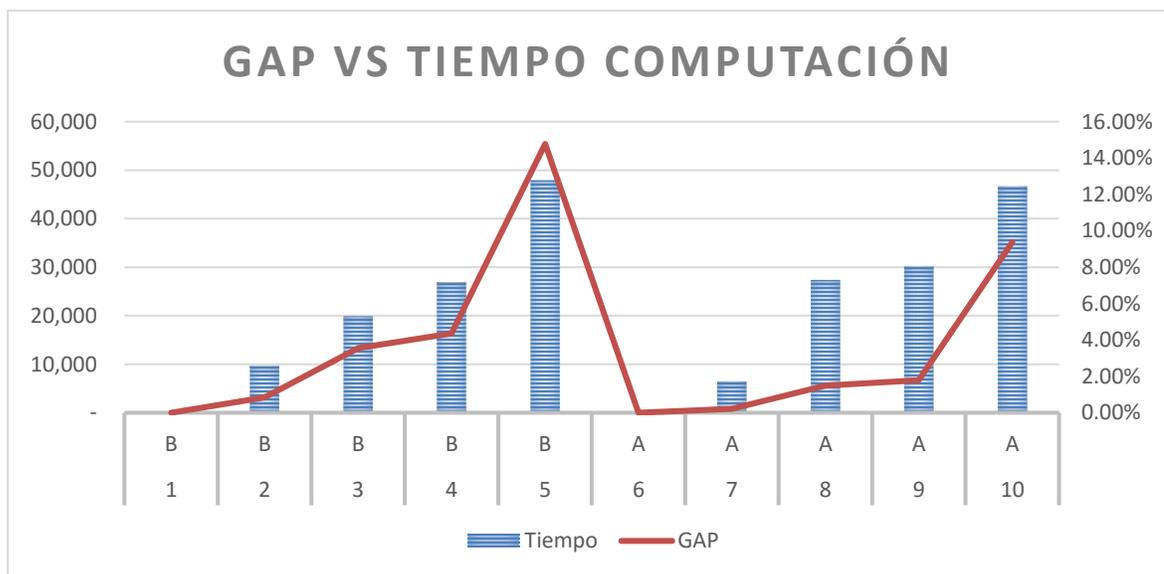


Ilustración 4.5 GAP vs tiempo de computación. (Fuente: Elaboración Propia)

Con los resultados de la instancia 10 la cual es comparable en un alto porcentaje con la realidad, se evidencia que este modelo en número de vehículos necesarios para suplir la demanda semanal es coherente teniendo tan sólo una desviación alrededor del 12% por encima de la capacidad instalada actual de flota, estos resultados se dan principalmente porque existen supuestos en este modelo mencionados anteriormente, donde la principal condición que genera este porcentaje es debido a que un vehículo puede hacer un número no entero de ciclos en un día, es decir, por ejemplo un vehículo con un origen y

destino definido puede hacer 1.5 ciclos en un día en la realidad, así que en dos días podría hacer 3 ciclos. Sin embargo, en el modelo planteado con periodos diarios se define que puede hacer a lo sumo un ciclo, dado que hacer dos ciclos en un día supera la jornada del día, por tanto, en 2 días haría 2 ciclos, un 33% menos que en la realidad, esto se podría llegar a modelar aumentando los tiempos de jornada y posiblemente trabajar con periodos de dos días o semanas, además de que en la instancia 10 se obtiene un GAP del 9% aproximadamente con respecto a la solución óptima.

Con el resultado del modelo táctico, se presentan en la Tabla 4.10 los resultados del modelo operativo.

Tabla 4.10 Resultados de Instancias de Prueba Modelo Operativo.

Instancia	Cantidad Variables	Cantidad Variables Enteras	Cantidad Restricciones	Tiempo Computación [Segundos]	Mejor GAP Obtenido
1	357	300	657	5	0.00%
2	3,903	3,500	7,403	35	0.00%
3	53,508	52,745	106,253	63	0.00%
4	58,649	57,750	116,399	94	0.00%
5	89,172	87,395	176,567	450	0.00%
6	357	300	657	3	0.00%
7	3,903	3,500	7,403	30	0.00%
8	54,184	52,745	106,929	54	0.00%
9	59,405	57,750	117,155	106	0.00%
10	103,634	100,485	204,119	546	0.00%

De los resultados de la Tabla 4.10, se observa que la cantidad de variables y restricciones de este modelo es menor que la presentada en la Tabla 4.9 del modelo táctico, aunque estas cantidades siguen siendo bastante grandes. A pesar de esto el tiempo de computación para obtener la solución óptima es bastante menor en comparación con el modelo táctico, y esto se debe principalmente a lo siguiente:

1. La solución encontrada por el modelo táctico en su mayoría cumple con las restricciones de ventanas horarias.
2. El promedio de ciclos realizados en un periodo es muy cercano a uno, así que en ese caso no existe la necesidad de realizar un ordenamiento entre ciclos.
3. Sólo el 38% de los clientes tienen restricción de ventanas horarias, los cuales tienen un horario de atención entre las 7:00 y las 20:00.

4. Donde más sucede la cantidad de ciclos es entre las plantas y los centros de distribución, sin embargo, estos no tienen restricción de ventanas horarias y por tanto la solución obtenida por el modelo táctico es óptima en el modelo operativo.

En los resultados del escenario 10, sólo se obtuvo una penalidad de 17.04 horas en los 1577 ciclos realizados dentro del horizonte de planificación. Lo que demuestra que la solución del modelo táctico resulta ser adecuada inclusive cuando existen restricciones de ventanas horarias.

Para observar gráficamente la solución de estas instancias, en la Ilustración 4.6 se presenta el resultado de decisión óptima del modelo táctico para la instancia 2, allí se observa la relación de demanda con las decisiones entre despachos y almacenamiento de un producto para un cliente particular, siendo la demanda (azul) el inventario (rojo) y la cantidad de producto entregada (Amarillo). Allí se observa las gráficas de forma separada y de forma conjunta, estas gráficas demuestran que las condiciones de balance se cumplen y que en el periodo 5 y 6 es mejor tener un almacenamiento de producto con menos cantidad de entregas para esos mismos periodos.

