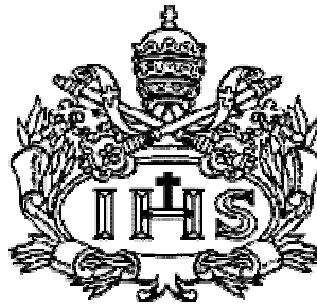


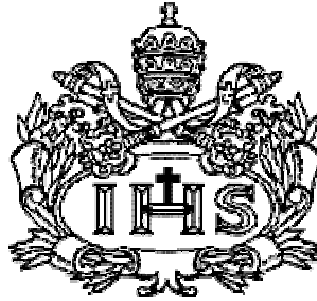
**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN MODELO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL  
PROCESO DE DISTRIBUCIÓN REALIZADO POR COLTANQUES LTDA. EN  
SU LÍNEA DE BOTELLEROS**



**MARÍA PIEDAD CORTÉS AGUDELO**

Pontificia Universidad Javeriana  
Carrera de Ingeniería Industrial  
Bogotá, D. C.  
2.009

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN MODELO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL  
PROCESO DE DISTRIBUCIÓN REALIZADO POR COLTANQUES LTDA. EN  
SU LÍNEA DE BOTELLEROS**



**Elaborado por:**  
MARÍA PIEDAD CORTÉS AGUDELO

TRABAJO DE GRADO

**Director:**  
JORGE ANDRÉS ALVARADO VALENCIA  
Ingeniero Industrial

Pontificia Universidad Javeriana  
Carrera de Ingeniería Industrial  
Bogotá, D. C.  
2.009

## 0. TABLA DE CONTENIDO

<b>0. TABLA DE CONTENIDO.....</b>	<b>7</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
1.2. Glosario .....	14
<b>2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....</b>	<b>17</b>
2.1. Situación actual.....	17
2.1.1. <i>Situación actual de la línea Botellers</i> .....	17
2.1.2. <i>Características de la línea Botellers</i> .....	20
2.2. Definición del problema.....	23
2.2.1. <i>Planeación y programación de los viajes</i> .....	23
2.2.2. <i>Imprevistos en la operación</i> .....	25
2.3. Soluciones actuales para problemas de ruteo.....	26
2.3.1. <i>Soluciones utilizadas actualmente en aplicaciones reales</i> .....	26
2.3.2. <i>Software disponible actualmente en Colombia para el diseño de rutas de distribución y servicios</i> .....	36
2.3.3. <i>Alternativas de solución</i> .....	41
<b>3. MODELO MATEMÁTICO.....</b>	<b>43</b>
3.1. Modelos revisados .....	43
3.1.1. <i>Problema del flujo de costo mínimo</i> .....	43
3.1.2. <i>Problema de ruteo con ventanas de tiempo (VRPTW)</i> .....	43
3.1.3. <i>Problema Job Shop</i> .....	44
3.2. Definición del modelo .....	44
3.2.1. <i>Conjuntos</i> .....	44
3.2.2. <i>Parámetros del modelo</i> .....	45
3.2.3. <i>Variables del modelo</i> .....	46
3.2.4. <i>Función objetivo del modelo</i> .....	46
3.2.5. <i>Restricciones del modelo</i> .....	46
3.3. Solución del modelo.....	48
<b>4. HEURÍSTICA.....</b>	<b>52</b>
4.1. Conceptos básicos.....	52
4.1.1. <i>Definición heurística</i> .....	52
4.1.2. <i>¿En qué casos usar un método heurístico y cómo seleccionar el adecuado?</i> 53	53
4.1.3. <i>Clasificación de los métodos heurísticos</i> .....	54
4.1.4. <i>Nivel de aspiración</i> .....	55
4.1.5. <i>Medición de la calidad de un algoritmo</i> .....	55
4.2. Esquema del algoritmo heurístico .....	58

4.2.1.	<i>Descripción de la heurística</i> .....	58
4.2.2.	<i>Iteración</i> .....	59
4.2.3.	<i>Regla de detención</i> .....	62
4.3.	Herramienta computacional .....	63
<b>5.</b>	<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b> .....	<b>64</b>
5.1.	Utilización recursos .....	64
5.2.	Costo – Beneficio .....	65
5.2.1.	<i>Asignación de recursos</i> .....	65
5.2.2.	<i>Venta y adquisición de nuevos tracto camiones</i> .....	66
5.3.	Análisis de sensibilidad .....	68
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>69</b>
6.1.	Conclusiones .....	69
6.2.	Recomendaciones .....	70
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>72</b>
<b>8.</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>76</b>
	Anexo 1: Resumen gastos operativos línea Botelleros.....	76
	Anexo 2: Características de los Tracto camiones y Botelleros.....	77
	Anexo 3: Restricciones de circulación.....	78
	Anexo 4: Datos operativos Plantas embotelladoras y Centros de Distribución .....	79
	Anexo 5: Proceso Planeación y Ejecución de Transporte .....	81
	Anexo 6: Viajes Planeados y Ejecutados en la línea Botelleros (Abril a Junio de 2009) .....	82
	Anexo 7: Incumplimiento de restricciones en los viajes.....	83
	Anexo 8: Precios LINGO .....	85
	Anexo 9: Clases de complejidad .....	85
	Anexo 10: Modelos matemáticos revisados .....	86
1.	<i>Problema del flujo de costo mínimo</i> .....	86
2.	<i>Problema de ruteo con ventanas de tiempo (VRPTW)</i> .....	87
3.	<i>Problema Job Shop</i> .....	88
	Anexo 11: Heurística .....	89
	Anexo 12: Especificaciones técnicas para el correcto uso del algoritmo heurístico .....	90
1.	<i>Especificaciones de hardware</i> .....	90
2.	<i>Especificaciones de software</i> .....	90
3.	<i>Especificaciones del algoritmo heurístico</i> .....	90
4.	<i>Consideraciones de uso del algoritmo heurístico</i> .....	91
	Anexo 13: Viajes programados por medio del algoritmo heurístico .....	92

Anexo 14: Costo promedio por kilómetro por vehículo .....	96
Anexo 15: Asignación de recursos según costo promedio por kilómetro .....	98
Anexo 16: Código del algoritmo heurístico.....	100

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo de Grado se desarrolla dentro de la operación de Botelleros de Coltanques Ltda., -empresa dedicada al transporte de carga en Colombia- abordando dos áreas muy importantes dentro de la Ingeniería Industrial, que se han convertido en herramientas fundamentales que una organización debe desarrollar y consolidar para asegurar una ventaja competitiva que le permita sobresalir en el nuevo mercado global: se trata de la Logística y la Investigación de Operaciones.

La logística gira en torno a crear valor para la cadena de suministros, al hacer posible que los clientes disfruten de un producto o servicio determinado, en el lugar y el momento que lo requieren. La logística considera varios aspectos, que son los que permitirán añadir valor y hacer más competitiva a una organización, ya que sus clientes estarán dispuestos a pagar más por un producto o servicio. Estos aspectos son:<sup>1</sup>

- Reducción de costos y transferencia de beneficios a los consumidores y a los accionistas, para aumentar la eficiencia de la cadena de suministros y hacerla más competitiva en los mercados globales.
- Mayor rapidez en el procesamiento de los requerimientos y en la entrega de los pedidos a los clientes, reducción de los errores y alta disponibilidad de los productos.
- Diferenciación de los productos de una compañía frente a los de sus competidores, ya que gracias al aumento de los niveles de servicio al cliente, se pueden penetrar nuevos mercados, incrementar la cuota del mercado y aumentar los beneficios.
- Mejoramiento del valor de *tiempo y lugar* de un negocio mediante el transporte, el flujo de información y los inventarios, al poner el producto o servicio donde y cuando el cliente lo desea.

De esta forma, las empresas buscan cada día mejorar el desempeño de sus cadenas de suministro, con el fin de llegar más rápidamente a cada uno de sus clientes y aumentar su productividad. Sin embargo, esto implica altos costos para la empresa. Al analizar la situación colombiana en desempeño logístico, vemos que su desempeño no es muy bueno en este aspecto y tiene importantes oportunidades de mejora:

El Índice de Desempeño Logístico del Banco Mundial ubicó a Colombia en 2008 en el puesto 82 entre 150 países y en la región solamente supera a Bolivia. Las mayores debilidades se encuentran en los componentes de aduanas e infraestructura, en donde el país ocupó los lugares 116 y 85 respectivamente.

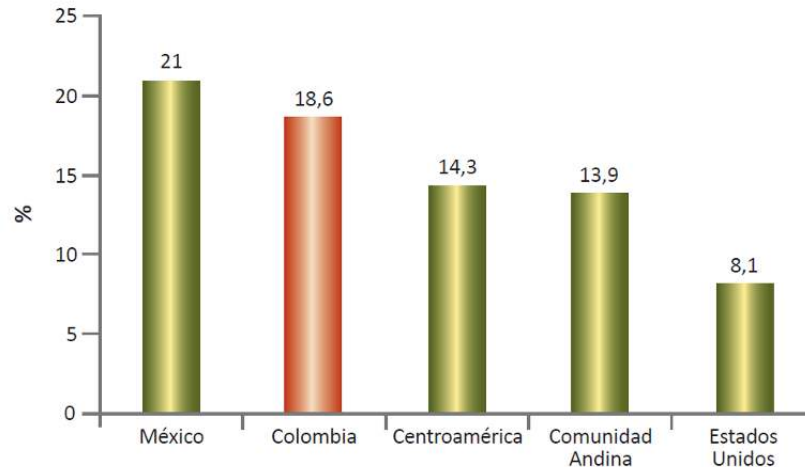
En un estudio para una muestra de empresas, el Banco Mundial (2006) calculó que los costos logísticos colombianos eran de 18,6% de las ventas mientras en

---

<sup>1</sup> BALLOU, R. Logística: Administración de la Cadena de Suministro. Quinta Edición. México: Pearson Education, 2004, 13 – 24 p.

