

## Información Importante

La Universidad de La Sabana informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del Catálogo en línea de la Biblioteca y el Repositorio Institucional en la página Web de la Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad de La Sabana.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan finalidad académica, nunca para usos comerciales, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, La Universidad de La Sabana informa que los derechos sobre los documentos son propiedad de los autores y tienen sobre su obra, entre otros, los derechos morales a que hacen referencia los mencionados artículos.

**BIBLIOTECA OCTAVIO ARIZMENDI POSADA**  
UNIVERSIDAD DE LA SABANA  
Chía - Cundinamarca

**SISTEMA DE SOPORTE DE DECISIONES PARA  
OPTIMIZAR LA CADENA DE SUMINISTRO DE UNA RED  
DE ESTACIONES DE COMBUSTIBLES EN COLOMBIA.  
CASO: (DISTRACOM S.A. – Valle de Aburra)**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para obtener el título de

Magister en Gerencia de Operaciones  
(Modalidad de profundización)

JOSE ALIRIO GARCIA SALAZAR

Director:  
José Fernando Jiménez., Msc.

Presentado públicamente el día xx de Mayo de 2013

Jurados:

Carlos Alberto Vega Mejía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia  
Steven Frasser Daza, Universidad de La Sabana, Chía, Colombia

Universidad de La Sabana  
Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas  
Chía, Colombia  
2013

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	7
1. INTRODUCCION .....	8
2. PROBLEMA DE INVESTIGACION.....	9
2.1 Enunciado del problema.....	9
2.1.1 La empresa .....	10
2.1.1.1 Localización de la demanda .....	10
2.1.1.2 Infraestructura de transporte.....	13
2.1.1.3 Localización de las plantas.....	14
2.1.1.4 Nivel de servicio.....	15
2.1.1.5 Configuración de las EDS .....	17
2.2 Formulación del problema .....	19
3. OBJETIVO DE LA INVESTIGACION .....	20
3.1. Objetivo general .....	20
3.2. Objetivos específicos.....	20
4. JUSTIFICACION Y DELIMITACION DE LA INVESTIGACION .....	21
4.1. Justificación.....	21
4.2. Delimitación de la investigación.....	23
5. MARCO DE REFERENCIA .....	23
5.1. Marco teórico .....	23
5.1.1. Tecnologías de la información orientadas al aprovisionamiento .....	24
5.1.2. Tecnologías de la información orientadas a la logística interna.....	26
5.1.3. Tecnologías de la información orientadas a la logística de distribución.....	27
5.1.4. Otro software de aplicación general.....	28
5.1.5. Análisis Envolvente de Datos -DEA .....	29
5.1.6. El Problema de Optimización Multiobjetivo.....	31
5.1.7. El Problema de Ruteo de Vehículos.....	33
5.2. Marco conceptual .....	41
6. DESARROLLO DE LOS MODELOS DE OPTIMIZACION .....	43

6.1.	FASE 1: DATA ENVELOPMENT ANALYSIS.....	44
6.1.1.	Condiciones Generales.....	45
6.1.2.	Formulación del Modelo.....	47
6.1.3.	Solución Propuesta.....	49
6.1.4.	Resultados y Análisis.....	49
6.2.	FASE 2: OPTIMIZACION DE INVENTARIOS.....	51
6.2.1.	Condiciones Generales.....	51
6.2.2.	Formulación del Modelo.....	51
6.2.3.	Solución Propuesta.....	54
6.2.4.	Resultados y Análisis.....	54
6.3.	FASE 3: OPTIMIZACION DISTRIBUCION Y TRANSPORTE.....	57
6.3.1.	Condiciones Generales.....	57
6.3.2.	Formulación del Modelo.....	58
6.3.3.	Solución Propuesta.....	61
6.3.4.	Resultados y Análisis.....	62
6.4.	FASE 4: POST-OPTIMIZACION DISTRIBUCION Y TRANSPORTE.....	70
6.4.1.	Aproximación inicial usando métodos manuales.....	71
6.4.2.	Mejor Solución.....	73
6.5.	DOCUMENTOS DE SOPORTE PARA LA TOMA DE DECISIONES.....	75
6.5.1.	Formatos de configuración de capacidades.....	75
6.5.2.	Formatos de control operacional.....	76
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
7.1.	CONCLUSIONES.....	78
7.2.	RECOMENDACIONES.....	79
8.	REFERENCIAS.....	81

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Red nacional de poliductos y localización de plantas de abasto.....	15
Figura 2. Ejemplo de la dominancia de Pareto para dos funciones objetivo.....	33
Figura 3. Dos rutas antes y después de ser unidas.....	37
Figura 4. Un ejemplo de rutas circulares y radiales .....	38
Figura 5. Aplicación del algoritmo rutear primero - asignar después .....	40
Figura 6. Posible iteración del algoritmo de Lin-Kernigham.....	41
Figura 7. Esquema de la eficiencia de la DMU j-ésima.....	48
Figura 8. Localización y distancias de la planta de abasto y EDS. ....	74

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Distribución por producto .....	10
Gráfica 2. Comportamiento semanal por producto .....	12
Gráfica 3. Comportamiento diario por producto .....	13
Gráfica 4. Frontera de eficiencia.....	47
Gráfica 5. Ranking de eficiencias. ....	50
Gráfica 6. Optimización de inventario producto 1 .....	55
Gráfica 7. Optimización de inventario producto 2.....	56
Gráfica 8. Optimización de inventario producto 3.....	56
Gráfica 9. Comportamiento general del inventario. ....	69
Gráfica 10. Comportamiento individual del inventario en las EDS.....	70
Gráfica 11. Comportamiento individual mejorado del inventario en las EDS.....	71

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Distribución Regional .....	10
Tabla 2. Demanda mensual por regional.....	11
Tabla 3. Información general .....	11
Tabla 4. Distribución nacional de plantas, EDS y camiones.....	14
Tabla 5. Niveles de servicio para abastecimiento y transporte .....	16
Tabla 6. Configuración de almacenamiento de EDS .....	18
Tabla 7. Variables generales para el análisis DEA. ....	46
Tabla 8. Indicadores de eficiencia de las variables DEA. ....	49
Tabla 9. Resultados DEA usando Solver de Excel. ....	50

Tabla 10. Volumen final de inventario .....	55
Tabla 11 Nivel de inventario por producto .....	55
Tabla 12. Lista de camiones disponibles.....	58
Tabla 13. Resultados generales de los escenarios .....	63
Tabla 14. Resultados escenario pesimista, modelos 4k_3P_1T y 2k_2P_1T .....	63
Tabla 15. Entregas por producto por camión (4k_3P_1T).....	64
Tabla 16. Entregas por producto por camión (2k_2P_1T).....	64
Tabla 17. Resultados escenario normal. Modelos 4k_3P_4T y 2k_3P_2T.....	65
Tabla 18. Entregas por producto por camión (4k_3P_4T).....	65
Tabla 19. Entregas por producto por camión (2k_3P_2T).....	65
Tabla 20. Resultados escenario optimista. Modelos 2k_2P_2T y 4k_3P_4T .....	66
Tabla 21. Entregas por producto por camión (2k_2P_2T).....	66
Tabla 22. Entregas por producto por camión (4k_3P_4T).....	66
Tabla 23. Distribución general de entregas por EDS .....	67
Tabla 24. Balance de lotes y compartimientos de k4 .....	68
Tabla 25. Distribución de entregas mensual ajustado. ....	72
Tabla 26. Matriz de distancias entre planta y EDS .....	73
Tabla 27. Matriz de indicadores para la gestión de operaciones en EDS.....	80

**SISTEMA DE SOPORTE DE DECISIONES PARA OPTIMIZAR LA CADENA DE SUMINISTRO DE UNA RED DE ESTACIONES DE COMBUSTIBLES EN COLOMBIA. CASO: (DISTRACOM S.A. – Valle de Aburra)**

**RESUMEN**

Siendo conscientes de la realidad nacional y la demanda continua de transformación de los procesos productivos orientados a mejorar la competitividad y sostenibilidad, la optimización de la cadena de abastecimiento de combustibles livianos en Colombia se ha vuelto un tema de especial interés por los buenos márgenes y rentabilidad que genera.

La falta de planeación de la demanda, la deficiente infraestructura de almacenamiento, los inadecuados planes de expansión y mejora de vías, sumado a la carencia de acuerdos sostenibles con la industria del transporte, son algunos de los argumentos que presenta la industria nacional de los combustibles livianos para justificar operaciones innecesarias y aumentar capital de trabajo con infraestructura ociosa en toda la cadena de suministro, que desde luego se traduce en aumento de márgenes o sobrecostos al consumidor final.

La tarea está en analizar los elementos que componen la cadena de abastecimiento y desde la óptica del minorista optimizar los procesos que estén bajo su control, minimizando los costos de tal manera que pueda trasladarse parte de los beneficios al consumidor final y pueda consolidarse como una red de estaciones de combustible más competitiva a nivel nacional.

En la actualidad se ven en el mercado múltiples opciones de software y hardware que dan solución puntual a las deficiencias operativas de los diferentes eslabones de la cadena pero ninguna que integre las necesidades de los diferentes actores. En la industria se proponen ideas innovadoras que satisfacen parcialmente las expectativas de un segmento de la cadena pero no complementan con decisión las ventanas que se abren para continuar con las mejoras en toda la cadena, la industria finalmente termina un proceso de inversión y de optimización a medias.

El objetivo principal del proyecto es plantear el desarrollo de una herramienta informática que pueda replicarse para implementar estrategias que garanticen un suministro sostenible en redes de Estaciones De Servicio (EDS) de todo el país y que posteriormente pueda integrar la cadena suministro desde la planta de abastecimiento, el transporte, los entes de control del gobierno y la red de EDS.

## 1. INTRODUCCION

La logística en la distribución y comercialización de combustibles en estaciones de servicio, es tal vez el proceso operativo estratégicamente más importante para diferenciarse de los competidores. Ofrecer excelencia operacional con mejor calidad en el servicio y menores costos, aumentar la velocidad y confiabilidad de la entrega a través de procesos innovadores, orientar la planificación y coordinación entre los diferentes elementos que componen la cadena de abastecimiento, desde las plantas hasta las EDS, implica el desarrollo de habilidades y capacidades para mejorar la competitividad de las EDS, incrementando los ingresos.

En este contexto cobran particular importancia para el desarrollo de la tesis los temas de pronóstico de la demanda, control y manejo de inventarios, capacidad de la flota, asignación y ruteo de vehículos, debido al gran potencial para reducir los costos de la cadena de abastecimiento redundando en beneficios económicos para las EDS y el cliente.

El objetivo principal de la tesis es el desarrollo de herramientas replicables para la logística en cadenas de estaciones de servicios, aborda el estudio y desarrollo de distintos modelos para optimizar las áreas de logística y control de inventarios. La solución a los modelos presentados en este documento pretende aportar sencillez a la solución de casos similares en la industria.

La estructura de la tesis inicia con un diagnóstico que recopila los datos necesarios e identifica la cadena de distribución, establece el flujo y la frecuencia de los requerimientos de volumen de combustible desde las estaciones de servicio, se identifica la capacidad de almacenamiento y el nivel de inventario de las EDS, la capacidad actual de la flota y las rutas de abastecimiento. Con esta información se define la línea base para el trabajo de optimización.

A continuación se identifican las acciones, metodologías y/o técnicas que permiten optimizar la cadena de abastecimiento a través del estudio de trabajos y literatura existentes. Para potencializar el estudio se revisan las mejores prácticas de la industria y se analizan cómo son utilizados los nuevos desarrollos en el mercado.

Seguidamente se proponen metodologías para optimizar la capacidad de almacenamiento y el nivel de inventario de las EDS, la capacidad y flexibilidad de la flota, y el tamaño de los lotes y frecuencias de entrega de combustibles.

Posteriormente se propone el desarrollo de una herramienta computacional para modelar y optimizar la capacidad de almacenamiento y nivel de inventario de las EDS, la capacidad y flexibilidad de la flota, el tamaño de los lotes, frecuencias de entrega y destinos de manera que facilite la toma de decisiones al gerente de operaciones.



Finalmente se presentan los resultados más relevantes con las conclusiones y recomendaciones que de estos se desprenden.

## **2. PROBLEMA DE INVESTIGACION**

La falta de planeación de la demanda, la infraestructura ociosa de almacenamiento, sumado a las operaciones ineficientes de distribución y transporte, aumentan el capital de trabajo de todos los agentes de la cadena, que desde luego, se traduce en aumento de márgenes o sobrecostos al consumidor final. La tarea está en analizar cada uno de los eslabones de la cadena y desde la óptica del minorista, optimizar los procesos que estén bajo su control minimizando los costos, de tal manera que pueda trasladar parte de los beneficios al consumidor final para mejorar la competitividad.

En la actualidad se ven en el mercado múltiples opciones de software y hardware que dan solución puntual a las deficiencias operativas de los diferentes eslabones de la cadena pero ninguna que integre las necesidades de los diferentes actores.

### **2.1 Enunciado del problema**

Como consecuencia del planteamiento anterior se ve la necesidad de integrar con herramientas tecnológicas y computacionales las mejores prácticas del mercado para el transporte de combustible desde la planta de abastecimiento hasta la estación de servicio, minimizando las pérdidas asociadas al transporte por disponibilidad ociosa. Se analizarán los costos reales y se optimizará de tal forma que pueda asegurar un aumento en la rentabilidad.

Para un mejor entendimiento de la situación es necesario conceptualizar la cadena de abastecimiento e identificar los costos asociados con la operación en cada uno de los eslabones de la cadena desde el aprovisionamiento, transporte y distribución, hasta el almacenamiento y consumo, así como de las relaciones y restricciones primarias que se establecen entre los mismos. Entender los beneficios de administrar apropiadamente los inventarios de combustible con un eficaz abastecimiento, de tal manera que no sufra ruptura y se puedan reducir los costos totales y en gran medida mejorar el nivel de servicio del sistema.

### 2.1.1 La empresa

La empresa tiene una unidad de negocio encargada del suministro de combustibles responsable de gestionar la compra, el transporte y la entrega en cada EDS. De acuerdo con la demanda y capacidad de almacenamiento, diariamente se abastecen entre 50 y 80 EDS. Este número varía dependiendo del día o época del año, alcanzando hasta 100 entregas el mismo día. A continuación se explicarán los elementos claves para el análisis de la cadena de suministro de combustibles de la compañía.

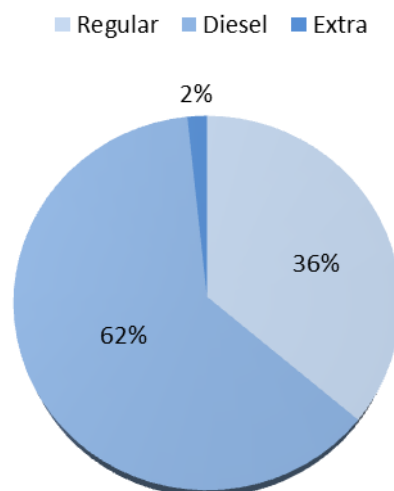
#### 2.1.1.1 Localización de la demanda

Este trabajo se desarrollará para una empresa con una red de 123 estaciones de combustible (EDS) localizadas en las principales ciudades y vías del país para comercialización de combustibles y lubricantes, distribuidas en 11 regiones geográficas con dos sedes administrativas (ver tabla 1). El suministro se realizará desde 11 plantas (ver tabla 3) ubicadas en puntos estratégicos del territorio nacional con una flota propia dedicada de 43 camiones cisternas y 55 camiones arrendados (ver tabla 3). Los productos a manejar son combustibles convencionales para motores a gasolina y diésel.

- a. **Participación en el mercado:** en la figura 1 se presenta la participación en el mercado de los diferentes productos evidenciándose la orientación de la compañía al sector industrial con la comercialización del diésel. Cabe anotar que aunque el mercado nacional tiene una ligera tendencia al consumo de diésel (53%), esta compañía tiene muy bien focalizado el segmento industrial (62% de su mercado).

Regional	No. EDS
Antioquia	13
Bajo Cauca	12
Caribe	17
Central	15
Distrito Capital	8
Llanos Orientales	5
Magdalena Medio	6
Occidente	15
Sabanas	15
Uraba	3
Valle de Aburra	14
<b>Total general</b>	<b>123</b>

Tabla 1. Distribución Regional



Gráfica 1. Distribución por producto

La tabla 2 muestra el promedio mensual de ventas por cada regional tomando como referencia el consumo de los últimos 18 meses, adicionalmente se muestra el peso de cada regional en las ventas nacionales de la compañía. La unidad de ventas está dada en galones.

<b>Demanda Nacional</b>	<b>Regular</b>	<b>Diesel</b>	<b>Extra</b>	<b>Total</b>	<b>Total</b>
Antioquia	179.339	214.678	8.083	402.099	5%
Bajo Cauca	209.817	565.880	7.465	783.163	9%
Caribe	319.838	716.289	13.379	1.049.506	12%
Central	331.797	483.587	23.880	839.264	10%
Distrito Capital	362.371	724.302	24.340	1.111.014	13%
Llanos Orientales	80.641	288.539	572	369.752	4%
Magdalena Medio	119.319	145.304	2.756	267.379	3%
Occidente	538.126	957.579	9.255	1.504.961	17%
Sabanas	322.557	259.918	8.540	591.014	7%
Uraba	51.241	33.548		84.789	1%
Valle de Aburra	599.985	969.449	46.059	1.615.493	19%
<b>Total</b>	<b>3.115.031</b>	<b>5.359.073</b>	<b>144.330</b>	<b>8.618.434</b>	<b>100%</b>

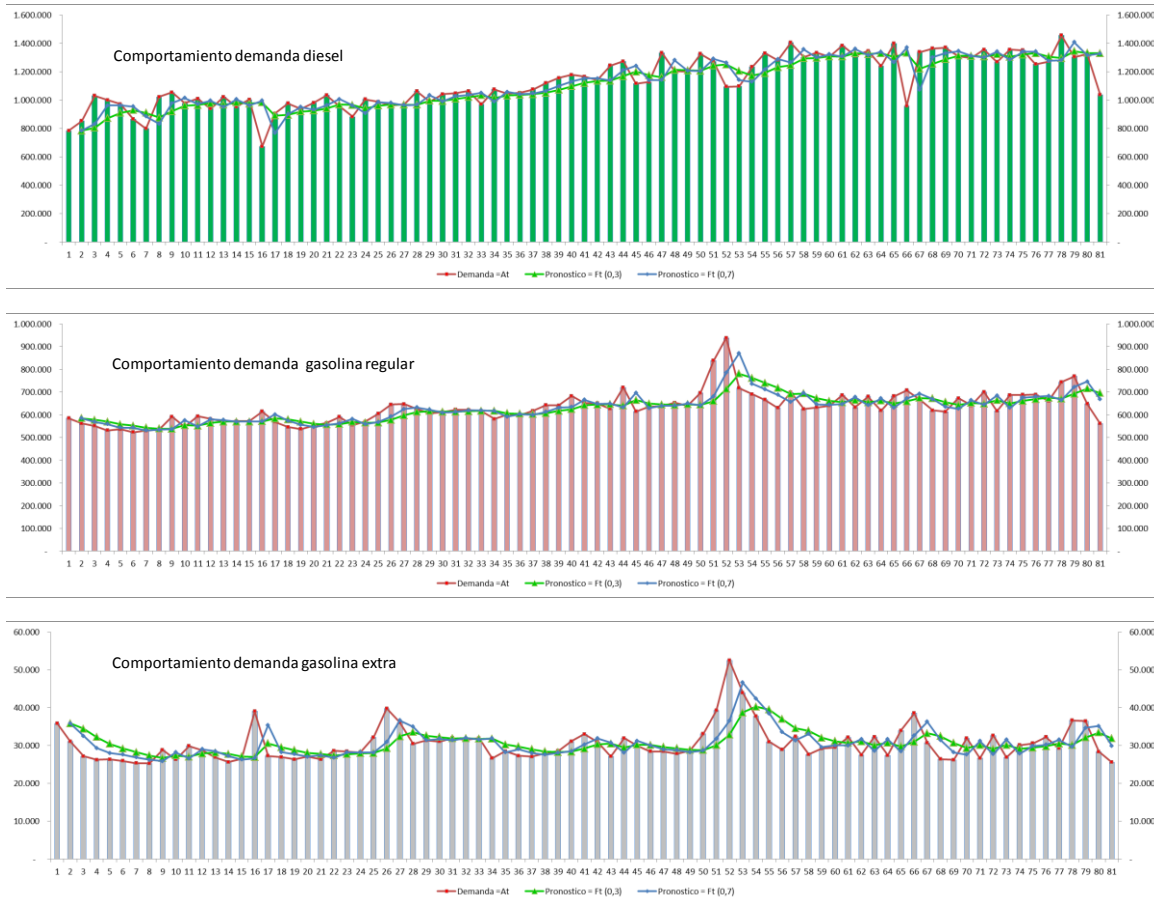
Tabla 2. Demanda mensual por regional

Por otra parte, la tabla 3 muestra que la red de estaciones de servicio tiene una capacidad instalada para almacenar 20 días de combustible, sin embargo, el nivel promedio de inventarios sólo permite garantizar ventas de combustible para 10 días con disponibilidad ociosa del 51% de su capacidad útil. Cabe destacar la rotación promedio de inventarios de las regionales de Antioquia, Bajo Cauca y Urabá con 3.9, 3.7 y 2.9 días respectivamente. Las unidades de capacidad, inventario y ventas están dadas en galones.

<b>Regional</b>	<b>Capacidad (gal)</b>	<b>Inventario (gal)</b>	<b>Ventas (gal)</b>	<b>Días de inventario</b>	<b>Rotación inventario</b>	<b>Nivel Uso (tanques)</b>
Antioquia	197.087	103.154	402.099	11,6	3,9	52%
Bajo Cauca	289.948	212.477	783.163	15,1	3,7	73%
Caribe	365.950	161.006	1.049.506	10,2	6,5	44%
Central	317.453	138.401	839.264	10,0	6,1	44%
Distrito Capital	298.214	116.677	1.111.014	7,4	9,5	39%
Llanos Orientales	119.562	47.979	369.752	6,7	7,7	40%
Magdalena Medio	98.789	38.608	267.379	10,9	6,9	39%
Occidente	469.066	232.239	1.504.961	10,5	6,5	50%
Sabanas	311.727	119.873	591.014	10,7	4,9	38%
Uraba	48.388	28.868	84.789	11,5	2,9	60%
Valle de Aburra	383.297	233.094	1.615.493	8,8	6,9	61%
<b>Totales</b>	<b>2.899.481</b>	<b>1.432.376</b>	<b>8.618.434</b>	<b>10,3</b>	<b>6,0</b>	<b>49%</b>

Tabla 3. Información general

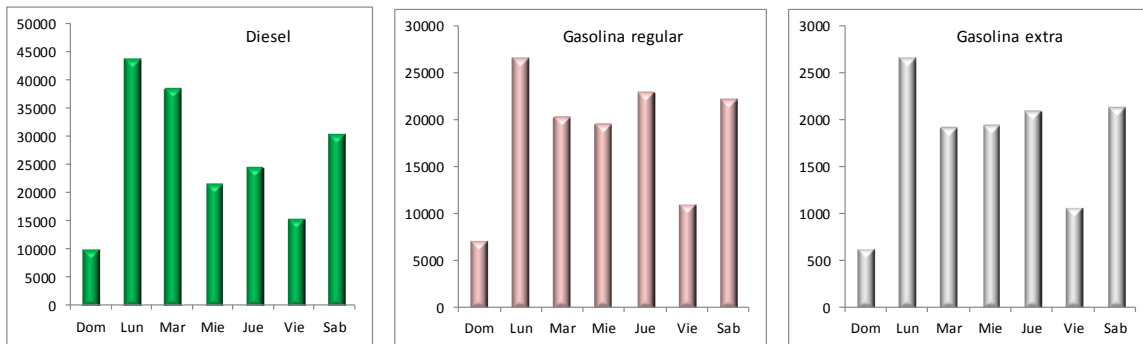
b. **Análisis de la demanda:** para determinar el comportamiento de la demanda se hace un análisis preliminar tomando como referencia las ventas de las 123 EDS en los últimos 18 meses (81 semanas), en la tabla 2 se muestra la demanda de los productos gasolina regular, diésel y gasolina extra.



Gráfica 2. Comportamiento semanal por producto

Es importante considerar que la demanda de combustible depende en gran medida de la ubicación geográfica y del perfil de los consumidores, que puede variar dependiendo del día, temporada laboral o vacacional, restricciones de vías por mantenimiento, siniestros naturales, regulación nacional, incentivos de consumo, etc.

De acuerdo a los resultados de la gráfica 2 se puede concluir que la demanda de los diferentes productos es de tipo estocástica dado que intervienen factores aleatorios imposibles de modelar o predecir, aunque el perfil de consumo semanal puede inducir con cierto grado de incertidumbre a un pronóstico general, un análisis con más detalle por producto por día (gráfica 3) cambia drásticamente esta condición, lo mismo sucede cuando el análisis se realiza individualmente por cada EDS.



Gráfica 3. Comportamiento diario por producto

Por tanto, en este trabajo solo se podrán modelar ciertas características estadísticas de los volúmenes temporales del sistema, pero no la evolución de las mismas, pues varían por la influencia de eventos impredecibles. Ante unas mismas condiciones iniciales de almacenamiento y volúmenes de venta, el sistema evolucionará cada vez de una forma distinta, pero conservando una serie de características comunes de tipo estadístico, que son las que se pueden modelar como es el caso de las tendencias de crecimiento, participación de los productos en el mercado, lotes de entrega máximos y mínimos, etc. Para este caso se supone que las ventas reales para un determinado período de tiempo varían aleatoriamente alrededor de un valor medio aproximadamente constante afectado por un factor (día, semana, mes y/o año) que es determinado del análisis histórico y las tendencias, la variabilidad de la demanda se tendrá en cuenta para determinar el stock de seguridad acorde al nivel de servicio.

### 2.1.1.2 Infraestructura de transporte

Para cubrir la demanda nacional de las EDS, la compañía tiene una flota de 98 camiones de los cuales 43 son propios operados directamente, localizados estratégicamente en las 11 plantas de las cuales abastecen el combustible para las EDS. Los camiones son de diferente tipo (sencillo hasta 3600 galones, doble troque hasta 6500 galones y tracto camión hasta 11450 galones), la configuración y capacidad de los compartimientos depende del fabricante, de las especificaciones de diseño y de los materiales de construcción. La ubicación de los camiones es asignada de acuerdo al número y volumen de órdenes de pedido de las EDS hacia las plantas. La tabla 4 muestra la relación de los camiones y su localización.

Plantas de Abasto	EDS por Regional	Camiones Propios	Camiones Arrendados
Aguazul	1	-	3
Bogotá	10	3	2
Buenaventura	6	2	3
Cartagena	59	27	15
Cartago	4	1	2
Galapa	4	1	-
Gualanday	2	-	2
Mariquita	6	2	7
Medellín	26	5	15
Pereira	1	-	1
Yumbo	4	2	5
<b>Infraestructura total</b>	<b>123</b>	<b>43</b>	<b>55</b>

Tabla 4. Distribución nacional de plantas, EDS y camiones

De acuerdo con la legislación vigente (Decreto 1609 del 31 de Julio de 2002), los camiones están certificados por las compañías mayoristas y cumplen los requisitos técnicos y de seguridad para la recepción, manejo, transporte y descarga de combustibles en todo el territorio nacional, para minimizar los riesgos, garantizar la seguridad, proteger la vida y el medio ambiente.

### 2.1.1.3 Localización de las plantas

El abastecimiento de combustible se hace desde las plantas mayoristas localizadas en las principales ciudades del país conectadas a las terminales de bombeo de Ecopetrol, de las estaciones de recibo al paso localizadas en las mediaciones de los poliductos y de las plantas desconectadas de los mayoristas. En la tabla 4 se relacionan las plantas de abasto, el número de EDS que de ellas se abastecen y la relación de camiones por planta, en la figura 1 se muestra la red nacional de Ecopetrol para el transporte de combustibles refinados. El abastecimiento de combustible para los departamentos de Córdoba, Sucre, Meta y Casanare debe hacerse a través de carro tanques desde los principales terminales ubicados en Medellín, Cartagena y Bogotá, respectivamente.