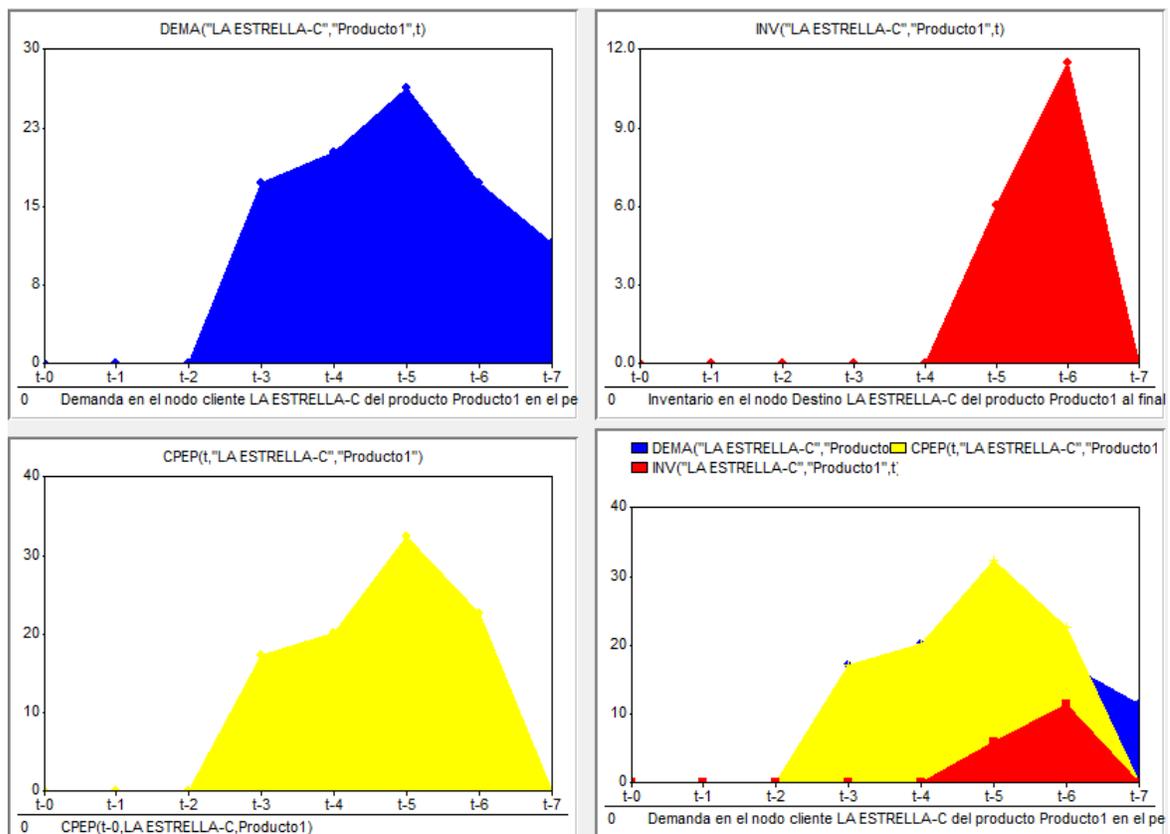


Ilustración 4.6 Resultado para un cliente específico de instancia 2.

Así que, este modelo táctico en la instancia 2 permite obtener la planificación para horizonte de tiempo de una semana, la cantidad de vehículos necesarios, y las asignaciones de visitas a cada cliente.

Con el resultado de este modelo táctico, se procede a ejecutar el modelo operativo, con el cual se buscará, de acuerdo con la asignación encontrada, minimizar la penalidad en horas de incumplir con las ventanas horarias de los clientes normales. En la Ilustración 4.7 se presenta el diagrama de Gantt de Vehículo vs Ciclo para todos los clientes de la instancia 2. Se observa de esta ilustración que solamente se realizó un ciclo para cada uno de los vehículos usados en la instancia a excepción del vehículo TC43 que realizó más de un ciclo, esto debido a que los demás vehículos tienen un tiempo de ciclo tan grande que sólo permite hacer un ciclo por día; Mientras que el vehículo TC43 realizó 3 ciclos porque su tiempo de ciclo es pequeño y lo permitía. En este punto es donde interviene el modelo operativo definiendo en qué orden debe realizar el vehículo cada uno de sus ciclos con fin de que, en el primer trayecto del ciclo pueda llegar dentro de las ventanas horarias del cliente, dado que pueden existir clientes con diferentes ventanas horarias y un mismo vehículo puede visitar distintos clientes.

El rango de las ventanas horarias se puede observar en la Ilustración 4.8, en esta ilustración el color rosa significa el rango de tiempo en que se visitar el cliente, dado que las ventanas horarias son para cada cliente, en esta figura se presenta un cliente en particular. Se debe denotar que el tiempo del trayecto es aproximadamente la mitad del tiempo de ciclo. Se observa que los vehículos TC7, TC28 y TC34 y parcialmente el TC43 son utilizados sólo para el cliente Envigado-N, allí se puede ver que todos los vehículos con sus trayectos de ida cumplen las ventanas horarias y porque el modelo operativo decide que el vehículo TC43 no podría hacer inicialmente el ciclo 2 (C2) debido a que incumpliría la ventana de apertura y por eso realiza otro ciclo inicialmente que de acuerdo con la Ilustración 4.7 es el ciclo 4 (C4) La Estrella-C.

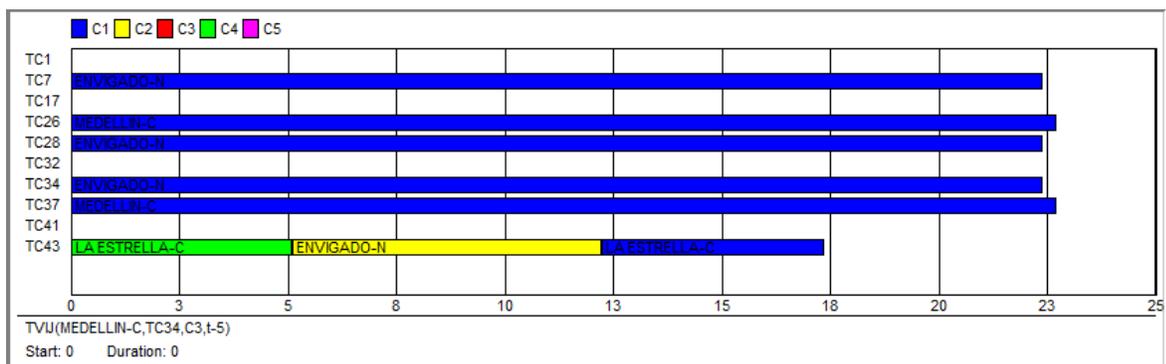


Ilustración 4.7 Diagrama de Gantt Vehículo Vs Ciclo para todos los clientes para la instancia 2.