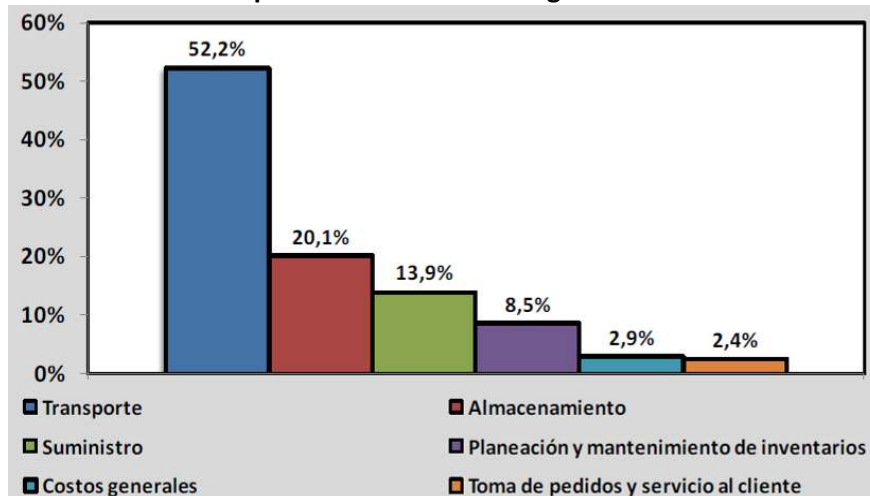
Estados Unidos eran de 8,1%. Esta diferencia se explica por: i) economías de escala debido al tamaño de las empresas norteamericanas con respecto a las colombianas, que les permite negociar fletes, espacios, tecnología y equipos a menor costo; ii) el valor agregado del producto es mucho mayor en Estados Unidos, lo que disminuye el cociente de costos sobre ventas; iii) el mayor costo de capital en Colombia incide en los costos de manejo de inventarios, y finalmente iv) costos nominales de almacenamiento.

**Gráfico 1. Costos logísticos como porcentaje de las ventas de las empresas (2006)**



Del total de los costos logísticos en Colombia, el 52,2% son costos de transporte, una proporción demasiado alta. El costo de transporte por tonelada-Km es 20% superior al de Argentina, 38% al de México y 13% más que en Brasil, tres países donde los kilómetros recorridos por vehículo son semejantes.<sup>2</sup>

**Gráfico 2. Composición de los costos logísticos en Colombia<sup>3</sup>**



<sup>2</sup> Informe Nacional de Competitividad 2008-2009, [en línea], Bogotá, Colombia. Consejo Privado de Competitividad, Octubre 2008, [citado 17-09-2009]. Disponible en Internet: <http://www.compite.ws/spccompite/resources/getresource.aspx?ID=352>

<sup>3</sup> GÓMEZ, H., *Mejorando la Competitividad en Colombia*, [boletín en línea]. Consejo Privado de Competitividad, Bogotá, Colombia, junio 11 de 2008, [citado 17-09-2009]. Disponible en Internet: <http://www.compite.ws/spccompite/resources/getresource.aspx?ID=313>

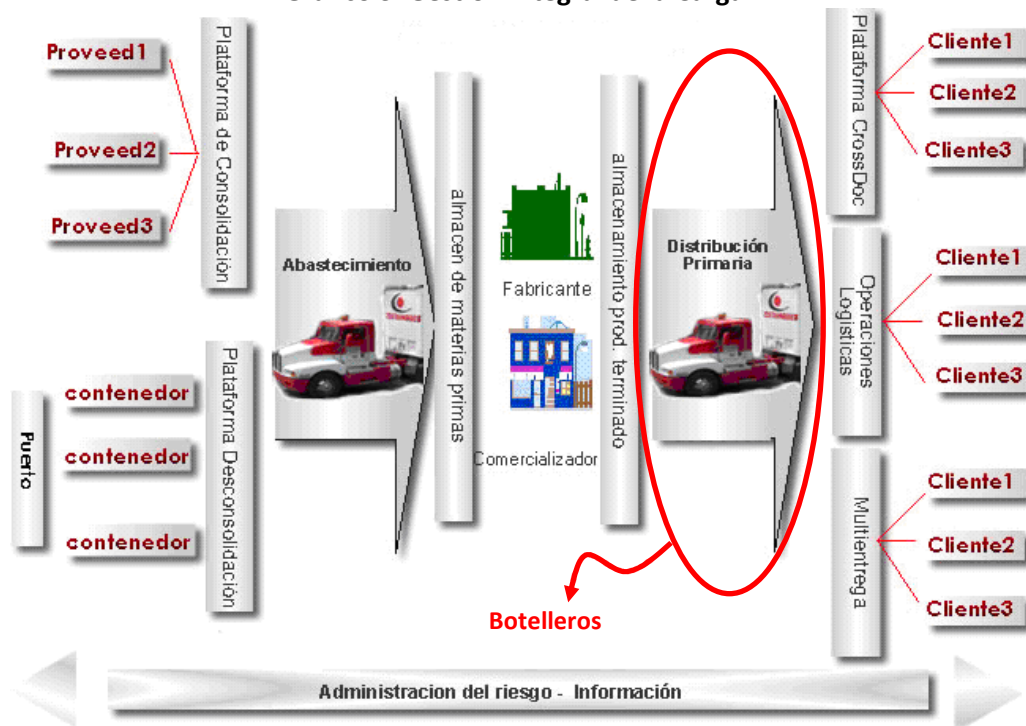
Entre los factores que influyen en los altos costos del transporte en Colombia, están los precios del combustible, pero también el atraso en la infraestructura vial:

Mientras en Colombia por cada millón de habitantes hay 350 kilómetros de vías, en Chile esa relación es de 860 kilómetros y en México de 900 kilómetros... La red vial, responsabilidad del INVIAS, tiene 16.000 kilómetros, de los cuales unos 12.000 están pavimentados, pero según Colfecar (Federación Colombiana de Transportadores de Carga por Carretera), para alcanzar los estándares internacionales, se necesitarían 35.000 kilómetros más de vías... Colombia tiene 9 kilómetros de vías por cada kilómetro cuadrado de área, mientras que Etiopía tiene 11, Senegal 20, Ghana 35 y Bangladesh 48.<sup>4</sup>

La Cámara Colombiana para la Infraestructura, señala que tenemos un atraso vial de 60 años que, al ritmo actual, nos tomará ese mismo tiempo subsanar.<sup>5</sup>

Tal como se observa en el Gráfico 3, la línea de Botelleros se encarga de la distribución primaria, llevando el producto terminado hacia los diferentes distribuidores quienes, finalmente entregan el producto al cliente final. Para llevar a cabo este proceso, debe hacer una cuidadosa programación que le permita sortear las dificultades implícitas en el almacenamiento del producto terminado, los altos costos del transporte (por precios del combustible y deficiencias en la red vial) y proporcionar soluciones eficientes a sus clientes.

Gráfico 3. Gestión Integral de la Carga<sup>6</sup>



<sup>4</sup> A ARIAS, L., *El rezago vial colombiano*, [página web en línea]. Tratado de Libre Comercio Andino – EEUU, Colombia, Octubre 15 de 2004, [citado 21-03-200]. Disponible en Internet: <http://www.tlc.gov.co/eContent/NewsDetail.asp?ID=3448&IDCompany=26>

<sup>5</sup> HERNÁNDEZ, S., *El TLC: ¿A lomo de mula?*, [página web en línea]. Opinet, Colombia, Mayo 15 de 2006, [citado 21-03-2008]. Disponible en Internet: [http://www.opinet.net/index.php?option=com\\_frontpage&Itemid=1](http://www.opinet.net/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1)



De esta forma, una empresa como Coltanques, dedicada al transporte terrestre de carga en Colombia, es un actor fundamental en este proceso, y de su eficiencia, depende que sobreviva a la fuerte competencia y a las dificultades y deficiencias del transporte nacional, convirtiéndose en aliado estratégico para de toda la industria del país.

Bajo este entorno, es necesario revisar las oportunidades de mejora que tiene la operación realizada por Coltanques para reducir los costos y simultáneamente descentralizar los mercados y los sitios de producción, generando mayores beneficios para la empresa y haciendo más competitivos los productos de sus clientes. En este punto, es donde adquiere importancia la otra herramienta que se pretende abordar en el presente Trabajo de Grado, la Investigación de Operaciones, la cual lleva a cabo los siguientes pasos:

El primer paso es: “La observación cuidadosa y la formulación del problema incluyendo la recolección de los datos pertinentes. El siguiente paso es la construcción de un modelo científico (por lo general matemático) que intenta abstraer la esencia del problema real. En este punto se propone la hipótesis de que el modelo es una representación suficientemente precisa de las características esenciales de la situación para que las conclusiones (soluciones) obtenidas sean válidas también para el problema real. Finalmente, se llevan a cabo los experimentos adecuados para probar esta hipótesis, modificarla si es necesario y eventualmente verificarla (validación del modelo)... Una característica adicional es que la investigación de operaciones intenta encontrar una mejor solución (llamada solución óptima) para el problema bajo consideración”.<sup>7</sup>

De esta forma, la investigación de operaciones se convierte en una herramienta para el mejoramiento de la eficiencia de una organización, y en el caso específico de este Trabajo de Grado, proporciona los elementos necesarios para el diseño y validación de un método, que proporcione una solución factible y que permita mejorar el proceso de distribución de Coltanques en su línea de Botelleros.

A través de la formulación y validación de un problema de investigación de operaciones, es posible optimizar el uso de los recursos de la empresa y diseñar las rutas para cada vehículo de acuerdo con la demanda de viajes para cada nodo, logrando prestar un servicio más ágil y preciso a sus clientes y generando mayor rentabilidad para la compañía.

Así, por medio de la aplicación de conocimientos propios de la Ingeniería Industrial, se pretende llegar a la solución de un problema empresarial real que permita:

- A nivel empresarial, contribuir al desarrollo de una importante empresa colombiana, que se ha consolidado como líder del sector transportador nacional, pero que requiere de grandes cambios para mantenerse en esta posición y ser más competitiva ante los nuevos retos que se le presentan. De esta forma, bajo un análisis de Ingeniería Industrial, se ha visto la necesidad de diseñar herramientas que le permitan a la

---

<sup>6</sup> COLTANQUES Ltda. *Gestión Integral de la Carga*, [página web en línea]. Colombia, 2005, [citado 21-03-2008]. Disponible en Internet: <http://www.coltanques.com.co/Gic/Gestion%20integral.htm>

<sup>7</sup> HILLIER, F y LIEBERMAN, G. Investigación de Operaciones. Séptima Edición. México: McGraw Hill, 2002, 2 – 3 p.

empresa el mejoramiento de sus procesos y la optimización de sus recursos para la prestación de servicios de altísima calidad a sus clientes.

- Impulsar una nueva etapa en el transporte terrestre del país, que requiere un cambio radical en la forma de hacer sus negocios, incluyendo herramientas de ingeniería para la optimización de sus operaciones, proporcionando una base confiable y bien cimentada a las actividades desarrolladas.
- A nivel académico, aplicar los conocimientos adquiridos durante la formación universitaria, en la solución de un problema específico de la Ingeniería Industrial, haciendo uso de herramientas de las áreas de Logística y Métodos Cuantitativos, especialmente. Se constituye así, en un reto personal, para demostrar capacidades, conocimientos e ingenio.

A continuación se presenta un glosario de términos útiles para entender los capítulos subsiguientes.