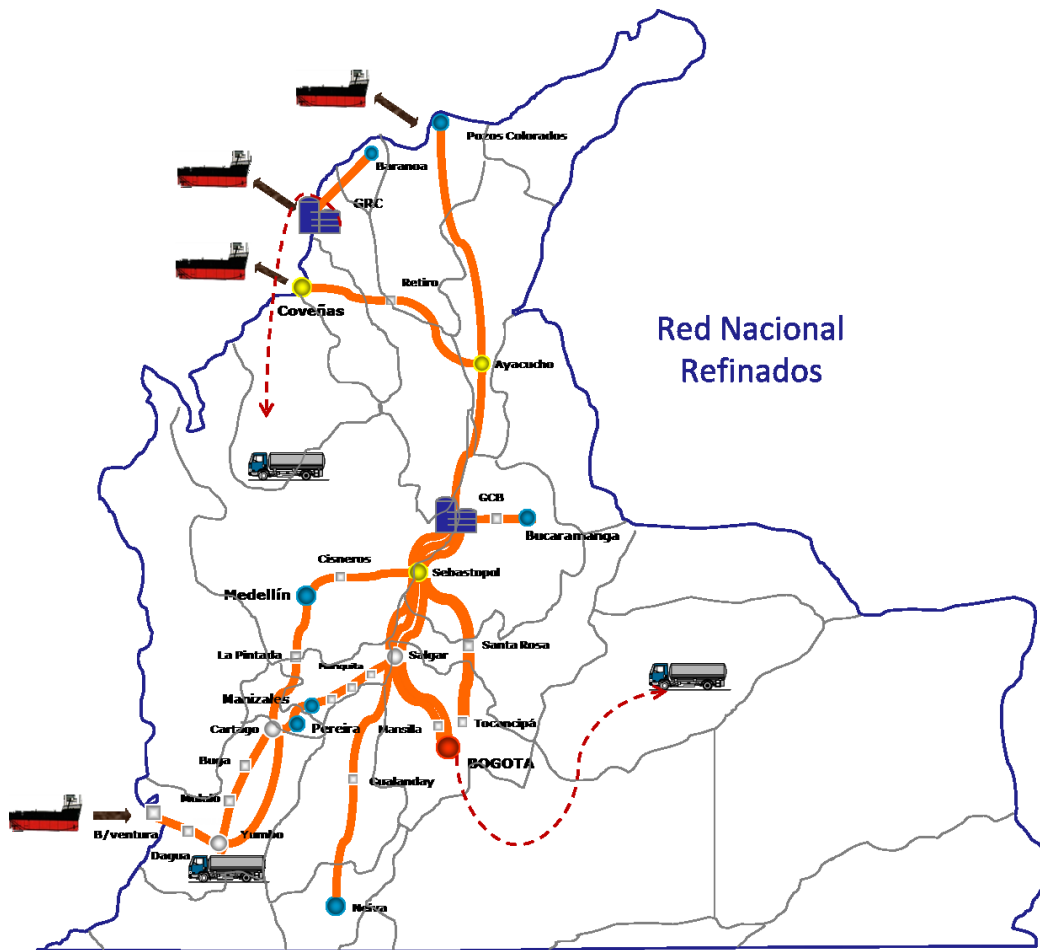


Figura 1. Red nacional de poliductos y localización de plantas de abasto

#### 2.1.1.4 Nivel de servicio

Las 11 plantas de abastecimiento gozan de alta disponibilidad de los diferentes productos salvo en situaciones de fuerza de mayor por mantenimientos correctivos y roturas de las líneas de poliductos que se generan planes de contingencia para cubrir la demanda desde otras ubicaciones, por lo general, plantas de abasto más próximas a la regional.

En la tabla 5 se muestran los acuerdos de servicios establecido para el abastecimiento y transporte de combustibles de las plantas a las EDS.

Servicio	Condicion
1. Recepción de pedidos	Respuesta al pedido 1 hora después de solicitado.
2. Entrega del producto	24 horas después de aprobado el pedido.
3. Generación de Facturas	1 hora después de que el vehículo entre a llenadero.
4. Aplicación de pagos.	3 horas después de recibir comprobante.
5. Reporte de entrega	3 días hábiles
<i>Promesa del servicio: producto correcto, calidad correcta, cantidad correcta, condicion correcta, oportunidad correcta, cliente correcto, costo correcto</i>	

Tabla 5. Niveles de servicio para abastecimiento y transporte

Adicionalmente para complementar los niveles de servicio, se analizan los siguientes factores:

**Cobertura nacional:** la localización de los 98 camiones en las 11 plantas permiten garantizar el suministro de combustible a la EDS más lejana en menos de 24 horas.

**Tiempo de entrega:** las plantas cuentan con sistemas para llenado rápido que reducen los tiempos en un 50% permitiendo optimizar la cantidad de viajes por día. Los horarios de atención de las plantas son definidos para cubrir el 70% de la demanda en la mañana por lo cual se tienen establecidas jornadas desde las 4:00 am hasta las 8:00 pm. Las entregas en la EDS son programadas de tal manera que no se afecte la venta de las horas con más demanda, cada EDS tienen un horario para la recepción de pedidos que depende de la temporada. Cabe anotar que los tiempos de tránsito están supeditados a las condiciones de las vías y la movilidad vehicular.

**Frecuencia:** la política de inventarios de la compañía está orientada a maximizar el uso de la infraestructura, por lo cual la frecuencia de entrega depende de la capacidad de almacenamiento, los días de inventario y la disponibilidad o cupo.

**Cantidad:** las plantas tienen sistemas de control y medición que permiten determinar variaciones inferiores a 0.15%, los camiones son aforados con instrumentos de precisión similar, los compartimientos son diseñados de tal forma que se minimice las pérdidas por efecto de evaporación, adicionalmente las EDS tienen instrumentos de alta precisión (consolas de inventario) que permiten determinar el volumen contenido en tanques de manera que pueda hacerse trazabilidad de la entrega.

**Calidad:** en la planta se realizan pruebas completas para asegurar la conformidad de todos los productos de acuerdo a normas internacionales para su distribución y comercialización, así mismo la reglamentación local exige a las EDS realizar pruebas básicas de rutina en la recepción de combustible y antes de iniciar la operación diaria.



**Precio:** el precio de los combustibles lo define el gobierno nacional, el precio de venta en planta viene dado por el precio del productor, los impuestos nacionales, la tarifa de transporte por poliducto y el margen mayorista. La EDS sólo puede gestionar la tarifa de transporte de la planta a la EDS que depende del volumen a transportar y la distancia. En muchos casos la tarifa de transporte por poliducto es superior a la tarifa en camión induciendo a la EDS a generar ahorros con su propio transporte.

**Servicio al cliente:** todas las compañías mayoristas tienen áreas de servicio al cliente orientado a optimizar el proceso de pedido al recaudo y a canalizar todas las variaciones que se dan por inconformidad en los acuerdos de servicio.

**Indicadores:** los indicadores de gestión comúnmente usados para medir las actividades de distribución, almacenamiento y transporte están orientados a medir; costos, nivel de inventarios, productividad, tiempos de proceso, utilización, calidad y Servicio.

#### **2.1.1.5 Configuración de las EDS**

Para el diseño de las EDS se toma de base un estudio de tráfico que permite determinar la demanda y el segmento de consumo, toma en cuenta entre otros; tipo de vía (troncal, primaria, secundaria, terciaria), ubicación (urbana, rural, industrial, comercial), tipo de vehículos (livianos, pesados), tipo de servicio (públicos, privados, transporte, carga).

La capacidad de almacenamiento se calcula tomando en cuenta la autonomía en días de inventario requerida para cubrir la demanda y la distancia hasta la planta de abasto más próxima.

La ubicación, la capacidad y configuración de los tanques es definida por el diseñador para lo cual analiza las variables que condicionan el camión a utilizar como el tipo (sencillo, doble troque, tracto camión), número de compartimientos y capacidad, de manera que pueda garantizar el suministro al menor costo sin interrumpir la operación de venta en la EDS.

En la tabla 6 se muestra la configuración de almacenamiento de combustibles de la red de EDS. La unidad de capacidad está dada en galones.

Nombre de la EDS	Regular	Diesel	Extra	Total	Nombre de la EDS	Regular	Diesel	Extra	Total
E/S ARBOLETES	9.000	8.000	-	17.000	E/S LA SEXTA	5.200	3.000	-	8.200
E/S ARENAL	5.000	5.000	-	10.000	E/S LA SIERRA	10.000	10.000	-	20.000
E/S AUTOPISTA	9.000	20.000	3.000	32.000	E/S LA URIBE	10.800	16.000	10.700	37.500
E/S AUTOSUR	19.100	14.470	4.468	38.038	E/S LA Y	20.000	20.000	10.000	50.000
E/S AVENIDA TERCERA	17.000	12.000	5.000	34.000	E/S LAS ACACIAS	8.000	12.000	4.000	24.000
E/S AYAPEL	10.500	7.000	-	17.500	E/S LAS GUADUAS	8.200	7.800	-	16.000
E/S BOCHICA	10.400	5.260	5.508	21.168	E/S LAS OLAS	6.800	36.000	3.000	45.800
E/S BONANZA	6.903	9.849	2.934	19.686	E/S LAS PALMAS	10.150	7.032	5.000	22.182
E/S BUENOS AIRES	5.200	8.000	-	13.200	E/S LAS VEGAS	5.000	20.000	5.000	30.000
E/S CANAGUARIOS	25.700	20.400	-	46.100	E/S LOS ANGELES	41.560	38.190	13.457	93.207
E/S CANDILEJAS	6.739	9.860	2.813	19.412	E/S LOS CORALES	15.080	15.867	2.978	33.925
E/S CAÑOFISTOL	5.731	5.731	-	11.462	E/S LOS LAGOS	5.000	15.000	-	20.000
E/S CASA VERDE	8.000	10.300	-	18.300	E/S LOS NARANJOS	8.800	11.700	2.700	23.200
E/S CODICALDAS	5.000	15.000	-	20.000	E/S LOS PISAMOS	7.000	10.000	3.000	20.000
E/S COOMOBUEEN	10.000	6.700	-	16.700	E/S LURUACO	10.260	5.160	-	15.420
E/S COROZAL	8.000	12.000	4.000	24.000	E/S MANGLARES	12.000	12.000	-	24.000
E/S COSTA DE ORO	10.000	20.000	10.000	40.000	E/S MARIA AUXILIADORA	11.680	8.700	3.000	23.380
E/S DON BOSCO	7.000	12.000	-	19.000	E/S MARIA LA BAJA	10.000	10.000	-	20.000
E/S DON QUIJOTE	5.500	5.500	-	11.000	E/S MATECAÑA	20.000	10.000	10.000	40.000
E/S EL BOSQUE	6.600	10.000	3.000	19.600	E/S MOMPOX	10.420	8.890	-	19.310
E/S EL CARMEN	10.000	8.000	-	18.000	E/S MONTERIANA MOVIL		10.000	-	10.000
E/S EL CASTILLO	6.800	14.500	2.800	24.100	E/S MURILLO	10.000	6.000	5.000	21.000
E/S EL CERRITO	7.000	5.000	3.000	15.000	E/S NUEVO HORIZONTE	30.898	41.360	-	72.258
E/S EL DORADO	12.000	12.000	-	24.000	E/S OLAYA HERRERA	15.000	5.000	10.000	30.000
E/S EL ESFUERZO	10.000	10.000	10.000	30.000	E/S ORIENTAL	4.968	8.120	-	13.088
E/S EL FRESNO	10.000	7.000	1.070	18.070	E/S PARQUE INDUSTRIAL	5.500	18.000	-	23.500
E/S EL LEGAL	10.900	4.850	-	15.750	E/S PASACARIBE		5.530	-	5.530
E/S EL LIBANO	13.950	5.500	1.500	20.950	E/S PEDREGAL	8.000	10.800	4.000	22.800
E/S EL LITORAL	20.000	20.000	-	40.000	E/S PORTAL DEL NORTE	12.000	8.000	4.000	24.000
E/S EL PIÑAL	8.766	23.300	-	32.066	E/S PROVIDENCIA	8.200	8.200	-	16.400
E/S EL PORTICO	10.000	7.000	3.000	20.000	E/S PUERTO BELGICA	7.000	17.000	-	24.000
E/S EL PRADO JERICO	6.000	6.000	-	12.000	E/S PUERTO DE FRASQUILLO	10.000	5.000	-	15.000
E/S EL PRADO SANTANA	3.300	3.300	-	6.600	E/S PUERTO LIBERTADOR	8.125	8.192	-	16.317
E/S EL RODEO	20.000	9.700	5.000	34.700	E/S PUERTO NUEVO	14.500	14.500	-	29.000
E/S EL TERMINAL BOGOTA		72.000	-	72.000	E/S PURISIMA	9.300	3.100	-	12.400
E/S EL TERMINAL CALI	20.000	30.000	-	50.000	E/S QUITO 2000	9.550	14.466	4.460	28.476
E/S EL TRAPICHE	8.760	30.920	2.830	42.510	E/S REGENCIA	15.000	11.979	-	26.979
E/S EL VIAJERO	10.000	10.000	5.000	25.000	E/S REPELON	8.200	8.200	-	16.400
E/S FLUVIAL LAS MERCEDES	5.850	11.600	-	17.450	E/S SABANAS	9.000	12.000	3.000	24.000
E/S FLUVIAL Y TERRESTRE	30.000	30.000	-	60.000	E/S SAN BERNARDO	10.000	4.800	-	14.800
E/S GALERAS	8.200	4.650	-	12.850	E/S SAN CRISTOBAL	12.000	10.000	5.000	27.000
E/S GRAN CHINAUTA	8.000	10.000	4.000	22.000	E/S SAN ESTEBAN	6.900	14.800	-	21.700
E/S GUAYABAL	8.800	3.400	3.400	15.600	E/S SAN GABRIEL	5.000	4.000	3.000	12.000
E/S LA APARTADA	5.000	5.000	-	10.000	E/S SAN JORGE	20.000	20.000	5.000	45.000
E/S LA CANDELARIA	20.000	10.000	10.000	40.000	E/S SAN JOSE	8.000	5.467	5.000	18.467
E/S LA CARBONERA	10.000	10.000	-	20.000	E/S SAN LUIS	7.000	5.000	-	12.000
E/S LA CASTELLANA	12.000	12.000	-	24.000	E/S SAN ONOFRE	20.000	10.000	-	30.000
E/S LA ENCRUCIJADA	10.000	10.000	-	20.000	E/S SAN RAFAEL	13.900	19.860	5.950	39.710
E/S LA FLORIDA	9.600	7.000	3.000	19.600	E/S SAN ROQUE	12.000	7.000	-	19.000
E/S LA GALAN	10.000	6.800	3.800	20.600	E/S TEXACO 09	25.000	5.000	5.000	35.000
E/S LA MILAGROSA	15.305	8.395	-	23.700	E/S TEXACO 30 YUMBO	10.000	15.000	5.000	30.000
E/S LA NUBIA	8.133	11.330	1.100	20.563	E/S TEXACO EXPOSICIONES	10.000	12.000	5.000	27.000
E/S LA PALMA	10.000	9.000	3.000	22.000	E/S URE	5.350	4.500	-	9.850
E/S LA PERLA	10.000	15.000	5.000	30.000	E/S VASQUEZ COBO	12.500	5.000	5.000	22.500
E/S LA PLAYA	10.527	8.679	-	19.206	E/S VILLA NUEVA	5.500	8.500	-	14.000
E/S LA PORTUARIA No 1	5.000	30.000	-	35.000	E/S VILLA GRANDE	6.000	12.000	-	18.000
E/S LA QUINTA	9.000	10.000	3.000	22.000	E/S VILLA MARIA	7.000	7.000	3.000	17.000
E/S LA ROMELIA	12.000	20.000	-	32.000	E/S ZARAGOZA	5.700	28.000	-	33.700
<b>Total</b>	<b>595.264</b>	<b>728.994</b>	<b>111.223</b>	<b>1.435.481</b>	<b>Total</b>	<b>623.041</b>	<b>690.713</b>	<b>150.245</b>	<b>1.463.999</b>

Tabla 6. Configuración de almacenamiento de EDS

## 2.2 Formulación del problema

Los combustibles livianos como las gasolinas y el diésel tienen la propiedad de comprimirse o expandirse en función de la temperatura. Las mezclas con los biocombustibles como etanol y biodiesel aumentan la volatilidad de los productos. Sumado a lo anterior, las operaciones de recepción, transporte y almacenamiento, generan diferenciales de temperatura que se reflejan en la variación de la densidad afectando el volumen que en la mayoría de los casos se traduce en faltantes. Por lo anterior, todas las operaciones asociadas al manejo del combustible deben optimizarse a fin de minimizar las potenciales pérdidas.

Conocidas la demanda, el cupo de combustible en las estaciones de servicio, la capacidad de los camiones, la disponibilidad, las distancias y tarifas del transporte, el problema consiste en optimizar los inventarios, asignar los lotes de productos a cada camión y asignar las rutas a los vehículos asegurando el menor costo para atender la demanda en las estaciones de servicio de tal manera que se garantice:

- El nivel óptimo de inventario con cero rupturas.
- La flota y capacidad adecuada para atender la totalidad de la demanda.
- Las condiciones operativas para maximizar la utilización de los equipos.

Para asegurar resultados confiables y sostenibles, la solución al problema deberá cubrir las siguientes preguntas:

- ¿Tiene la compañía el conocimiento del negocio, la normatividad, y las oportunidades de operación bajo los mejores estándares aplicables de la industria?
- ¿Tiene la compañía buenas prácticas de operación para garantizar el almacenamiento y control adecuado de inventarios de combustible?
- ¿Tiene la compañía las habilidades técnicas para definir el tipo y capacidad de la flota, así como el conocimiento para la asignación de rutas de abastecimiento?
- ¿Tiene la compañía la orientación del servicio para entregar al cliente: el producto correcto, en el lugar correcto, con la cantidad correcta, en la condición correcta, en el momento correcto, para el cliente correcto, con el costo correcto?

Considerando que el éxito en la gestión logística depende de la capacidad de integración (información y sistemas, proveedores y clientes, recursos y decisiones, etc.) se debe buscar la posibilidad de integrar los sistemas de información de la flota de transporte y el sistema de gestión de las EDS, con los modelos matemáticos y técnicas de optimización necesarias, de tal manera que facilite la toma de decisiones. Por lo anterior, se hace necesario plantear la siguiente pregunta para la investigación:

¿Es posible desarrollar una herramienta computacional para compartir e integrar de manera eficiente los actores de una cadena de suministro de combustibles en Colombia, mejorando su competitividad?

### **3. OBJETIVO DE LA INVESTIGACION**

#### **3.1. Objetivo general**

Diseñar un Sistema de Soporte de Decisiones para optimizar la cadena de suministro de una red de estaciones de combustibles en Colombia con el uso de métodos analíticos robustos de optimización para facilitar la toma de decisiones y aumentar la productividad y eficiencia de las operaciones de dicha empresa.

#### **3.2. Objetivos específicos**

- Realizar un diagnóstico de la capacidad actual de la flota, rutas de abastecimiento y niveles de inventario de una red de estaciones de combustible.
- Identificar las acciones, metodologías y/o técnicas que permitan optimizar la cadena de abastecimiento de una red de estaciones de combustible.
- Definir criterios y una metodología para la optimización de la capacidad actual de la flota, rutas de abastecimiento y niveles de inventario de una red de estaciones de combustible.
- Diseñar y desarrollar una herramienta de software que permita modelar y optimizar los inventarios de la red de EDS y la flota de camiones para distribución y transporte de combustible de las plantas de abastecimiento a las EDS, para mejorar la toma de decisiones de la gerencia de operaciones.
- Generar lineamientos y políticas corporativas orientadas a optimizar la toma de decisiones en la cadena de abastecimiento.

## 4. JUSTIFICACION Y DELIMITACION DE LA INVESTIGACION

### 4.1. Justificación

Con el trabajo se busca realizar un análisis de las técnicas relacionadas con la Administración de las Operaciones logrando así, comprender cuáles son las ventajas competitivas que se pueden obtener luego de alcanzado una eficiente optimización de los recursos. A lo largo del trabajo se redefinirá la situación de la compañía, sus estrategias, la forma cómo estas estrategias se ven plasmadas en ventajas significativas tanto para la empresa, sus accionistas, sus empleados y sobre todo para sus clientes.

El desarrollo del trabajo inicia con una revisión general de los principales elementos de la cadena de suministro, se profundizará en los temas de gestión de inventarios, rutas de abastecimiento, flota de transporte y la configuración de la operación para la toma de decisiones en casos de contingencia, con el fin de mejorar las actividades más sensibles de distribución buscando la excelencia operativa de la compañía. Adicionalmente se deberá:

- Profundizar en el área de transporte terrestre, tanto en el conocimiento del negocio, la normatividad, y las oportunidades de operación bajo unas buenas prácticas aplicables.
- Analizar metodologías en logística que fomenten la orientación de servicio al cliente como las 7R's (Hugos, 2003), que buscan entregar al cliente: el producto correcto, en el lugar correcto, con la cantidad correcta, en la condición correcta, en el momento correcto, para el cliente correcto, con el costo correcto.
- Profundizar en las buenas prácticas de operación de almacenamiento de combustible, que representa generalmente una fuente de “pérdidas” en toda la cadena.

La optimización de la cadena para que el negocio pueda crecer, aumentar su rentabilidad y asegurar su sostenibilidad en el tiempo no puede darse sin antes definir un plan para incrementar la productividad, éste deberá basarse en la implementación de indicadores y metas que evidencien la gestión individual y del proceso. Para ello deberá considerarse un plan de capacitación orientado a concientizar y motivar al personal sobre los beneficios de las mediciones en calidad, medida, transporte, costos, tiempos, eficiencia e innovación tecnológica usando herramientas tecnológicas que permitan controlar los indicadores de manera apropiada.

Siendo conscientes de las restricciones de infraestructura vial del país, se deberá analizar para optimizar el sistema de transporte:

- Diseño de la red de distribución (localización de la demanda, almacenamiento, medios, rutas y unidades de transporte)
- Selección de tipo y forma de transporte
- Decisión de flota propia o tercerización
- Diseño de la flota
- Selección de equipos y proveedores
- Acuerdos de servicio, nivel de servicio
- Contrataciones y administración de contratos
- Programación de vehículos
- Ejecución y control (monitoreo, contingencias)
- Control de entregas (a tiempo, completo, en el lugar exacto, 7Rs.)
- Procesamiento y solución de novedades
- Gestión de activos a través de mantenimiento

Bajo la premisa de optimizar el capital de trabajo en toda la cadena de suministro se deberá analizar los inventarios partiendo de los pronósticos de ventas de corto plazo, cantidad, tamaño y localización de los puntos de pedido, niveles de servicio, asegurar inventario mínimo y suficiente sin rupturas, aplicar en lo posible estrategias de justo a tiempo.

Partiendo de la necesidad de optimizar el uso de los activos se deberá analizar el almacenamiento de las estaciones de servicio para lo cual se requiere rediseñar la red logística desde los centros de distribución (plantas de abastecimiento), optimizar la configuración del espacio y almacenamiento de las estaciones de servicio, asegurar la confiabilidad del inventario, utilizar equipos más eficientes (mayor capacidad, menor consumo).

Buscando satisfacer las necesidades del cliente se analizará el alcance de todo el servicio, desde el procesamiento óptimo de las órdenes hasta el cumplimiento de niveles de servicio.

Para asegurar un aprovisionamiento óptimo de productos se deberá disminuir la incertidumbre que genera las compras por lo cual se analizará:

- Selección de proveedores y fuentes de suministro mayorista
- Programación de compras
- Determinación de cantidades para la compra y puntos de reabastecimiento

- Analizar el procesamiento de pedidos desde el recibo en planta hasta la entrega en la estación de servicio

Todo lo antes expuesto debe integrarse en soluciones tecnológicas que ayuden y motiven a que las personas se sientan más eficientes en su ambiente laboral, mucho más productivas y emprendedoras, orientadas al mejoramiento continuo a todo nivel desde las áreas internas de la compañía hasta los clientes y consumidores finales.

#### **4.2. Delimitación de la investigación**

Dada la complejidad para abordar la totalidad de las EDS, este trabajo se desarrollará para una regional con una red de 14 estaciones de combustible (EDS) localizadas en el área metropolitana de Medellín (ver tabla 1). El suministro se realizará desde la planta conjunta La María, en la misma ciudad, con flota propia dedicada de 5 camiones cisternas y 15 camiones arrendados (ver tabla 3). Los productos a manejar son combustibles convencionales para motores a gasolina y diésel.

La información contenida en las bases de datos relacionadas será de manejo confidencial por lo cual los datos mostrados estarán afectados por un factor, sin embargo, se tratará de conservar los datos en las fuentes originales donde sea posible.

La escogencia de la regional será definida con la aplicación de la técnica de optimización DEA (Análisis Envolvente de Datos) que permite identificar las unidades eficientes e ineficientes y determinar qué variables están afectando la eficiencia, y a partir del “benchmarking” (identificar los mejores procedimientos) fijar metas u objetivos a las unidades encontradas como ineficientes de tal manera que puedan replicarse las buenas practicas a todas las regionales de la compañía.

### **5. MARCO DE REFERENCIA**

#### **5.1. Marco teórico**

El concepto de cadena de suministro aparece claramente en los trabajos de Forrester cuando sugirió que el éxito de las empresas dependía de la interacción entre el flujo de información, materiales, pedidos, dinero, mano de obra y equipos (Forrester, 1961), y declaró que la comprensión y control de estos flujos es el trabajo principal de la gestión.

La Gestión de la Cadena de Suministro (Supply Chain Management - SCM), es definida por el Council of Logistics Management (2007) como *“la coordinación sistemática y*

*estratégica de las funciones de negocio tradicional y las tácticas utilizadas a través de esas funciones de negocio, al interior de una empresa y entre los diferentes procesos de la cadena de suministro, con el fin de mejorar el desempeño en el largo plazo tanto de la empresa individualmente como de toda la cadena de suministro en general”*

De acuerdo a la definición anterior resulta imperioso analizar las herramientas tecnológicas que facilitan el intercambio de información continua entre los procesos de la cadena de suministro, y el desarrollo de las TIC's como el medio que facilita la toma de decisiones en cada uno de los eslabones, creando y manteniendo relaciones de mayor colaboración entre proveedores y clientes.

Se puede inferir que la SCM tiene como gran objetivo garantizar las interacciones adecuadas de los elementos logísticos, con el fin de que en la cadena de suministro se presente un flujo de productos e información óptimos, que permita la reducción de costos y el aumento de la satisfacción de los clientes. Cabe destacar, que las TIC's se han convertido en un medio facilitador para que la SCM cumpla sus objetivos, debido a que éstas permiten el almacenamiento y transmisión de información logística, que posteriormente se convierte en la base para la toma de decisiones.

La SCM es un medio para que la empresa mejore la competitividad y genere valor a los clientes. Por lo cual “Una empresa que reduce costos y satisface las necesidades de los clientes, depende de una cadena de suministro bien gestionada, integrada y flexible que se maneja en tiempo real y cuya información fluye de manera eficiente” (Price Water House Coopers, 2007) . Por lo tanto, “Una efectiva gestión de la cadena de suministro implica el intercambio de información y bienes, entre proveedores y clientes, incluyendo fabricantes, distribuidores, y otras empresas que participan en el funcionamiento de la cadena de suministro” (Gunasekarana, 2008). Lo cual hace pensar que este objetivo se está logrando gracias a la mejor administración y facilidad en el intercambio de información en la cadena de suministro, debido a la diversidad y avances de las TIC's logísticas. Se podría expresar que la SCM es una “Estrategia, encargada de gestionar conjuntamente las actividades, procesos y agentes de la cadena de suministro” (Urzelai Inza, 2006).

A continuación se presentan algunas soluciones tecnológicas desarrolladas a nivel global y su aplicación.

### **5.1.1. Tecnologías de la información orientadas al aprovisionamiento**

**EDI (Electronic Data Interchange);** IBM, la define como “la transferencia de información entre empresas utilizando mensajes electrónicos con contenidos estandarizados, los cuales fueron previamente establecidos entre las partes” (IBM, Redbooks, 2003).