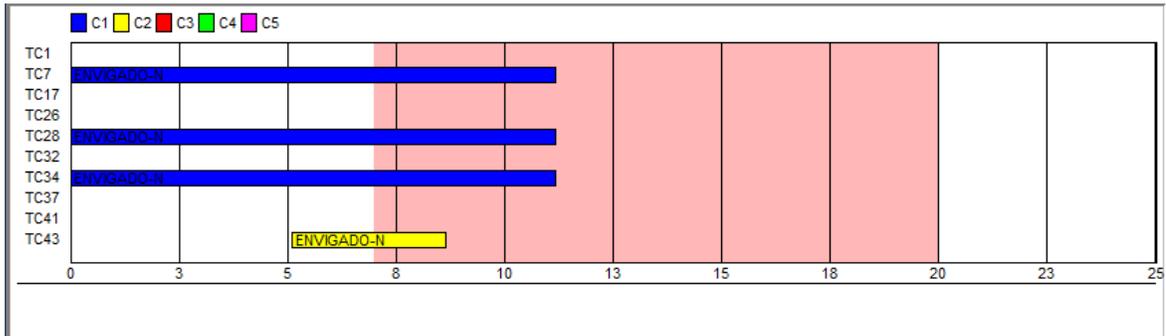


Ilustración 4.8 Diagrama de Gantt Vehículo Vs Ciclo para un solo cliente para la instancia 2.

Con esta modelación presentada, se obtiene un resultado integrado entre la administración de inventarios y ruteo de vehículos, a tal punto que permita realizar una programación adecuada con horarios de salida para cada uno de los vehículos hacia cada uno de los destinos (Hub's o clientes), con una planificación semanal, que permite dimensionar la capacidad de la flota para cumplir con el nivel de servicio exigido por los clientes, tanto a nivel de inventario como a nivel de atención horaria.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

A pesar de que en los últimos años la industria de cemento ha presentado una leve declinación en su crecimiento en Colombia, esta industria sigue siendo una de las más importantes en este país, especialmente por el desarrollo de grandes proyectos de infraestructuras viales como son las autopistas 4G, y, por otro lado, la demanda de grandes entes comercializadores. Sin embargo, dada las especificaciones del producto, se hace necesario tener diferentes modelos de eficiencia logística dentro de la cadena de suministro, especialmente en las etapas de distribución y almacenamiento. En este punto el modelo presentado previamente propone un enfoque de integración proveedor-cliente permitiendo encontrar una metodología que reduzca los costos y mejore las condiciones de servicio.

A lo largo de este trabajo se propuso un esquema de modelación MIP en dos fases que permitió alcanzar la solución exacta, aunque no óptima por el enfoque en dos etapas a un problema de mediano y gran tamaño en un tiempo computacional razonable, demostrando que con este modelo fue posible abstraer el 95% de las condiciones de demanda, despachos de cemento, cantidad de clientes, y múltiples restricciones particulares que tiene este sector industrial. En total, la instancia dentro del caso de estudio con mayor tamaño contó con 80 clientes, 5 plantas de producción, 8 Hub's (CEDIS), 3 productos, 261 vehículos, de los cuáles, de acuerdo con el origen y destino se podrían hacer hasta 11 ciclos, con dos diferentes tipos de tripulación para un horizonte de planificación de 7 días. Lo anterior, en un procesador Intel® Core™ i5-5200U CPU @2.20GHz (4 procesadores lógicos) con una memoria RAM de 8 GB y un sistema operativo Windows de 64 bits, generando un total de 278.526 variables y 152.337 restricciones, para un total de tiempo de computación de 13.1 horas aproximadamente, donde posteriormente este resultado fue insumo para realizar la programación de visitas en un orden que permitiera minimizar la penalidad en incumplir las ventanas horarias, obteniendo un resultado comparable con la realidad en cantidad de vehículos encontrando y esquema de servicio.

Con el resultado del modelo táctico se obtiene que se usa una cantidad de vehículos similar a los vehículos actuales del caso estudiado de los últimos 6 meses, con una leve desviación, además de que esta solución permitió establecer una programación adecuada de visitas y con el modelo operativo una secuenciación óptima de rutas para

cumplir en la mayor posibilidad con los horarios de atención de cada uno de los clientes al mínimo costo total, donde incluye costo de flota, costos variables de transporte y costos de inventario.

5.2 Recomendaciones

Dada la complejidad del problema abordado fue necesario proponer una metodología de dos fases, en donde dos modelos matemáticos representan la realidad del problema con diferentes objetivos, aunque igual de importantes. Sin embargo, para trabajos futuros se sugiere estudiar la posibilidad de que estos dos modelos puedan integrarse en uno solo, buscando minimizar el costo total de la cadena de abastecimiento, proponiendo como restricciones el cumplimiento de las ventanas horarias.

A pesar de los buenos resultados del modelo, aún existen ciertas condiciones que no fueron tenidas en cuenta por el modelo táctico, de las que se destacan principalmente la forma de modelar los ciclos no entera, y teniendo en cuenta la posibilidad de realización de viajes de un único trayecto. Adicionalmente, como trabajo futuro, se sugiere incluir la posibilidad de ir desde una planta, por ejemplo, Planta A a un cliente y retornar a otra planta, por ejemplo, Planta B; condición que no fue de considerada en esta tesis.