## 1.2. Glosario

**BOTELLERO:** Semirremolque dividido en compartimentos diseñados para el almacenamiento y transporte de botellas.

**CADENA DE SUMINISTROS:** Un conjunto de actividades funcionales (transporte, control de inventarios, etc.) que se repiten muchas veces a lo largo del canal de flujo, mediante la cual la materia prima se convierte en productos terminados y se añade valor para el consumidor.<sup>8</sup>

**CARPADO:** Proceso de poner y quitar la carpa de los vehículos que protege la carga. El tiempo de carpado puede variar dependiendo del modelo del botellero.

**CLASES DE COMPLEJIDAD:** Los problemas se clasifican en: clase P, clase NP, clase NP-completo y clase NP-Hard. (Ver [Anexo 9](#))<sup>9</sup>

**Clase P:** La clase de complejidad de los problemas cuya que pueden ser resueltos en tiempo polinómico calculado a partir de la entrada por una máquina de Turing<sup>10</sup> determinista. Entonces, los problemas pertenecen a la clase P si su solución puede ser descrita con precisión y ser programada para que la realice una computadora en tiempo

---

<sup>8</sup> *Ibíd.*, 7 p.

<sup>9</sup> RIOJAS, A., *Búsqueda Tabú: Conceptos, algoritmo y aplicación al problema de las N-reinas*, [documento en línea], Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad Ciencias Matemáticas, E.A.P. de Investigación operativa, Lima, Perú, 2005, [citado 17-09-2009]. Disponible en Internet: [http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtual/monografias/Basic/riojas\\_ca/contenido.htm](http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtual/monografias/Basic/riojas_ca/contenido.htm)

<sup>10</sup> Una máquina de Turing no es una máquina física sino un mecanismo lógico por medio del cual el cálculo puede descomponerse en iteraciones de operaciones concretas extremadamente simples (controladas por un "programa"). El principio de Turing es "Cualquier procedimiento que puede ser descrito con precisión puede ser programado para que lo realice una computadora"

que varíe polinómicamente (no exponencialmente, por ejemplo) en relación al tamaño de sus variables y/o parámetros de entrada. Estos problemas se denominan tratables.

**Clase NP (Non-Deterministic Polynomial-time):** Cuando los problemas sólo se pueden resolver usando una máquina de Turing no-determinista en tiempo Polinomial o si su solución se puede verificar en una máquina de Turing determinística en tiempo polinomial.

**Clase NP- completo:** Hay otra clase de problemas que perteneciendo a la clase NP tienen ciertas características que ameritan una clasificación aparte, son los NP-completos. Un problema de decisión C es NP-completo si es un problema NP y si todo problema de NP se puede transformar polinomialmente en él. Como consecuencia de esta definición, de tenerse un algoritmo polinomial para el problema C, se tendría una solución en la clase P para todos los problemas de NP.

**Clase NP-hard:** Cuando se prueba que un problema de optimización combinatoria en su versión problema de decisión, pertenece a la clase NP completa, entonces la versión optimización es NP- hard, es decir, que el número de posibles soluciones crece exponencialmente al aumentar el número de nodos del grafo y no es posible construir algoritmos que en tiempo polinomial resuelvan cualquier instancia del problema.

**HEURÍSTICA:** Procedimiento para el que se tiene un alto grado de confianza en que encuentra soluciones de alta calidad con un costo computacional razonable, aunque no se garantice su optimalidad o su factibilidad, e incluso, en algunos casos, no se llegue a establecer lo cerca que se está de dicha situación. Un método heurístico es un procedimiento para resolver un problema de optimización bien definido mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza de forma inteligente para obtener una buena solución.<sup>11</sup>

Con frecuencia, el procedimiento es un algoritmo iterativo novedoso, donde cada iteración implica la realización de una búsqueda de una nueva solución que puede ser mejor que la solución que se encontró con anterioridad. Cuando el algoritmo termina después de un tiempo razonable, la solución que proporciona es la mejor que se puede encontrar en cualquier iteración<sup>12</sup>.

**LINGO:** LINGO es una completa herramienta que permite construir y solucionar modelos de optimización lineales, no lineales y enteros, de forma más rápida, fácil y eficiente. LINGO ofrece un paquete completamente integrado que incluye un potente lenguaje para expresar modelos de optimización, un entorno que permite construir y editar problemas y un conjunto de solvers que se ejecutan rápidamente según el modelo, para obtener una solución.<sup>13</sup>

---

<sup>11</sup> RIOJAS, A., op. cit., 21 p.

<sup>12</sup> HILLIER, F y LIEBERMAN, G. Introducción a la investigación de operaciones. Octava Edición. México: McGraw Hill, 2006, 617 p.

<sup>13</sup> LINGO 11.0 - *Optimization Modeling Software for Linear, Nonlinear, and Integer Programming*, [página web en línea]. LINDO SYSTEMS, [citado 23-09-2009]. Disponible en Internet: [http://www.lindo.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2&Itemid=10](http://www.lindo.com/index.php?option=com_content&view=article&id=2&Itemid=10)

**LOGÍSTICA:** Parte del proceso de la cadena de suministros que planea, lleva a cabo y controla el flujo y almacenamiento eficientes y efectivos de bienes y servicios, así como de la información relacionada, desde el punto de origen hasta el punto de consumo, con el fin de satisfacer los requerimientos de los clientes.<sup>14</sup>

**METAHEURÍSTICA:** Método de solución general que proporciona tanto una estructura general como criterios estratégicos para desarrollar un método heurístico específico que se ajuste a un tipo particular de problema<sup>15</sup>. Están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son efectivos<sup>16</sup>.

**PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS:** Un problema de Ruteo de Vehículos consiste en, dado un conjunto de clientes y depósitos dispersos geográficamente y una flota de vehículos, determinar un conjunto de rutas de costo mínimo que comiencen y terminen en los depósitos, para que los vehículos visiten a los clientes. Las características de los clientes, depósitos y vehículos, así como diferentes restricciones operativas sobre las rutas, dan lugar a diferentes variantes del problema.<sup>17</sup>

**SEMIREMOLQUE:** Vehículo no autopropulsado diseñado y concebido para ser acoplado a un automóvil, sobre el que reposará parte del mismo, transfiriéndole una parte sustancial de su masa.<sup>18</sup>

**TEORÍA DE LA COMPLEJIDAD COMPUTACIONAL:** Es la rama de la teoría de la computación que estudia, de manera teórica, los recursos requeridos durante el cómputo de un algoritmo para resolver un problema. Los recursos comúnmente estudiados son el tiempo (mediante una aproximación al número y tipo de pasos de ejecución que un algoritmo emplea para resolver un problema) y el espacio (mediante una aproximación a la cantidad de memoria utilizada para resolver un problema)<sup>19</sup>.

El objetivo fundamental de la Complejidad Computacional es clasificar los problemas de acuerdo a su tratabilidad, tomando el o los algoritmos más eficientes para resolverlos, es decir, se quiere determinar las respuestas a las siguientes preguntas: ¿Cuán tratable es el problema? Y si el problema es tratable, ¿es el algoritmo eficiente?<sup>20</sup>

**TRACTOCAMIÓN:** Automóvil concebido y construido para realizar, principalmente, el arrastre de un semirremolque.<sup>21</sup>

---

<sup>14</sup> BALLOU, R. op. cit., 4 p.

<sup>15</sup> *Ibíd.*, 617 p.

<sup>16</sup> OSMAN, I y KELLY, J. *Meta-Heuristics: Theory and Applications*. Boston, USA: Editorial Kluwer Academic, 1996.

<sup>17</sup> OLIVERA, A. *Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos*, [documento en línea]. Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, Agosto 2004, [citado 17-09-2009]. Disponible en Internet: <http://www.fing.edu.uy/inco/pedeciba/bibliote/reptec/TR0408.pdf>

<sup>18</sup> *Definiciones y categorías de vehículo*, [página web en línea]. AUTOcity.com, [citado 24-09-2009]. Disponible en Internet: [http://motos.autocity.es/tramites\\_dgt/legislacion/reglamento\\_vehiculos/anexo2.html](http://motos.autocity.es/tramites_dgt/legislacion/reglamento_vehiculos/anexo2.html)

<sup>19</sup> *Complejidad computacional*, [página web en línea]. Wikipedia, [citado 17-09-2009]. Disponible en Internet: [http://es.wikipedia.org/wiki/Complejidad\\_computacional](http://es.wikipedia.org/wiki/Complejidad_computacional)

<sup>20</sup> RIOJAS, A., op. cit., 9 p.

<sup>21</sup> *Definiciones y categorías de vehículo*, [página web en línea]. AUTOcity.com, [citado 24-09-2009]. Disponible en Internet: [http://motos.autocity.es/tramites\\_dgt/legislacion/reglamento\\_vehiculos/anexo2.html](http://motos.autocity.es/tramites_dgt/legislacion/reglamento_vehiculos/anexo2.html)

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

### 2.1. Situación actual

#### 2.1.1. Situación actual de la línea Botelleros

En el frente de Botelleros de Coltanques, se atiende un solo cliente: Industria Nacional de Gaseosas. Industria Nacional de Gaseosas tiene cuatro plantas embotelladoras que atienden a treinta y un centros de distribución a nivel nacional, es decir, que diariamente, la tarea de Coltanques es abastecer dichos centros de distribución desde su correspondiente planta embotelladora:

**Tabla 1. Plantas y centros de distribución donde opera Coltanques**

PLANTA	CENTROS DE DISTRIBUCIÓN QUE ABASTECE
Cali	Armenia Buenaventura Buga Manizales Pasto Pereira Popayán
Barranquilla	Cartagena Corozal Montería Santa Marta Valledupar
Bogotá	Barbosa Bogotá Sur Chiquinquirá Duitama Fusagasugá Girardot Granada Ibagué La Dorada Neiva Tunja Villavicencio Villeta Zipaquirá
Bucaramanga	Aguachica Barrancabermeja Cúcuta San Gil

Entre estos cuatro nodos se mueven en promedio 1.798 viajes al mes, correspondientes a una facturación promedio de \$1.717.667.345 al mes. En la siguiente tabla, podemos ver cómo se distribuyen estos ingresos en cada una de las plantas embotelladoras:

**Tabla 2. Total viajes y facturación por mes en cada nodo de la línea de Botelleros**

Nodo	Promedio viajes por mes	Promedio facturado por mes *	Participación	Pareto	Tipo
Bogotá	757	\$ 581.451.953	33,85%	33,85%	A
Barranquilla	550	\$ 525.520.728	30,60%	64,45%	A
Cali	264	\$ 307.780.383	17,92%	82,36%	B
Bucaramanga	227	\$ 302.914.281	17,64%	100,00%	B
<b>TOTAL</b>	<b>1798</b>	<b>\$ 1.717.667.345</b>	<b>100,00%</b>		

\* Valores en pesos colombianos (\$)

Según esto, más del 60% de los viajes se concentran en los nodos Bogotá y Barranquilla, por lo cual es de gran importancia asegurar el cumplimiento de los viajes en estos dos nodos.