Urzelai, Inza (2006) afirma que si las transacciones e intercambio de información entre empresas son automatizadas y normalizadas por medio del EDI, se puede mejorar el



aprovisionamiento y la SCM en general, debido a que posiblemente se reduce el tiempo de envío, recepción de documentos, disminución de costos, y se mejorarán las relaciones comerciales entre las partes que intervienen. El EDI presenta desventajas, tales como los altos costos de implementación y complejidad de la infraestructura física, lo cual, no ha permitido que muchas empresas pequeñas lo utilicen.

**E-Procurement;** es definido por Aberdeen (1998), como una herramienta que permite automatizar los procesos tácticos y el flujo de información asociados con el aprovisionamiento. De acuerdo con Integrated Technical Resources Group ITRG (2002), las soluciones e-procurement basan la optimización del proceso de aprovisionamiento (productos estandarizados y altos volúmenes), a través de la utilización de catálogos para la realización de pedidos, la automatización de la aprobaciones de órdenes de compra, y establecimiento de controles para hacer cumplir las políticas de aprovisionamiento establecidas para compradores y proveedores.

Las ventajas del e-procurement radican en que está soportada en Internet e Intranet y se basa en las mejores prácticas de aprovisionamiento, lo que permite optimizar las operaciones de compra y venta entre las empresas, lo cual, maximiza los intercambios de bienes e información a través de toda la cadena de suministro de una forma ágil y oportuna, y se crea una sola interfaz de comunicación con los proveedores. Una de las principales desventajas que presenta es que requiere la utilización de catálogos electrónicos para la realización de pedidos, por lo que en ocasiones se presentan errores de precios y productos.

**VMI (Vendor Managed Inventory) /CRP (Continuous Replenishment Program);** Para Urzelai, Inza (2006), el VMI y CRP, son un sistema de aprovisionamiento que se basa en el intercambio de información (Internet/EDI), de tal forma que es el propio proveedor quien gestiona los niveles de stock de su empresa cliente, y el que genera los pedidos. Según Boonet (2001), el VMI se presenta cuando el proveedor controla los inventarios del cliente, y reabastece las cantidades necesarias

Según Schutt (2001) algunas de las ventajas de la utilización del VMI son: Manejar más eficientemente el reaprovisionamiento, reducción de costos de transporte, disminución de cantidad de inventarios y mejoras en el sistema de demanda (Forecast) en la empresa del cliente. Adicionalmente, Ballou, Ronald (2004) explica que la aplicación del VMI mejora la estimación de pronósticos y la administración y control de la producción e inventarios. Mientras las desventajas pueden ser: la poca confianza por parte de las empresas para delegar tal responsabilidad a sus proveedores y la falta de infraestructura tecnológica de muchas empresas para garantizar el flujo de información de consumos e inventarios para realizar las operaciones. El CRP es considerado por Urzelai, Inza (2006) como una parte del VMI, y maneja la información para que el reaprovisionamiento sea continuo.

### 5.1.2. Tecnologías de la información orientadas a la logística interna

**Programas ERP - Enterprise Resource Planning** – Planificación de los Recursos Empresariales, tales como el "SAP" o el "J.D. Edwards", permiten integrar las operaciones a través de módulos interconectados de planificación, gestión y control de todas las áreas de la compañía. Para SAP, principal proveedor en el mundo de ERP, define al ERP como una arquitectura de software empresarial que facilita e integra información entre las funciones de manufactura, logística, finanzas y recursos humanos, SAP (2008). Para Aladwani (2001), el ERP es un conjunto de programas integrados que apoya las principales actividades organizacionales tales como manufactura y logística, finanzas y contabilidad, ventas y mercadotecnia y recursos humanos.

Las ventajas de los ERP residen principalmente en la utilización de una única base de datos, lo que facilita la comunicación e intercambio de información entre las diferentes áreas de la empresa y evita la redundancia y duplicidad de la información. Adicionalmente, su arquitectura en módulos integrados e independientes entre sí, facilitan la modificación y ajuste de los parámetros y estructuras de información. Las principales desventajas que presentan en su uso son las grandes inversiones de dinero y altos porcentajes de fracasos en proyectos de implementación, debido a la no re-estructuración de los procesos de negocio, y a la mala gestión del cambio de la cultura organizacional (Maldonado, 2008).

Una nueva generación de sistemas denominados ERP II, ha evolucionado para producir integraciones con sistemas para manejo de relaciones con los clientes (CRM), lo cual permite la colaboración a lo largo de la cadena de suministro, y a través de internet, se permite al usuario, el mando del sistema desde cualquier lugar del mundo (Zapata, Arango & Adarme, 2010).

**MRP I y MRP II;** Según Berenguer, J. & Ramos, J. (2003), el MRP I es una técnica para calcular la demanda interna y se considera como un software para la planificación y control de la producción y las compras, mientras el MRP II tiene objetivo planificar y controlar todos los recursos internos de la empresa desde fabricación-producción, marketing, finanzas e ingeniería.

El MRP I mejora la eficiencia y eficacia de la logística interna debido que permite: a) analizar los requisitos de componentes de cada producto; b) considerar el nivel de inventario de cada uno ellos; c) Tener en cuenta los lead times; d) emitir informes sobre elementos a comprar o fabricar, en qué cantidad, cuándo se deben efectuar las órdenes de producción o pedido y qué órdenes reprogramar o anular. Adicionalmente, tiene la ventaja de contener módulos de planificación de la capacidad, CRP (Capacity Resource Planning), y aplicativos de finanzas.

El MRP (I-II) mejora de forma general la gestión de inventarios y producción, lo cual aumenta el aprovechamiento de los recursos económicos y la rotación de activos. Su

principal desventaja es que se requiere la documentación de la estructura de los productos y la coordinación de funciones entre los departamentos de la empresa.

**RFID (Radio Frequency Identification);** Es un término genérico para denotar todas las tecnologías que usan como principio ondas de radio para identificar productos de forma automática, está involucra el uso de etiquetas especiales o TAGS que emiten señales de radio a unos dispositivos llamados lectores, encargados de recoger las señales, GS1 Colombia (2008). Son equipos de transmisión de datos en vehículos de transporte, utilizados con el mismo fin que los sistemas de rastreo satelitales.

Las principales ventajas de utilización en logística interna son: a) Mayor capacidad de memoria de almacenamiento de datos respecto al códigos de barras; b) la información contenida en los tags es variable, por lo cual las etiquetas son reutilizables, mientras los códigos de barras no; c) los tags pueden ser leídos de forma simultánea, mientras el código de barras debe ser leído uno por uno, y d) no es necesario el contacto visual entre el lector y la etiqueta (Urzelai, Inza, 2006); e) las actualizaciones del stock y las ubicaciones se realizan en tiempo real, g) el número de errores se reduce prácticamente a cero. Actualmente las desventajas del RFID se basan en los altos costos del sistema, y la falta de implementación en la industria que todavía lo ve un poco ajeno (Mauleón, Mikel 2003).

El RFID tiene gran potencial de uso, debido que facilita y minimiza el tiempo de la identificación de productos, lo que facilita operaciones de ubicación y extracción de productos en el almacén. Adicionalmente, se convierte en la base de la implementación del EPC que es un estándar internacional de codificación, que será analizado posteriormente dentro del documento.

### **5.1.3. Tecnologías de la información orientadas a la logística de distribución**

**TMS (Transportation Management System);** El TMS optimiza los recursos de transporte conciliando su menor costo con los estándares necesarios de servicios al cliente, y los requisitos de los otros agentes de la cadena de suministro (Arcweb, 2008).

Según el Advisory Group (2007), el TMS trae las siguientes ventajas: a) Facilita el abastecimiento de servicios de transporte; b) mejora la planeación y optimización de actividades de transporte; c) permite rastrear y dar seguimiento al cargamento; d) Permite la consolidación de cargas, cuando se tienen pedidos de pequeño tamaño, lo cual permite la reducción de costos de transporte, y mejora en la eficiencia del proceso; e) facilita la atención de reclamos y solicitudes de los clientes, debido a que por medio de este sistema es posible realizar trazabilidad a los cargamentos, por lo cual, si se presenta una inquietud o reclamo el sistema lo resuelve casi automáticamente. Las desventajas que presentan el TMS son: a) altos costos de implementación, debido que se adquiere una herramienta poderosa de análisis y simulación y b) re-estructuración del proceso de transporte.

**CRM (Consumer Relationship Management);** El CRM o Administración de Relaciones con el Consumidor, es definido por Microsoft, como una estrategia que permite a las empresas identificar, atraer y retener a sus clientes (Microsoft, 2008).

El CRM cubre los procesos de mercadeo, ventas y servicio al cliente. Para Berenguer, J. & Ramos, J. (2003), algunas de las ventajas del CRM son la facilidad para administración de la información relacionada con los clientes y aumento de su satisfacción, reducción de costos y mejora en la productividad debido a la automatización de actividades. Entre las desventajas del CRM, se considera la dificultad del cambio de la cultura organizacional para enfocarla al cliente, y altos costos de implementación. El CRM mejora la gestión de la SCM debido a que permite conocer información acerca de las necesidades y satisfacción de los clientes, lo cual puede mejorar la estimación de la demanda.

**ECR (Efficient Consumer Response);** ECR o Respuesta Eficiente al Consumidor es un modelo estratégico en el cual clientes y proveedores trabajan en forma conjunta para entregar el mayor valor agregado al consumidor final. La Unión Europea, lo definió como el trabajo conjunto de las empresas para satisfacer los deseos de los consumidores de manera correcta, rápida y con bajo costo (ECR Europea, 1995).

El funcionamiento del ECR está basado en la utilización de código de barras y el EDI, lo cual permite la identificación y seguimiento a los productos, mejorar la trazabilidad y agilizar el intercambio de información entre el cliente-proveedor (GS1 Colombia, 2008).

Finalmente, una de las principales quejas de las empresas que han implementado ECR, son el aumento en los costos debido a la resistencia al cambio y mal servicio debido a cambios estructurales.

**GPS (Global Position System);** El sistema de posicionamiento global (GPS) es un sistema de satélites utilizando navegación que permite determinar la posición de un objeto con exactitud (Correa, P., 2002). La aplicación del GPS en la cadena de suministro, se enfoca al monitoreo de cargas y camiones, sus ventajas son la reducción de costos debido al mejor control que se podría realizar sobre la flota de transporte y aumento en la seguridad debido a la trazabilidad a los productos

#### **5.1.4. Otro software de aplicación general**

Algunos programas de procesamiento de órdenes de compra y/o despacho, de detección de cuellos de botella dinámicos, de control de inventarios y almacenes, etc. Diseños especiales para vehículos de transporte de carga, por ejemplo, aquellos que disponen de compartimentos separados para el transporte de distinto tipo de mercancías, con diferentes exigencias de temperatura que son reguladas por termostatos individuales.

**Programas de simulación (What if) y Optimización**, específicos o de diseño personal (por ejemplo con Excel), como programación lineal, conformación de escenarios, métodos heurísticos, teoría de las restricciones, etc. Permiten simular todos los procesos de la cadena, ajustar las variables y generar acciones de mejoramiento en diferentes escenarios antes de implementar la herramienta.

**APS - Advanced Planning and Scheduling, Planeamiento y Programación Avanzada**: este sistema es un verdadero soporte para las decisiones de una cadena de suministros, más que un sistema transaccional. Es un sistema de optimización de toda la cadena, generando planes de demanda y de requerimientos de materiales basados en la disponibilidad de recursos y las limitaciones de todas las empresas de la cadena de suministro (Monterroso, Elda, 1998).

De acuerdo con Vasani, Roberto (1998), los beneficios generados por este sistema son: la modelización dinámica de todos los aspectos de la cadena logística, la visibilidad en tiempo real de problemas surgidos respecto del plan, la generación automática de los requerimientos de abastecimiento, el análisis del impacto de alternativas de suministro de bienes y servicios sobre el costo total de la cadena logística, la vinculación de la demanda con el planeamiento de la producción y la logística de la empresa y el cálculo de la solución óptima. Es tal vez la herramienta más completa que existe para integrar las operaciones de la cadena de suministro.

Monterroso, Elda (1998) afirma que la teoría de las restricciones indica que para optimizar el funcionamiento de un sistema se deben identificar los recursos cuellos de botella y coordinar el ritmo de trabajo de todos los centros, de acuerdo al ritmo que marquen dichos recursos. En consecuencia, resulta conveniente para el caso de estudio (Cadena de Suministro EDS) desarrollar soluciones tecnológicas para la optimización del problema de transporte y posteriormente mejorar el rendimiento de la cadena de suministro integrando los diferentes eslabones a través del intercambio de información en un ambiente colaborativo (Ipek Koçoğlu, Salih Zeki, Imamoglu, Hüseyin Incea, Halit Keskin, 2011).

#### **5.1.5. Análisis Envolvente de Datos -DEA**

La técnica de Investigación de Operaciones DEA (Data Envelopment Analysis – Análisis Envolvente de Datos), es una técnica de optimización construida para medir la eficiencia relativa de un grupo de unidades organizacionales denominadas DMUs (Decision Making Units), tomando en cuenta para su cálculo únicamente los datos provenientes de cada unidad, la medición técnica de las eficiencias de las DMU (unidades creadoras de decisión) es un elemento fundamental de gestión para orientar y mejorar los resultados de las empresas en el medio competitivo de hoy (Sanhueza, 2003).

Farrel (1957), inspirado en los trabajos de Koopmans, fue el primero que proporcionó la manera de medir empíricamente la eficiencia productiva, propuso considerar como

referencia eficiente la mejor práctica observada entre la muestra de empresas en estudio, y calcular así los índices de eficiencia de cada una por comparación con las que presentan un mejor desempeño. El desarrollo del DEA fue la contribución de Charnes, Cooper & Rhodes (1978) en respuesta a la búsqueda de establecer cuáles empresas de una muestra determinan la superficie envolvente o frontera de producción eficiente. La distancia radial de una empresa hacia la frontera provee la medida de eficiencia. Por tanto, aquellas empresas que están sobre la frontera o determinan la frontera, son consideradas eficientes, en cambio aquellas que se encuentran alejadas de la frontera son consideradas ineficientes (Sanhueza, 2003).

Esta técnica permite identificar las unidades eficientes e ineficientes y determinar qué variables (insumos – inputs y productos – outputs) están afectando la eficiencia, y a partir del “benchmarking” (identificar los mejores procedimientos) fijar metas u objetivos a las unidades encontradas como ineficientes.

DEA permite comparar la gestión relativa de un grupo de unidades de producción de bienes y/o servicios que utilizan el mismo tipo de recursos (insumos) para producir un mismo grupo de productos (salidas). La metodología identifica fronteras eficientes y permite hallar indicadores de gestión relativa para cada unidad con relación a aquellas que están en la frontera eficiente. Además permite identificar y cuantificar las ineficiencias con relación a los recursos de entrada y los productos de salidas, dando así pautas para el mejoramiento de las distintas unidades analizadas (López, Fernández & Morales, 2007).

DEA trata de optimizar la medida de eficiencia de cada unidad analizada para crear así una frontera eficiente basada en el criterio de Pareto (Charnes et al. 1997).

La técnica supone que primero se construye la frontera de producción empírica y después se evalúa la eficiencia de cada unidad observada que no pertenezca a la frontera de eficiencia. Así, además de no ser un método paramétrico (no supone la existencia de una función que relacione inputs con outputs) tampoco es estadístico puesto que no asume que la eficiencia no captada siga algún tipo de distribución probabilística (al estilo de los tests de consistencia de inputs y outputs observados con la frontera de producción implementados por Hanooh & Rothschild (1972) y Sengupta (1987).

En un análisis DEA se realizan dos procesos simultáneamente mediante el uso de algoritmos de programación lineal: la obtención de la frontera eficiente y la estimación de la ineficiencia. La obtención de la frontera eficiente se calcula maximizando el output dado el nivel de inputs si se utiliza orientación output y minimizando el input dado el nivel de outputs si se utiliza orientación input. La estimación de la ineficiencia depende de la orientación utilizada y se calcula como la distancia a la frontera de cada empresa evaluada, comparándose cada empresa con otra tecnológicamente similar.

El modelo DEA en su versión BCC (Banker, Charnes & Cooper, 1984) de orientación *output* está basado en los postulados de convexidad, libre disponibilidad de *inputs* y *outputs* y rendimientos variables a escala. Según el postulado de convexidad si dos *inputs* (*outputs*) alcanzan una cantidad de *output* (*input*) también puede hacerlo cualquier combinación lineal de ellos. Según la libre disponibilidad de *inputs* y *outputs* cada entidad puede producir menos (igual) *outputs* con el mismo (mayor) nivel de recursos.

El modelo BCC establece comparaciones entre unidades (empresas) midiendo exclusivamente ineficiencias debidas a la gestión productiva. Se establecen comparaciones respecto a unidades (empresas) que operan en una escala similar siendo capaces de adaptarse a los comportamientos individuales de cada unidad (empresa).

Con el modelo CCR (Charnes, Cooper & Rhodes, 1978) una unidad (empresa) puede ser comparada con otras sustancialmente más grandes o más pequeñas mientras que con el modelo BCC una unidad (empresa), es comparada con otras lo más similares posibles a su tamaño (Quindós, Rubiera & Vicente, 2003).

#### 5.1.6. El Problema de Optimización Multiobjetivo

El Problema de Optimización Multiobjetivo (MOP) (llamado también multicriterio o vectorial) puede definirse como el problema de encontrar (Osyczka, 1985) un vector de variables de decisión que satisfagan un cierto conjunto de restricciones y optimice un conjunto de funciones objetivo. Estas funciones forman una descripción matemática de los criterios de desempeño que suelen estar en conflicto unos con otros y que se suelen medirse en unidades diferentes.

Para poder determinar qué tan “buena” es una cierta solución, es necesario contar con algún criterio para evaluarla. Estos criterios se expresan como funciones computables de las variables de decisión a las que se denomina funciones objetivo. En problemas del mundo real, algunas de estas funciones objetivo suelen estar en conflicto entre sí, y algunas deben minimizarse mientras otras han de maximizarse (Coello, 2005).

La Optimización Multiobjetivo (MOP) en general incluye un conjunto de  $n$  parámetros (variables de decisión), un conjunto de  $k$  funciones objetivo y un conjunto de  $m$  restricciones. Las funciones objetivo y las restricciones son funciones de las variables de decisión. Luego, el MOP puede expresarse como:

$$\begin{aligned}
 \text{Optimizar:} & \quad y = f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)) \\
 \text{Sujeto a:} & \quad e(x) = (e_1(x), e_2(x), \dots, e_m(x)) \geq 0 \\
 \text{Dónde:} & \quad x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X \\
 & \quad y = (y_1, y_2, \dots, y_k) \in Y
 \end{aligned} \tag{1}$$

Siendo  $x$  el vector de decisión e  $y$  el vector objetivo. El espacio de decisión se denota por  $X$  y el espacio objetivo por  $Y$ . Optimizar, dependiendo del problema, puede significar, igualmente, minimizar o maximizar.

El conjunto de restricciones  $e(x) \geq 0$  determina el conjunto de soluciones factibles  $X_f$  y su correspondiente conjunto de vectores objetivo factibles  $Y_f$ .

El conjunto de soluciones factibles  $X_f$  se define como el conjunto de vectores de decisión  $x$  que satisface los requerimientos  $e(x)$ :

$$X_f = \{x \in X \mid e(x) \geq 0\} \quad (2)$$

La imagen de  $X_f$ , es decir, la región factible del espacio objetivo, se denota por

$$Y_f = f(X_f) = \bigcup_{x \in X_f} \{y = f(x)\} \quad (3)$$

De estas definiciones se tiene que cada solución del MOP en cuestión consiste de una  $n$ -tupla  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , que conduce a un vector objetivo  $y = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x))$ , donde cada  $x$  debe cumplir con el conjunto de restricciones  $e(x) \geq 0$ . El problema de optimización consiste en hallar la  $x$  que tenga el “mejor valor” de  $f(x)$ . En general, y según ya se ha introducido, no existe un único “mejor valor”, sino un conjunto de soluciones. Entre éstas, ninguna se puede considerar mejor a las demás si se tienen en cuenta todos los objetivos al mismo tiempo. Este hecho deriva de que puede existir y generalmente existe conflicto entre los diferentes objetivos que componen el problema. Por ende, al tratar con MOP se precisa de un nuevo concepto de “óptimo”.

**Dominancia Pareto en un contexto de Maximización.** Para dos vectores objetivos  $a$  y  $b$ ,

- $a \{\ll b$  ( $a$  domina a  $b$ ) si y sólo si  $a > b$
- $b \{\ll a$  ( $b$  domina a  $a$ ) si y sólo si  $b > a$
- $a \ll b$  ( $a$  y  $b$  no son comparables) si y sólo si  $a \wedge b \not\ll a$

**Dominancia Pareto en un contexto de Minimización.** Para dos vectores objetivos  $a$  y  $b$ ,

- $a \{\ll b$  ( $a$  domina a  $b$ ) si y sólo si  $a < b$
- $b \{\ll a$  ( $b$  domina a  $a$ ) si y sólo si  $b < a$
- $a \ll b$  ( $a$  y  $b$  no son comparables) si y sólo si  $a \wedge b \not\ll a$

**Optimalidad Pareto.** Dado un vector de decisión  $x \in X_f$  y su correspondiente vector objetivo  $y = f(x) \in Y_f$ , se dice que  $x$  es no dominado respecto a un conjunto  $A \subseteq X_f$  si y sólo si

$$\forall a \in A : (x \{\ll a \vee x \ll a)$$

En caso que  $x$  sea no dominado respecto a todo el conjunto  $X_f$ , y sólo en ese caso, se dice que  $x$  es una solución **Pareto óptima** ( $x \in X_{true}$  –el conjunto Pareto óptimo real–). Mientras



que la  $y$  correspondiente es parte del frente **Pareto óptimo real**  $Y_{true}$ . Esto se define a continuación.

**Conjunto Pareto óptimo y frente Pareto óptimo.** Dado el conjunto de vectores de decisión factibles  $X_f$ . Se denomina  $X_{true}$  al conjunto de vectores de decisión no dominados que pertenecen a  $X_f$ , es decir:

$$X_{true} = \{x \in X_f \mid x \text{ es no dominado con respecto a } X_f\}$$

El conjunto  $X_{true}$  también es conocido como el conjunto Pareto óptimo, mientras que el conjunto correspondiente de vectores objetivo  $Y_{true} = f(X_{true})$  constituye el frente Pareto óptimo.

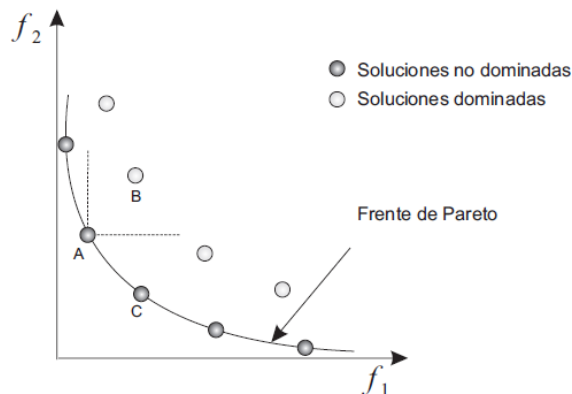


Figura 2. Ejemplo de la dominancia de Pareto para dos funciones objetivo

Fuente: Ramírez, 2006, *Una nueva propuesta para optimización multiobjetivo basada en búsqueda dispersa (Scatter Search)*, pp. 22.

En la figura 2 se puede ver gráficamente la dominancia de Pareto. Por ejemplo, la solución A domina a B, ya que A mejora a la solución B tanto en la función objetivo  $f_1$  como en la función objetivo  $f_2$ . La solución C no domina a A, ya que C es mejor que la solución A en  $f_2$ , pero A es mejor que C en  $f_1$ . Las soluciones no dominadas forman el frente de Pareto.

### 5.1.7. El Problema de Ruteo de Vehículos

El Problema de Ruteo de Vehículos (VRP, por sus siglas en inglés, Vehicle Routing Problem) es uno de los más comunes en la optimización de operaciones logísticas y se define como: la determinación de la ruta óptima para una flota de vehículos que parten de uno o más depósitos (almacenes) para satisfacer la demanda de varios clientes dispersados geográficamente (Dantzig, G. B. and Ramser. R.H, 1959).

Para conceptualizar mejor el problema del VRP, Rocha, González y Orjuela (2011) plantean una revisión del estado del arte acerca de la evolución del VRP desde su concepción comenzando con el Problema del Agente Viajero (TSP) planteado en 1956 hasta los trabajos recientes.

El ejemplo más famoso de este problema es conocido como Problema del Agente Viajero (TSP). En este caso, se dispone de un vehículo que debe visitar un conjunto de clientes, pasando por cada uno de ellos una única vez y retornar al origen. El objetivo es minimizar el tiempo total de viaje.

Las variantes del VRP difieren particularmente en el objetivo que debe ser optimizado. Las características más usuales son:

***Cada cliente tiene asociada una demanda o cantidad de producto que debe recibir (o entregar).*** Puede además existir la restricción que dicha demanda deba ser satisfecha por un único vehículo o que exista la posibilidad que más de un vehículo visite a los clientes.

***Cada cliente dispone de un periodo del día en el cual puede ser visitado.*** Este caso se presenta frecuentemente en problemas de abastecimiento en grandes ciudades. Las reglamentaciones de tránsito suelen prohibir tareas de carga y descarga en determinadas horas para evitar congestionamientos de tránsito. En otros casos, como por ejemplo la distribución de diarios, las entregas deben ser hechas antes de determinada hora.

***Cantidad y capacidad de vehículos disponibles.*** La flota de vehículos puede ser homogénea (vehículos de igual capacidad) o heterogénea. En algunos casos, los clientes tienen restricciones respecto al tamaño del vehículo que los abastece. Por ejemplo, si las rutas de acceso para llegar al cliente no permiten superar cierto peso del vehículo o si no se dispone de un lugar de maniobras suficientemente grande.

***Cantidad de depósitos.*** La empresa de distribución puede tener varios puntos de abastecimiento. Cada uno de ellos tiene asociado un posible subconjunto de clientes (o todos) a los cuales abastecer.

***Punto de partida y finalización de las rutas.*** En general, los vehículos tienen que retornar al depósito del cual salieron para el alistamiento de carga. En algunas aplicaciones esta exigencia no es necesaria dado a variantes de la ruta por temas de mantenimiento y/o finalización del turno.

***Red de comunicación entre clientes.*** En algunas instancias, existe vía de comunicación entre clientes, mientras que en otras la red vial no es completa y no puede darse continuidad a las rutas.

***Costo de traslado.*** Entre un par de clientes, el costo de traslado puede ser fijo, depende de la distancia, del tamaño del camión, el volumen, etc.

Los objetivos típicos que pueden ser considerados en los problemas de ruteo de vehículos son: *minimizar el tiempo total de transporte, minimizar la suma de los tiempos de espera de los clientes, minimizar el número de vehículos utilizados.*

Cada combinación de estos factores da como resultado un problema de ruteo de vehículos particular (Zabala Paula, 2006), y la solución para el problema VRP puede ser dependiendo de la instancia con técnicas exactas, heurísticas y meta heurísticas.

Dentro de los métodos de solución exactos encontramos: algoritmos de ramificación y acotamiento (hasta 100 nodos), ramificación y corte, programación dinámica y programación lineal entera. Un completo compendio de métodos exactos para Problemas de Ruteo de Vehículos puede encontrarse en los trabajos de Laporte & Norbert (1987), Laporte (1992) y en Rocha, González & Orjuela (2011).

Dentro de los métodos heurísticos encontramos: métodos de construcción (Mole, R.H. & Jameson, S.R, 1976), (Potvin, J.Y. & Rousseau, J.M, 1993), (Bodin, L., Golden, B., Assad, A. & Ball, M, 1983), el algoritmo de 2 fases que dividen al VRP en dos etapas: la de asignación de clientes a vehículos y la de determinación del orden de visita a dichos clientes (Christofides, Mingozzi & Toth, 1979), y el algoritmo de mejora iterativa que toma como entrada una solución de otra heurística (Golden, B., Assad, A., Levy, L. & Gheysens, F., 1984).