6. Referencias

- Adulyasak, Y., Cordeau, J. F., & Jans, R. (2014). Formulations and branch-and-cut algorithms for multivehicle production and inventory routing problems. *INFORMS Journal on Computing*, 26(1). <http://doi.org/10.1287/ijoc.2013.0550>
- Agudelo, I. (2009). *Supply Chain Management in the Cement Industry*. Massachusetts institute of technology Libraries (Vol. 2). Retrieved from <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/51643?show=full>
- Aimms. (2013). *AIMMS Language Reference*. Technology.
- Ajiwe, V. I. ., Okeke, C. ., & Akigwe, F. . (2000). A preliminary study of manufacture of cement from rice husk ash. *Bioresource Technology*, 73(1), 37–39. [http://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00135-2](http://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00135-2)
- Amrina, E., & Vilsa, A. L. (2015). Key Performance Indicators for Sustainable Manufacturing Evaluation in Cement Industry. *Procedia CIRP*, 26, 19–23. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.173>
- Andersson, H., Hoff, A., Christiansen, M., Hasle, G., & Løkketangen, A. (2010). Industrial aspects and literature survey: Combined inventory management and routing. *Computers & Operations Research*, 37(9), 1515–1536.
- ARANGO, M. D., ZAPATA, J. A., & JAIMES, W. A. (2011). APLICACIÓN DEL MODELO DE INVENTARIO MANEJADO POR EL VENDEDOR EN UNA EMPRESA DEL SECTOR ALIMENTARIO COLOMBIANO. (Spanish). *VENDOR MANAGED INVENTORY APPLICATION IN A COLOMBIAN FOOD ENTERPRISE*. (English).
- Bell, W. J., Dalberto, L. M., Fisher, M. L., Greenfield, a. J., Jaikumar, R., Kedia, P., ... Prutzman, P. J. (1983). Improving the Distribution of Industrial Gases with an On-Line Computerized Routing and Scheduling Optimizer. *Interfaces*, 13(6), 4–23. <http://doi.org/10.1287/inte.13.6.4>
- Bertazzi, L., & Speranza, M. G. (2012). Inventory routing problems: an introduction. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 1(4), 307–326. <http://doi.org/10.1007/s13676-012-0016-7>
- CEMEX. (2018). CEMEX | Production Process. Retrieved March 30, 2018, from <http://www.cemexholdingsphilippines.com/production-process.aspx>
- Chen, Y. M., & Lin, C. T. (2009). A coordinated approach to hedge the risks in stochastic inventory-routing problem. *Computers and Industrial Engineering*, 56(3), 1095–1112. <http://doi.org/10.1016/j.cie.2008.09.044>

- Christiansen, M., Fagerholt, K., Flatberg, T., Haugen, ??yvind, Kloster, O., & Lund, E. H. (2011). Maritime inventory routing with multiple products: A case study from the cement industry. *European Journal of Operational Research*, 208(1), 86–94. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.08.023>
- Coelho, L. C., Cordeau, J.-F., & Laporte, G. (2013). Thirty Years of Inventory Routing. *Transportation Science*, 48(1), 1–19. <http://doi.org/10.1287/trsc.2013.0472>
- Coelho, L. C., Laporte, G., & Cordeau, J.-F. (2012). Dynamic and stochastic inventory-routing, 1–27. Retrieved from <https://www.cirrelt.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2012-37.pdf>
- Cortes, M. L. F. A. F. P. (2015). Perfil Logístico del Sector del Cemento en Colombia.
- DANE. (2018). Estadísticas de Cemento Gris Boletín técnico, (Diciembre 2017), 1–29.
- Desaulniers, G., Rakke, J. G., & Coelho, L. C. (2016). A Branch-Price-and-Cut Algorithm for the Inventory-Routing Problem. *Transportation Science*, 50(3). <http://doi.org/10.1287/trsc.2015.0635>
- Dror, M., Ball, M., & Golden, B. (1985). A computational comparison of algorithms for the inventory routing problem. *Annals of Operations Research*, 4(1), 1–23. <http://doi.org/10.1007/BF02022035>
- Fredendall, L. D., & Hill, E. (2011). Inventory Management. *Encyclopedia of Supply Chain Management*, 536–541. <http://doi.org/10.1081/E-ESCM-120048138>
- Gaur, V., & Fisher, M. L. (2004). A Periodic Inventory Routing Problem at a Supermarket Chain. *Operations Research*, 52(6), 813–822. <http://doi.org/10.1287/opre.1040.0150>
- Gómez, R. A., & Correa, A. A. (2011). Análisis Del Transporte Y Distribución De Materiales De Construcción Utilizando Simulación Discreta En 3D Construction Materials Transport and Distribution Analysis Using Discrete Simulation in 3D, 39–52.
- Guzmán, D., Chacón, E., & Sañay, I. (2016). Modelo De Procesos Para La Automatización Del Área De Producción En El Sector De La Industria Cementera Pública Del Ecuador. *Ingenius: Revista de*, 51–63. Retrieved from <http://revistas.ups.edu.ec/index.php/ingenius/article/view/16.2016.07>
- Hertz, A., Uldry, M., & Widmer, M. (2012). Integer linear programming models for a cement delivery problem. *European Journal of Operational Research*, 222(3), 623–631. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.04.039>
- Hewitt, M., Nemhauser, G., Savelsbergh, M., & Song, J. H. (2013). A branch-and-price guided search approach to maritime inventory routing. *Computers and Operations Research*, 40(5), 1410–1419. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2012.09.010>
- Hillier, F. S., Lieberman, G. J., & Murrieta Murrieta, J. E. (2006). *Introducción a la investigación de operaciones*. McGraw-Hill. Retrieved from https://books.google.com.co/books/about/Introducción_a_la_investigación_de_ope