Por otra parte, al analizar los costos promedios mensuales para los primeros seis meses del 2009, de acuerdo con las cifras presentadas en el [Anexo 1](#), los gastos más importantes son combustible, peajes, salarios y gastos de mantenimiento (por la antigüedad de la mayoría de los vehículos), que ascienden al 76,4% del total de costos asociados.

En cuanto a los recursos disponibles para la operación de Botelleros en Coltanques, se dispone de los recursos indicados en la Tabla 3.

**Tabla 3. Recursos línea Botelleros**

Nodo	Conductores	Tracto camiones	Botelleros
Bogotá	24	22	37
Barranquilla	20	19	28
Bucaramanga	13	11	18
Cali	12	11	19
<b>Total</b>	<b>69</b>	<b>63</b>	<b>102</b>

Al revisar la antigüedad de los botelleros, según información del [Anexo 2](#), vemos que aproximadamente el 63,7% de los botelleros son modelos recientes (2005 o más recientes); sin embargo, hay un porcentaje alto (36,3%) de botelleros de modelos inferiores a 1998. Aunque los botelleros son propiedad del cliente, afectan el desempeño de la línea, ya que los botelleros viejos demandan mayores gastos de mantenimiento y cambios más frecuentes de llantas debido a que son más pesados; razón por la cual se debe revisar la asignación de estos botelleros, para que operen en centros de distribución que demanden menor número de viajes y se encuentren a una distancia menor de las plantas embotelladoras para que no generen gastos mayores.

Además, es importante la renovación de la flota de botelleros, ya que los modelos recientes tienen una mayor capacidad, lo que permite optimizar el proceso de distribución al poder llevar más carga por viaje a un menor costo.

Referente a los tracto camiones, de la información presentada en el [Anexo 2](#), vemos que más del 56% de la flota utilizada para la línea de Botelleros corresponde a modelos anteriores a 1997. Los tracto camiones más viejos demandan mayores gastos de mantenimiento (rubro que representa cerca del 12% del total de gastos) y combustible (37% del total de gastos). Este aspecto se debe tener en cuenta al momento de asignar los vehículos a cada ruta, de forma que las rutas más largas sean realizadas por recursos más nuevos que generen menos gastos, y viceversa para las rutas más cortas.

En las siguientes gráficas observamos fotografías de un botellero nuevo, un botellero viejo y un tracto camión.

#### Gráfico 4. Botelleros

##### Botellero nuevo



##### Botellero viejo



Gráfico 5. Tracto camión



La idea es que con una mejor asignación de los recursos, se requieran menos tracto camiones para realizar los viajes demandados por el cliente y se pueda pensar en renovación de la flota existente derivada de los ahorros generados, de una mejor utilización de la flota disponible y de la optimización de la operación en la línea de Botelleros.

### **2.1.2. Características de la línea Botelleros**

A continuación, describimos los aspectos y características de la línea bajo análisis, que se deben tener en cuenta en el diseño de la herramienta para la programación de viajes de la línea de Botelleros. En general, se deben tener en cuenta ocho tipos de restricciones:

#### **1. Restricciones de circulación**

Según la resolución 4626 del 13 de octubre de 2006, se restringe la circulación de vehículos de carga con capacidad de tres y media (3,5) toneladas o más, cuando se transportan productos considerados no perecederos en algunos trayectos de las carreteras del país, durante horarios establecidos.

En el [Anexo 3](#) se encuentra el listado de las vías en las cuales aplica restricción de circulación y que afectan la operación de Coltanques.

#### **2. Pico y placa ambiental:**

Por medio del decreto 174 de 2006, se adoptaron medidas para reducir la contaminación y mejorar la calidad del aire en el Distrito Capital. Según este decreto, se adopta una restricción de circulación en la ciudad de Bogotá, a los vehículos de transporte de carga de más de cinco toneladas, entre las 9:00 a.m. y las 10:00 a.m. de lunes a viernes.



### 3. Máxima velocidad permitida

- La velocidad promedio permitida es de 45 Km./h
- La velocidad máxima permitida con carga es de 40 Km./h (25 millas/h)
- La velocidad máxima permitida sin carga es de 50 Km./h (31 millas/h)

### 4. Horario de conductores

- Las horas laborales promedio para un conductor de vehículo de carga en Coltanques se encuentra entre 12 y 16 horas diarias.
- Los conductores deben descansar mínimo 6 horas antes de reiniciar sus labores.
- Deben tomar desayuno entre 8 y 9 de la mañana, almuerzo entre 12 y 1 de la tarde y comida entre 7 y 8 de la noche, horarios que pueden llegar a ser flexibles por conveniencia para el servicio.
- Durante el trayecto, cada tres horas de conducción efectiva, realizan un descanso de 15 minutos en los lugares previamente establecidos (por seguridad de la carga, el vehículo y el conductor), tiempo que ya está contemplado dentro de los tiempos de tránsito.
- Los conductores tendrán un máximo de 6 días laborales a la semana.

### 5. Disponibilidad de muelles para carga y descarga y botelleros para enganche y desenganche en plantas y centros de distribución

Cada planta embotelladora y cada centro de distribución tiene un número determinado de muelles disponibles para la carga y descarga de la mercancía, que pueden llegar a ser una restricción para el número de vehículos que se envíen simultáneamente a un centro de distribución o a una planta, porque se podrían generar demoras por la capacidad de atención de los vehículos.

Todos los centros de distribución tienen dos muelles para descargue, y en las plantas embotelladoras tenemos la disponibilidad señalada en la Tabla 4:

**Tabla 4. Disponibilidad de muelles para carga en las plantas embotelladoras**

PLANTA	NÚMERO MUELLES
Bogotá	4
Barranquilla	4
Bucaramanga	2
Cali	3

Además, hay que tener en cuenta que en las plantas embotelladoras y en algunos centros de distribución hay botelleros disponibles para enganche y desenganche inmediato cuando el vehículo llega, reduciendo los tiempos de espera durante el cargue y descargue ([Anexo 4](#)).

## 6. Ventanas de tiempo de atención

**En planta:** Hace referencia a los horarios en los cuales se puede hacer carga del producto en las plantas embotelladoras. Actualmente, las cuatro plantas (Barranquilla, Cali, Bogotá y Bucaramanga) tienen ventanas de atención las 24 horas del día.

**En CEDI:** Este aspecto hace referencia a los horarios durante los cuales los vehículos pueden descargar el producto en los diferentes centros de distribución. Cada CEDI tiene ventanas de tiempo de atención establecidas, lo cual restringe los horarios en que deben ser despachados los vehículos desde las plantas embotelladoras, con el fin de que el vehículo no tenga que esperar la apertura de la ventana, o cuando llegue, ésta ventana ya haya sido cerrada ([Anexo 4](#)).

## 7. Tiempo promedio de cargue en planta y descargue en CEDI

El tiempo promedio de cargue en planta es de 1,5 horas, incluyendo los 15 minutos de carpado. Este tiempo se reduce a 0,58 horas cuando hay trailer disponible para enganche y desenganche. El tiempo promedio de descarga en cada centro de distribución es de 2 horas, incluyendo los 15 minutos de carpado. Cuando el viaje se va a realizar a un CEDI pequeño, el tiempo de cargue en planta se incrementa porque se debe armar una carga mucho más variada, lo que hace que el picking y el conteo tomen mayor tiempo.

En el [Anexo 4](#) se encuentran los tiempos promedios de cargue y descargue en cada planta y para cada CEDI.

## 8. Restricciones adicionales

Adicionalmente, se deben tener en cuenta las siguientes restricciones, que aplican solo para ciertos nodos o centros de distribución y en determinados horarios, tal como se indica en la Tabla 5.

**Tabla 5. Restricciones adicionales para la línea de Botelleros**

RESTRICCIÓN	DESCRIPCIÓN	UNIDAD O NODO	HORARIO
Inventario en planta	No se puede cargar o descargar durante el tiempo que estén realizando el inventario diario	Planta Bogotá	6:00 - 7:30
		Planta Bucaramanga	6:00 - 7:00
		Planta Cali	6:00 - 7:00
Restricción de circulación en vía Bosa - Soacha	No está permitido el tráfico de vehículos de carga en la vía Bosa - Soacha, lo cual restringe los horarios de viaje hacia y retorno desde los CEDIS de Fusagasugá, Girardot, Ibagué y Neiva	CEDI Fusagasugá CEDI Girardot CEDI Ibagué CEDI Neiva	5:00 - 8:00 17:00 - 20:00

Restricción de circulación en Zipaquirá	Zipaquirá por ser considerada como patrimonio histórico, no está permitida la circulación de vehículos de carga durante el día. Adicionalmente, por la falta de buenas vías de acceso al CEDI, se deben, se deben utilizar contraflujos que solo están habilitados en horas de la noche.	CEDI Zipaquirá	6:00 - 22:00
Restricción en CEDI Girardot	Se redujo la ventana de atención en el CEDI por tutela de la comunidad para evitar tráfico de vehículos de carga durante todo el día	CEDI Girardot	15:00 - 20:00
Restricción vial por perímetro Urbano Calle 27	No pueden transitar vehículos de carga por la Calle 27 en Bucaramanga. Afecta viajes que salen hacia el CEDI Cúcuta; sin embargo, se puede tomar el anillo vial, sin que restrinja los viajes ni afecta el tiempo de recorrido	CEDI Cúcuta	9:00 - 17:00
Carro transportador de valores	No se permite entrada ni salida de vehículos de la planta por seguridad	Planta Bogotá	21:00 - 22:00
		Planta Bucaramanga	16:00 - 17:00
		Planta Cali	15:00 - 16:00

En el [Anexo 4](#) se encuentran los datos operativos de las plantas embotelladoras y de los centros de distribución, que afectan la programación de los viajes de la línea de botelleros: Disponibilidad de botelleros para enganche y desenganche, apertura y cierre de las ventanas de tiempo, distancia en kilómetros entre la planta embotelladora y cada CEDI de su nodo, tiempo promedio de cargue en planta, tiempo promedio de descargue en CEDI, tiempo promedio ida al CEDI, tiempo promedio retorno del CEDI y tiempo total del ciclo para cada CEDI.