Dentro de los métodos metaheurísticos encontramos: algoritmos de colonia de hormigas (Colorni, A., Dorigo, M. & Maniezzo, V., 1991), programación restringida, recorrido simulado, algoritmos genéticos (Holland, 1975), (Pereira, F., Tavares, J., P.M.E.C., 2002), búsqueda tabú (Gupta, 2002), (Glover, F., 1986), (Osman, I., 1993), (Gendreau, Hertz & Laporte, 1994), y redes neuronales entre otros.

Dependiendo de las condiciones del problema es el método a utilizar. Para instancias pequeñas podemos formularlo como modelo de PLE (programación lineal entera), para instancias mayores es necesario modelarlo de manera general como un grafo (Díaz Parra & Cruz Chávez, 2010). Para complementar el análisis de conceptos del VRP Olivera (2004), propone para este tipo de aplicaciones el modelo del problema con flota heterogénea (FSMVRP).

**El Problema con Flota Heterogénea (FSMVRP):** en los problemas con flota heterogénea los costos y capacidades de los vehículos varían, existiendo un conjunto  $T = \{1, \dots, |T|\}$  de tipos de vehículo. La capacidad de los vehículos  $k \in T$  es  $q^k$  y su costo fijo (si lo tuvieran) es  $f^k$ . Los costos y tiempos de viaje para cada tipo de vehículo son  $c_{ij}^k$  y  $t_{ij}^k$  respectivamente. Se asume que los índices de los vehículos están ordenados en forma creciente por capacidad (es decir,  $q^{k1} \leq q^{k2}$  para  $k1, k2 \in T, k1 < k2$ ).

En la siguiente formulación de flujo de vehículos de tres índices (Corona, 2005) se agrega un índice para discriminar entre los tipos de vehículos.

Las variables binarias  $x_{ij}^k$  indican si el arco  $(i,j)$  es utilizado por el vehículo  $k$  y las variables  $r_i$  positivas indican la carga acumulada en la ruta correspondiente hasta el nodo  $i$  (inclusive). La función objetivo (1) mide el costo total de la solución incluyendo costos fijos y variables. Las restricciones (2) establecen que todo cliente debe ser visitado por algún vehículo. En (3) se indica que si un vehículo de tipo  $k$  visita al nodo  $i$ , entonces un vehículo del mismo tipo debe abandonarlo. Las restricciones (4) y (5) fijan los valores de las variables  $r_i$  actúan como restricciones de eliminación de subtours, mientras que la capacidad de los vehículos se impone en (6).

$$\min \sum_{k \in T} f^k \sum_{j \in \Delta^+(0)} x_{0j}^k + \sum_{k \in T} \sum_{(i,j) \in E} c_{ij}^k x_{ij}^k \quad (1)$$

$$s.a. \sum_{k \in T} \sum_{i \in \Delta^+(j)} x_{ij}^k = 1 \quad \forall j \in V/\{0\} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ij}^k - \sum_{j \in \Delta^-(i)} x_{ji}^k = 0 \quad \forall i \in V, \forall k \in T \quad (3)$$

$$r_0 = 0 \quad (4)$$

$$r_j - r_i \geq (d_j + q^{|T|}) \sum_{k \in T} x_{ji}^k - q^{|T|} \quad \forall i \in V/\{0\}, \forall j \in \Delta^+(i) \quad (5)$$

$$r_j \leq \sum_{k \in T} \sum_{i \in \Delta^-(j)} q_k x_{ij}^k \quad \forall j \in V/\{0\} \quad (6)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in E, \forall k \in T \quad (10)$$

$$r_j \geq 0 \quad \forall j \in V \quad (11)$$

En esta formulación se asume que la cantidad de vehículos de cada tipo es ilimitada. El problema correspondiente se denomina Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem (o FSMVRP). No sólo se deben decidir las rutas, sino la composición de la flota de vehículos a utilizar. Usualmente, al tratar con problemas de flota heterogénea, se opta por utilizar este modelo aun cuando en algunos casos no refleja la realidad (Olivera, 2004).

Si la cantidad de vehículos disponibles de cada tipo  $k$  fuera  $v_k$ , conocida de antemano, debería agregarse las restricciones

$$\sum_{j \in \Delta^+(0)} x_{0j}^k \leq v_k ; \forall k \in T \quad (12)$$

**El Algoritmo de Ahorros:** uno de los algoritmos más difundidos para el VRP es el Algoritmo de Ahorros de Clarke & Wright (1964). Si en una solución dos rutas diferentes  $(0, \dots, i, 0)$  y  $(0, j, \dots, 0)$  pueden ser combinadas formando una nueva ruta  $(0, \dots, i, j, \dots, 0)$  como se muestra en la figura 2, el ahorro (en distancia) obtenido por dicha unión es

$$s_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij} \quad (13)$$

pues en la nueva solución los arcos  $(i,0)$  y  $(0,j)$  no serán utilizados y se agregará el arco  $(i,j)$ . En este algoritmo se parte de una solución inicial y se realizan las uniones que den mayores ahorros siempre que no violen las restricciones del problema. Existe una versión paralela en la que se trabaja sobre todas las rutas simultáneamente, y otra secuencial que construye las rutas de a una a la vez.

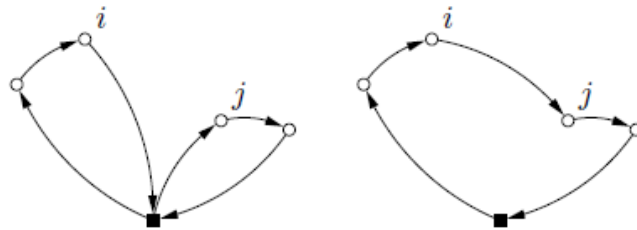


Figura 3. Dos rutas antes y después de ser unidas

Fuente: Olivera, 2004, *Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos*, pp. 10.

Dado que en la definición de  $s_{ij}$  solamente interviene la ubicación de los clientes  $i$  y  $j$ , todos los ahorros pueden calcularse una sola vez al comienzo de la ejecución del algoritmo. En la versión secuencial, podrían calcularse los ahorros a medida que son necesarios.

Si el máximo ahorro es negativo, la combinación de las rutas aumentará la distancia recorrida pero disminuirá la cantidad de rutas de la solución (y por lo tanto la cantidad de vehículos utilizados). Dependiendo de las particularidades de cada problema, debe decidirse si realizar o no ese tipo de combinaciones.

Se ha observado que utilizando la definición original de ahorro suelen generarse algunas rutas circulares como se muestra en la figura 3 lo cual puede ser negativo. Para solucionar este problema algunos autores (Yellow, 1970), (Golden, Magnanti & Nguyen, 1977), (Gaskell, 1967), proponen redefinir el ahorro como:

$$s_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - \lambda c_{ij} \quad (14)$$

donde  $\lambda$  es un parámetro que penaliza la unión de rutas con clientes lejanos (llamado parámetro de forma o shape parameter). Dicho parámetro puede utilizarse también para generar un conjunto de soluciones diferentes mediante la ejecución repetida del algoritmo con diferentes valores de  $\lambda$ .

En general ocurre que al comienzo de la ejecución del algoritmo dos alternativas pueden parecer equivalentes y, sin embargo, la elección tiene un gran impacto en la solución final. Las soluciones obtenidas con el Algoritmo de Ahorros pueden, en general, ser mejoradas mediante operadores de búsqueda local como el algoritmo 3-opt (Lin, 1965).

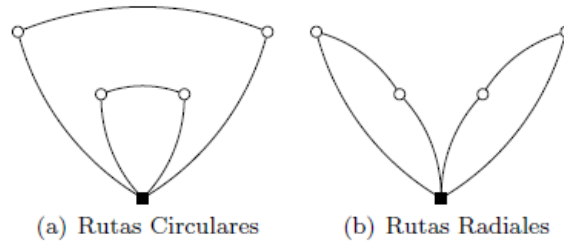


Figura 4. Un ejemplo de rutas circulares y radiales

Fuente: Olivera, 2004, *Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos*, pp. 12.

**Golden, Assad, Levy y Gheysens:** en esta propuesta se modifica la definición del ahorro para incorporar los costos fijos de los diferentes vehículos (Golden, Assad, Levy & Gheysens, 1984). En cada iteración se tiene un conjunto de rutas, cada una de las cuales cubre cierta demanda  $z$  y está asignada al vehículo capaz de cargar dicha demanda que tenga el menor costo fijo. Se define con  $F(z)$  al costo fijo del vehículo más barato cuya capacidad sea no menor que  $z$  y con  $P(z)$  a la capacidad de dicho vehículo.

Si dos rutas (una con el cliente  $i$  al final y otra con el cliente  $j$  al comienzo) con demandas respectivas  $z_i$  y  $z_j$  son combinadas, el ahorro en términos de costos fijos es  $F(z_i) + F(z_j) - F(z_i + z_j)$ . Se define entonces el Ahorro Combinado (CS, por sus siglas en inglés) como:

$$\bar{s}_{ij} = s_{ij} + F(z_i) + F(z_j) - F(z_i + z_j) \quad (15)$$

donde  $s_{ij}$  es el ahorro original (ver formulas 13 y 14). Es decir, se suma el ahorro por distancias y el ahorro por costos fijos. Este enfoque es una extensión directa del algoritmo original y toma en cuenta solamente el ahorro de una iteración a la siguiente. Se proponen dos medidas adicionales que toman en cuenta el costo de oportunidad de utilizar un vehículo más grande al unir dos rutas.

Luego de unir las rutas, la capacidad libre del vehículo utilizado para recorrer la nueva ruta será  $P(z_i + z_j) - z_i - z_j$ . En el Ahorro de Oportunidad Optimista (OOS por sus siglas en inglés), se supone (de manera optimista) que dicha capacidad estará colmada al final del algoritmo. Por lo tanto, al unir las rutas se ahorra, el costo fijo del vehículo más barato que pueda transportar dicha carga. El OOS es entonces:

$$s_{ij}^* = \bar{s}_{ij} + F(P(z_i + z_j) - z_i - z_j) \quad (16)$$

Los autores reportan que el método basado en CS desfavorece la combinación de rutas, mientras que el OOS las combina excesivamente. Una tercera medida llamada Ahorro de

Oportunidad Realista (ROS por sus siglas en inglés), surge como solución intermedia. Esta medida incluye el término del ahorro de oportunidad sólo cuando la nueva ruta requiere un vehículo de mayor capacidad que los que utilizan las dos rutas por separado, es decir, cuando  $w = P(z_i + z_j) - \max\{z_i, z_j\} > 0$ . Además, considera como ahorro de oportunidad, al costo del vehículo más caro que no puede satisfacer la demanda de la nueva ruta. Siendo  $F'(z)$  el costo fijo del vehículo más caro que no puede cargar una demanda de  $z$ , se define

$$s'_{ij} = \bar{s}_{ij} + \delta(w)F'(P(z_i + z_j) - z_i - z_j) \quad (17)$$

donde  $\delta(0) = 0$  y  $\delta(w) = 1$  si  $w > 0$ . Al igual que en el algoritmo original, puede agregarse un parámetro de forma.

Una desventaja de cualquiera de estas propuestas es que incorporan datos de la demanda de las rutas en la definición del ahorro y por lo tanto algunos ahorros deben ser recalculados en cada iteración del algoritmo.

**Rutear Primero - Asignar Después:** en los métodos rutear primero - asignar después (Beasley, 1983), se procede en dos fases. Primero se calcula una ruta que visita a todos los clientes resolviendo un TSP. En general esta ruta no respeta las restricciones del problema y se particiona en varias rutas, cada una de las cuales sí es factible.

Dada  $r = (0, v_1, \dots, v_n, 0)$ , la solución del TSP obtenida en la primera fase, se determina la mejor partición de  $r$  que respete la capacidad del vehículo. Este problema se puede formular como el de hallar un camino mínimo en un grafo dirigido y acíclico. Para ello, se construye un grafo  $G = (X, V, W)$  donde  $X = \{0, v_1, \dots, v_n\}$ . Los arcos de  $G$  conectan todo par de clientes  $v_i$  y  $v_j$  con  $i < j$ , tales que la demanda total de los clientes  $v_{i+1}, \dots, v_j$  no supera la capacidad del vehículo:

$$V = \left\{ (v_i, v_j) \mid i < j, \sum_{k=i+1}^{j-1} d_{v_k} \leq Q \right\} \quad (18)$$

Cada arco  $(v_i, v_j)$  se pondera con el costo de la ruta  $(0, v_{i+1}, \dots, v_j, 0)$ , es decir

$$w(v_i, v_j) = c_{0, v_{i+1}} + c_{v_j, 0} + \sum_{k=i+1}^{j-1} c_{v_k, v_{k+1}} \quad (19)$$

Un arco  $(v_i, v_j)$  representa la ruta  $(0, v_{i+1}, \dots, v_j, 0)$ . Cada camino de  $0$  a  $v_n$  en  $G$  representa una posible partición de la ruta  $r$  en rutas que respetan las restricciones de demanda. Por lo tanto, el camino de costo mínimo entre  $0$  y  $v_n$  representa la partición de costo mínimo de la ruta original en rutas que respetan la restricción de capacidad. Como el grafo es acíclico (sólo hay arcos  $(v_i, v_j)$  con  $i < j$ ), puede utilizarse el Algoritmo de Dijkstra para hallar dicho

camino. En la figura 4 se presenta un posible ordenamiento de los clientes de un problema y su grafo asociado. Si el camino más corto de 0 a 4 en el grafo fuera (0, 2, 4), la solución dada por el algoritmo serían las rutas (0, 1, 2, 0) y (0, 3, 5, 4, 0), como se indica.

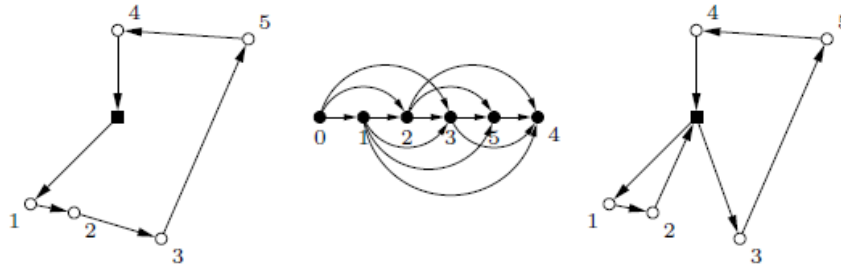


Figura 5. Aplicación del algoritmo rutear primero - asignar después

Fuente: Olivera, 2004, *Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos*, pp. 20.

Aunque la ruta inicial sea la solución óptima del TSP y la partición se realice de manera óptima, las rutas obtenidas no necesariamente son una solución óptima para el problema. Por lo tanto, alcanza con que la ruta inicial se calcule en forma heurística, por ejemplo, mediante la aplicación de 2-opt sobre una ruta aleatoria como en el trabajo original. El algoritmo puede ejecutarse repetidas veces, partiendo de diferentes rutas iniciales.

Según la definición original,  $w(v_i, v_j)$  es el costo de la ruta que comienza en  $v_{i+1}$ , sigue el orden de la ruta original y termina en  $v_j$ . Esta definición puede modificarse permitiendo variar el orden de los clientes  $v_{i+1}, \dots, v_j$  de modo de obtener una ruta mejor. En el artículo original se aplica el algoritmo 2-opt sobre la ruta  $(0, v_{i+1}, \dots, v_j, 0)$ .

Golden et al. (1984) da una extensión directa al método Rutear Primero – Asignar Después para FSMVRP. En la versión original del algoritmo, cada arco  $(r_i, r_j)$  representa la ruta  $(0, r_{i+1}, \dots, r_j, 0)$  y se pondera con la distancia recorrida por dicha ruta (ver ecuación 19). En la versión para FSMVRP se considera, además de la distancia, el costo del menor vehículo capaz que recorrer la ruta:

$$w(r_i, r_j) = c_{0,r_{i+1}} + \sum_{k=i+1}^{j-1} c_{r_k,r_{k+1}} + c_{r_j,0} + F\left(\sum_{k=i+1}^j d_{r_k}\right) \quad (20)$$

Luego, al igual que en el algoritmo original, se halla el camino de costo mínimo entre 0 y  $r_n$  para obtener las rutas de la solución. Los mismos autores proponen un procedimiento similar a éste, que permite considerar más particiones de la ruta original incorporando varias copias del depósito en el grafo auxiliar.



Una vez que se tiene una solución para el problema, se puede intentar mejorarla mediante un procedimiento de búsqueda local como el que sigue.

**Algoritmo de Lin y Kernighan:** el algoritmo de Lin & Kernighan (1973) pertenece a una clase de algoritmos heurísticos muy usados: los de búsqueda local. Se comienza con un tour inicial; si no hay tours vecinos de menor costo, se elige la ruta del vehículo de menor costo que se tenga hasta el momento porque se trata de un óptimo local, de lo contrario se reemplaza el tour que tenga en ese momento por un tour vecino de menor costo. Este proceso finaliza en algún momento pues se tiene un número finito de posibles tours.

El tiempo que requiere la búsqueda de un mejor vecino depende del número de iteraciones que se necesitan (o sea, el número de veces que el tour puede ser mejorado antes de encontrar un óptimo local). Lin y Kernighan definen los vecinos de un tour como aquellos tours que pueden ser obtenidos a partir de él, intercambiando un número finito de ramas del tour por ramas que no pertenecen al tour.

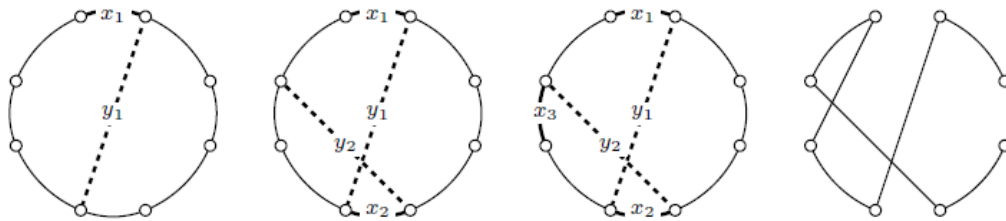


Figura 6. Posible iteración del algoritmo de Lin-Kernigham.

Fuente: Olivera, 2004, *Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos*, pp. 24.

## 5.2. Marco conceptual

Dado un conjunto de clientes o puntos de distribución con almacenamiento de productos y una flota de vehículos dispersos geográficamente, a grandes rasgos un problema de ruteo de vehículos consiste en decidir cuantas unidades trasladar desde ciertos puntos de origen (plantas, ciudades, etc.) a ciertos puntos de destino (centros de distribución, ciudades, etc.) y determinar un conjunto de rutas de costo mínimo que comience en las plantas y termine en los centros de distribución. Las características de los clientes, depósitos y vehículos, así como diferentes restricciones operativas sobre las rutas, dan lugar a diferentes variantes del problema. Se suponen conocidos los costos unitarios de transporte, los requerimientos de demanda y la oferta disponible.

De acuerdo con Díaz Parra & Cruz Chávez (2010), Las variables o parámetros involucrados en el problema son: depósitos, localizaciones geográficas, vehículos y capacidades. El depósito o punto de distribución es donde comienzan todas las rutas y donde terminan. Las localizaciones geográficas involucran: tiempo, distancia, origen y

destino. Los vehículos son los que realizan los viajes (flota homogénea todos los vehículos son iguales o heterogénea todos los vehículos son diferentes). Las capacidades son las que se observan en el vehículo como son: carga total, volumen total, número de las plataformas. Los pesos especifican el costo de recorrido entre las localizaciones geográficas.

Diferenciado el problema del transporte y para un buen entendimiento de las interrelaciones que se pueden generar con todos los actores, a continuación se enuncian algunas definiciones de cadena de suministro y SCM.

*La logística en la cadena de abastecimiento “es una disciplina que se encarga de la administración de los materiales y la información asociada, desde los proveedores hasta los clientes, garantizando la entrega de los productos en las cantidades pactadas, con las especificaciones acordadas, en los tiempos establecidos y al menor costo” (Aguilar, 2001; Ballou, 2004).*

Otras definiciones de cadena de suministro:

<b><i>Autor</i></b>	<b><i>Definición</i></b>
<b><i>Ganeshan y Harrinson (1995)</i></b>	<i>“La cadena de suministro es una red de instalaciones y redes de distribución que permiten el aprovisionamiento de materiales su transformación en productos semi-terminados y/o finales que son distribuidos para satisfacer las necesidades de los clientes”</i>
<b><i>Ballou (2004)</i></b>	<i>“Un conjunto de actividades funcionales que se repiten a lo largo del canal de flujo del producto, mediante los cuales la materia prima se convierte en productos terminados y se añade valor al consumidor”</i>
<b><i>Mentzer (2004)</i></b>	<i>“Un conjunto de tres o más empresas conectadas o relacionadas con flujos de productos, servicios, finanzas e/o información desde el suministro hasta el cliente final”</i>
<b><i>Correa y Gómez (2009)</i></b>	<i>“La cadena de suministro busca añadir valor al cliente, mejorar las condiciones con proveedores, fabricantes, clientes y aumentar las ganancias a los accionistas”</i>

*Fuente: Logística Minera – Correa & Gómez – 2009*

La integración estratégica con alineación, sincronización y optimización de objetivos en la cadena de suministro con herramientas tecnológicas y uso de indicadores en los procesos de negocio que ayuden a direccionar los esfuerzos y mejorar el desempeño, es tal vez la definición más concreta para la “Gestión de la Cadena de Suministro” o en inglés Supply Chain Management. A continuación se presentan otras definiciones:

<b>Autor</b>	<b>Definición</b>
<b>Brewer, Button y Hensher (2001)</b>	<i>“Es la integración y administración de los procesos logísticos claves a través de la cadena de suministro”</i>
<b>Mentzer (2004)</b>	<i>“Coordinación sistemática y estratégica de los procesos del negocio dentro de una empresa particular y su cadena de suministro, con el fin de mejorar su desempeño a largo plazo como un todo (empresas y cadena de suministro)”</i>
<b>Hugos (2006)</b>	<i>“Es la coordinación de los procesos de producción, inventarios, localización, transporte entre los participantes de la cadena de suministro para satisfacer las necesidades de los clientes de una forma eficiente y responsable”</i>
<b>Correa y Gómez (2009)</b>	<i>“Es un medio para coordinar e integrar estrategias y sistemáticamente los procesos claves dentro de la cadena de suministro con el fin de satisfacer las necesidades del cliente y mejorar el desempeño de las empresas involucradas”</i>

*Fuente: Logística Minera – Correa & Gómez – 2009*

Con la orientación para generar valor en cada uno de los eslabones de la cadena se configura el concepto de operador logístico como el ente mediador que hace que las interrelaciones entre clientes y proveedores se desarrollen en una ambiente colaborativo.

*Resa (2004) define que "un operador logístico es aquella empresa que por encargo de su cliente diseña los procesos de una o varias fases de su CA (aprovisionamiento, transporte, almacenaje, distribución e incluso ciertas actividades del proceso productivo), organiza, gestiona y controla tales operaciones, utilizando para ello la infraestructura física, tecnología y sistemas de información propios y ajenos, independientemente de que preste o no los servicios con medios propios o subcontratados. En este sentido, el operador responde directamente ante su cliente de los bienes y servicios adicionales acordados en relación con éstos, y es su interlocutor directo".*

En el estudio Trabajo de desarrollo del concepto de operador logístico la ABML (Associação Brasileira de Movimentação e Logística, 2005) define que *"un operador logístico es un proveedor de servicios especializados en gestionar y ejecutar todas las actividades logísticas o parte de ellas, en las distintas fases de la CA de sus clientes. Con ello agrega valor a los productos de éstos y además puede prestar servicios simultáneos en tres actividades logísticas básicas: control de existencias, almacenamiento y gestión de transportes.*

## **6. DESARROLLO DE LOS MODELOS DE OPTIMIZACION**

Para lograr los objetivos propuestos orientados a mejorar el desempeño individual de las EDS, se hace necesario en la primera fase abordar los temas con un análisis estadístico que

permita determinar las eficiencias técnicas de cada una de las EDS por cada producto en cada regional. Con éstos resultados, se establece el orden de prioridad para la implementación de los programas de optimización utilizando la técnica de Análisis Envolvente de Datos (DEA).

En la segunda fase, se desarrolla el modelo para la optimización de inventarios buscando maximizar el nivel de servicio para cubrir la demanda. En la tercera fase, y como complemento de la fase anterior, a través de un modelo multi-objetivo se pretende optimizar la distribución y el transporte de productos de las plantas a las EDS. Finalmente, para garantizar la optimalidad de las soluciones propuestas, se desarrolla en la cuarta fase un modelo para la post-optimización.

A continuación se detalla cada una de las fases con definición de alcance, formulación y desarrollo de modelos, análisis de resultados y consideraciones finales.

## **6.1. FASE 1: DATA ENVELOPMENT ANALYSIS**

La eficiencia orientada a mejorar la productividad consiste en asegurar una correcta distribución de los medios empleados en relación con los fines obtenidos y compararse con un óptimo. El método del Análisis Envolvente de Datos conocido por sus siglas en inglés como DEA (Data Envelopment Analysis), permite estudiar la eficiencia de una unidad productiva en relación con el comportamiento de otras unidades similares.

La metodología identifica fronteras eficientes y permite hallar indicadores de gestión relativa para cada unidad con relación a aquellas que están en la frontera eficiente. Además permite identificar y cuantificar las ineficiencias con relación a los recursos de entrada y los productos de salidas, dando así pautas para el mejoramiento de las distintas unidades analizadas (González & Valdés, 2009).

Esta metodología, basada en Programación Lineal, ha tenido mucho auge tanto en el sector público como en el privado en aplicaciones relacionadas con competitividad, productividad y eficiencia en amplia diversidad de campos de la ingeniería, de la administración y de la economía (Bancos, Salud, Servicios en general, Comercio, Producción, Regulación, Educación, entre otros), (López et al. 2007).

Aunque esta metodología, ha tenido mucho reconocimiento en diferentes sectores de la economía y la industria, no fue posible evidenciar aplicaciones en el sector del petróleo y particularmente en el mercado de combustibles retail, por lo cual resulta interesante la aplicación de esta técnica para la búsqueda de las ineficiencias de las regionales.

Considerando las regionales como unidades productivas con variables de entradas y salidas similares, la metodología DEA se puede aplicar como herramienta de análisis económico cuantitativo válida para estudiar el desempeño de cada una de las regionales a través de un simple cálculo de indicadores de productividad parcial, establecer el orden y nivel de eficiencia de manera que ayude a determinar la prioridad en la orientación de planes de mejora.

El objetivo de esta fase es analizar a través del método DEA, la eficiencia técnica de las regionales y definir el orden de intervención para la implementación de los planes de optimización de inventarios y transporte.

### 6.1.1. Condiciones Generales

El primer desafío, al aplicar los modelos de DEA (CCR y BCC), consiste en seleccionar las variables (inputs y outputs) que describan con mayor precisión el proceso de transformación de las DMUs evaluadas y permita discriminar claramente las DMUs eficientes de las ineficientes (González & Valdés, 2009). Sin embargo, tal como notaron Golany & Roll (1989), muy pocos estudios han sido desarrollados con el propósito de seleccionar de mejor forma estas variables. Algunos autores que han propuesto métodos para seleccionar inputs y outputs han sido Lins & Moreira (1999), Soares de Mello et al. (2004), Senra et al. (2005), Wagner & Shimshak (2007).

Los métodos de selección de variables persiguen, primordialmente, ordenar un conjunto de variables (inputs y outputs) definidas para evaluar a las DMUs usando modelos DEA, con el propósito de seleccionar un número restringido de variables, de manera de mantener la relación causal en los modelos y que éstos indiquen adecuadamente el desempeño de las DMUs evaluadas (González & Valdés, 2009).

En el abordaje propuesto por Lins & Moreira (1999), se parte de un par input-output inicial que tenga alta correlación. El criterio de selección de nuevas variables a ser incluidas consiste en verificar cuál de las variables candidatas provoca mayor eficiencia media en el modelo DEA.