tml?id=Q9pgAQAACAAJ&redir_esc=y

- Hoff, A., Andersson, H., Christiansen, M., Hasle, G., & Løkketangen, A. (2010). Industrial aspects and literature survey: Fleet composition and routing. *Computers and Operations Research*, 37(12), 2041–2061. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2010.03.015>
- Kleywegt, A. J., Nori, V. S., & Savelsbergh, M. W. P. (2002). The Stochastic Inventory Routing Problem with Direct Deliveries. *Transportation Science*, 36(1), 94–118. <http://doi.org/10.1287/trsc.36.1.94.574>
- Laporte, G., & Coelho, L. C. (2012). A Branch-and-Cut Algorithm for the Routing Problem A Branch-and-Cut Algorithm for the Multi-Product Multi-Vehicle Inventory-Routing Problem.
- Li, C., Nie, Z., Cui, S., Gong, X., Wang, Z., & Meng, X. (2014). The life cycle inventory study of cement manufacture in China. *Journal of Cleaner Production*, 72, 204–211. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.048>
- Moin, N. H., & Salhi, S. (2007). Inventory routing problems: a logistical overview. *Journal of the Operational Research Society*, 58(9), 1185–1195. <http://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602264>
- Mutlu, F., Msakni, M. K., Yildiz, H., Sönmez, E., & Pokharel, S. (2016). A comprehensive annual delivery program for upstream liquefied natural gas supply chain. *European Journal of Operational Research*, 250(1), 120–130. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.10.031>
- Na, C., & Progame, M. (2010). the Inventory and Classification of Types of Damage. *Journal of the Inventory Control*, 16(2), 21–30.
- Noche, B., & Elhasia, T. (2013). Approach to Innovative Supply Chain Strategies in Cement Industry; Analysis and Model Simulation. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 75, 359–369. <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.04.041>
- Papageorgiou, D. J., Nemhauser, G. L., Sokol, J., Cheon, M. S., & Keha, A. B. (2014). MIRPLib - A library of maritime inventory routing problem instances: Survey, core model, and benchmark results. *European Journal of Operational Research*, 235(2), 350–366. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.12.013>
- Paraphantakul, C. (2013). Scheduling Deliveries With Backhauls In Thailand's Cement Industry. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Payr, F., & Schmid, V. (2009). Optimizing deliveries of ready-mixed concrete. *2009 2nd International Symposium on Logistics and Industrial Informatics, LINDI 2009*. <http://doi.org/10.1109/LINDI.2009.5258569>
- Popović, D., Vidović, M., & Radivojević, G. (2011). Simulation approach to analyse deterministic IRP solution of the stochastic fuel delivery problem. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20, 273–282. <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.033>

- Popović, D., Vidović, M., & Radivojević, G. (2012). Variable Neighborhood Search heuristic for the Inventory Routing Problem in fuel delivery. *Expert Systems with Applications*, 39(18), 13390–13398. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.064>
- Qin, L., Miao, L., Ruan, Q., & Zhang, Y. (2014). A local search method for periodic inventory routing problem. *Expert Systems with Applications*, 41(2), 765–778. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.100>
- Raigoza Loaiza, J. F. (2016). Aplicación de Métodos Multi-criterio (MCDA) para planeamiento energético de largo plazo en la industria del cemento, 69. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/54265/>
- Ríos-Ocampo, J. P., & Olaya Morales, Y. (2016). Sustainability of the domestic consumption of construction materials in Colombia, 1990-2013. *Lecturas de Economía*, 0(86), 127–151.
- Roldán, R., Basagoiti, R., & Onieva, E. (2014). Inventory Routing Problem with Stochastic Demand and Lead Time: State of the Art. *Springer*, 239(1), 761. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-01854-6>
- Rothlauf, F. (2011). *Design of Modern Heuristics*. <http://doi.org/10.1007/978-3-540-72962-4>
- Shao, Y., Furman, K. C., Goel, V., & Hoda, S. (2015). A hybrid heuristic strategy for liquefied natural gas inventory routing. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 53, 151–171. <http://doi.org/10.1016/j.trc.2015.02.001>
- Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Haijema, R., & Van Der Vorst, J. G. A. J. (2015). Modeling an Inventory Routing Problem for perishable products with environmental considerations and demand uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 164, 118–133. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.03.008>
- Taha, H. A., & González Pozo, V. (2004). *Investigación de operaciones*. Pearson/Educación. Retrieved from [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=3oHztjMSuL8C&oi=fnd&pg=PA1&dq=historia+de+la+investigación+de+operaciones&ots=nNyJ4b7TDQ&sig=CiS2UcL_SW_VKyTYghZTk_gdDIs#v=onepage&q=historia de la investigación de operaciones&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=3oHztjMSuL8C&oi=fnd&pg=PA1&dq=historia+de+la+investigación+de+operaciones&ots=nNyJ4b7TDQ&sig=CiS2UcL_SW_VKyTYghZTk_gdDIs#v=onepage&q=historia+de+la+investigación+de+operaciones&f=false)
- Vidović, M., Popović, D., & Ratković, B. (2013). Mixed integer and heuristics model for the inventory routing problem in fuel delivery. *International Journal of Production Economics*, 147(PART C), 593–604. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.04.034>
- Vrat, P. (2014). *Materials Management*. <http://doi.org/10.1007/978-81-322-1970-5>
- Waller, M., Johnson, M. E., & Davis, T. (1999). Vendor-managed inventory in the retail supply chain. *Journal of Business Logistics*. <http://doi.org/Article>
- Wang, X. (2010). An integrated multi-depot location- inventory-routing problem for logistics distribution system planning of a chain enterprise. *2010 International Conference on Logistics Systems and Intelligent Management, ICLSIM 2010*, 3,

- 1427–1431. <http://doi.org/10.1109/ICLSIM.2010.5461202>
- 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.
- Wolsey, L. A., & Nemhauser, G. L. (2014). *Integer and Combinatorial Optimization*. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=MvBjBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=integer+programming+wolsey&ots=1czCyEN8xx&sig=kLr9JSutkHNGL2Hv5R2BCIYpJIE#v=onepage&q=integer+programming+wolsey&f=false>
- Yao, Y., Evers, P. T., & Dresner, M. E. (2007). Supply chain integration in vendor-managed inventory. *Decision Support Systems*. <http://doi.org/10.1016/j.dss.2005.05.021>
- Yu, Y., Chu, F., & Chen, H. (2006). A Model and Algorithm for Large Scale Stochastic Inventory Routing Problem. *2006 International Conference on Service Systems and Service Management*, 1, 355–360. <http://doi.org/10.1109/ICSSSM.2006.320640>
- Zhang, Y., Li, M., & Liu, Z. (2011). Vehicle scheduling and dispatching of ready mixed concrete. *Proceedings of 4th International Workshop on Advanced Computational Intelligence, IWACI 2011*, 465–472. <http://doi.org/10.1109/IWACI.2011.6160052>
- Zheng, H. Z., Chu, D. H., Zhan, D. C., & Xu, X. F. (2009). A heuristic solution approach for VMI cyclic inventory routing problem. *Proceedings of the 2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems, GCIS 2009*, 2, 503–508. <http://doi.org/10.1109/GCIS.2009.53>
- Zipkin, P. (2000). *Foundations of inventory management. Foundations of inventory management*.