## 2.2. Definición del problema

### 2.2.1. Planeación y programación de los viajes

El Proceso de Planeación y Ejecución de Transporte que realiza el cliente, corresponde al esquema mostrado en el [Anexo 5](#). Allí, podemos observar el flujo de información entre el cliente y Coltanques, caracterizado por los ajustes mensuales, semanales y diarios en los requerimientos de servicio por parte del cliente, que generan altos incumplimientos y cancelaciones de la programación.

En el [Anexo 6](#), se presentan los viajes planeados y ejecutados en todos los nodos, para los meses de Abril, Mayo y Junio de 2009. Esta programación nos permite ver que los niveles de ejecución de los viajes planeados por el cliente difieren del 100%, especialmente en el nodo

Bogotá, dadas las restricciones de circulación que existen en dicho nodo y que impiden muchas veces el cumplimiento de la programación. En la Tabla 6 se ve un resumen del cumplimiento:

**Tabla 6. Diferencia porcentual entre viajes planeados y ejecutados**

Nodo	Diferencia			
	Abril	Mayo	Junio	Total
Barranquilla	124%	92%	101%	105%
Bogotá	73%	54%	52%	59%
Bucaramanga	105%	79%	91%	90%
Cali	119%	87%	92%	98%
<b>Total</b>	<b>95%</b>	<b>70%</b>	<b>71%</b>	<b>78%</b>

Entre las principales razones de las diferencias entre viajes planeados y ejecutados, encontramos los cambios hechos por el mismo cliente, quien determina diariamente, de acuerdo a sus niveles de ventas, si es necesario incrementar o disminuir el número de viajes inicialmente planeado para algún centro de distribución. Pero por otra parte, se encuentra también el incumplimiento por parte de Coltanques, quien no ha desarrollado un mecanismo eficaz para realizar la programación y asegurar su cumplimiento, evitando la violación de las restricciones de ventanas de tiempo, circulación y muelles antes descritas.

Bajo estas condiciones, vemos que los viajes en el frente de Botelleros no tienen un patrón uniforme que facilite su programación, ni hay herramientas estadísticas y tecnológicas que permitan la prestación de un servicio coordinado y cumplido, adaptable a las necesidades cambiantes del cliente. Es por esa razón, que en ocasiones, ante la imposibilidad de cumplir los viajes pactados con los recursos actuales, es necesario incluir recursos de otras líneas de Coltanques para cumplir con su cliente, situación que se puede evitar aumentando la utilización de los recursos inicialmente asignados para Botelleros.

Por otra parte, al analizar los viajes ejecutados en los meses de Abril, Mayo y Junio de 2009 por Coltanques y revisar si efectivamente cumplen con las restricciones establecidas ([Anexo 7](#)), encontramos que en promedio, en el 22,75% de los viajes se está incumpliendo alguna restricción; siendo Cali el nodo más crítico, con incumplimientos en el 36,01% de los viajes que allí se realizan, seguido de Bogotá con el 30,70%, Bucaramanga 18,2% y por último Barranquilla con solo 7,66% de incumplimientos.

La restricción que se incumple con mayor frecuencia (más del 56% de las veces y en el 12,84% de los viajes) es la referente a ventanas de tiempo, esto debido a que no exige un estricto cumplimiento, porque dependiendo de la necesidad de producto que tenga el centro de distribución puede recibir el viaje aún fuera de sus ventanas de tiempo; sin embargo, cuando se cumplen estrictamente las ventanas de tiempo, incumplir esta restricción significa grandes tiempos de espera y tiempo improductivo de los recursos.

Lo mismo sucede con las restricciones por inventario en planta o por ingreso del carro de valores, dependen de las necesidades del centro de distribución y de la planta, por lo cual pueden llegar a ser incumplidas sin que esto genere retrasos en el viaje, como se ve en el 18,17% de los casos y el 4,13% de los viajes ejecutados.

En cuanto a las restricciones de circulación, se deben cumplir estrictamente, porque el cruce de un viaje con una de estas restricciones, inevitablemente generará retrasos en el viaje y tiempo improductivo del recurso. Estas restricciones se presentan solamente en el nodo Bogotá, donde se debe garantizar salidas a tiempo de la planta y de los centros de distribución, por lo cual depende también en gran medida de que se ejecuten tiempos estándar de cargue y descargue. El incumplimiento de estas restricciones corresponde al 25,39% de los casos y al 5,78% de los viajes, pero si se tiene en cuenta solo el nodo Bogotá, estos incumplimientos están afectando cerca del 14% de sus viajes, principal razón para que el nivel de ejecución de los viajes planeados sea tan bajo en ese nodo.

### 2.2.2. Imprevistos en la operación

Las demoras e incumplimientos a la programación de viajes establecida se deben en gran parte a los imprevistos y demoras en la operación, que son responsabilidad tanto de Coltanques como del cliente.

Por parte de Coltanques, encontramos que en varios viajes, hubo inconvenientes relacionados con el funcionamiento del vehículo (en algunos casos tardó más de un día su solución), que corresponden al 0,66% de los viajes ejecutados entre Abril y Junio de 2009, tal como se aprecia en la Tabla 7:

**Tabla 7. Inconvenientes relacionados con vehículos**

Observaciones	Ida	Retorno
Mantenimiento	1	2
Montaje Llantas	3	1
Tanqueo	2	13
Varado	10	3
<b>Total general</b>	<b>16</b>	<b>19</b>

Por parte del cliente, también se presentan retrasos importantes en los tiempos de cargue y descargue (Tabla 8), aumentando significativamente los tiempos estándar de operación, lo cual desencadena demoras e incumplimientos en la ejecución final de los viajes, retrasos que deben ser asumidos por Coltanques y no por el cliente. Estos retrasos se presentaron en el 4% de los viajes ejecutados entre Abril y Junio de 2009.

**Tabla 8. Retrasos en la operación generados por el cliente**

Observaciones Cargue	Total	Tiempo promedio	Observaciones Descargue	Total	Tiempo promedio
Demora en armado Picking	31	2:10:06	Demora en conteo	175	1:27:34
Falta de Producto	2	5:04:00	Demora en Documentos	3	1:05:20
			Producto Sin grabar	1	1:25:00
<b>Total general</b>	<b>33</b>	<b>2:20:38</b>	<b>Total general</b>	<b>179</b>	<b>1:27:12</b>

## 2.3. Soluciones actuales para problemas de ruteo

### 2.3.1. Soluciones utilizadas actualmente en aplicaciones reales

A continuación vamos a revisar la forma en que algunas empresas han abordado sus problemas de ruteo de vehículos:

- **Recuperación y reciclaje de envases en la industria cervecera:**<sup>22</sup>

Una de las actividades poco difundidas y desarrolladas en las empresas mexicanas es la logística inversa; aunque no la desconocen, no la han considerado como parte de su cadena de suministro y más aún, como una manera efectiva de mermar costos. Cervecería Cuauhtémoc Moctezuma FEMSA realizó un estudio para la planeación de un sistema de redes de logística inversa, diseñado para la recolección de envase no retornable de vidrio y aluminio, el cual busca gestionar el proceso de la forma más efectiva y económica posible a través del diseño técnico-científico de operación y redes de recopilación.

El análisis de rutas de recolección es importante dado que uno de los costos más representativos en las cadenas de distribución en México son los comparativamente altos precios de transporte terrestre. El objetivo de recopilar los envases de vidrio y aluminio es la reincorporación del material al ciclo económico, ya sea en la producción de envase nuevo o en otros sectores.

Para este caso de logística inversa, se parte de la formulación básica para los modelos de ruteo conocida como problema de ruteo con vehículo de capacidad definida (en inglés Capacitated Vehicle Routing Problem-CVRP). Este modelo es conocido en matemáticas como NP-hard o de difícil solución cuando aumenta el número de sitios que deben ser visitados, sólo pequeñas y medianas instancias del problema (hasta 100 clientes) pueden ser solucionados a un óptimo. Por esta razón, se recurre al uso de potentes algoritmos heurísticos que encuentran una buena solución.

Para la solución del problema de ruteo inverso, en este caso, primero se usa el algoritmo de vecino más cercano (en inglés nearest neighbor) para calcular una solución inicial. Este algoritmo parte del origen al cliente más cercano donde se toma la carga de producto. Sucesivamente se va identificando y desplazándose al vecino más próximo revisando cada vez, no sobrepasar las restricciones de máxima capacidad del vehículo transportador, ni el tiempo máximo de ruta considerando también el tiempo de regreso al origen.

Para trabajar con la naturaleza de la demanda y abasto inversos, y apoyándose en métodos determinísticos, se estiman diferentes escenarios de ruteo para su diseño. Estos escenarios fueron basados en un porcentaje de recuperación en el método de diseño. En el primer escenario se considera un porcentaje de recuperación de 10%, que se obtuvo de los porcentajes reales que esquemas anteriormente aplicados han logrado en su inicio.

---

<sup>22</sup> BARRERA, M., *Recuperación y reciclaje de envases en la Industria cervecera*, [página web en línea]. Énfasis Logística Online, México, 2006, [citado 09-12-2009]. Disponible en Internet: <http://www.logistica.enfasis.com/notas/3840-recuperacion-y-reciclaje-envases-la-industria-cervecera>

Los clientes se dividieron en dos grupos de acuerdo con la cantidad de envase no retornable y su contribución a la capacidad del transporte. Clientes que aportan mensualmente más o igual a 10% de la capacidad del vehículo transportador se decidieron visitar una vez por semana. El resto de los clientes se visitará una vez cada dos semanas. Adicionalmente, los clientes se clasifican en cuatro cuadrantes de acuerdo con su ubicación.

El tiempo total de las rutas para todos los clientes (3.732,56 min) es ligeramente mayor que la suma del tiempo total de rutas para los cuatro cuadrantes (3.620,90 min). Respecto al número de rutas, para el total de clientes es de 33 y la suma de las rutas por cuadrantes es igual a 32. Es importante tener en cuenta que el número de clientes determina el tiempo de cómputo del algoritmo. Para este caso, el algoritmo se corrió especificando mejoras sólo mayores a 10 minutos limitando el tiempo de cómputo, de otra manera tomaría más de 24 horas obtener un resultado con rutas mejoradas.

Las rutas son agrupadas de manera que la suma de su tiempo de operación no sobrepase la restricción de 420 minutos/día. El número de rutas agrupadas es el mismo tanto para el total de clientes como para la suma de los cuadrantes. Se puede concluir que se necesitarían dos vehículos transportadores operando cinco días a la semana para cubrir todas las rutas exclusivas de recolección de envase no retornable para clientes de recolección semanal, asumiendo 10% de porcentaje de recuperación.