Para efectos de establecer el orden y/o prioridad de las regionales para la implementación de un programa que permita mejorar los ingresos de la compañía *maximizando el nivel de inventarios y minimizando los costos del transporte* de combustible de las plantas de abasto a las EDS, se analizarán las siguientes variables:

**Variables de entrada:** involucran los recursos necesarios para realizar el proceso productivo de cada regional, los inputs del proceso son:

- **Número de EDS:** del número de EDS se deduce el potencial número de rutas que se deben programar y la cantidad de recursos requeridos.

- **Capacidad:** la capacidad instalada y el inventario permiten determinar el tamaño de los lotes de producto a recibir.
- **Flete:** el valor del flete determina los costos asociados a la ruta dependiendo del tipo de transporte.

**Variables de salida:** se refieren a los resultados operacionales obtenidos en el proceso productivo, los outputs obtenidos en el proceso son:

- **Ingresos:** es la contribución de cada regional a los estados financieros de la compañía, depende del margen de comercialización del producto.
- **Ventas:** corresponde a la demanda de combustible de cada regional, determina el tamaño de los lotes y tipo de vehículos a utilizar.
- **Inventario:** permite determinar la disponibilidad de combustible para la venta, el nivel de servicio, la autonomía para cubrir la demanda y el potencial ingreso por aumento de precio.

En la tabla 7 se muestra el resultado de la medición de las variables para aplicar el método DEA.

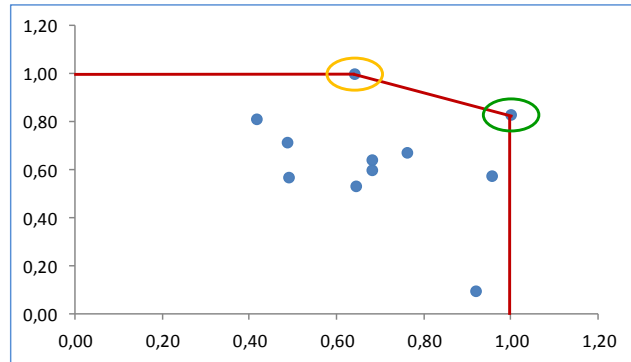
Regional	No. EDS	Capacidad (gal)	Flete (\$)	Margen (\$)	Ventas (gal)	Inventario (gal)
Antioquia	13	197.087	105	259.673.663	402.099	103.154
Bajo Cauca	12	289.948	279	783.682.286	783.163	212.477
Caribe	17	365.950	90	591.091.188	1.049.506	161.006
Central	15	293.455	209	526.877.309	839.264	138.401
Distrito Capital	8	276.214	58	653.676.168	1.111.014	116.677
Llanos Orientales	5	95.562	195	135.650.322	369.752	6.729
Magdalena Medio	6	98.789	47	163.849.061	267.379	38.608
Occidente	15	469.066	36	738.910.463	1.504.961	232.239
Sabanas	15	287.727	175	430.673.248	591.014	119.873
Uraba	3	48.388	280	66.257.172	84.789	28.868
Valle de Aburra	14	383.297	27	928.293.754	1.615.493	233.094
<b>Totales</b>	<b>123</b>	<b>2.805.483</b>	<b>1.501</b>	<b>5.278.634.635</b>	<b>8.618.434</b>	<b>1.391.126</b>

Tabla 7. Variables generales para el análisis DEA.

En un análisis preliminar se consideraron dos variables con alta correlación; *Rotación de inventarios* y *Nivel de uso*, que permiten orientar de manera rápida el nivel de servicio que debe cumplir el transportador para cubrir la demanda. En la gráfica 4, se muestra la frontera de eficiencia determinada con el análisis previo. El resultado de este análisis cumple para las dos variables definidas, no para todo el modelo.

De la siguiente gráfica, se deduce que se debe complementar el análisis con otras variables que ayuden a determinar un verdadero orden de manera objetiva, sin caer en interpretaciones que deriven en pérdidas de control de las iniciativas.

Regional	Rot. Inv.	Nivel Uso
Antioquia	0,48	0,71
Bajo Cauca	0,64	1,00
Caribe	0,68	0,60
Central	0,68	0,64
Distrito Capital	0,95	0,58
Llanos Orientales	0,92	0,10
Magdalena Medio	0,64	0,53
Occidente	0,76	0,68
Sabanas	0,49	0,57
Uraba	0,42	0,81
Valle de Aburra	1,00	0,83



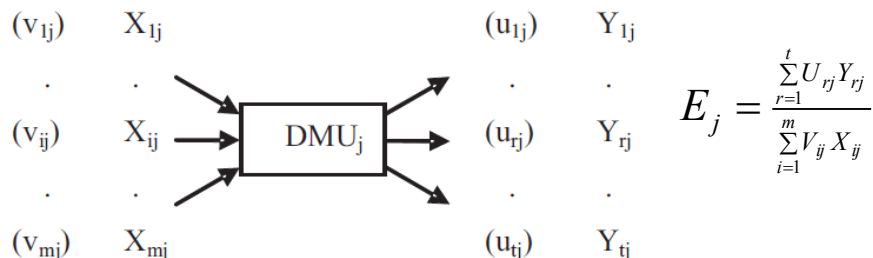
Gráfica 4. Frontera de eficiencia

### 6.1.2. Formulación del Modelo

Maximizar la eficiencia requiere la solución de un problema de programación fraccional el cual tiene múltiples soluciones (figura 7). El término programación fraccional es utilizado para designar la clase de problemas de optimización para los cuales la función objetivo es un cociente,  $f(x)/g(x)$ , sujeto a unas determinadas restricciones (Quindós M., Rubiera M. & Vicente C., 2005).

Para llevar el anterior caso a un modelo de programación lineal, es necesario apoyarse en los modelos básicos de DEA “CCR y BCC” los cuales tratan el estudio de las eficiencias orientadas a la Entrada (reducir las entradas, con los mismos niveles de salidas, para mejorar la eficiencia), u orientadas a la Salida (reducir las salidas, con los mismos niveles de entradas) y realizar los respectivos ajustes para pasar de un modelo fraccional a uno lineal.

En este caso se utilizará el modelo CCR dejando el denominador constante (asumiendo una valor de 1) y maximizando el numerador.



$$\sum_{i=1}^m V_{ij} X_{ij} \qquad \sum_{r=1}^t U_{rj} Y_{rj}$$

Figura 7. Esquema de la eficiencia de la DMU j-ésima

Fuente: Chediak y Valencia, 2008, *Metodología para medir la eficiencia mediante la técnica envolvente de datos DEA*, pp. 71.

### Definiciones

$DMU_j$  : Unidad de decisión j-ésima  $\{j1, j2, \dots, j8\}$ .

$X_{ij}$  : Cantidad del i-ésima entrada a la j-ésima DMU.

$Y_{rj}$  : Cantidad del r-ésima salida de la j-ésima DMU.

$V_{ij}$  : Peso del i-ésima entrada a la j-ésima DMU.

$U_{ij}$  : Peso del i-ésima salida a la j-ésima DMU.

$E_j$  : Eficiencia de la j-ésima DMU.

### Modelo Matemático

Con la definición de los conjuntos, parámetros y variables anteriores, la formulación del modelo de programación no lineal para el caso analizado es:

$$Max h_0 = \sum_{\forall r} U_r Y_{r0} \qquad (1)$$

La ecuación (1) expresa la función objetivo, la cual busca maximizar *las eficiencias orientadas a la Entrada (reducir las entradas, con los mismos niveles de salidas, para mejorar la eficiencia)*.

### Restricciones:

$$\sum_{\forall i} V_i X_{i0} = 1 \qquad (2)$$



$$\sum_{\forall r} U_r Y_{rj} - \sum_{\forall j} V_i X_{ij} \leq 0 \quad (3)$$

$$V_i \geq 0 \quad (4)$$

$$U_r \geq 0 \quad (4)$$

### 6.1.3. Solución Propuesta

La aplicación del método DEA, modelo CCR de eficiencias orientadas a la entrada (Charnes, Cooper y Rhodes, 1978), se ha realizado considerando tres entradas (número de EDS, capacidad y flete) y tres salidas (ingresos, ventas y nivel de inventarios).

Dado que el análisis DEA requiere de datos relativamente homogéneos para lograr una estimación consistente de la eficiencia, los datos para el estudio proceden de una base estadística de la compañía con información de los últimos 18 meses de operación.

En la tabla 8 se muestra la eficiencia técnica global de cada una de las regionales de acuerdo a las variables de decisión (DMUs). En primera instancia, se evidencia que la regional Valle de Aburra tiene el mejor desempeño en cuatro de las seis variables de estudio seguida por la regional de Occidente y la regional Caribe.

Regional	EDS	Capacidad	Flete	Ingresos	Ventas	Inventario
Antioquia	0,76	0,42	0,25	0,28	0,25	0,44
Bajo Cauca	0,71	0,62	0,10	0,84	0,48	0,91
Caribe	1,00	0,78	0,30	0,64	0,65	0,69
Central	0,88	0,63	0,13	0,57	0,52	0,59
Distrito Capital	0,47	0,59	0,46	0,70	0,69	0,50
Llanos Orientales	0,29	0,20	0,14	0,15	0,23	0,03
Magdalena Medio	0,35	0,21	0,56	0,18	0,17	0,17
Occidente	0,88	1,00	0,73	0,80	0,93	1,00
Sabanas	0,88	0,61	0,15	0,46	0,37	0,51
Uraba	0,18	0,10	0,10	0,07	0,05	0,12
Valle de Aburra	0,82	0,82	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Def. Variable</b>	<b>Entrada</b>	<b>Entrada</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>Salida</b>	<b>Salida</b>

Tabla 8. Indicadores de eficiencia de las variables DEA.

### 6.1.4. Resultados y Análisis

El desarrollo del modelo se realizó con la herramienta Solver de Excel, el cual permite resolver problemas de optimización lineal y no lineal, con Solver es posible resolver problemas y asignar recursos que tengan hasta 200 variables de decisión (continuas), 100 restricciones explícitas y 400 simples; cotas superior e inferior o restricciones enteras sobre

las variables de decisión (Avella Pérez, Diego., 2011), (Sánchez & López, 1992). Para resolver el caso de estudio, se utilizó un computador personal con procesador Intel(R) Core™ i5 con memoria RAM de 4 GB y Microsoft Office 2010.

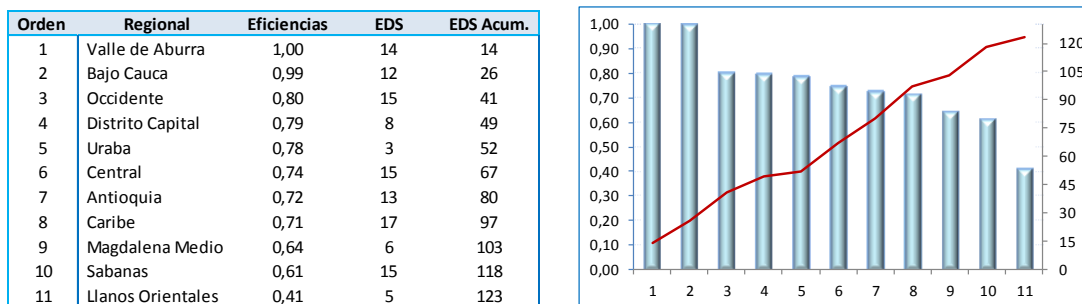
En la tabla 9 se muestra los resultados del cálculo y el ranking para cada regional de acuerdo a la eficiencia técnica global.

Max h <sub>0</sub> = 0,723804033					
<b>Regional</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>Entrada</b>	<b>Eficiencias</b>	<b>Ranking DEA</b>
Antioquia	0,724 >= 0	(0,276) <= 0	1,000	0,724	7
Bajo Cauca	1,471 >= 0	(0,000) <= 0	1,471	0,999	2
Caribe	1,314 >= 0	(0,542) <= 0	1,857	0,708	8
Central	1,102 >= 0	(0,387) <= 0	1,489	0,740	6
Distrito Capital	1,106 >= 0	(0,296) <= 0	1,401	0,789	4
Llanos Orientales	0,198 >= 0	(0,287) <= 0	0,485	0,407	11
Magdalena Medio	0,322 >= 0	(0,179) <= 0	0,501	0,642	9
Occidente	1,892 >= 0	(0,488) <= 0	2,380	0,795	3
Sabanas	0,895 >= 0	(0,565) <= 0	1,460	0,613	10
Uraba	0,190 >= 0	(0,055) <= 0	0,246	0,776	5
Valle de Aburra	1,945 >= 0	0,000 <= 0	1,945	1,000	1
R3 1,000000997 = 1					

Tabla 9. Resultados DEA usando Solver de Excel.

De acuerdo a las variables seleccionadas, en la gráfica 5 se muestra que las regionales Valle de Aburra (100%), Bajo Cauca (99,9%) y Occidente (80%) tienen los mejores resultados de eficiencia, lo cual permite deducir que tienen las mejores prácticas para asignar recursos y generar ingresos.

Por otra parte, las regionales del Magdalena Medio (64,2%), Sabanas (61,3%) y Llanos Orientales (40,7%) son las más ineficientes y requieren de mayor esfuerzo para alcanzar buenos resultados, se prevé que tienen infraestructura ociosa, bajos márgenes de comercialización y/o altos costos en los fletes.



Gráfica 5. Ranking de eficiencias.

Los resultados del DEA confirman que las variables seleccionadas, independientemente del número de DMUs, aportan de manera significativa al análisis de eficiencia, pues describen con precisión el comportamiento de las DMUs, permiten determinar la frontera eficiente, diferenciar las regionales de buen desempeño y evidenciar las brechas o esfuerzo de mejora de las demás regionales.

Como resultado de este análisis se concluye que la regional Valle de Aburra, como generadora de mayor ingreso, aplica en primera instancia para la implementación de los programas de optimización de inventarios, transporte y distribución de combustibles. Cabe anotar que *este resultado coincide con el análisis previo para la definición de la frontera de eficiencia.*

## **6.2. FASE 2: OPTIMIZACION DE INVENTARIOS**

Dadas las condiciones del negocio en el cual se observa la tendencia al aumento de los márgenes de comercialización de los combustibles, la política de optimización de los ingresos de la compañía está orientada a garantizar el máximo nivel de inventario de todos los productos.

A continuación se presentan las generalidades del problema, la formulación del modelo matemático, la propuesta de solución, los resultados y su análisis.

### **6.2.1. Condiciones Generales**

La programación que se realice para optimizar el nivel de inventarios debe satisfacer las siguientes condiciones:

- a. Asegurar un nivel de inventario superior al 80% en todos los productos.
- b. No se permite disponibilidad ociosa de camiones en la EDS.
- c. No se permite contaminación o mezcla de productos.
- d. Se permite usar camiones de cualquier capacidad y configuración.
- e. La planta tiene capacidad ilimitada para cubrir la demanda.
- f. Se admiten viajes incompletos usando mínimo 2 de 3 compartimientos llenos.

### **6.2.2. Formulación del Modelo**

El modelo de programación entera que permite resolver el problema para la optimización de inventarios se presenta continuación.

#### **Conjuntos**

**i** = Plantas de abasto {p11}; para el caso de Medellín aplica una sola localización (p11).

**j** = Estaciones de servicio (EDS) {e1, e2,...e14}

**k** = Camiones {k1, k2,...k5}

**l** = Compartimientos {l1, l2, l3}

**p** = Producto {p1, p2, p3}

**t** = Tiempo en días {1, 2,...30}

### **Parámetros**

$Capp_{pt}^i$  = Capacidad de la planta i del producto p el día t.

$Dem_{pt}^j$  = Demanda de la EDS j del producto p el día t.

$Capc_{kl}$  = Capacidad del camión k del compartimiento l.

$Cape_{jp}$  = Capacidad de la EDS j del producto p.

$Stocki_{jp}$  = Inventario inicial de la EDS j del producto p.

*Nota: La unidad de medida de todos los parámetros está dada en galones.*

### **Variables de Decisión**

$Asigc_{klp} = \begin{cases} 1 & \text{si asigno producto } p \text{ al compartimiento } l \text{ del camión } k \\ 0 & \text{si el compartimiento } l \text{ del camión } k \text{ ya tiene producto } p \end{cases}$

$Invini_{pj}^t$  = Inventario inicial del producto p en la EDS j el día t.

$Invfin_{pj}^t$  = Inventario final del producto p en la EDS j el día t.

$Cantidad_{ijk}^{lpt}$  = Cantidad del producto p transportado de la planta i a la EDS j en el compartimiento l del camión k el día t.

## Modelo Matemático

Con la definición de los conjuntos, parámetros y variables anteriores la formulación del modelo es la siguiente:

$$\text{Min CupoDisp} = \sum_{\forall j} \sum_{\forall p} \sum_{\forall t} [\text{Cape}_{jp} - \text{Invfin}_{pj}^t] \quad (1)$$

La ecuación (1) expresa la función objetivo, la cual busca minimizar la disponibilidad ociosa o cupo de la EDS, en otras palabras busca *garantizar la mayor cantidad de combustible para atender la demanda*.

### Restricciones:

$$\sum_{\forall j} \sum_{\forall k} \sum_{\forall t} \text{Cantidad}_{ijk}^{\text{ipt}} \leq \text{Capp}_{ipt}; \forall i, \forall p, \forall t \quad (2)$$

**Satisfacción de la demanda:** la ecuación (2) busca garantizar que la cantidad de combustible que sale de la planta (i) con destino a la EDS (j) sea menor a la capacidad de la planta.

$$\text{Cantidad}_{ijk}^{\text{ipt}} \leq \text{Capc}_{kl} \times \text{Asigc}_{klp}; \forall i, \forall j, \forall k, \forall l, \forall p, \forall t \quad (3)$$

**Capacidad de los camiones:** la ecuación (3) permite asegurar que la cantidad de combustible que se transporta de la planta (i) a la EDS (j) sea menor o igual a la capacidad del camión (k) asignado, impide que la capacidad del camión sea superada.

$$\sum_{\forall p} \text{Asigc}_{klp} = 1; \forall k, \forall l \quad (4)$$

**Asignación de productos:** la ecuación (4) garantiza la asignación de único producto (p) por compartimiento (l) evitando la mezcla de los combustibles.

$$\text{Invini}_{pjl} = \text{Stocki}_{jp}; \forall j, \forall p \quad (5)$$

**Inventario inicial:** la ecuación (5) define que el inventario inicial por producto (p) del día 1 de la EDS (j) es igual al inventario de corte inicial.

$$\text{Invini}_{pjt} + \sum_{\forall i} \sum_{\forall k} \sum_{\forall t} \text{Cantidad}_{ijk}^{\text{ipt}} - \text{Dem}_{jpt} = \text{Invini}_{pj(t+1)}; \forall j, \forall p, \forall t[1..29] \quad (6)$$

**Balance diario:** la ecuación (6) define el balance de inventario de combustibles diario por EDS hasta el día 29.

$$\text{Invini}_{pj(30)} + \sum_{\forall i} \sum_{\forall k} \sum_{\forall l} \text{Cantidad}_{ijk}^{lp(30)} - \text{Dem}_{jp(30)} = \text{Invfin}_{pj}; \forall j, \forall p \quad (7)$$

**Balance de cierre mensual:** la ecuación (7) define el balance de inventario de combustibles por EDS para el cierre del día 30.

$$\sum_{\forall i} \sum_{\forall k} \sum_{\forall l} \text{Cantidad}_{ijk}^{lpt} \leq \text{Cape}_{jp} - \text{Invini}_{jpt}; \forall j, \forall p, \forall t \quad (8)$$

**Capacidad disponible EDS:** la ecuación (8) garantiza la disponibilidad de cupo en la EDS (j) para recibir la cantidad de combustible transportado desde la planta (i), de tal manera que no genere disponibilidad ociosa de los camiones (k) en la EDS.

$$\text{Asig}c_{klp} \in \{0,1\} \quad (10)$$

$$\text{Invini}_{pj}^t \geq 0; \forall p, \forall j, \forall t \quad (11)$$

$$\text{Invfin}_{pj}^t \geq 0; \forall p, \forall j, \forall t \quad (12)$$

$$\text{Cantidad}_{ijk}^{lpt} \geq 0; \forall i, \forall j, \forall k, \forall l, \forall p, \forall t \quad (13)$$

**Restricciones:** las ecuaciones (10), (11), (12) y (13) corresponden a las restricciones de no negatividad.

### 6.2.3. Solución Propuesta

El modelo de programación entera propuesto, permite determinar la cantidad de combustible que debe transportarse diariamente desde la planta a cada EDS, maximizándose la capacidad de almacenamiento de la EDS y mejorando el nivel de servicio para cubrir la demanda.

### 6.2.4. Resultados y Análisis

El desarrollo del modelo se realizó en LPSolve IDE (Versión 5.5.2.0), el cual está diseñado en un entorno integrado de desarrollo para modelar problemas de programación matemática. Para resolver el caso de estudio, se utilizó un computador personal con procesador Intel(R) Core™ i5 con memoria RAM de 4 GB. El tiempo de resolución del problema fue de 103 segundos con 27390 iteraciones.

En la tabla 10 se muestra el inventario final por producto de cada EDS, en general las EDS terminaron con inventarios superiores al 85% de su capacidad, aumentando su promedio de inventarios un 46%, mejorando el nivel de servicio y los ingresos de la compañía, cabe anotar que las EDS e1 y e8 no tienen almacenamiento del producto 3.

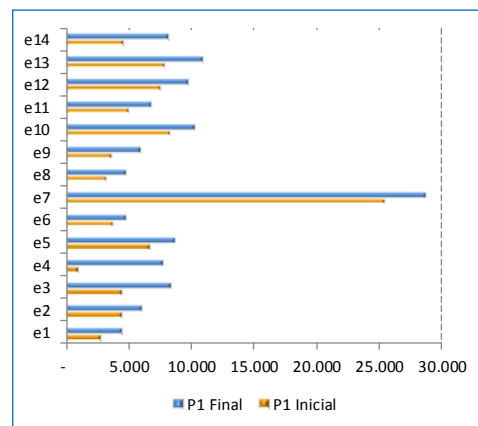
Estacion	P1	P2	P3
e1	4.397	13.807	-
e2	6.062	3.960	2.954
e3	8.390	27.230	2.781
e4	7.761	3.166	3.340
e5	8.691	5.302	2.918
e6	4.719	16.445	4.929
e7	28.703	27.964	10.254
e8	4.714	12.573	-
e9	5.926	10.168	2.373
e10	10.309	6.784	2.859
e11	6.813	8.552	3.896
e12	9.743	7.481	3.868
e13	10.917	9.224	4.937
e14	8.094	11.577	4.794
<b>Total</b>	<b>125.239</b>	<b>164.233</b>	<b>49.903</b>

Estacion	P1	P2	P3
e1	88%	92%	-
e2	87%	79%	98%
e3	96%	88%	98%
e4	88%	93%	98%
e5	91%	76%	97%
e6	94%	82%	99%
e7	91%	90%	98%
e8	94%	84%	-
e9	67%	87%	88%
e10	88%	78%	95%
e11	85%	79%	97%
e12	81%	94%	97%
e13	91%	92%	99%
e14	81%	96%	96%
<b>Total</b>	<b>87%</b>	<b>87%</b>	<b>97%</b>

Tabla 10. Volumen final de inventario      Tabla 11 Nivel de inventario por producto

La tabla 11 muestra el nivel de inventario por producto de cada EDS, en esta puede identificarse que la EDS e9 termina con el nivel más bajo de inventario del producto 1, sin embargo a nivel general, la estación cumple la condición de garantizar un nivel de inventario superior al 80% en todos los productos.

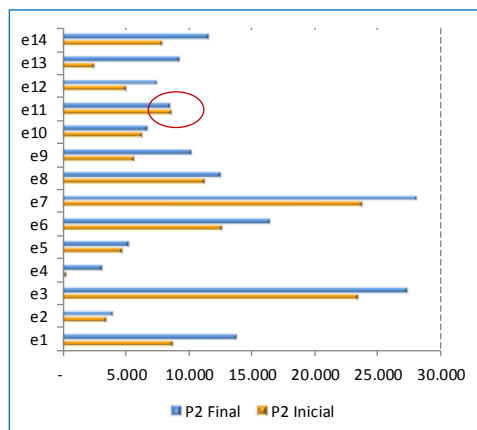
Estacion	P1 Inicial	P1 Final	Incremento
e1	2.782	4.397	58%
e2	4.477	6.062	35%
e3	4.429	8.390	89%
e4	942	7.761	724%
e5	6.633	8.691	31%
e6	3.667	4.719	29%
e7	25.392	28.703	13%
e8	3.166	4.714	49%
e9	3.552	5.926	67%
e10	8.303	10.309	24%
e11	4.969	6.813	37%
e12	7.488	9.743	30%
e13	7.870	10.917	39%
e14	4.525	8.094	79%
<b>Total</b>	<b>88.196</b>	<b>125.239</b>	<b>42%</b>



Gráfica 6. Optimización de inventario producto 1

En la gráfica 6 se evidencia el aumento de los niveles de inventario del producto 1, la EDS e6 fue la de menor incremento en volumen (1052 galones) y la EDS e4 la de mayor (6819 galones). Cabe destacar que el diferencial de aumento es sobre la base del promedio de los últimos 18 meses. En general el producto 1 tuvo un incremento en volumen del 42%.

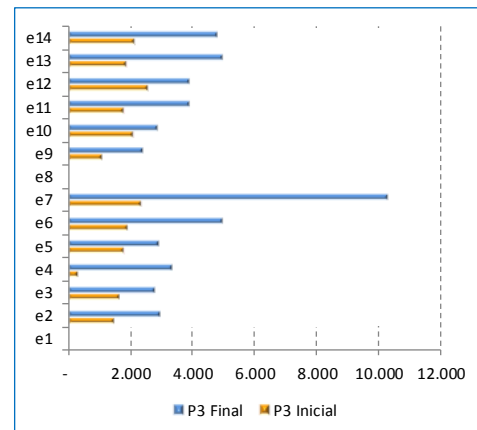
Estacion	P2 Inicial	P2 Final	Incremento
e1	8.697	13.807	59%
e2	3.440	3.960	15%
e3	23.380	27.230	16%
e4	273	3.166	1059%
e5	4.730	5.302	12%
e6	12.659	16.445	30%
e7	23.731	27.964	18%
e8	11.262	12.573	12%
e9	5.655	10.168	80%
e10	6.355	6.784	7%
e11	8.672	8.552	-1%
e12	5.033	7.481	49%
e13	2.537	9.224	264%
e14	7.938	11.577	46%
<b>Total</b>	<b>124.363</b>	<b>164.233</b>	<b>32%</b>



Gráfica 7. Optimización de inventario producto 2

La gráfica 7 muestra el aumento de los niveles de inventario del producto 2, se destaca la EDS e11 porque tuvo afectación en volumen de 120 galones y la EDS e13 un aumento en 6687 galones. En general el producto 2 tuvo un incremento en volumen del 32%.

Estacion	P3 Inicial	P3 Final	Incremento
e1	-	-	-
e2	1.466	2.954	102%
e3	1.614	2.781	72%
e4	303	3.340	1004%
e5	1.728	2.918	69%
e6	1.873	4.929	163%
e7	2.283	10.254	349%
e8	-	-	-
e9	1.076	2.373	120%
e10	2.046	2.859	40%
e11	1.761	3.896	121%
e12	2.501	3.868	55%
e13	1.813	4.937	172%
e14	2.071	4.794	132%
<b>Total</b>	<b>20.535</b>	<b>49.903</b>	<b>143%</b>



Gráfica 8. Optimización de inventario producto 3

Aunque la gráfica 8 muestra el mejor promedio de aumento de los niveles de inventario de todos los productos (143%), se debe tener especial cuidado con el almacenamiento de



*este producto dado que la rotación es muy baja, sin embargo el objetivo de maximizar el inventario se cumple satisfactoriamente con un 97%.*

### **6.3. FASE 3: OPTIMIZACION DISTRIBUCION Y TRANSPORTE**

Dada la demanda de combustibles p1, p2 y p3 de las 14 EDS localizadas en la Regional del Valle del Aburra, se requiere transportar los productos desde la planta Medellín hasta las 14 EDS usando 5 camiones propios y 4 camiones contratados (ver tabla 12). El problema consiste en asignar los lotes de productos a cada camión de manera que se pueda optimizar las entregas asegurando el menor costo y en lo posible viajes completos desde la planta hacia las EDS con entregas exclusivas por EDS y/o combinar viajes dependiendo de la conveniencia.