Anexo 1: Implementación Modelo Táctico en AIMMS

```

Section Modelo_Tactico {
  DeclarationSection Horizonte_de_planificacion {
    Horizon PHO {
      Index: t;
      CurrentPeriod: PINI;
      IntervalLength: PEPA;
      Definition: ElementRange(0,MAXP,prefix:"t-");
    }
    ElementParameter PINI {
      Text: "Periodo Inicial";
      Range: PHO;
      Definition: Element(PHO,2);
    }
    Set PPLA {
      SubsetOf: PHO;
      Text: "Periodos de Planificacion sin el primer periodo";
      Definition: PHO-element(PHO,1);
    }
    Parameter PEPA {
      Text: "Periodos de planificación";
      Definition: CARD(PHO)-1;
    }
    Parameter MAXP;
  }
  DeclarationSection Conjuntos {
    Set NOD {
      Text: "Nodos";
      Index: i, j;
    }
    Set NPA {
      SubsetOf: NOD;
      Definition: {
        {i in NOD| TNOD(i)="PLANTA"}
      }
    }
    StringParameter TNOD {
      IndexDomain: i;
    }
    Set NCD {
      SubsetOf: NOD;
      Definition: {
        {i in NOD| TNOD(i)="CEDI"}
      }
    }
    Set NCL {
      SubsetOf: NOD;
      Definition: {
        {i in NOD| TNOD(i)="CLIENTE"}
      }
    }
    Set NPC {
      SubsetOf: NOD;
      Text: "Nodos plantas + Nodos Cedis (Órigenes)";
    }
  }
}

```

```

        Definition: NPA+NCD;
    }
    Set NCC {
        SubsetOf: NOD;
        Text: "Nodos Cedis + Nodos Clientes (Destinos)";
        Definition: NCD+NCL;
    }
    Parameter PNCR {
        IndexDomain: (j,i,r)|(j in NPC and i in NCC);
        Text: "Nodos conductor relevo, Nodos origenes con los que se puede ir en
conductor relevo a nodos destinos.";
    }
    Set NCR {
        IndexDomain: (r,j);
        SubsetOf: NOD;
        Definition: {
            {i in NOD|PNCR(j,i,r)}
        }
    }
    Set VEH {
        Text: "Vehiculos";
        Index: k;
    }
    Parameter VEHN {
        IndexDomain: (k,j in NPC);
    }
    Set VPC {
        IndexDomain: k;
        SubsetOf: NPC;
        Definition: {
            {j| VEHN(k,j)}
        }
    }
    Set CIC {
        Text: "Ciclos permitidos de un vehículo entre origen y destino con producto y
vehículo.";
        Index: c, c1;
    }
    Parameter PCIN {
        IndexDomain: (j,i,c)|(j in NPC and i in NCC);
        Text: "Cantidad de ciclos que se pueden hacer desde j a i";
    }
    Set CIN {
        IndexDomain: (j,i);
        SubsetOf: CIC;
        Definition: {
            {c in CIC|PCIN(j,i,c)}
        }
    }
    Set PRO {
        Text: "Productos";
        Index: m;
    }
    Set NPP {
        IndexDomain: (m);
        SubsetOf: NPC;
        Definition: {
            {j| TPRO(j,m)}
        }
    }
    Parameter TPRO {
        IndexDomain: (j in NPC,m);
    }
    Set TRP {
        Text: "Tipo de tripulación (un sólo conductor, o con conductor relevo)";
        Index: r;
    }
}

```

```

DeclarationSection Parametros {
  Parameter DEMA {
    IndexDomain: (i in NCL,m,t in PPLA);
    Text: "Demanda en el nodo cliente i del producto m en el periodo t";
  }
  Parameter INVS {
    IndexDomain: (i in NCC,m);
    Text: "inventario de seguridad del cliente i del producto m";
  }
  Parameter INVI {
    IndexDomain: (i in NCC,m);
    Text: "Inventario inicial del cliente i del producto m";
  }
  Parameter CAPN {
    IndexDomain: (i in NCC,m);
    Text: "Capacidad máxima de almacenamiento en el nodo i del producto m";
  }
  Parameter TIVI {
    IndexDomain: (j,i,r)|(j in NPC and i in NCR(r,j));
    Text: "Tiempo de ciclo del nodo origen j al nodo destino i con el tipo de
tripulación r";
  }
  Parameter CCIC {
    IndexDomain: (j,i,r)|(j in NPC and i in NCR(r,j));
    Text: "Costo de ciclo de nodo origen j a nodo destino i con el tipo de
tripulación r";
  }
  Parameter CAPV {
    IndexDomain: k;
    Text: "Capacidad en peso del vehículo k";
  }
  Parameter CVEH {
    IndexDomain: k;
    Text: "Costo de usar un vehículo";
  }
  Parameter CINV {
    IndexDomain: (i in NCC);
    Text: "costo de inventario";
  }
  Parameter TJOR {
    Text: "Tiempo de Jornada";
  }
  Parameter MAXV {
    IndexDomain: k;
    Definition: {
      !CARD(PHO)*CARD(CIC)*CARD(PRO)*CARD(NCL)
      100
    }
  }
  Parameter MAXM {
    IndexDomain: (i,j,k,t);
    Definition: CARD(CIC)*CARD(PRO);
  }
}
Section Variables_del_Modelo {
  DeclarationSection Variables_de_Asignacion {
    Variable AVC {
      IndexDomain: (j,i,m,k,c,r,t)|(j in VPC(k) and j in NPP(m) and i in NCR(r,j)
and c in CIN(j,i));
      Text: "Asignación vehiculo k al producto m en cliente i en periodo t";
      Range: binary;
    }
    Variable AVP {
      IndexDomain: k;
      Text: "Asignación de uso de vehiculo k";
      Range: binary;
    }
  }
}