Para los clientes que se visitan en un periodo de cada dos semanas, el tiempo total de rutas para todos los clientes (3.073,70 min) es ligeramente menor que la suma del tiempo total de rutas para los cuatro cuadrantes (3.162,73 min). El número de rutas para todos los clientes (16) es menor que la suma de las rutas para los cuadrantes; lo mismo ocurre para el número de rutas agrupadas, ocho para todos los clientes y 10 al sumar los resultados de cada cuadrante. Los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo a todos los clientes son mejores que al aplicarlo parcialmente a los cuadrantes. Al agrupar las rutas se puede concluir que se necesitarían ocho grupos, por lo que sería suficiente tener un vehículo que durante ocho días llevará a cabo las rutas para la recolección de envase no retornable de clientes que se visitan cada dos semanas.

Los escenarios evaluados en esta etapa del proyecto arrojaron soluciones mejoradas, aunque debido a la naturaleza del método éstas no necesariamente son las óptimas. Sin embargo, la razón de activos (número de rutas y aditamentos) con respecto a los volúmenes de recolección esperados y manejados en el modelo sugiere una eficiencia de utilización similar a los modelos de distribución tradicional. Esto se considera para la continuidad de la investigación, al perfilar la evaluación de algoritmos de mejora como son los heurísticos (de relajación, de dos etapas), metaheurísticos evolutivos y variantes de los mismos para la etapa de recolección.

▪ **Problema de distribución de Coca-Cola:** <sup>23</sup>

Coca-Cola Enterprises es una de tantas compañías que gracias a la implementación de un modelo matemático ha logrado ahorrar grandes cantidades de dinero al optimizar procesos

---

<sup>23</sup> AZUARA, M., *El problema de los 45 millones de dólares*, [documento en línea]. Estudiante de Matemáticas Aplicadas del ITAM, [citado 09-12-2009]. Disponible en Internet: <http://laberintos.itam.mx/files/275.pdf>

de producción y distribución. Esta compañía es un claro ejemplo de las ventajas que ofrecen áreas de las Matemáticas Aplicadas como es la Investigación de Operaciones.

Al ser una de las empresas con mayor flota en todo el mundo, es claro que con un sistema eficiente de distribución de sus productos se podría ahorrar una cantidad considerable de dinero. En el año de 2007 Coca-Cola implementó un modelo del problema del enrutamiento vehicular con la ayuda de una compañía de software (ORTEC) y la Universidad de Tilburg con resultados sorprendentes: la empresa ahorra aproximadamente 45 millones de dólares al año, el número de productos perdidos por fallas en la distribución disminuyó, así como la contaminación producida por rutas que no eran óptimas y por lo tanto gastaban más combustible.

El decidir los horarios y las rutas de camiones podría sonar sencillo; sin embargo son tantas las posibilidades de formar rutas y horarios que éste es uno de los problemas más complicados en el área de la optimización discreta, pues incluso con los avances en el área de la computación no es posible verificar todas las posibilidades en un tiempo aceptable (encontrar la solución podría tardar meses o años).

Se puede ver la utilidad práctica de resolver este tipo de problemas aún con su gran nivel de dificultad que aumenta a medida que se tienen más camiones, paradas o restricciones que cumplir, ya que las diferentes opciones de rutas crecen a una tasa a la cual una computadora no puede encontrar una solución óptima en un tiempo razonable.

Para solucionar este tipo de problemas se recomienda hacerlo por pasos que en general son más sencillos. Primero, es necesario calcular las distancias (y/o costos) entre cada par de paradas. Esto puede ser por diversas técnicas, como el uso de GIS (Sistemas de Información Geográfica) que pueden ser muy exactos y en el caso de camiones son capaces de dar la ruta más corta entre dos paradas de manera rápida con algoritmos de la ruta más corta.

Después es conveniente decidir el número de rutas que vamos a permitir para simplificar el problema; esto se decide a partir de la distribución de las paradas, por ejemplo, se puede pensar en una ruta por cada colonia o más dependiendo del número de paradas que tenga cada una.

Una vez que las paradas se asignan a una ruta específica, el problema se reduce al también complicado problema del agente viajero (TSP). Aquí se trata de encontrar la forma óptima de recorrer estas paradas; esto es visitar todas las paradas minimizando el costo y regresar al punto de origen. Esto se complica aún más si existe alguna restricción de tiempo de entrega, pues no siempre se puede dejar un producto en una tienda en un tiempo arbitrario.

Por último hay que considerar el asignar a los empleados que llevarán a cabo estas tareas porque las rutas pueden durar más o menos tiempo que el turno de los empleados, entonces es necesario acomodar también a los empleados y cómo irán realizando sus turnos. Lo que se suele hacer es que a las rutas más cortas se les acomoda un solo empleado y en las rutas largas se solicitan en puntos clave para el cambio de empleados.



Las compañías encargadas de desarrollar paquetes computacionales para este tipo de problemas saben que con esta cantidad de posibles rutas se necesita una forma no tan demorada y que, aunque no dé el resultado óptimo, dé una buena aproximación. Lo que se desarrolla para esto son las heurísticas, técnicas y algoritmos basados en técnicas probabilísticas, experiencia o incluso en la naturaleza.

Sin embargo, este problema no es el único con grandes beneficios prácticos en la sociedad. Varias compañías han sido beneficiadas con el desarrollo de las Matemáticas Aplicadas, por ejemplo Hewlett-Packard y DaimlerChrysler que junto con Coca-Cola Enterprises fueron finalistas del premio Franz Edelman por logros en el área de Investigación de Operaciones.

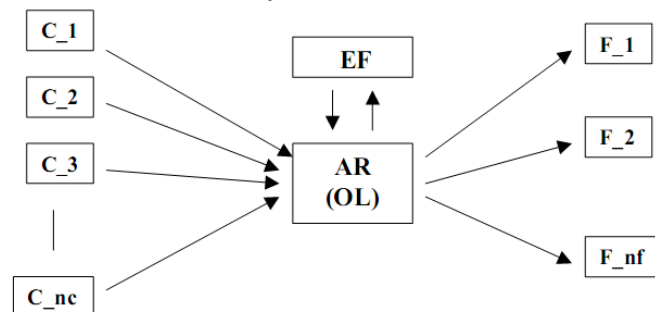
▪ **Problema logístico a varios niveles en la industria automotriz:**<sup>24</sup>

El problema logístico que se plantea afecta a un operador logístico, (OL), que tiene como cliente una empresa fabricante de componentes de automóviles (EF). El operador logístico organiza, gestiona y realiza las actividades de recogida de materias primas en las factorías suministradoras, y la entrega de productos elaborados a los clientes de dicha empresa.

La empresa debe entregar determinados pedidos de productos elaborados (componentes de automóviles) a sus clientes (básicamente diferentes tipos de volantes). Cada pedido lleva asociado un número de unidades a entregar del producto y una frecuencia. Cada producto elaborado requiere para su fabricación determinadas piezas (materias primas), que deben ser recogidas en las factorías correspondientes.

El operador logístico dispone de un almacén regulador (AR) donde guarda las piezas o materias primas, hasta que son recogidos por la empresa fabricante para su manipulación. En este almacén regulador también se guardan los productos elaborados por la empresa hasta que llegan los clientes a recoger los pedidos. Los clientes se denotan por C1, C2, ..., C<sub>nc</sub> y las factorías de materias primas se denotan por F1, F2, ..., F<sub>nf</sub>; donde nc y nf indican respectivamente el número de clientes y el número de factorías.

**Gráfico 6. Estructura del problema de la industria automotriz**



<sup>24</sup> ALEGRE, J., CASADO, S., DELGADO, C. y PACHECO, J., *Análisis de un problema logístico a varios niveles en la industria del automóvil. Diseño de soluciones aproximadas*, [documento en línea]. Departamento Economía Aplicada, Universidad de Burgos, España, 2002, [citado 09-12-2009]. Disponible en Internet: <http://www.uv.es/asepuma/X/E51C.pdf>

El operador logístico intenta minimizar los costos de estas operaciones en un horizonte temporal, (número de días =  $ndías$ ) determinado, que son:

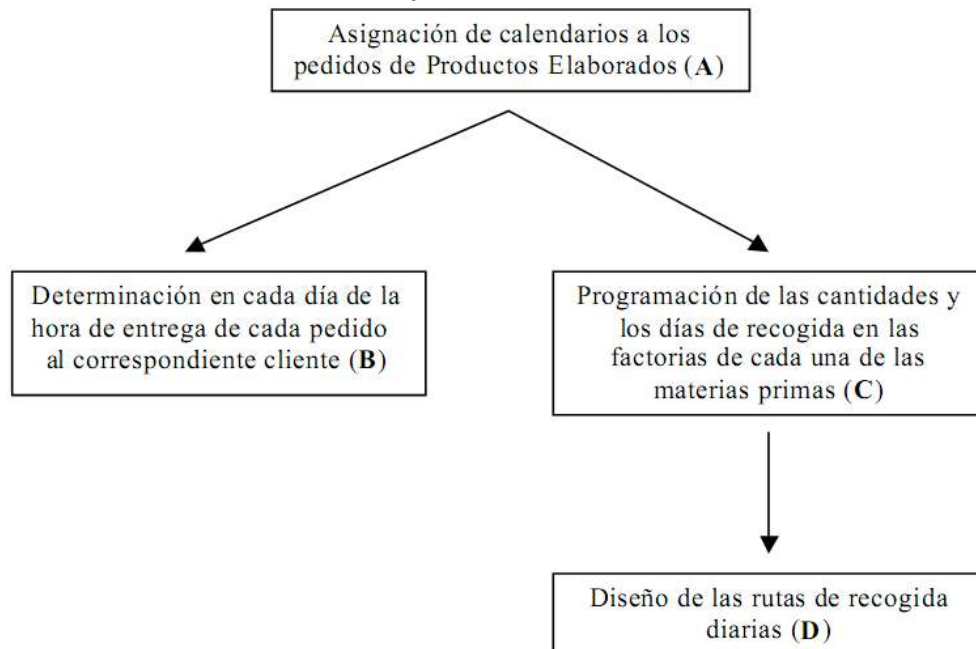
- 1) Costo de transportar las materias primas desde las factorías hasta el almacén regulador.
- 2) Costo del personal ('carretilleros') contratado para realizar las cargas de los pedidos en los vehículos de los correspondientes clientes.

Además, en ésta interacción hay varios elementos a tener en cuenta como capacidad productiva (tanto de factorías como de la empresa), stocks iniciales de productos elaborados y materias primas, tiempos de transporte, tamaño de la flota y características de la misma, entre otros.