Partiendo de la fase anterior, en la cual se necesita encontrar el inventario máximo que puede transportarse con una flota conocida en tamaño y capacidad, ahora se plantea encontrar el tamaño óptimo de los lotes y las frecuencias a costo mínimo. Para lograr este propósito, se planteará un modelo multiobjetivo que maximice el inventario en las EDS y minimice los costos del transporte.

A continuación se presentan las generalidades del problema, la formulación del modelo matemático, la propuesta de solución, los resultados y su análisis.

#### **6.3.1. Condiciones Generales**

La programación que se realice para optimizar la distribución y transporte debe satisfacer las siguientes consideraciones:

- a. No se permite rotura de inventarios para cubrir la demanda
- b. Se permite un nivel de inventario superior al 80% en todos los productos.
- c. No pueden anticiparse entregas sin validar cupo del producto a ninguna EDS.
- d. Debe darse prioridad a los camiones propios k1, k2, k3 y k4.
- e. No se permite disponibilidad ociosa de camiones en la EDS.
- f. No se permite contaminación o mezcla de productos.
- g. No se permite compartir el mismo compartimiento para varias EDS.
- h. Todos los vehículos pueden transportar los tres productos pero no mezclas.
- i. Se admiten compartimientos incompletos superiores al 90% de la capacidad.

- j. Se admiten viajes incompletos usando mínimo 2 de 3 compartimientos
- k. Se permite usar camiones de cualquier capacidad y configuración de acuerdo a la tabla 12.

Camion	c1 (gal)	c2 (gal)	c3 (gal)	Total	Tipo	Cantidad	Viajes
k1	620	640	620	1.880	Propio	1	5
k2	2.940	1.950	970	5.860	Propio	1	4
k3	1.150	1.200	1.100	3.450	Propio	1	5
k4	4.130	3.660	3.660	11.450	Propio	2	4
k5	1.180	1.600	680	3.460	Tercero	1	5
k6	970	1.290	1.080	3.340	Tercero	1	5
k7	1.520	1.130	1.080	3.730	Tercero	1	5
k8	1.500	1.280	850	3.630	Tercero	1	5

Tabla 12. Lista de camiones disponibles

### 6.3.2. Formulación del Modelo

El modelo de programación entera que permite resolver el problema para optimizar la distribución y el transporte, se presenta a continuación.

#### Conjuntos

**i** = Plantas de abasto {p11}; para el caso de Medellín aplica una sola localización (p11).

**j** = Estaciones de servicio (EDS) {e1, e2,...e14}

**k** = Camiones {k1, k2,...k8}

**l** = Compartimientos {l1, l2, l3}

**p** = Producto {p1, p2, p3}

**t** = Tiempo en días {1, 2,...30}

#### Parámetros

$Capp_{pt}^i$  = Capacidad de la planta i del producto p el día t.

$Dem_{pt}^j$  = Demanda de la EDS j del producto p el día t.

$Capc_{kl}$  = Capacidad del camión k del compartimiento l.

$Cape_{jp}$  = Capacidad de la EDS j del producto p.

$Stocki_{jp}$  = Inventario inicial de la EDS j del producto p.

$Costo_{kj}^p$  = Costo para transportar el producto p a la EDS j en el camión k

### Variables de Decisión

$Asigc_{klp} = \begin{cases} 1 & \text{si asigno producto p al compartimiento l del camión k} \\ 0 & \text{si el compartimiento l del camión k ya tiene producto p} \end{cases}$

$Invini_{pj}^t$  = Inventario inicial del producto p en la EDS j el día t.

$Invfin_{pj}$  = Inventario final del producto p en la EDS j.

$Cantidad_{ijk}^{lpt}$  = Cantidad del producto p transportado de la planta i a la EDS j en el compartimiento l del camión k el día t.

### Modelo Matemático

Con la definición de los conjuntos, parámetros y variables anteriores la formulación del modelo es la siguiente:

$$Min \text{ Transporte} = \sum_{\forall i} \sum_{\forall j} \sum_{\forall k} \sum_{\forall l} \sum_{\forall p} \sum_{\forall t} \text{Cantidad}_{ijk}^{lpt} \times \text{Costo}_{kjp} \quad (1)$$

La ecuación (1) define la función objetivo, la cual busca minimizar los costos de transporte de la planta (i) a la EDS (j).

### Restricciones:

$$\sum_{\forall j} \sum_{\forall k} \sum_{\forall l} \text{Cantidad}_{ijk}^{lpt} \leq \text{Capp}_{ipt}; \forall i, \forall p, \forall t \quad (2)$$

**Satisfacción de la demanda:** la ecuación (2) busca garantizar que la cantidad de combustible que sale de la planta (i) con destino a la EDS (j) sea menor a la capacidad de la planta.

$$\text{Cantidad}_{ijk}^{lpt} \leq \text{Capc}_{kl} \times \text{Asigc}_{klp}; \forall i, \forall j, \forall k, \forall l, \forall p, \forall t \quad (3)$$

**Capacidad de los camiones:** la ecuación (3) permite asegurar que la cantidad de combustible que se transporta de la planta (i) a la EDS (j) sea menor o igual a la capacidad del camión (k) asignado, impide que la capacidad del camión sea superada.

$$\sum_{\forall p} \text{Asigc}_{k1p} = 1; \forall k, \forall l \quad (4)$$

**Asignación de productos:** la ecuación (4) garantiza la asignación de único producto (p) por compartimiento (l) evitando la mezcla de los combustibles.

$$\text{Invini}_{pjl} = \text{Stocki}_{jpl}; \forall j, \forall p \quad (5)$$

**Inventario inicial:** la ecuación (5) define que el inventario inicial por producto (p) del día 1 de la EDS (j) es igual al inventario de corte inicial.

$$\text{Invini}_{pjt} + \sum_{\forall i} \sum_{\forall k} \sum_{\forall l} \text{Cantidad}_{ijk}^{lpt} - \text{Dem}_{jpt} = \text{Invini}_{pj(t+1)}; \forall j, \forall p, \forall t[1..29] \quad (6)$$

**Balance diario:** la ecuación (6) define el balance de inventario de combustibles diario por EDS hasta el día 29.

$$\text{Invini}_{pjt=30} + \sum_{\forall i} \sum_{\forall k} \sum_{\forall l} \text{Cantidad}_{ijk}^{lpt=30} - \text{Dem}_{jpt=30} = \text{Invfin}_{pj}; \forall j, \forall p \quad (7)$$

**Balance de cierre mensual:** la ecuación (7) define el balance de inventario de combustibles por EDS para el cierre del día 30.

$$\sum_{\forall j} \sum_{\forall p} \sum_{\forall t} [\text{Cape}_{jpt} - \text{Invfin}_{jpt}] \leq 106278 \quad (8)$$

**Capacidad disponible EDS:** la ecuación (8) garantiza que la disponibilidad de cupo en las EDS para recibir combustible en ningún caso supere 106278 galones.

$$\text{Invfin}_{jpt} \leq \text{Cape}_{jpt} \quad (9)$$

**Inventario Máximo:** la ecuación (9) define que el inventario final de la EDS (j) en ningún caso puede superar la capacidad de diseño de la EDS.

$$\sum_{\forall j} \sum_{\forall l} \sum_{\forall p} \text{Cantidad}_{ijk1}^{lpt} \leq 9400; \forall i, \forall t \quad (10)$$

**Capacidad viajes k1:** la ecuación (10) define el volumen diario que puede transportar el camión k1 de la planta (i) a la EDS (j).

$$\sum_{\forall j} \sum_{\forall l} \sum_{\forall p} \text{Cantidad}_{ijk2}^{lpt} \leq 29300; \forall i, \forall t \quad (11)$$

**Capacidad viajes k2:** la ecuación (11) define el volumen diario que puede transportar el camión k2 de la planta (i) a la EDS (j).

$$\sum_{\forall j} \sum_{\forall l} \sum_{\forall p} \text{Cantidad}_{ijk3}^{lpt} \leq 17250; \forall_i, \forall_t \quad (12)$$

**Capacidad viajes k3:** la ecuación (12) define el volumen diario que puede transportar el camión k3 de la planta (i) a la EDS (j).

$$\sum_{\forall j} \sum_{\forall l} \sum_{\forall p} \text{Cantidad}_{ijk4}^{lpt} \leq 45800; \forall_i, \forall_t \quad (13)$$

**Capacidad viajes k4:** la ecuación (13) define el volumen diario que puede transportar el camión k4 de la planta (i) a la EDS (j).

$$Asigc_{klp} \in \{0,1\} \quad (14)$$

$$Invini_{pj}^t \geq 0; \forall_p, \forall_j, \forall_t \quad (15)$$

$$Invfin_{pj}^t \geq 0; \forall_p, \forall_j, \forall_t \quad (16)$$

$$\text{Cantidad}_{ijk}^{lpt} \geq 0; \forall_i, \forall_j, \forall_k, \forall_l, \forall_p, \forall_t \quad (17)$$

**Restricciones:** las ecuaciones (14), (15), (16) y (17) corresponden a las restricciones de no negatividad.

### 6.3.3. Solución Propuesta

El modelo de programación entera propuesto permitirá determinar el tipo y número de camiones a usar, la frecuencia de entrega y el tamaño de los lotes de combustible que debe transportarse. Lo anterior minimizando los costos de transporte y maximizando la capacidad de almacenamiento de la EDS, objetivos que redundan para mejorar los ingresos de la compañía. A continuación se detallan algunas variantes para el modelo considerado:

**Escenario 1 (4k\_3P\_1T):** 4 tipos de camiones, 3 productos, 1 sola tarifa de transporte por cada EDS para cualquier camión.

**Escenario 2 (4k\_3P\_4T):** 4 tipos de camiones, 3 productos, 4 tarifas de transporte (1 por cada tipo de camión por cada EDS). Se restringen los viajes de k4 a su capacidad máxima.

**Escenario 3 (3k\_3P\_1T):** 3 tipos de camiones, 3 productos, 1 sola tarifa de transporte por cada EDS para cualquier camión. Se descarta el camión de menor capacidad (k1).

**Escenario 4 (3k\_3P\_3T):** 3 tipos de camiones, 3 productos, 3 tarifas de transporte (1 por cada tipo de camión por cada EDS). Se descarta el camión de menor capacidad (k1).

**Escenario 5 (3k\_3P\_3TA):** 3 tipos de camiones, 3 productos, 3 tarifas de transporte (1 por cada tipo de camión por cada EDS). Se descarta el camión de menor capacidad (k1) y se restringen los viajes de k2, k3 y k4 a la capacidad máxima de los camiones.

**Escenario 6 (3k\_2P\_3TA):** 3 tipos de camiones, 2 productos, 3 tarifas de transporte (1 por cada tipo de camión por cada EDS). Se descarta el camión de menor capacidad (k1), se transportan los productos de mayor demanda (P1 y P2) y se restringen los viajes de k2, k3 y k4 a la capacidad máxima de los camiones.

**Escenario 7 (2k\_3P\_2T):** 2 tipos de camiones, 3 productos, 2 tarifas de transporte (1 por cada tipo de camión por cada EDS). Se descartan los camiones de menor capacidad (k1 y k3).

**Escenario 8 (2k\_2P\_1T):** 2 tipos de camiones, 2 productos, 1 sola tarifa de transporte por cada EDS para cualquier camión. Se descartan los camiones de menor capacidad (k1 y k3) y se transportan los productos de mayor demanda (P1 y P2).

**Escenario 9 (2k\_2P\_2T):** 2 tipos de camiones, 2 productos, 2 tarifas de transporte (1 por cada tipo de camión por cada EDS). Se descartan los camiones de menor capacidad (k1 y k3) y se transportan los productos de mayor demanda (P1 y P2).

**Escenario 10 (4k\_3P\_4T):** 4 tipos de camiones, 3 productos, 4 tarifas de transporte (1 por cada tipo de camión por cada EDS).

#### 6.3.4. Resultados y Análisis

En la tabla 13 se muestra el resumen general de los resultados de los escenarios modelados. En primera instancia se descartaron los escenarios 3, 5 y 6 dado a que las entregas exceden la capacidad del producto p1 en la mayoría de las EDS y no alcanzan a cubrir el abastecimiento del producto p2 que tiene más demanda. El escenario 4, aunque es uno de los más económicos, se descarta porque excede la demanda del producto p3 y no alcanza a cubrir la demanda de los productos p1 y p2 en la mayoría de las EDS.

Descripcion escenario		1 4k_3P_1T k1+k2+k3+k4	2 4k_3P_4T k1+k2+k3+k4	3 3k_3P_1T k2+k3+k4	4 3k_3P_3T k2+k3+k4	5 3k_3P_3TA k2+k3+k4	6 3k_2P_3TA k2+k3+k4	7 2k_3P_2T k2+k4	8 2k_2P_1T k2+k4	9 2k_2P_2T k2+k4	10 4k_3P_4T k1+k2+k3+k4	
V A R I A B L E S	Nivel inventario	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
	Tipo Camiones	4k	4k	3k	3k	3k	3k	2k	2k	2k	4k	
	Capacidad camiones	101750	101750	92350	92350	92350	92350	75100	91600	75100	101750	
	Tarifa flete	tarifa unica	4 tarifas	tarifa unica	3 tarifas	3 tarifas	3 tarifas	2 tarifas	tarifa unica	2 tarifas	4 tarifas	
	Demanda	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
	Productos	p1+p2+p3	p1+p2+p3	p1+p2+p3	p1+p2+p3	p1+p2+p3	p1+p2	p1+p2+p3	p1+p2	p1+p2	p1+p2	p1+p2+p3
	Costo mínimo	\$ 72.350.825	\$ 51.740.825	\$ 72.350.825	\$ 46.280.450	\$ 51.740.825	\$ 48.657.110	\$ 51.740.825	\$ 44.213.615	\$ 48.657.110	\$ 48.932.598	
	Volumen k1 (gal)	57.255	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Volumen k2 (gal)	1.138.357	373.271	726.467	9.246	373.271	296.233	373.271	-	296.233	73.495	
	Volumen k3 (gal)	330.860	-	301.036	-	-	-	-	1.103.497	-	-	
Volumen k4 (gal)	220.799	1.374.000	719.768	1.738.025	1.374.000	1.374.000	1.374.000	566.736	1.374.000	1.714.155		
Volumen total (gal)	1.747.271	1.747.271	1.747.271	1.747.271	1.747.271	1.670.233	1.747.271	1.670.233	1.670.233	1.787.650		
D O S	Producto P1 (gal)	814.235	702.715	840.292	520.391	844.717	765.983	687.715	796.133	636.393	651.345	
	Producto P2 (gal)	907.202	1.018.722	881.145	874.100	876.720	904.250	1.033.722	874.100	1.033.840	1.062.810	
	Producto P3 (gal)	25.834	25.834	25.834	352.780	25.834	-	25.834	-	-	73.495	
Validacion escenarios		No	Si	No	No	No	No	Si	No	Si	Si	

Tabla 13. Resultados generales de los escenarios

**Escenario pesimista:** corresponde a los modelos enmarcados en rojo de la tabla 13, (4k\_3P\_1T: 4 tipos de camiones, 3 productos, 1 tarifa y 2k\_2P\_1T: 2 tipos de camiones, 2 productos, 1 tarifa). En este escenario se modela la condición de *tarifa única* promedio para todos los camiones.

En el modelo de la izquierda de la tabla 14 (4k\_3P\_1T) y tabla 15 todos los camiones transportan en el periodo mensual algún producto; el producto p1 es transportado por los camiones k1, k2, k3 y k4, el producto p2 es transportado en los camiones k2, k3 y k4, y el producto p3 es transportado solo en el camión k4.

El nivel de uso de los camiones no es uniforme, los camiones k1 y k4 escasamente llegan al 25%, k3 tiene un nivel de uso adecuado (83%) pero no óptimo y k2 excede su

EDS	k1	k2	k3	k4	Total	EDS	k3	k4	Total
e1		56.849			56.849	e1	52.719	4.130	56.849
e2	56.400	159.080	67.500	122.012	404.992	e2	148.911	204.708	353.619
e3		77.298	31.200	32.716	141.214	e3	79.264	61.950	141.214
e4	855	40.129		1.543	42.527	e4	25.323	15.661	40.984
e5		85.826		742	86.568	e5	70.246	15.580	85.826
e6		78.971	31.200	16.844	127.015	e6	85.344	41.671	127.015
e7		100.027	80.960	28.722	209.709	e7	128.899	75.650	204.549
e8		81.472	19.200		100.672	e8	71.145	29.527	100.672
e9		85.471	27.600	7.472	120.543	e9	83.692	29.379	113.071
e10		106.058		2.314	108.372	e10	89.468	16.590	106.058
e11		106.417	18.000	1.589	126.006	e11	100.577	23.840	124.417
e12		57.981	27.600	2.044	87.625	e12	56.301	29.280	85.581
e13		65.808		439	66.247	e13	54.358	11.450	65.808
e14		36.970	27.600	4.362	68.932	e14	57.250	7.320	64.570
<b>Total</b>	<b>57.255</b>	<b>1.138.357</b>	<b>330.860</b>	<b>220.799</b>	<b>1.747.271</b>	<b>Total</b>	<b>1.103.497</b>	<b>566.736</b>	<b>1.670.233</b>
Capacidad	216.200	673.900	396.750	1.053.400	2.340.250	Capacidad	396.750	1.053.400	1.450.150
Nivel Uso	26%	169%	83%	21%	75%	Nivel Uso	278%	54%	115%

capacidad el 69%.

Tabla 14. Resultados escenario pesimista, modelos 4k\_3P\_1T y 2k\_2P\_1T

En el modelo de la derecha de la tabla 14 (2k\_2P\_1T) y tabla 16 se evidencia un mejor desempeño del camión k4 (54%) pero excede la capacidad de k3 en más de 100% lo que supone que se deben contratar al menos 2 equipos más con la misma configuración de k3.

En este modelo los camiones k3 y k4 transportan los productos p1 y p2, el producto p3 no está especificado en el modelo.

EDS	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	e9	e10	e11	e12	e13	e14	Total
k1		56.400		855											57.255
p1		56.400		855											57.255
k2	56.849	159.080	77.298	40.129	85.826	78.971	100.027	81.472	85.471	106.058	106.417	57.981	65.808	36.970	1.138.357
p1	16.781	88.200	8.508	31.509	23.038	5.531	34.351	7.004	43.150	35.111	35.601	40.667	33.657	29.569	432.677
p2	40.068	70.880	68.790	8.620	62.788	73.440	65.676	74.468	42.321	70.947	70.816	17.314	32.151	7.401	705.680
k3		67.500	31.200			31.200	80.960	19.200	27.600		18.000	27.600		27.600	330.860
p1		67.500					52.160		27.600			27.600		27.600	202.460
p2			31.200			31.200	28.800	19.200			18.000				128.400
k4		122.012	32.716	1.543	742	16.844	28.722		7.472	2.314	1.589	2.044	439	4.362	220.799
p1		121.843													121.843
p2			32.716			16.844	23.562								73.122
p3		169		1.543	742		5.160		7.472	2.314	1.589	2.044	439	4.362	25.834
Total	56.849	404.992	141.214	42.527	86.568	127.015	209.709	100.672	120.543	108.372	126.006	87.625	66.247	68.932	1.747.271

Tabla 15. Entregas por producto por camión (4k\_3P\_1T)

EDS	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	e9	e10	e11	e12	e13	e14	Total
k3	52.719	148.911	79.264	25.323	70.246	85.344	128.899	71.145	83.692	89.468	100.577	56.301	54.358	57.250	1.103.497
p1	16.781	140.161	8.508	21.397	15.718	5.531	64.551	6.387	45.130	20.471	28.281	38.987	26.337	49.849	488.089
p2	35.938	8.750	70.756	3.926	54.528	79.813	64.348	64.758	38.562	68.997	72.296	17.314	28.021	7.401	615.408
k4	4.130	204.708	61.950	15.661	15.580	41.671	75.650	29.527	29.379	16.590	23.840	29.280	11.450	7.320	566.736
p1		175.680		10.967	7.320		21.960	617	25.620	14.640	7.320	29.280		7.320	308.044
p2	4.130	29.028	61.950	4.694	8.260	41.671	53.690	28.910	3.759	1.950	16.520		4.130		258.692
Total	56.849	353.619	141.214	40.984	85.826	127.015	204.549	100.672	113.071	106.058	124.417	85.581	65.808	64.570	1.670.233

Tabla 16. Entregas por producto por camión (2k\_2P\_1T)

**Escenario normal:** corresponde a los modelos enmarcados en azul de la tabla 13, (4k\_3P\_4T: 4 tipos de camiones, 3 productos, 4 tarifas y 2k\_3P\_2T: 2 tipos de camiones, 3 productos, 2 tarifas). En este escenario se modela la condición de *tarifa por tipo de camión*.

En los dos modelos de la tabla 17 (4k\_3P\_4T y 2k\_3P\_2T) los productos p1 y p2 son transportado por los camiones k2 y k4 y el producto p3 es transportado sólo en el camión k4 (tabla 18 y 19). En ambos casos el nivel de uso del camión k2 es 55% y del camión k4 es 130%, lo que supone que se debe contratar al menos 1 camión con la misma configuración de k4.



EDS	k2	k4	Total	EDS	k2	k4	Total
e1		56.849	56.849	e1		56.849	56.849
e2	171.123	233.869	404.992	e2	175.800	229.192	404.992
e3	9.750	131.464	141.214	e3	23.390	117.824	141.214
e4	23.184	19.343	42.527	e4	30.921	11.606	42.527
e5	25.400	61.168	86.568	e5	25.580	60.988	86.568
e6	9.750	117.265	127.015	e6	31.100	95.915	127.015
e7	34.210	175.499	209.709	e7	57.570	152.139	209.709
e8	19.500	81.172	100.672	e8		100.672	100.672
e9	1.786	118.757	120.543	e9	2.702	117.841	120.543
e10	1.950	106.422	108.372	e10		108.372	108.372
e11	7.830	118.176	126.006	e11	21.430	104.576	126.006
e12	31.310	56.315	87.625	e12	3.900	83.725	87.625
e13		66.247	66.247	e13		66.247	66.247
e14	37.478	31.454	68.932	e14	878	68.054	68.932
<b>Total</b>	<b>373.271</b>	<b>1.374.000</b>	<b>1.747.271</b>	<b>Total</b>	<b>373.271</b>	<b>1.374.000</b>	<b>1.747.271</b>
Capacidad	673.900	1.053.400	1.727.300	Capacidad	673.900	1.053.400	1.727.300
Nivel Uso	55%	130%	101%	Nivel Uso	55%	130%	101%

Tabla 17. Resultados escenario normal. Modelos 4k\_3P\_4T y 2k\_3P\_2T

EDS	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	e9	e10	e11	e12	e13	e14	Total
k2		171.123	9.750	23.184	25.400	9.750	34.210	19.500	1.786	1.950	7.830	31.310		37.478	373.271
p1		112.623		23.184	17.600		18.610		1.786		5.880	31.310		37.478	248.471
p2		58.500	9.750		7.800	9.750	15.600	19.500		1.950	1.950				124.800
k4	56.849	233.869	131.464	19.343	61.168	117.265	175.499	81.172	118.757	106.422	118.176	56.315	66.247	31.454	1.374.000
p1	16.781	109.800	8.508	9.180	5.438	5.531	67.901	7.004	68.964	35.111	29.721	36.957	33.657	19.691	454.244
p2	40.068	123.900	122.956	8.620	54.988	111.734	102.438	74.168	42.321	68.997	86.866	17.314	32.151	7.401	893.922
p3		169		1.543	742		5.160		7.472	2.314	1.589	2.044	439	4.362	25.834
<b>Total</b>	<b>56.849</b>	<b>404.992</b>	<b>141.214</b>	<b>42.527</b>	<b>86.568</b>	<b>127.015</b>	<b>209.709</b>	<b>100.672</b>	<b>120.543</b>	<b>108.372</b>	<b>126.006</b>	<b>87.625</b>	<b>66.247</b>	<b>68.932</b>	<b>1.747.271</b>

Tabla 18. Entregas por producto por camión (4k\_3P\_4T)

EDS	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	e9	e10	e11	e12	e13	e14	Total
k2		175.800	23.390	30.921	25.580	31.100	57.570		2.702		21.430	3.900		878	373.271
p1		88.200		26.460	17.800		23.520		2.702					455	159.137
p2		87.600	23.390	4.461	7.780	31.100	34.050				21.430	3.900		423	214.134
k4	56.849	229.192	117.824	11.606	60.988	95.915	152.139	100.672	117.841	108.372	104.576	83.725	66.247	68.054	1.374.000
p1	16.781	119.223	8.508	5.904	5.238	5.531	62.991	7.004	68.048	35.111	35.601	68.267	33.657	56.714	528.578
p2	40.068	109.800	109.316	4.159	55.008	90.384	83.988	93.668	42.321	70.947	67.386	13.414	32.151	6.978	819.588
p3		169		1.543	742		5.160		7.472	2.314	1.589	2.044	439	4.362	25.834
<b>Total</b>	<b>56.849</b>	<b>404.992</b>	<b>141.214</b>	<b>42.527</b>	<b>86.568</b>	<b>127.015</b>	<b>209.709</b>	<b>100.672</b>	<b>120.543</b>	<b>108.372</b>	<b>126.006</b>	<b>87.625</b>	<b>66.247</b>	<b>68.932</b>	<b>1.747.271</b>

Tabla 19. Entregas por producto por camión (2k\_3P\_2T)

**Escenario optimista:** corresponde a los modelos enmarcados en verde de la tabla 13, (2k\_2P\_2T: 2 tipos de camiones, 2 productos, 2 tarifas y 4k\_3P\_4T: 4 tipos de camiones, 3 productos, 4 tarifas). En este escenario se modela la condición de *tarifa por tipo de camión*.

En el modelo de la izquierda de la tabla 20 (2k\_2P\_2T) y tabla 21 el producto p1 es transportado por los camiones k2 y k4 y el producto p2 es transportado en el camión k4, el producto p3 no se incluyó en el modelo. El nivel de uso del camión k2 es 44% y del camión k4 es 130% excediendo su capacidad.