```

```

DeclarationSection Variables_de_Cantidad {
  Variable INV {
    IndexDomain: (i in NCC,m,t);
    Text: "Inventario en el nodo Destino i del producto m al final de t";
    Range: nonnegative;
  }
  Variable CPE {
    IndexDomain: (j,i,m,k,c,r,t)|(j in VPC(k) and j in NPP(m) and i in NCR(r,j)
and c in CIN(j,i));
    Text: "Cantidad de producto entregado con el vehiculo k en el tiempo t";
    Range: [0, CAPV(k)];
  }
}
}
Section Restricciones_del_Modelo {
  DeclarationSection Restricciones_de_Relacion {
    Constraint RUVE {
      IndexDomain: k;
      Text: "Restricción de uso de vehiculo en el horizonte de planificación";
      Definition: sum((j,i,m,c,r,t)|(j in VPC(k) and i in
NCC),AVC(j,i,m,k,c,r,t)) <= MAXV(k) *AVP(k);
    }
    Constraint RVCC {
      IndexDomain: (j,i,m,k,c,r,t)|(j in VPC(k) and i in NCC);
      Text: "Relación de cantidad entregada y asignación de vehiculo cliente";
      Definition: CPE(j,i,m,k,c,r,t)<= CAPV(k)*AVC(j,i,m,k,c,r,t);
    }
    Constraint RCIC {
      IndexDomain: (k,c,t);
      Text: "Sólo se puede ir a un cliente con un producto en un ciclo";
      Definition: sum((j,i,m,r)|(j in VPC(k) and i in
NCC),AVC(j,i,m,k,c,r,t))<=1;
    }
    Constraint RPRE {
      IndexDomain: (k,c,c1,t)|(c in PRE(c1));
      Text: "Precedencia entre ciclos c1<c2, c2<c3";
      Definition: sum((j,i,m,r)|(j in VPC(k) and i in NCR(r,j)),
AVC(j,i,m,k,c,r,t)) <= sum((j,i,m,r)|(j in VPC(k) and i in NCR(r,j)), AVC(j,i,m,k,c1,r,t));
    }
    Parameter PPRE {
      IndexDomain: (c,c1);
      Definition: c1<c;
    }
    Set PRE {
      IndexDomain: c1;
      SubsetOf: CIC;
      Definition: {
        {c| PPRE(c,c1)}
      }
    }
  }
}
DeclarationSection Restricciones_de_Capacidad {
  Constraint BALI {
    IndexDomain: (i in NCL,m,t);
    Text: "Balance de inventarios en los nodos clientes";
    Definition: INV(i,m,t)=INV(i,m,t-1)+sum((j,k,c,r)|(j in NPP(m)),
CPE(j,i,m,k,c,r,t))-DEMA(i,m,t);
  }
  Constraint BACD {
    IndexDomain: (i in NCD,m,t);
    Text: "Balance de inventarios en los nodos centros de distribución
(CEDIS)";
    Definition: INV(i,m,t)=INV(i,m,t-1)+sum((j,k,c,r)|(j in NPP(m)),
CPE(j,i,m,k,c,r,t))-sum((j,k,c,r)|(j in NCL), CPE(i,j,m,k,c,r,t));
  }
  Constraint CAPC {
    IndexDomain: (j,i,m,t)|(j in NPC and i in NCC);
    Text: "Capacidad de almacenamiento del nodo destino";
  }
}

```

```

        Definition: sum((k,c,r), CPE(j,i,m,k,c,r,t))<= CAPN(i,m)-INV(i,m,t);
    }
    Constraint CNOD {
        IndexDomain: (i,m,t)|(i in NCC);
        Text: "Capacidad de almacenamiento del nodo destino (sólo en función del
inventario)";
        Definition: INV(i,m,t)<= CAPN(i,m);
    }
    Constraint RINV {
        IndexDomain: (i in NCC,m,t);
        Text: "Inventario debe ser mayor al inventario de seguridad";
        Definition: INV(i,m,t)>= INVS(i,m);
    }
}
DeclarationSection Restricciones_de_Tiempo {
    Constraint CAPT {
        IndexDomain: (k,t);
        Text: "Restricción de jornada de tiempo";
        Definition: {
            sum((j,i,m,c,r)|(j in VPC(k) and j in NPP(m) and i in NCR(r,j) and c in
CIN(j,i)), TIVI(j,i,r)*AVC(j,i,m,k,c,r,t))<= TJOR
            !Index (k,t)

            !sum((j,i,c,r)|(j in VPC(k) and i in NCR(r,j) and c in CIN(j,i)),
TIVI(j,i,r)*AVC(j,i,m,k,c,r,t))<= TJOR
            !Index (m,k,t)
        }
    }
}
DeclarationSection Funcion_Objetivo {
    Variable MCT {
        Range: free;
        Definition: sum((i,j,m,k,c,r,t)|(i in NCC and j in NPC),
CCIC(j,i,r)*AVC(j,i,m,k,c,r,t)) + sum(k, CVEH(k)*AVP(k)) + sum((i,m,t)|i in
NCC,CINV(i)*INV(i,m,t));
    }
}
DeclarationSection Problema_Matematico {
    Set RestriccionesT {
        SubsetOf: AllConstraints;
        Definition: {
            !data {RUVE, RVCC, RCIC, RPRE, CAPT, BALI, BACD, CNOD} !Con Precedencia
            data {RUVE, RVCC, RCIC, CAPT, BALI, BACD, CNOD} !sin Precedencia
            !data {RUVE, RVCC, RCIC, CAPT, BALI, BACD, CAPC} ! se cambia CAPC por CNOD
            !data {RUVE, RVCC, RCIC, CAPT, BALI, BACD, CAPC, RINV} !con restricción de
inventario de seguridad
        }
        Comment: "RUVE2 es la restricción para definir viaje de i a j con k en t";
    }
    Set VariablesT {
        SubsetOf: AllVariables;
        Definition: {
            data {AVC, AVP, INV, CPE, MCT}
            !data {AVC, AVT, AVP, INV, CPE, MCT} con variable de asignación AVT
        }
        Comment: "AVT es la variable para definir viaje de i a j con k en t asociada a
RUVE2";
    }
}
MathematicalProgram OPAC {
    Objective: MCT;
    Direction: minimize;
    Constraints: RestriccionesT;
    Variables: VariablesT;
    Type: Automatic;
}
}