La dificultad computacional de este modelo en su conjunto es evidente. Si nos fijamos solamente en los niveles de decisión 'más bajos' (las horas de entrega de los productos y el diseño de rutas de recogida de materias primas) de forma aislada y para cada día, los modelos resultantes (el Multiprocessor Scheduling Problem, MSP, y el Problema de Rutas de Vehículos o VRP) son conocidos problemas NP-Hard. Por tanto teniendo en cuenta además la rapidez con la que muchas veces se han de tomar las decisiones en las empresas y que el operador logístico en cuestión, es una pequeña mediana empresa que no dispone potentes ordenadores de cálculo, en este caso, lo más adecuado es intentar desarrollar técnicas de solución aproximadas o heurísticas.

Las decisiones a tomar en este problema se pueden dividir en 4 partes o niveles:

**Gráfico 7. Niveles del problema de la industria automotriz**



Para solucionar el problema, se aplicó un esquema de Movimientos vecinales y procedimiento de Búsqueda Local, en el cual, dado un vector  $S$ , de calendarios de pedidos de productos elaborados, definimos su vecindario  $N(S)$  de la siguiente forma:

$$S' \in N(S) \Leftrightarrow \exists i' \in \{1, 2, \dots, np\} / S'(i') \neq S(i') \text{ y } \forall i \neq i' S'(i) = S(i)$$

Es decir, soluciones vecinas de  $S$  son todas aquellas a las que se da lugar cuando un pedido (y sólo uno) cambia su *calendario*.

Para valorar los posibles movimientos de una solución a otra (en el nivel A), veamos cómo se modifican inicialmente las variables de decisión en el resto de los niveles. Cuando un pedido de producto elaborado  $i$  cambia del calendario  $C$  al  $C'$ , los valores de  $R$  cambian de la siguiente manera:

- Para cada día  $d \in C-C'$  eliminar el pedido  $i$  de  $R(d)$
- Para cada día  $d \in C'-C$  añadir el pedido  $i$  a  $R(d)$  insertándolo en el slot menos ocupado.

Para el conjunto de los días afectados es fácil calcular la diferencia entre el slot más ocupado antes y después del cambio, y por tanto la variación del personal necesario.

Por otra parte para cada pieza  $k$  del producto  $i$  (es decir, materias primas afectadas por el cambio) se determinan los nuevos conjunto  $CP(k)$  a que el cambio daría lugar, y se toma  $CX'(k) = CP(k)$ . Es decir suponemos que las 'nuevas' recogidas se realizan en las fechas tope requeridas.

Finalmente para cada una de las materias primas afectadas  $k$ , se realizan los siguientes pasos:

- $\forall s = 1..nx_{k,s}$  se elimina la "vieja" recogida  $s$  de  $RT(dx_{k,s})$ . Para ello vale unir los puntos de visita anterior y posterior.
- $\forall s = 1..nx'_{k,s}$  se añade la "nueva" recogida  $s$  de  $RT(dx'_{k,s})$ . Para ello se inserta entre 2 puntos de  $RT(dx'_{k,s})$  de forma que se incremente menos la ruta resultante sin violar ninguna restricción.

La variación de la distancia total recorrida se puede calcular fácilmente a partir de los arcos que se eliminan y los que se añaden.

Además de para cada uno de los niveles B, C y D también se van a considerar diferentes movimientos vecinales que pueden ayudar a mejorar las soluciones una vez que se ejecuta un movimiento. Así la composición de slots diarias,  $R(d)$ , pueden ser mejoradas con movimientos 0-1 (un pedido pasa de un slot a otro), o 1-1 (intercambios de pedidos de diferentes slots). Estos intercambios han sido usados frecuentemente en múltiples trabajos para el MSP.

De la misma forma en el nivel C, se van a considerar cambios en la que la recogida  $s$  de una pieza  $j$  puede adelantarse o atrasarse siempre que no se violen las restricciones señaladas en el apartado 2.3., (y considerando siempre que  $dx_{k,s} \in (dx_{k,s-1}, dx_{k,s+1})$ ). Al realizar estos intercambios se modifican las rutas de los días afectados según se señaló en este mismo apartado. Para valorarlos vale considerar los arcos que se eliminan y añaden.

Finalmente las rutas diarias pueden ser mejoradas usando movimientos basados en CROSS intercambios y Or-intercambios. Los CROSS intercambios consisten en intercambiar cadenas de puntos entre 2 rutas diferentes, y los Or-intercambios consiste en recolocar una cadena de puntos en una posición diferente dentro de la misma ruta.

De esta forma el procedimiento de búsqueda local que se propone para el problema completo, a partir de una solución inicial,  $(S, R, CX = \{CX(k), k=1..nf\}, y RT)$ , actúa de la siguiente manera:

**Procedimiento de Búsqueda Local**

*Repetir*

*Buscar la mejor solución vecina de S*

*Si produce mejora en la función objetivo entonces:*

- *Ejecutar el movimiento modificando las componentes de R, CX(k) correspondientes y RT, (1)*
- *Mejorar los R(d) afectados con movimientos 0-1 y 1-1, (2)*
- *Mejorar las rutas modificando los días de recogida de piezas (3)*
- *Para cada RT(d) modificado por los pasos (1) o (3) mejorar las rutas con CROSS intercambios y Or- intercambios*

*Hasta que no haya ninguna solución vecina mejor*

Finalmente se muestran los resultados obtenidos por el algoritmo propuesto para un ejemplo con datos reales. El algoritmo usa como solución inicial los obtenidos por el operador logístico (OL) y se analiza cuanto mejora dicha solución.

Los productos son 8 tipos de cinturones de seguridad para diferentes versiones del Opel Astra, mientras que en total hay 117 piezas diferentes. Cada cinturón está compuesto de entre 21 y 24 piezas, (obviamente algunos tipos de cinturones pueden tener algunos piezas iguales). Tanto el almacén regulador como la empresa fabricante se localizan en el polígono de Villalonquejar (Burgos). En cuanto a las factorías se distribuyen en 24 localidades de España (9; 4 en Barcelona, 2 en Burgos y 1 en Guipuzcoa), Alemania (8), Francia (4), Suiza (2) e Italia (1). La capacidad de producción de la empresa es de unos 900.000 cinturones por mes (entre 3.400 y 5.000 cinturones al día según el tipo), aunque en las entregas correspondientes a estos datos quedan bastante por debajo (1.800 como máxima entrega en un día para un tipo de cinturón).

Se dispone de una flota de vehículos de una capacidad de 66 europallets para las recogidas de piezas. El costo por Kilómetro recorrido es de 145 pesetas; y el costo por carretillero de 12.000 pesetas al día; (1 carretillero carga 10 pallets por hora). A continuación se muestran la solución obtenida por el operador logístico (OL), y la resultante de aplicar a esta el procedimiento de Búsqueda Local (OL+BL).

**Tabla 9. Solución obtenida por el operador logístico (OL) con la aplicación de BL**

	OL	OL + BL
Kilómetros	13.543	13.186
Contratos Carretilleros	53	50
Costo local	2.599.735	2.511.970

La reducción en el costo total de las operaciones es de un 3,37 %, cantidad que puede parecer pequeña. Sin embargo estos resultados entendemos que son esperanzadores puesto que no se parte de una solución arbitraria o aleatoria, sino de la aportada por los responsables del operador logístico con mucha experiencia. Por otra parte los movimientos vecinales así definidos han resultado eficaces al demostrar conseguir leves mejoras, y

pueden formar parte de otras estrategias más sofisticadas como *Búsqueda Tabú*, *Path Relinking*, *VNS*, entre otras, que no se limitan a obtener un mínimo local.

▪ **Software Roadshow de SKU Logistics:** <sup>25</sup>

La correcta administración del transporte es un área fundamental para un buen desempeño de la cadena de suministro. La selección del modo de transporte apropiado, la utilización de la capacidad máxima de los activos (vehículos, trenes, contenedores), el control y monitoreo de los transportadores y el manejo efectivo de las flotas propias, son elementos fundamentales para balancear los costos operativos de transporte con la calidad y puntualidad de las entregas.

SKU Logistics ofrece soluciones que le permitirán lograr mejoras substanciales en la distribución tanto primaria como secundaria, dirigidas a:

- Optimizar la gestión de transporte "Transportation Management System" (TMS).
- La programación y planificación de la distribución "Routing & Scheduling".

El manejo eficiente de las rutas de entregas exige el desarrollo e implementación de dos fases principales:

- Desarrollo de un plan inicial a fin de utilizar eficientemente los camiones satisfaciendo las necesidades de los clientes.
- Ajuste y refinación del plan inicial para que el mismo refleje las dinámicas del mundo real.

En este sentido, el sistema Roadshow - líder dentro de su categoría por más de 15 años -, ofrecido por SKU Logistics, ofrece los siguientes beneficios:

- **Reducir Costos:** Roadshow ayuda a las empresas a reducir costos de transporte relacionados con tiempos de manejo, kilometraje de viaje, planificación de rutas y gestión de la flota. La empresa podrá disminuir los gastos generados por el tiempo extra para completar la programación, reducir la mano de obra requerida para crear rutas y asignar trabajo, reducir costos de equipos, incluyendo gasolina y mantenimiento.
- **Mejorar el desempeño/Servicio al cliente:** Roadshow ofrece una mayor visibilidad y un mayor control sobre la programación del transporte. La capacidad de Roadshow de generar soluciones rápidamente, permite la visualización del impacto de cualquier modificación en las condiciones operativas de la flota de vehículos. Así mismo, Roadshow permite al usuario establecer restricciones de todo tipo en las operaciones diarias las cuales pueden ser relacionadas a los clientes, a los servicios y a los conductores, para evitar que el sistema programe visitas equivocadas o asigne usuarios a recorridos no apropiados.

Roadshow dispone de los siguientes módulos:

---

<sup>25</sup> SKU Logistics. *Transporte: Routing & Scheduling*, [página web en línea]. [Citado 09-12-2009]. Disponible en Internet: <http://www.skulogistics.com/transporte.php>

El módulo "**Route Planner**" permite generar estática o dinámicamente las rutas óptimas de entrega dentro de cada territorio, una vez que éstos han sido debidamente balanceados. Durante este proceso se toman en cuenta todas las restricciones, limitaciones y requerimientos de cada cliente, tales como ventanas de tiempo, tiempo fijos y variables de servicio, condiciones de las calles, distancia, velocidades, sentidos de las calles, horas pico, entre otros. "Route Planner" permite obtener los siguientes beneficios:

- Determinar las rutas de entrega óptimas al menor costo posible, haciendo uso de algoritmos sofisticados.
- Aumentar la productividad de los conductores y ayudantes, reduciendo las horas extras de trabajo.
- Reducir significativamente los costos de distribución, reduciendo los kilómetros recorridos, las horas extras, balanceando las cargas y aumentando la utilización de los vehículos, todo basado en distancias recorridas, tiempo de manejo, costos y factores de servicio reales.