EDS	k2	k4	Total	EDS	k2	k4	Total
e1		56.849	56.849	e1		76.849	76.849
e2	61.650	132.229	193.879	e2	3.169	77.631	80.800
e3		141.214	141.214	e3	2.674	180.894	183.568
e4	24.922	175.802	200.724	e4	4.943	53.184	58.127
e5	16.086	69.740	85.826	e5	3.742	102.426	106.168
e6		127.015	127.015	e6	4.973	152.015	156.988
e7	48.990	155.559	204.549	e7	15.617	267.299	282.916
e8		100.672	100.672	e8		120.672	120.672
e9	37.363	75.708	113.071	e9	10.172	133.571	143.743
e10	11.760	94.298	106.058	e10	5.314	126.438	131.752
e11	5.880	118.537	124.417	e11	5.589	143.217	148.806
e12	65.607	19.974	85.581	e12	6.044	105.581	111.625
e13		65.808	65.808	e13	1.896	87.808	89.704
e14	23.975	40.595	64.570	e14	9.362	86.570	95.932
<b>Total</b>	<b>296.233</b>	<b>1.374.000</b>	<b>1.670.233</b>	<b>Total</b>	<b>73.495</b>	<b>1.714.155</b>	<b>1.787.650</b>
Capacidad	673.900	1.053.400	1.727.300	Capacidad	673.900	1.053.400	1.727.300
Nivel Uso	44%	130%	101%	Nivel Uso	11%	163%	101%

Tabla 20. Resultados escenario optimista. Modelos 2k\_2P\_2T y 4k\_3P\_4T

EDS	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	e9	e10	e11	e12	e13	e14	Total
k2		61.650		24.922	16.086		48.990		37.363	11.760	5.880	65.607		23.975	296.233
p1		61.650		24.922	16.086		48.990		37.363	11.760	5.880	65.607		23.975	296.233
k4	56.849	132.229	141.214	175.802	69.740	127.015	155.559	100.672	75.708	94.298	118.537	19.974	65.808	40.595	1.374.000
p1	16.781	94.451	8.508	7.442	6.952	5.531	37.521	7.004	33.387	23.351	29.721	2.660	33.657	33.194	340.160
p2	40.068	37.778	132.706	168.360	62.788	121.484	118.038	93.668	42.321	70.947	88.816	17.314	32.151	7.401	1.033.840
<b>Total</b>	<b>56.849</b>	<b>193.879</b>	<b>141.214</b>	<b>200.724</b>	<b>85.826</b>	<b>127.015</b>	<b>204.549</b>	<b>100.672</b>	<b>113.071</b>	<b>106.058</b>	<b>124.417</b>	<b>85.581</b>	<b>65.808</b>	<b>64.570</b>	<b>1.670.233</b>

Tabla 21. Entregas por producto por camión (2k\_2P\_2T)

Día	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	e9	e10	e11	e12	e13	e14	Total
k2		3.169	2.674	4.943	3.742	4.973	15.617		10.172	5.314	5.589	6.044	1.896	9.362	73.495
p3		3.169	2.674	4.943	3.742	4.973	15.617		10.172	5.314	5.589	6.044	1.896	9.362	73.495
k4	76.849	77.631	180.894	53.184	102.426	152.015	267.299	120.672	133.571	126.438	143.217	105.581	87.808	86.570	1.714.155
p1	21.781	34.853	17.268	41.164	32.638	10.531	118.071	12.004	79.550	46.791	43.601	80.267	45.657	67.169	651.345
p2	55.068	42.778	163.626	12.020	69.788	141.484	149.228	108.668	54.021	79.647	99.616	25.314	42.151	19.401	1.062.810
<b>Total</b>	<b>76.849</b>	<b>80.800</b>	<b>183.568</b>	<b>58.127</b>	<b>106.168</b>	<b>156.988</b>	<b>282.916</b>	<b>120.672</b>	<b>143.743</b>	<b>131.752</b>	<b>148.806</b>	<b>111.625</b>	<b>89.704</b>	<b>95.932</b>	<b>1.787.650</b>

Tabla 22. Entregas por producto por camión (4k\_3P\_4T).

En el modelo de la derecha de la tabla 20 (4k\_3P\_4T) y tabla 22 el producto p3 es transportado exclusivamente por camión k2 alcanzando un nivel de uso del 11%. Los productos p1 y p2 son transportados por el camión k4 con un nivel de uso de 163%, lo que permite suponer que se requiere un camión adicional con la misma configuración para cubrir la totalidad de la demanda.

En la tabla 22 se muestra que la totalidad de los productos p1 y p2 se entregan en el camión k4 y el producto p3 en el camión k2. Cabe destacar que aunque no es usual dedicar

un equipo para la entrega de un solo producto, resulta muy importante analizar este resultado toda vez que se optimiza en mayor grado *el tiempo de llenado* en la planta de despacho.

Camión	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	e9	e10	e11	e12	e13	e14	Total
k2		3.169	2.674	4.943	3.742	4.973	15.617		10.172	5.314	5.589	6.044	1.896	9.362	73.495
2						2.033							1.896		3.929
3		2.940	2.674	2.940	2.940	2.940	2.940		2.940	2.940	2.940	2.940		2.940	32.074
4		229		2.003	802		2.940		2.940	2.374	2.649	2.940		2.940	19.817
5							2.940		2.940			164		2.940	8.984
6							2.940		1.352					542	4.834
7							2.940								2.940
8							917								917
k4	76.849	77.631	180.894	53.184	102.426	152.015	267.299	120.672	133.571	126.438	143.217	105.581	87.808	86.570	1.714.155
1				886			2.431								3.317
2				1.312	5		4.130		2.083				358	455	8.343
3		800	3.660	1.401	2.429	507	4.130		2.406	1.950	1.356	1.637	1.353	2.156	23.785
4	311	2.204	3.660	1.332	2.261	6.305	4.130	3.119	2.769	2.327	4.400	2.758	1.264	2.120	38.960
5	988	2.761	4.408	1.490	2.103	8.516	7.748	7.636	4.872	2.921	5.075	2.696	2.496	3.638	57.348
6	7.790	3.483	7.790	4.423	2.023	8.161	7.790	7.790	5.608	3.874	4.849	5.743	2.606	5.375	77.305
7	7.790	4.777	7.790	4.646	6.135	4.266	8.928	7.790	5.966	4.078	8.449	6.172	5.491	5.615	87.893
8	7.790	5.416	7.790	4.654	7.790	3.983	8.674	6.497	5.937	3.966	8.646	6.228	7.790	5.596	90.757
9	7.790	7.790	7.790	4.130	7.790	4.790	8.794	7.320	6.085	4.153	8.728	6.151	7.790	5.769	94.870
10	7.790	7.790	6.246	4.130	7.790	5.687	11.294	7.320	5.902	6.100	5.071	6.097	7.790	5.604	94.611
11	3.660	7.790	7.320	4.130	7.790	7.320	11.450	7.320	5.891	6.721	4.852	6.090	7.790	1.984	90.108
12	3.660	7.790	7.320	4.130	7.790	7.320	11.450	7.320	6.358	7.062	4.972	6.189	7.790	2.145	91.296
13	3.660	7.790	7.320	4.130	7.790	7.320	11.450	7.320	6.201	7.266	5.057	2.525	7.790	1.976	87.595
14	3.660	7.790	7.320	4.130	7.790	7.320	11.450	3.660	6.065	7.790	4.933	2.509	7.790	2.058	84.265
15	3.660	7.790	7.320	4.130	3.660	7.320	11.450	3.660	6.888	7.790	5.083	2.868	7.790	2.273	81.682
16	3.660	3.660	7.320	4.130	3.660	7.320	11.450	3.660	6.717	7.790	5.626	2.957	7.790	2.723	78.463
17	3.660		7.320		3.660	7.320	11.450	3.660	6.464	7.790	5.175	3.661	4.130	2.067	66.357
18	3.660		7.320		3.660	7.320	11.450	3.660	6.529	7.790	4.937	4.130		2.070	62.526
19	3.660		7.320		3.660	7.320	11.450	3.660	7.790	7.790	5.222	4.130		2.255	64.257
20	3.660		7.320		3.660	7.320	11.450	3.660	4.130	3.660	4.961	4.130		2.019	55.970
21			7.320		3.660	7.320	11.450	3.660	4.130	3.660	4.833	4.130		3.892	54.055
22			7.320		3.660	7.320	11.450	3.660	4.130	3.660	6.172	4.130		4.130	55.632
23			7.320		3.660	7.320	11.450	3.660	4.130	3.660	7.790	4.130		4.130	57.250
24			7.320			3.660	11.450	3.660	4.130	3.660	7.790	4.130		4.130	49.930
25			7.320			3.660	11.450	3.660	4.130	3.660	7.790	4.130		4.130	49.930
26			7.320			3.660	11.450	3.660	4.130	3.660	7.790	4.130		4.130	49.930
27			7.320			3.660	7.790	3.660	4.130	3.660	3.660	4.130		4.130	42.140
28			7.320					4.130							11.450
29								4.130							4.130
Total	76.849	80.800	183.568	58.127	106.168	156.988	282.916	120.672	143.743	131.752	148.806	111.625	89.704	95.932	1.787.650

Tabla 23. Distribución general de entregas por EDS

Con base en los resultados de los dos modelos, se concluye que la mejor solución es transportar el producto p3 en el camión k2, y los productos p1 y p2 en 2 camiones k4 de tal manera que balanceando las entregas puedan alcanzar un nivel de uso del 80%. A continuación se detalla el análisis del modelo óptimo alcanzado 4k\_3P\_4T.

En la tabla 23 se muestra la distribución general de entregas mensual por EDS y el tamaño de los lotes por cada camión. Se resalta en azul y en rojo algunas entregas de combustible que se hacen por debajo del mínimo esperado del 90% de la capacidad

nominal de los compartimientos, se evidencia además que la gran mayoría de las entregas se hace con compartimientos completos en los camiones k2 y k4 descartando el resto de camiones.

En la tabla 24A se presenta el balance de carga y el nivel de uso de cada uno de los compartimientos de k4, nótese que el número máximo de viajes corresponde a la frecuencia de uso más alta 237 viajes con c1, considerando que c2 tiene la misma capacidad de c3 se puede balancear los viajes distribuyendo equitativamente la carga, finalmente para optimizar al máximo la ocupación del camión se balancean los compartimientos c1 con c2 y c3 como lo muestra la tabla 24B, aunque el nivel de uso no mejora manteniéndose en el 84%, se evidencia una reducción significativa del 32% en el número de viajes.

Considerando la restricción del número de viajes de los camiones k4 (45800 galones: 4 viajes por día), se observa que las rutas pueden cubrirse fácilmente con dos camiones.

Descripcion	c1	c2	c3	Totales
No. De Viajes	211	237	84	237
Entregas Reales	651.345	756.365	306.445	1.714.155
Entrega Nominal	871.430	867.420	307.440	2.046.290
Variación Actual	75%	87%	100%	84%

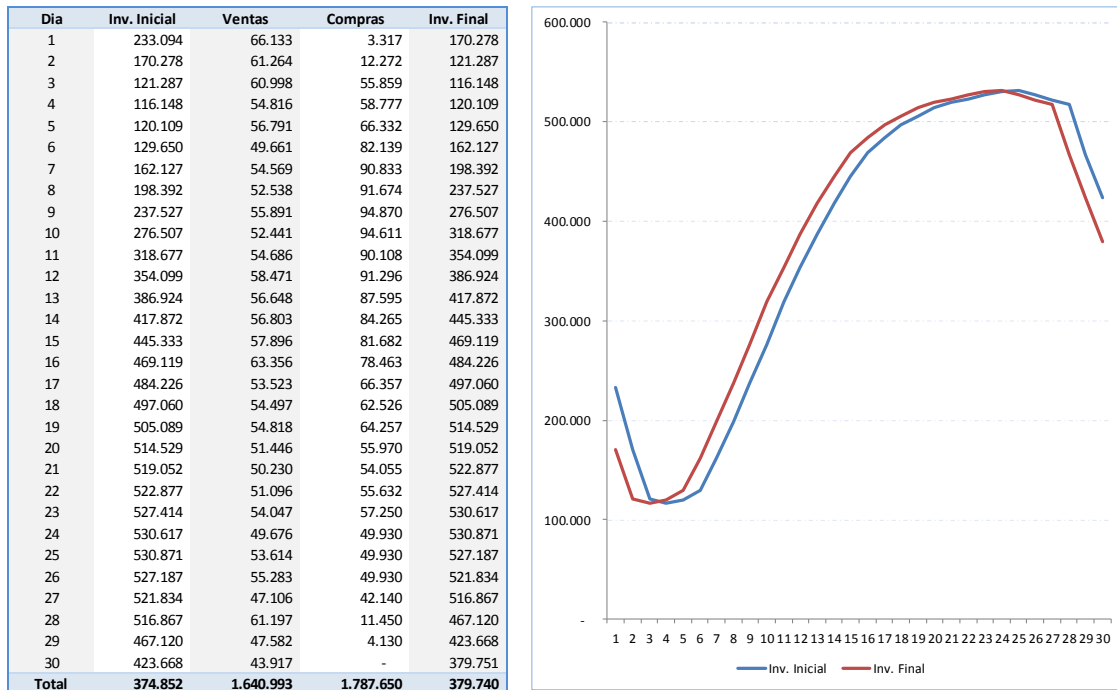
A

Descripcion	c1	c2	c3	Totales
No. De Viajes	179	179	178	179
Entregas Optimas	651.345	540.425	522.385	1.714.155
Entrega Nominal	739.270	655.140	651.480	2.045.890
Variación Optima	88%	82%	80%	84%

B

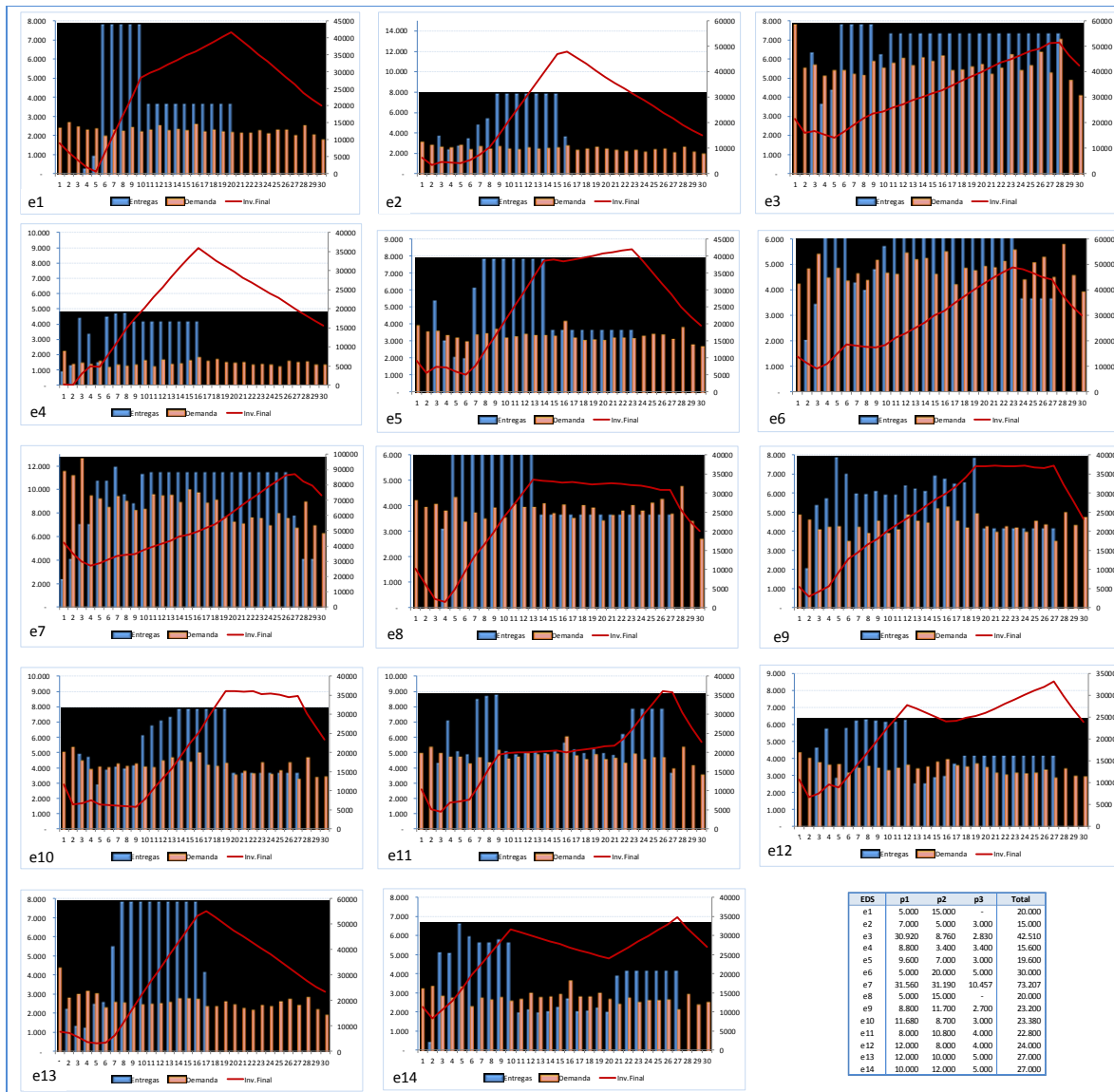
Tabla 24. Balance de lotes y compartimientos de k4

En la gráfica 9 se muestra el comportamiento general de los inventarios de las 14 EDS, se observa que en los primeros tres días el inventario llega a su nivel mínimo e inicia su recuperación hasta alcanzar el valor máximo el día 24.



Gráfica 9. Comportamiento general del inventario.

En la gráfica 10 se detalla el comportamiento de los inventarios por EDS, aunque todos los perfiles muestran un abastecimiento que cubre las expectativas de la demanda, el nivel de servicio es bajo en virtud a la rotura de inventarios en las EDS e1, e2, e4, e8, e9 y e13 en los primeros días, incumpliendo el numeral (a) de las condiciones generales. Por otra parte, se evidencia que el plan de abastecimiento es muy intensivo en la segunda y tercera semana desbordando la capacidad de almacenamiento de las EDS e incumpliendo además el numeral (e) por disponibilidad ociosa de los camiones en las EDS y/o plantas.



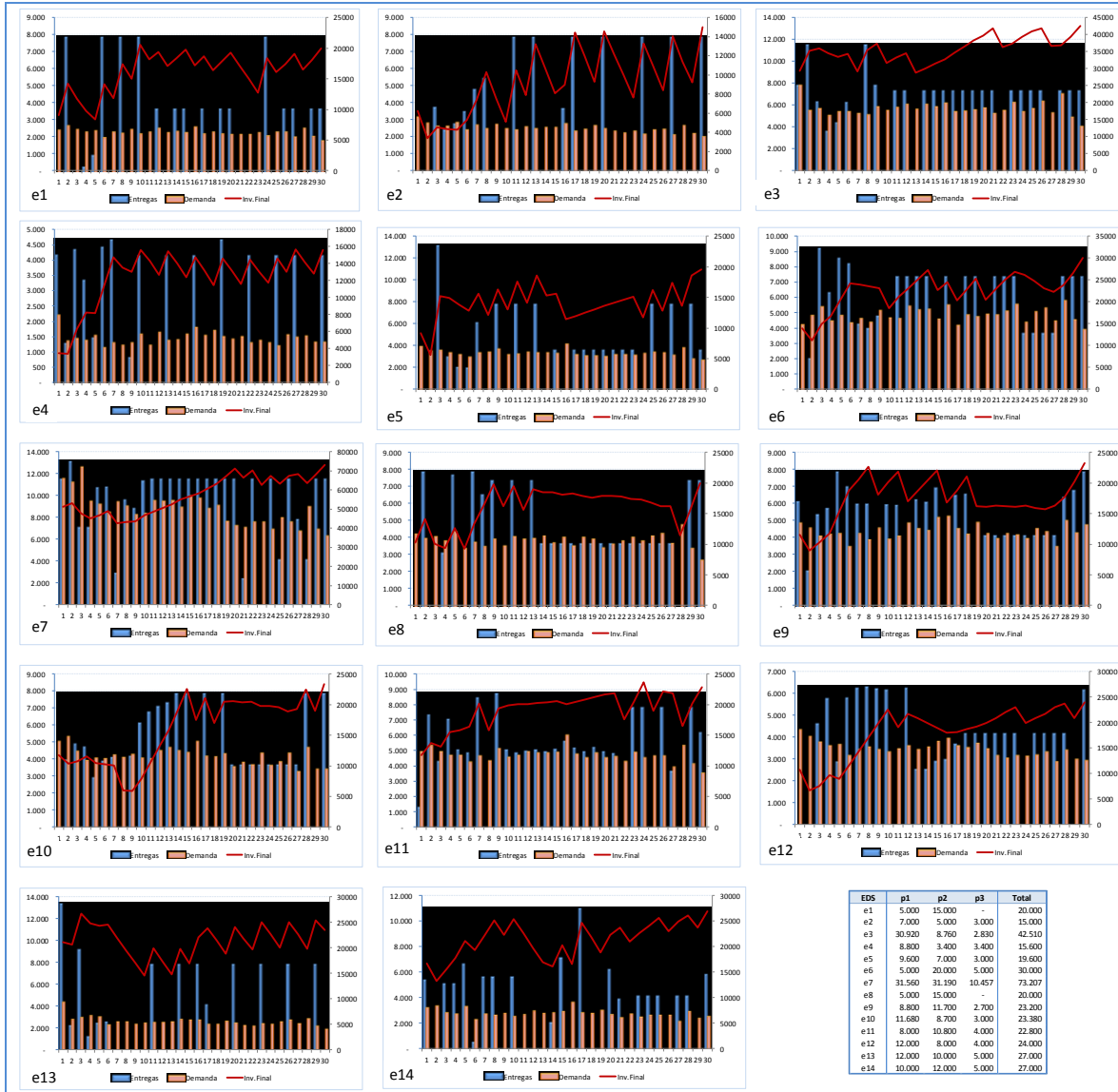
Gráfica 10. Comportamiento individual del inventario en las EDS.

#### 6.4. FASE 4: POST-OPTIMIZACION DISTRIBUCION Y TRANSPORTE

Dados los tamaños de los lotes y las frecuencias de distribución del escenario optimista (4k\_3P\_4T), se procederá a optimizar los resultados manualmente, buscando mejorar el balance en la distribución, interpretando los perfiles de las gráficas y variando únicamente las frecuencias de los viajes de manera que cumpla las condiciones generales del problema.

### 6.4.1. Aproximación inicial usando métodos manuales

A continuación se muestran los resultados de la post-optimización manual.



Gráfica 11. Comportamiento individual mejorado del inventario en las EDS.

Distribución de entregas de acuerdo a los resultados del modelo, día 1 al día 15.															
Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
e1				311	988	7.790	7.790	7.790	7.790	7.790	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660
e2			3.740	2.433	2.761	3.483	4.777	5.416	7.790	7.790	7.790	7.790	7.790	7.790	7.790
e3			6.334	3.660	4.408	7.790	7.790	7.790	7.790	6.246	7.320	7.320	7.320	7.320	7.320
e4	886	1.312	4.341	3.335	1.490	4.423	4.646	4.654	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130
e5		5	5.369	3.063	2.103	2.023	6.135	7.790	7.790	7.790	7.790	7.790	7.790	7.790	3.660
e6		2.033	3.447	6.305	8.516	8.161	4.266	3.983	4.790	5.687	7.320	7.320	7.320	7.320	7.320
e7	2.431	4.130	7.070	7.070	10.688	10.730	11.868	9.591	8.794	11.294	11.450	11.450	11.450	11.450	11.450
e8				3.119	7.636	7.790	7.790	6.497	7.320	7.320	7.320	7.320	7.320	3.660	3.660
e9		2.083	5.346	5.709	7.812	6.960	5.966	5.937	6.085	5.902	5.891	6.358	6.201	6.065	6.888
e10			4.890	4.701	2.921	3.874	4.078	3.966	4.153	6.100	6.721	7.062	7.266	7.790	7.790
e11			4.296	7.049	5.075	4.849	8.449	8.646	8.728	5.071	4.852	4.972	5.057	4.933	5.083
e12			4.577	5.698	2.860	5.743	6.172	6.228	6.151	6.097	6.090	6.189	2.525	2.509	2.868
e13		2.254	1.353	1.264	2.496	2.606	5.491	7.790	7.790	7.790	7.790	7.790	7.790	7.790	7.790
e14		455	5.096	5.060	6.578	5.917	5.615	5.596	5.769	5.604	1.984	2.145	1.976	2.058	2.273
<b>Total general</b>	<b>3.317</b>	<b>12.272</b>	<b>55.859</b>	<b>58.777</b>	<b>66.332</b>	<b>82.139</b>	<b>90.833</b>	<b>91.674</b>	<b>94.870</b>	<b>94.611</b>	<b>90.108</b>	<b>91.296</b>	<b>87.595</b>	<b>84.265</b>	<b>81.682</b>

Distribución de las entregas con aproximaciones manuales (Optimizado)															
Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
e1		7.790		311	988	7.790		7.790		7.790		3.660		3.660	3.660
e2			3.740	2.433	2.761	3.483	4.777	5.416			7.790		7.790		
e3	7.790	11.450	6.334	3.660	4.408	6.246		11.450	7.790		7.320	7.320		7.320	7.320
e4	4.161	1.312	4.341	3.335	1.490	4.423	4.646		855	4.130			4.130		
e5		5	13.159	3.063	2.103	2.023	6.135		7.790		7.790		7.790		3.660
e6		2.033	9.134	6.305	8.516	8.161	4.266	3.983	4.790		7.320	7.320	7.320	7.320	
e7	11.450	13.058	7.070	7.070	10.688	10.730	2.940	9.591	8.794	11.294	11.450	11.450	11.450	11.450	11.450
e8		7.790		3.119	7.636		7.790	6.497	7.320		7.320	7.320	7.320	3.660	3.660
e9	6.085	2.083	5.346	5.709	7.812	6.960	5.966	5.937		5.902	5.891		6.201	6.065	6.888
e10		3.966	4.890	4.701	2.921	3.874	4.078		4.153	6.100	6.721	7.062	7.266	7.790	7.790
e11	1.326	7.320	4.296	7.049	5.075	4.849	8.449		8.728	5.071	4.852	4.972	5.057	4.933	5.083
e12			4.577	5.698	2.860	5.743	6.172	6.228	6.151	6.097		6.189	2.525	2.509	2.868
e13	13.281	2.254	9.143	1.264	2.496	2.606					7.790			7.790	
e14	5.375		5.096	5.060	6.578	542	5.615	5.596		5.604				2.058	7.063
<b>Total general</b>	<b>49.468</b>	<b>59.061</b>	<b>77.126</b>	<b>58.777</b>	<b>66.332</b>	<b>67.430</b>	<b>60.834</b>	<b>62.488</b>	<b>56.371</b>	<b>51.988</b>	<b>74.244</b>	<b>47.973</b>	<b>66.849</b>	<b>64.555</b>	<b>59.442</b>

Distribución de entregas de acuerdo a los resultados del modelo, día 16 al día 30.															
Estación	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
e1	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660										
e2	3.660														
e3	7.320	7.320	7.320	7.320	7.320	7.320	7.320	7.320	7.320	7.320	7.320	7.320	7.320		
e4	4.130														
e5	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660							
e6	7.320	7.320	7.320	7.320	7.320	7.320	7.320	7.320	3.660	3.660	3.660	3.660			
e7	11.450	11.450	11.450	11.450	11.450	11.450	11.450	11.450	11.450	11.450	11.450	11.450	7.790	4.130	4.130
e8	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660		
e9	6.717	6.464	6.529	7.790	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130		
e10	7.790	7.790	7.790	7.790	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660		
e11	5.626	5.175	4.937	5.222	4.961	4.833	6.172	7.790	7.790	7.790	7.790	7.790	3.660		
e12	2.957	3.661	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130			
e13	7.790	4.130													
e14	2.723	2.067	2.070	2.255	2.019	3.892	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130		
<b>Total general</b>	<b>78.463</b>	<b>66.357</b>	<b>62.526</b>	<b>64.257</b>	<b>55.970</b>	<b>54.055</b>	<b>55.632</b>	<b>57.250</b>	<b>49.930</b>	<b>49.930</b>	<b>49.930</b>	<b>42.140</b>	<b>11.450</b>	<b>4.130</b>	<b>-</b>

Distribución de las entregas con aproximaciones manuales (Optimizado)															
Estación	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
e1		3.660		3.660	3.660				7.790		3.660	3.660		3.660	3.660
e2	3.660	7.790			7.790				7.790			7.790			7.790
e3	7.320	7.320	7.320	7.320	7.320	7.320		7.320	7.320	7.320	7.320		7.320	7.320	7.320
e4	4.130			4.654			4.130			4.130		4.130			4.130
e5		3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660		7.790		7.790		7.790	3.660
e6	7.320		7.320	7.320		7.320	7.320	7.320	3.660	3.660	3.660	3.660	7.320	7.320	7.320
e7	11.450	11.450	11.450	11.450	11.450	2.431	11.450		11.450	4.130	11.450	7.790	4.130	11.450	11.450
e8	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	7.320	7.320
e9		6.464	6.529		4.130	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130	6.358	6.717
e10		7.790		7.790	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	3.660	7.790		7.790
e11	5.626	5.175	4.937	5.222	4.961	4.833		7.790	7.790	7.790	7.790	3.660	3.660	7.790	6.172
e12	2.957	3.661	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130	4.130		4.130	4.130	4.130	4.130		6.090
e13	7.790	4.130			7.790			7.790			7.790			7.790	
e14		10.885			6.149	3.892		4.130	4.130	4.130		4.130	4.130		5.769
<b>Total general</b>	<b>53.913</b>	<b>75.645</b>	<b>49.006</b>	<b>58.866</b>	<b>68.360</b>	<b>45.036</b>	<b>42.140</b>	<b>53.590</b>	<b>61.380</b>	<b>46.740</b>	<b>57.250</b>	<b>58.190</b>	<b>41.178</b>	<b>67.157</b>	<b>86.261</b>

Tabla 25. Distribución de entregas mensual ajustado.