```

}

Anexo 2: Implementación Modelo Operativo en AIMMS

```

Section Modelo_Operativo {
  DeclarationSection Conjuntos_MO {
    Parameter NVCK {
      IndexDomain: (i,k,c,t)|(i in NCC);
    }
    Set NVK {
      IndexDomain: (k,c,t);
      SubsetOf: NCC;
      Text: "Nodos clientes que fueron asignados previamente en el modelo táctico";
      Definition: {
        {i| NVCK(i,k,c,t)}
      }
    }
    Parameter PPREL {
      IndexDomain: (c,c1);
      Definition: c1<c;
    }
    Set PRE1 {
      IndexDomain: c;
      SubsetOf: CIC;
      Definition: {
        {c1| PPREL(c,c1)}
      }
    }
  }
  DeclarationSection Parametros_MO {
    Parameter TMIN {
      IndexDomain: (i in NCC,t in PPLA);
      Text: "Tiempo de inicio de ventana horaria del cliente i en el periodo t";
      Range: [0, TJOR];
    }
    Parameter TMAX {
      IndexDomain: (i in NCC,t in PPLA);
      Text: "Tiempo de fin de ventana horaria del cliente i en el periodo t";
      Range: [0, TJOR];
    }
    Parameter TVIJ {
      IndexDomain: (i,k,c,t) | (i in NVK(k,c,t));
      Text: "Tiempo de viaje de nodos clientes visitados con k en c en t";
    }
    Parameter TVIJ2 {
      IndexDomain: (i,k,c,t) | (i in NVK(k,c,t));
      Text: "Tiempo de viaje de nodos clientes visitados con k en c en t";
      Definition: TVIJ(i,k,c,t)*PORC;
    }
    Parameter PORC {
      Text: "Porcentaje del tiempo de viaje para el trayecto de ida";
      Definition: 0.5;
    }
    Parameter PORC2 {
      Text: "Porcentaje del tiempo de viaje para el trayecto de ida";
      Definition: 1;
    }
  }
}

```

```

    }
    Parameter MAXT {
      Definition: {
        100
        !sum((i,k,c,t),TVIJ(i,k,c,t))
      }
    }
    Parameter SPEN {
      Definition: sum((i,k,c,t),PEN(i,k,c,t));
    }
  }
  DeclarationSection Variables_MO {
    Variable TSL {
      IndexDomain: (i,k,c,t) | (i in NVK(k,c,t));
      Text: "Tiempo de Salida a los clientes";
      Range: nonnegative;
    }
    Variable PEN {
      IndexDomain: (i,k,c,t) | (i in NVK(k,c,t));
      Text: "Tiempo de Salida a los clientes";
      Range: nonnegative;
    }
    Variable SEC {
      IndexDomain: (k,c,c1,t) | (c<c1);
      Text: "Variable Binaria para secuenciación de ciclos";
      Range: binary;
    }
  }
  DeclarationSection Restricciones_MO {
    Constraint RMIN {
      IndexDomain: (i,k,c,t) | (i in NVK(k,c,t));
      Text: "Límite inferior de llegada a los nodos clientes";
      Definition: TSL(i,k,c,t) + (PORC*TVIJ(i,k,c,t)) >= TMIN(i,t);
    }
    Constraint RMAX {
      IndexDomain: (i,k,c,t) | (i in NVK(k,c,t));
      Text: "Límite superior de llegada a los nodos clientes";
      Definition: {
        TSL(i,k,c,t) + (PORC*TVIJ(i,k,c,t)) - PEN(i,k,c,t) <= TMAX(i,t)

        !TSL(i,k,c,t) + PORC*TVIJ(i,k,c,t) <= TMAX(i,t) !Sin Penalidad
      }
    }
    Constraint SCIC1 {
      IndexDomain: (k,c,c1,t) | (c<c1);
      Text: "Secuencia de ciclos";
      Definition: sum(i in NCC, TSL(i,k,c,t)) + sum(i in NCC, TVIJ(i,k,c,t)) <= sum(i
in NCC, TSL(i,k,c1,t)) + MAXT*(1-SEC(k,c,c1,t));
    }
    Constraint SCIC2 {
      IndexDomain: (k,c,c1,t) | (c<c1);
      Text: "Secuencia de ciclos";
      Definition: sum(i in NCC, TSL(i,k,c1,t)) + sum(i in NCC, TVIJ(i,k,c1,t)) <=
sum(i in NCC, TSL(i,k,c,t)) + MAXT*SEC(k,c,c1,t);
    }
  }
  DeclarationSection Funcion_Objetivo_MO {
    Variable MCO {
      Range: free;
      Definition: {
        sum((i,k,c,t) | (i in NCC), PEN(i,k,c,t))

        !+sum((i,k,c,t) | (i in NCL), TSL(i,k,c,t)) !incluyendo hora de salida
      }
    }
  }
  DeclarationSection Problema_Matematico_MO {
    Set RestriccionesO {

```

```
SubsetOf: AllConstraints;
Definition: {
  !data {RMIN, RMAX} !Sin Secuenciación
  data {RMIN, RMAX, SCIC1, SCIC2} !Con secuenciación
  !data {RMIN, RMAX, SCIC, SCIC1, SCIC2} !Con otra formulación
}
}
Set VariablesO {
SubsetOf: AllVariables;
Definition: {
  data {TSL, SEC, PEN, MCO}
  !data {TSL, TSL2, SEC, PEN, MCO} !con otra formulación
}
}
MathematicalProgram OPACS {
  Objective: MCO;
  Direction: minimize;
  Constraints: RestriccionesO;
  Variables: VariablesO;
  Type: Automatic;
}
```