En la gráfica 11 se puede evidenciar que para cada EDS se cumplen todas las condiciones generales del problema. Se validó que para cada uno de los productos no hay rotura de inventarios y se garantiza que todas las entregas no sobrepasen la capacidad de la EDS. En la tabla 25 se muestran los ajustes manuales generados en la distribución de entregas diarias para cumplir las condiciones antes mencionadas.

Aunque los resultados del análisis previo en la tabla 25 y gráfica 11 muestran una buena configuración de la operación optimizando al máximo el inventario con un mínimo de viajes, se sugiere analizar si el balance de compartimientos y camiones se puede realizar al costo mínimo considerando un plan de rutas óptimo.

### 6.4.2. Mejor Solución

Como un ejercicio complementario que no hace parte del presente alcance se recomienda analizar un plan de rutas, y con base en estas, balancear las entregas de tal manera que se garantice la mínima cantidad de viajes optimizando el recorrido de los camiones. Para este análisis se sugiere el siguiente planteamiento:

Dados los lotes de productos p1, p2 y p3 que se pueden transportar desde la planta de abasto de combustibles de Medellín, en los camiones entregados por el modelo k2 y k4, hasta las 14 EDS localizadas en la zona metropolitana del Valle de Aburra; el problema consiste en asignar los lotes de productos a cada camión de manera que se puedan optimizar las entregas asegurando “en lo posible” viajes completos desde la planta de abasto hasta las EDS con entregas exclusivas por EDS y/o combinar las entregas usando algunas de las rutas sugeridas. En la tabla 16 se relacionan las distancias de la planta de abasto a cada EDS y de las EDS entre sí.

	PL	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	e9	e10	e11	e12	e13	e14
PL	-	26	16	23	12	14	29	5	32	15	19	1	7	13	8
e1	26	-	15	49	16	16	3	31	5	11	9	27	21	39	19
e2	16	15	-	38	6	6	14	21	17	1	5	17	11	25	9
e3	23	49	38	-	35	37	52	20	32	38	42	22	30	36	31
e4	12	16	6	35	-	3	19	17	22	5	9	13	7	25	5
e5	14	16	6	37	3	-	19	19	22	5	8	15	9	27	22
e6	29	3	14	52	19	19	-	34	3	14	12	30	36	42	22
e7	5	31	21	20	17	19	34	-	37	20	24	4	12	18	13
e8	32	5	17	32	22	22	3	37	-	17	15	33	27	44	25
e9	15	11	1	38	5	5	14	20	17	-	2	16	10	28	9
e10	19	9	5	42	9	8	12	24	15	2	-	20	14	31	12
e11	1	27	17	22	13	15	30	4	33	16	20	-	8	14	9
e12	7	21	11	30	7	9	36	12	27	10	14	8	-	20	15
e13	13	39	25	36	25	27	42	18	44	28	31	14	20	-	20
e14	8	19	9	31	5	22	22	13	25	9	12	9	15	20	-

Tabla 26. Matriz de distancias entre planta y EDS

En la figura 7 se muestra la ubicación de las 14 EDS y se establecen las rutas lógicas posibles. Cabe anotar que de acuerdo a la configuración de los camiones, a lo sumo, un camión puede entregar producto a tres EDS en un mismo viaje.



Descripcion	Ciclo Completo
Ruta 1	pl-ex-pl
Ruta 2	pl-e6-e8-pl
Ruta 3	pl-e1-e8-pl
Ruta 4	pl-e9-e10-pl
Ruta 5	pl-e9-e2-pl
Ruta 6	pl-e9-e2-e10-pl
Ruta 7	pl-e8-e10-pl
Ruta 8	pl-e4-e5-e2-pl
Ruta 9	pl-e14-e12-pl
Ruta 10	pl-e13-pl
Ruta 11	pl-e11-e7-pl
Ruta 12	pl-e11-e3-pl
Ruta 13	pl-e11-e7-e3-pl

Figura 8. Localización y distancias de la planta de abasto y EDS.

Dado que el modelo define el volumen del lote y asigna el vehículo a cada EDS, el mejoramiento consiste en identificar la ruta y asignar los lotes de producto de tal manera que se puedan obtener en “lo posible” viajes completos en distancias mínimas.

El enfoque del mejoramiento puede basarse en heurísticas simples como la de Lin Kernigan (1973) que a partir de una solución factible con K rutas se intercambian los arcos que sean necesarios a fin de validar si la solución mejora.

En muchas ocasiones se trata de visitar al cliente exactamente una vez, sin embargo, en otros casos puede aceptarse que su demanda pueda ser atendida de manera fragmentada o por vehículos diferentes. Los clientes podrían tener restricciones de horario, en forma de intervalos o ventanas de tiempo dentro de las cuales se debe atender su servicio. También podría tenerse en cuenta no sólo el tiempo de recorrido por la red, sino el tiempo de servicio al cliente (carga y descarga). También podrían existir restricciones de asociación entre vehículos y clientes, de manera que determinados clientes sólo puedan ser atendidos por determinados vehículos (por ejemplo, vehículos grandes y pesados que no pueden circular por calles estrechas o el centro urbano).

## 6.5. DOCUMENTOS DE SOPORTE PARA LA TOMA DE DECISIONES

Considerando que los modelos generados requieren de una base de información sólida y confiable con bajo nivel de incertidumbre para asegurar resultados exitosos. A continuación se muestran los formatos sugeridos que deben diligenciarse para soportar la toma de decisiones. Se sugiere el registro continuo de la información solicitada.

### 6.5.1. Formatos de configuración de capacidades

Estos formatos deben diligenciarse y/o actualizarse cada vez que entre un equipo o EDS.

#### a. Capacidad Flota

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Placa	Localizacion	Comp.1 (gal)	Comp.2 (gal)	Comp.3 (gal)	Comp.4 (gal)	Cap. Total (gal)	Tipo	Propietario

Se debe registrar: la placa del camión cisterna, la planta en la cual está inscrito el camión, la capacidad de cada compartimiento en galones (gal), el tipo de camión (sencillo, doble troque o tracto camión) y el propietario (si es propio o contratado).

#### b. Capacidad EDS

1	2	3	4	5	6
Nombre EDS	CeCo	Cap. P1 (gal)	Cap. P2 (gal)	Cap. P3 (gal)	Cap. Total (gal)

Se debe registrar: el nombre de la EDS, el centro de costo definido en el ERP y la capacidad de almacenamiento por producto.

#### c. Tarifa Fletes

1	2	3	4	5	6
Placa	Planta	CeCo	Distancia (Km)	No. Ruta	Tarifa (\$)

Se debe registrar: la placa del camión cisterna, el nombre de la planta, el centro de costo definido en el ERP, la distancia de la planta a la EDS en kilómetros, el número de ruta de acuerdo al plan nacional de rutas y la valor de la tarifa del flete de la planta a la EDS.

### 6.5.2. Formatos de control operacional

Estos formatos deben diligenciarse diariamente y reportar el resultado del análisis correspondiente.

#### d. Ventas

1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre EDS	CeCo	Fecha	Dia	Mes	Ventas P1 (gal)	Ventas P2 (gal)	Ventas P3 (gal)

Se debe registrar: el nombre de la EDS, el centro de costo definido en el ERP, la fecha en el formato día/mes/año y las ventas diarias por producto.

#### e. Pedidos

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No. Pedido	Nombre Planta	Nombre EDS	CeCo	Fecha	Hora	Cantidad P1 (gal)	Cantidad P2 (gal)	Cantidad P3 (gal)

Se debe registrar: el número asignado del pedido, nombre de la planta, nombre de la EDS, centro de costo definido en el ERP, la fecha en el formato día/mes/año, hora en el formato hora: minutos y el volumen solicitado por producto. De este reporte se deduce o puede estimarse la demanda por producto por EDS

#### f. Asignación

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Placa	No. Pedido	CeCo	Ruta	Fecha	Hora	Cantidad P1 (gal)	Cantidad P2 (gal)	Cantidad P3 (gal)

Se debe registrar: la placa del camión cisterna, el número asignado del pedido, el centro de costo definido en el ERP, el número de ruta de acuerdo al plan nacional de rutas, la fecha en el formato día/mes/año, hora en el formato hora: minutos y el volumen solicitado por producto. De este reporte se deduce el volumen y número de viajes máximo que puede soportar la flota así como la conveniencia de las rutas definidas.

Un reporte combinado de los pedidos y la asignación, permite determinar el nivel de servicio de la flota.

### g. Inventarios

1	2	3	4	5	6	7	8	9
CeCo	Fecha	Producto	Ventas (gal)	Compras (gal)	Inv. Inicial (gal)	Inv. Final (gal)	Cupo (gal)	Dias Inv.

Se debe registrar: el centro de costo definido en el ERP, la fecha en el formato día/mes/año, el producto (gasolina regular, gasolina extra o diésel), ventas consolidadas por producto, compras o entregas consolidadas por producto, inventario inicial o corte inicial del día anterior, inventario final o corte final del día, cupo disponible al final del día (ver formula de balance diario en la sección 6.2.2) y número de días de inventario. De este reporte se deriva el tamaño de los lotes y las frecuencias de compras y/o entregas. Adicionalmente contribuye a determinar los ingresos operativos por administración efectiva de los inventarios.

**Nota:** el manejo combinado de la información contenida en las tablas o formatos sugeridos, permite construir una base de datos para desplegar los informes bases del presente documento.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Partiendo de los objetivos primarios de la gerencia de operaciones para conectar las actividades más importantes del negocio en esta industria de aumentar el nivel de servicio para cubrir la demanda, maximizar el nivel de inventarios como fuente de mayores ingresos por el continuo incremento del producto y minimizar los costos de transporte a través una buena configuración de la flota de transporte, los resultados del proyecto en cada una de sus

fases son evidentemente satisfactorios, a continuación se describen las principales conclusiones y recomendaciones para la implementación futura de las herramientas.

## 7.1. CONCLUSIONES

Aunque la demanda de los diferentes productos es de tipo estocástica porque intervienen factores aleatorios imposibles de modelar o predecir, los resultados obtenidos en los diferentes escenarios son razonables bajo las condiciones modeladas con resultados factibles en casi todos los escenarios. En la medida que aumentan las restricciones para mejorar la solución, se van descartando los resultados primarios hasta llegar al escenario óptimo. Estos resultados nos permiten argumentar que el modelo es robusto porque es factible en los diferentes escenarios y adicionalmente alcanza un equilibrio entre factibilidad y optimalidad para cada escenario.

Metodologías como el DEA (Análisis Envolvente de Datos) permite la identificación de indicadores de eficiencia de una unidad productiva en relación al comportamiento de otras unidades similares, identifica fronteras eficientes (mejores prácticas, mejor uso de recursos) y permite hallar indicadores de gestión relativa para cada unidad con relación a aquellas que están en la frontera eficiente dando pautas para el mejoramiento de las unidades de menor desempeño, colocar metas y estrategias usando un “benchmarking” como línea base de mejora.

Para obtener la máxima contribución de la metodología DEA, los administradores y los tomadores de decisiones, deben seleccionar las variables necesarias que permitan determinar con precisión la frontera. Adicionalmente, asegurar que todas las variables aporten de igual manera al análisis de eficiencia, independientemente del número de DMUs observadas, permitiendo obtener estimaciones más fidedignas de la eficiencia de las DMUs y establecer metas para cada DMU ineficiente de las variables críticas seleccionadas.

Las aplicaciones desarrolladas para la optimización de los inventarios y el transporte permitieron demostrar la gran utilidad de las herramientas informáticas como LPsolve para la solución de problemas de moderada complejidad orientados a optimizar costos que redundan en ventajas competitivas y beneficios económicos para los diferentes actores.

De acuerdo a los resultados del modelo, las EDS alcanzaron en promedio un nivel de inventario superior al 85%, excediendo la condición de garantizar un mínimo de 80% en todos los productos con un aprovechamiento adicional de la infraestructura de almacenamiento del 46%.

Para el modelo de transporte en la fase de post-optimización, se logró cumplir las condiciones generales del problema de maximizar el nivel de inventario de las EDS, evitando mezclas o contaminaciones de productos, roturas de inventario y disponibilidad ociosa, entre otras. Adicionalmente se logró mejorar el desempeño de la flota al reducir el número de camiones de 8 a 3 unidades,

Si bien, el modelo de transporte permite optimizar la flota y el número de viajes, se presentan casos en los cuales el vehículo se traslada con viajes incompletos, por lo cual, es preciso complementar la solución teórica con una adecuada planeación de rutas para evitar desplazamientos de vehículos con compartimientos vacíos.

## **7.2. RECOMENDACIONES**

Considerando que la compañía cuenta con ERP de última generación, se debe implementar un informe que maneje tanto órdenes de venta como datos históricos para generar un pronóstico de la demanda de productos que deben ser atendidos en las EDS. A corto plazo se debe combinar la incertidumbre de los datos históricos con la certidumbre de los datos actuales para redefinir la demanda de manera confiable y orientar el abastecimiento de la red de EDS a minimizar los costos de transporte, optimizando el almacenamiento de inventarios cumpliendo con los requerimientos de servicio definido para las EDS.

Para la implementación de las herramientas se debe tener especial cuidado en aquellas regionales dónde el almacenamiento supera los 10 días de inventario dado a que pueden tener un alto potencial de degradación de los productos por su baja rotación. Aunque los modelos están orientados a mejorar el uso de los activos, se debe analizar cada EDS y cada unidad de transporte para validar la necesidad de aumentar los inventarios y/o eliminar la capacidad ociosa.

Se recomienda implementar y probar las herramientas en la regional Valle de Aburra y continuar el despliegue con las regionales de Occidente, Caribe y Distrito Capital pues en estas regionales se localiza más del 75% de la flota propia y más del 45% de la flota contratada.

Aunque los resultados de los modelos son satisfactorios, se recomienda definir políticas para las solicitudes de pedido (lotes eficientes), horarios de transporte y frecuencias de entrega para no interferir con las horas de mayor demanda de las EDS.

Para evitar la fase de ajuste manual en la post-optimización, se sugiere desarrollar un algoritmo que acumule los volúmenes residuales de los pedidos hasta completar la capacidad de un camión de tal manera que se minimice el traslado de viajes incompletos. Adicionalmente, que permita balancear las frecuencias de entrega sin que exceda la capacidad de almacenamiento de las EDS.

El éxito en la gestión logística depende de la capacidad de integración (información y sistemas, proveedores y clientes, recursos y decisiones, etc.). Por esta razón se debe buscar la integración del sistema de información geográfica SIG, la información del sistema logístico y la información del sistema de gestión de las EDS con los modelos matemáticos y técnicas de optimización necesaria para la optimización del transporte, la toma de decisiones y la gestión de flotas.

Para asegurar mejores resultados, se deben implementar indicadores de gestión orientados a controlar las actividades claves del proceso. A continuación se relacionan los de uso más frecuente en la industria.

Tipo	Distribución	Almacenamiento	Transporte
<b>Costos</b>	Costo de entregar	- Costo producto - Pérdidas por evaporación	- Costo de transportar por volumen - Costo operar vs costo mantener - Costo transporte vs margen ventas - Pérdidas por transporte - Costo viaje ida con carga - Costo viaje regreso sin carga
<b>Inventarios</b>		- Producto disponible - Nivel de inventario - Dias de inventario - Capacidad almacenamiento	- Producto en tránsito
<b>Productividad</b>	Pedidos atendidos	Rotación de inventario	- Volumen entregado por camión - Horas disponibilidad - Horas mantenimiento - % Viajes completos - # Viajes por día por camión
<b>Tiempos proceso</b>	Tiempo atención venta		- Tiempo entrega pedido
<b>Utilización</b>		% Ocupación tanques	- % Ocupación camiones
<b>Calidad &amp; Servicio</b>	% Devoluciones	% Roturas - Obsolescencia	- % Pedidos entregados a tiempo - % Faltantes - % Sobrantes - % Calidad

Tabla 27. Matriz de indicadores para la gestión de operaciones en EDS



## 8. REFERENCIAS

- Acuña, Enrique. (2005). Ruteo de vehículos con ventanas de tiempo para una cadena de supermercados regional en Chile, Tesis de Magister en Gestión de Operaciones de la Universidad de Chile.
- Arcweb. (22 de enero de 2008). TMS. Recuperado de <http://www.arcweb.com>.
- Avella Pérez, Diego. (2011). Manual Básico Solver Ms Excel 2010. BuenasTareas.com. Recuperado 07, 2012, de <http://www.buenastareas.com/ensayos/Manual-Basico-Solver-Ms-Excel-2010/4688414.html>
- Ballou, Ronald. (2004). Business Logistics management. USA: Prentice Hall.
- Beasley, J. (1983). Route first – cluster second methods for vehicle routing. *Omega*, 11, 403–408.
- Berenguer, J. And Ramos, J. Negocios digitales. (2003). Competir utilizando Tecnologías de Información. España: Ediciones Universidad de Navarra (EDUNSA).
- Bertsimas, D.J., Simchi, L.D. (1996). A new generation of vehicle routing research. *Operation research*, 44 (2). ISSN: 0030-364X.
- Bodin, L., Golden, B., Assad, A., Ball, M. (1983). Routing and scheduling of vehicles and crews – the state of the art. *Computers & Operations Research* 10, 63–211.
- Boonet. (2001). *New Directions in Supply Chain Management: Technology, Strategy & Implementation*. USA: Amacon.
- Charnes, A. et alter. (1997). *Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology and Applications*. New York, Kluwer Academic Publishers, Second edition.
- Chediak, P. Francisco y Valencia, A. Luz Stella. (2008). Metodología para medir la eficiencia mediante la técnica envolvente de datos DEA. *Vector*, 3, 70-81.
- Cheong, Y. M., Ong, H. L., Huang, H. C. (2002). Modeling vehicle routing problem for a soft drink distribution company. *Asia-Pacific Journal of operational research*, 19, 17-34.
- Clarke, G., Wright, W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12, 568–581.
- Coello Coello, Carlos A. (2007). *Journal Papers on Evolutionary Multiobjective Optimization*. Una nueva propuesta para optimización multiobjetivo basada en búsqueda dispersa (Scatter Search). Recuperado de <http://delta.cs.cinvestav.mx/~ccoello/EMOO/EMOOjournals.html#O>

- Colorni, A., Dorigo, M., Maniezzo, V. (1991). Distributed optimization by ant colonies. In Varela, F., Bourguin, P., eds.: Proceedings of the European Conference on Artificial Life, Elsevier, Amsterdam, 134–142.
- Corona, J.A. (2005). Hiper-heurísticas a través de programación genética para la resolución de problemas de ruteo de vehículos. Tecnológico de Monterrey. Mexico: Ed. Monterrey.
- Correa Espinal Alexander, Gómez Montoya Rodrigo A. (2009). Cadena de suministro en el sector minero como estrategia para su productividad. Grupo GIMGO, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.
- Correa. P. (2002). Guía práctica del GPS. Marcombo. Español.
- Dantzig, G. B. and Ramser. R.H. (1959). The Truck Dispatching Problem. Management Science, 6, 80–91.
- Díaz Parra Ocotlán, Cruz Chávez Marco Antonio. (2010). El Problema del Transporte. Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Avenida Universidad 1001. Col. Chamilpa. C.P. 62210. Cuernavaca, Morelos.
- Donoso, Yezid., Albor, Pedro., Benavides, Alex Benavides. (octubre, 2005). Optimización con múltiples objetivos utilizando Tabú Search. Ingeniería & Desarrollo. Universidad del Norte. 18: 34-49.
- Drango Serna Martín D, Pérez Ortega Giovanni y Arango Martínez Carlos A. (2008). Decisiones en la Gerencia de la Cadena de Suministro. Facultad de Minas, Universidad Nacional Sede Medellín, Colombia.
- ECR Europe. (1995). Executive Borrada Vision Statement. Unión Europea.
- Enfasis Logística. (Septiembre, 1998). Año 4, N° 5.
- Garey, M. R., Johnson, D.S. (2003). Computers and intractability, A Guide to the theory of NP-Completeness. W.H. Freeman and Company. New York, USA.
- Gaskell, T. (1967). Bases for vehicle fleet scheduling. Operational Research Quarterly, 18, 281–295
- Gendreau, M., Hertz, A., Laporte, G. (1994). A tabu search heuristic for the vehicle routing problem. Management Science 40, 1276–1290.
- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. Computers & Operations Research 13, 533–549.
- Golden, B., Assad, A., Levy, L., Gheysens, F. (1984). The fleet size and mix vehicle routing problem. Computers & Operations Research 11, 49–66.
- Golden, B., Magnanti, T., Nguyen, H. (1977). Implementing vehicle routing algorithms. Networks, 7, 113–148.

- González-Araya Marcela C., Valdés Valenzuela Nelson G. (2009). Método de selección de variables para mejorar la discriminación en el análisis de eficiencia aplicando modelos DEA, Escuela de Ingeniería Civil Industrial, Facultad de Ingeniería. Universidad de Talca. Merced N° 437. Curicó. Chile.
- GS1 Colombia. (23 de enero de 2008). Código de Barras. Recuperado de
- Gunasekaran, A. Laib, K. and Cheng, TCE. (2008) Responsive supply chain: a competitive strategy in a networked economy. *Omega* 36(4), 549–564.
- Gupta, D. K. (2002). Tabu search for vehicle routing problems (VRPs). *International Journal of Computer Mathematics*, 79(6), 693-701.
- Hannoch y Rothschild. (1972). Testing the assumptions of production theory: a non parametric approach. *Journal of Political Economy*, 80, 256-75.
- Hillier, F. S., Lieberman, G. J. (1994). Introducción a la investigación de operaciones. Ed. McGraw-Hill. 5ª ed.
- Holland, J. (1975). *Adaptation in Natural and artificial systems*. The University of Michigan Press. [http://www.gs1co.org/Respuestas/verContenido3.aspx?contenido=codigo\\_barras](http://www.gs1co.org/Respuestas/verContenido3.aspx?contenido=codigo_barras).
- HUGOS, Michael. (2003). *Fundamentos de la gestión de la cadena de suministro*. Nueva Jersey: John Wiley and Sons, Inc., ISBN 978-0-471-23517-0.
- IBM, Redbooks. (2003). *Implementing EDI Solutions*. USA: IBM.
- Ipek Koçoğlu, Salih Zeki, Imamoglu, Hüseyin Incea, Halit Keskin. (2011). The effect of supply chain integration on information sharing: Enhancing the supply chain performance, 7th International Strategic Management Conference.
- ITRG. (2002). *A success guide for e procurement*. Australia: ITGR.
- Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: an overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research* 59, 345–358.
- Laporte, G., Nobert, Y. (1987). Exact algorithms for the vehicle routing problem. *Annals of Discrete Mathematics* 31, 147–184.
- Lin, S. (1965). Computer solutions of the traveling salesman problem. *Bell System Technical Journal*, 44, 2245–2269
- Lin, S.; Kernighan, B.W. (1973). An effective heuristic algorithm for the traveling salesman problem, *Operations Research*, 21(2), 498-516.
- López Juan Fernando, Fernández Henao Sergio y Morales Marcela María. (2007). Aplicación de la técnica DEA (Data Envelopment Analysis) en la determinación de eficiencia de centros de costos de producción. *Scientia et Technica*, XIII (37). Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701

- Machado, J. Tavares, F.B. Pereira, and Costa, E. (Julio de 2002). Vehicle routing problem: Doing in the evolutionary way, in proceedings of the evolutionary computation conference (GECCO 2002). New York, USA.
- Maldonado, Miguel. (2008). El impacto de los factores críticos de éxito en la implementación de sistemas integrados de ERP. Cuad. Difus. 13 (25).
- Mauleón, Mikel (2003). Sistema de Almacenaje y Picking. España: Díaz de Santos.
- Microsoft. (2 de marzo de 2012). El CRM como estrategia de negocio. Recuperado de [http://www.microsoft.com/spain/empresas/soluciones/guia\\_crm.mspx](http://www.microsoft.com/spain/empresas/soluciones/guia_crm.mspx)
- Ministerio de Minas y Energía, Decreto 1521, Por el cual se reglamenta el almacenamiento, manejo, transporte y distribución de combustibles líquidos derivados del petróleo para estaciones de servicio, 6 de agosto de 1998.
- Ministerio de Minas y Energía, Decreto 1609, Por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera, 31 de Julio de 2002.
- Mole, R.H., Jameson, S.R. (1976). A sequential route-building algorithm employing a generalised savings criterion. Operational Research Quarterly 27, 503–511.
- Monterroso, Elda. (1998). El proceso logístico y la gestión de la cadena de abastecimiento.
- Olivera, Alfredo. (2004). Heurísticas para problemas de ruteo de vehículos, Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería, Universidad de la Republica, Montevideo, Uruguay.
- Orjuela Castro Javier, Castro Ocampo Oscar Fernando, Suspes Bulla Edwin Andrés. (2005). Operadores y plataformas logísticas. Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación en Competitividad de la Industria Colombiana (GICIC), Universidad Distrital.
- Osman, I. (1993). Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem. Annals of Operations Research 41, 421–451.
- Pereira, Francisco, Tavares, Jorge, P.M.E.C. (2002). GVR: A new genetic representation for the vehicle routing problem. In: Proceedings of the 13th. Conference on Artificial Intelligence and Cognitive Science (AICS 2002), 95–102.
- Potvin, J.Y., Rousseau, J.M. (1993). A parallel route building algorithm for the vehicle routing and scheduling problem with time windows. European Journal of Operational Research 66, 331–340.
- Price Water House Coopers. (10 de diciembre de 2007). Manual Práctico de Logística. Recuperado de <http://www.programaempresa.com/empresa/empresa.nsf/paginas/BA43A3DF9ED296C1C125705B0024E380?OpenDocument>.

- Quindós Morán María Del Pilar, Rubiera Morollón Fernando y Vicente Cuervo María Rosalía. (2005). Análisis Envolvente de Datos: una aplicación al sector de los servicios avanzados a las empresas del principado de Asturias. Universidad de Oviedo (Dpto. de Economía Aplicada).
- Ramírez S, N.A. (2006). Una nueva propuesta para optimización multiobjetivo basada en búsqueda dispersa (Scatter Search). Centro de investigación y de estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional - Departamento de Computación. México D.F.
- Ribas V, I., Companys P, R., (mayo, 2007). Estado del arte de la planificación colaborativa en la cadena de suministro: Contexto determinista e incierto. *Intangible Capital*, 2007 – (3)3: 91-121 - ISSN: 1697-9818.
- Rocha, L.; González, C. y Orjuela, J. (2011). Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución. En: *Ingeniería*, Vol. 16, No. 2, pág. 35 – 55.
- Sánchez Alvarez, Isidro, López Ares, Susana. Optimización con Solver. Departamento de Economía Cuantitativa. Universidad de Oviedo. España. Recuperado de <http://www.uv.es/asepuma/VI/31.PDF>
- Sanhueza Hormazábal, Raúl Edgardo. (2003). Fronteras de eficiencia, metodología para la determinación del valor agregado de distribución, Pontificia Universidad Católica de Chile, 46-61.
- SAP (Systems, Applications and Products). (6 de enero de 2008). ¿Qué es un ERP?. Recuperado de <http://www.mundosap.com/foro/showthread.php?t=424>.
- Sengupta, J.K. (1987). Efficiency Measurement in Non Market Systems Thorough DEA. *International Journal of Systems Science*, 18, 2279-2304.
- Urzelai Inza, A. (2006). Manual básico de logística integral. España: Ediciones Díaz de Santos.
- Yellow, P. (1970). A computational modification to the savings method of vehicle scheduling. *Operational Research Quarterly*, 21, 281–283.
- Zabala, Paula. (2006). Problemas de ruteo de vehículos. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
- Zapata Cortes, J. A., Arango Serna, M. D. & Adarme Jaimes, W. (2010). Herramientas tecnológicas al servicio de la gestión empresarial. *Avances en sistemas e informática*, 7 (3), ISSN1657-7663.

Palabras clave: Optimización de inventarios, Optimización de flota, Optimización Distribución y Transporte, Optimización Multiobjetivo, Optimización Red Estaciones de Servicio, Análisis Envolvente de Datos (DEA).