El módulo "**Sales & Territory Planner**" permite definir, modificar, combinar o eliminar territorios correspondientes a conjuntos de servicios procesados para un día o para un ciclo determinado de días. El balanceo de territorios de ventas, la optimización de la frecuencia de servicio y la asignación de días de servicio, permiten a la empresa una planificación más eficiente del servicio al usuario y del crecimiento del volumen de facturación. La implementación específica de este módulo le generará a su empresa los siguientes beneficios:

- Modelar diferentes estructuras de tiempo de servicio, por territorio y por días de servicio.
- Establecer normas para la combinación de tipo de clientes/clase de producto que permitan establecer frecuencias óptimas de servicio a los clientes.
- Generar automáticamente territorios compactados geográficamente.
- Asignar días de servicio para cada cliente dentro de cada territorio del servicio al usuario y del crecimiento del volumen de facturación.
- Establecer normas para la combinación de tipo de clientes/clase de producto que permitan establecer frecuencias óptimas

El módulo "**Dispatch**" provee una intuitiva y efectiva manera de mejorar la gerencia de las flotas usando comunicación inalámbrica integrada, proporcionando además la habilidad de monitorear y re-distribuir los conductores y vehículos en tiempo real, mejorando las operaciones de visitas, entregas y búsquedas de productos.

La solución provee comunicación integrada entre la operación central, manejada con la consola de Dispatch y los conductores que están ejecutando los planes. En este sentido Dispatch permite el monitoreo pasivo, con comunicación sólo de los vehículos hacia la central, o utilizando dispositivos bidireccionales. Estos últimos pueden capturar eventos tales como: llegadas, entregas, partidas para luego pasarlos a tiempo real al servidor de Dispatch.

Posteriormente los planes de ejecución, basados en cómo se están ejecutando los planes originales, son revisados y enviados nuevamente a los vehículos y conductores para hacer las modificaciones de rutas necesarias.

- **TourSolver:**<sup>26</sup>

Es el software de optimización de rutas que permite evaluar, optimizar y planificar itinerarios de transporte.

- Evaluar y optimizar el orden de pasaje a los clientes.
- Planificar las rutas según sus coacciones de cargas, de horarios y de recursos (número de vehículos, de repartidores e chóferes, de técnicos...)
- Exportar los planes de trabajo a los PDA del personal itinerante.
- Ahorros operacionales significativos.
- Mejora del servicio al cliente.
- Aumento de la productividad.
- Evaluación de las rutas existentes.
- Gestión de las restricciones asociadas a los clientes, al personal móvil, a la configuración de costos, a los vehículos y a la configuración de la red vial.
- Simulación.
- Facilidad de uso.

El software funciona en cuatro etapas:

1. **Ubicar Clientes y Vehículos en el mapa:** Automáticamente y directamente a partir de direcciones postales almacenada en los sistemas de información o de un simple archivo MapInfo, Microsoft Excel, Access o Texto.
2. **Configurar los parámetros de optimización:** Según el número de recursos, las coacciones de itinerarios, el cargamento de los vehículos, los horarios de reparto, los costos horarios; etc.
3. **Lanzar el planificador:** Sigue en tiempo real la optimización de las rutas. Visualiza lista ordenada de clientes por vehículo, distancia, duración, costos, capacidad de vehículos usada e informes globales e indicadores visuales.
4. **Explorar los resultados:** Exporta los planes de trabajo de cada chofer en formato Excel, Word o Texto, con la visualización de los itinerarios en un mapa.

Algunas empresas que han utilizado este software como solución para optimización de rutas y de planificación:

- **CPM Bélgica:** Empresa dedicada a operaciones de marketing operativo. En una operación con 60 comerciales planificada en 40 semanas, TourSolver permitió reducir en un 25% los kilómetros recorridos, reduciendo en 30 kilómetros por semana el trayecto de cada comercial, lo que representa un total de 72.000 kilómetros, es decir un ahorro de 15.000€.
- **Winche Redes Comerciales:** Es una empresa especializada en la externalización de las fuerzas de venta y el merchandising (presentación de los productos en los departamentos de los puntos de venta). La empresa utiliza el software TourSolver para la planificación de rutas, eso permite organizar las rutas de los comerciales

---

<sup>26</sup> OPTI-TIME. *TourSolver*, [página web en línea]. [Citado 09-12-2009]. Disponible en Internet: [http://www.opti-time.com/es/organizacion\\_rutas/index.asp](http://www.opti-time.com/es/organizacion_rutas/index.asp)

para periodos de dos meses, dividen los centros a visitar en zonas, dependiendo de las cargas de trabajo; mejorando la definición de los recursos que tienen que visitar los puntos de venta, según su emplazamiento geográfico. A continuación, los comerciales utilizan las programaciones realizadas de manera bastante flexible, para conservar máxima autonomía. A partir de la lista de clientes a visitar, ellos deciden qué orden van a seguir durante sus rutas.

TourSolver permite ahorrar tiempo durante la creación de las programaciones; además, estima la planificación de rutas con TourSolver permite repartir mejor el trabajo y el seguimiento de las acciones de los comerciales resulta más fácil, porque la carga de trabajo es más precisa.

- **Distriplus:** Empresa distribuidora de máquina expendedoras. A través del uso de TourSolver, las previsiones kilométricas son muy fiables, lo cual contribuye a mejorar la previsión de los gastos y facilita la negociación de los costos de los vehículos.

### **2.3.2. Software disponible actualmente en Colombia para el diseño de rutas de distribución y servicios**<sup>27</sup>

En el mercado mundial existe una amplia diversidad de software para el diseño de rutas que integra herramientas de optimización para resolver el problema de ruteo de vehículos (VRP de su definición en inglés Vehicle Routing Problem) con sistemas de información geográfica (SIG). A pesar de esta diversidad, algunas empresas proveedoras de software con amplio reconocimiento internacional, así como la mayoría de las empresas evaluadas en el mercado norteamericano, no ofrecen soporte en Colombia para la instalación de estas herramientas. Algunas empresas de este grupo son Appian Logistics Software, GIRO Inc., Prophesy Transportation Software, PROLOGOS, Soloplan, RouteSmart Technologies y MJC2 Limited entre otras.

Consecuentemente, es necesario analizar de forma particular los software de diseño de rutas disponibles en el país, que incluyan soporte y seguimiento en su implementación. De manera general en Colombia, los proveedores de software son compañías de carácter privado, sin embargo un gran porcentaje de programas son elaborados paralela mente por equipos investigativos de tipo académico.

Teniendo en la cuenta la gran cantidad de variaciones que existen para el VRP en la realidad, se encontró que la mayoría del software está diseñado para la solución del VRPTW (Vehicle Routing Problem with Time Windows) en el cual los clientes especifican intervalos de tiempo durante los cuales quieren ser atendidos. Del mismo modo, el software está diseñado para resolver casos como el OVRP (Open Vehicle Routing Problem), en cual la flota no es de propiedad de la compañía sino de transportadores a los cuales se les contrata y no tienen que regresar al centro de distribución y el VRP clásico.

<sup>27</sup> GUTIERREZ, V., PALACIO, J. y VILLEGAS, J., *Reseña del software disponible en Colombia para el diseño de rutas de distribución y servicios*, [documento en línea]. Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2007, [citado 09-12-2009]. Disponible en Internet: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/215/21514507.pdf>



Los programas son desarrollados para una gran diversidad de sectores y aplicaciones entre los que se encuentran: la recolección de leche, la entrega de productos de consumo masivo, la prestación de servicios de mantenimiento, la distribución de alimentos para animales, la recolección de residuos sólidos, el transporte escolar, servicios postales y la entrega de productos industriales como concreto y combustibles.

No obstante, la mayoría de los proveedores brindan soluciones puntuales para cada problema, dependiendo de especificaciones o requerimientos propios de cada empresa, como por ejemplo, la separación de productos químicos o alimenticios en un mismo vehículo. Esto puede verse como una desventaja, ya que la flexibilidad que brindan estas aplicaciones es mínima; sin embargo, para lograr un equilibrio, los desarrolladores de software no restringen de manera significativa su capacidad, por lo cual es común encontrar aplicaciones con un número máximo de clientes, de vehículos y de rutas bastante elevado. Además, los programas traen consigo diversas opciones de agrupamiento para cada uno de estos ítems; por ejemplo, de acuerdo a la capacidad de los vehículos, la longitud de las rutas y el tipo de cliente, entre otros.

Por su parte, los diseñadores académicos de software presentan algunos modelos que se diferencian de acuerdo a su sector o aplicación, pero presentan generalizaciones al momento de enfocar el producto a un mercado; es decir, no presentan restricciones en cuanto al tipo de sector al que va dirigido el software.

Los criterios de optimización en los cuales se basan las empresas son principalmente, el tiempo total de las rutas y la distancia total recorrida en las mismas. Algunas aplicaciones cuentan con un criterio adicional que es el atractivo visual de las rutas, cuya idea fundamental es minimizar el cruce o inserción de dos o más recorridos, para presentar rutas que son más fácilmente aceptadas por las personas que las diseñan. De todos los criterios posibles que se pueden tener en cuenta, el tiempo total para realizar la entrega es el más importante de todos.

Dependiendo de las necesidades de cada sector o empresa, el software es diseñado con diversas herramientas o aplicaciones que permiten un manejo más práctico al usuario; entre dichas herramientas están los SIG y GPS (Sistemas de Posicionamiento Global). Además, acorde a cada empresa, el software incluye la posibilidad de utilización de ventanas de tiempo tanto rígidas como flexibles; éstas últimas permiten entregar en intervalos de tiempo diferentes al establecido por el cliente pero con cierta penalización.

Por otro lado, en la literatura, no es común encontrar información sobre los métodos bajo los cuales funciona la optimización de las rutas, pero se puede observar que los más usados son métodos aproximados como los métodos constructivos, la búsqueda tabú, el recocido simulado, o el recocido determinístico.

Es relevante mencionar, que los ambientes o plataformas en los que se ejecutan las aplicaciones, son comunes en nuestro medio. Por ejemplo, es típico el uso sobre sistemas operativos como Windows y Linux, entre otros.

Al respecto del tamaño de los problemas a resolver y los requerimientos en hardware, sólo uno de los productos tiene capacidades limitadas en el número de paradas, de vehículos, de



Analyst						redes mediante Java
Roadnet Transportation Suite	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Peso
Sinmaf Vehicle Router	50.000	2.500	100	Ilimitado depende de restricciones	Ilimitado	Peso y volumen en forma explícita
SpicaR	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Peso
TransCad	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Peso, unidades

**Tabla 12. Desempeño computacional**

Producto	Tiempo computacional	¿Qué tipos de algoritmos emplea?	¿Se utilizan aproximaciones para reducir el tiempo el tiempo computacional?
ARC Logistics	10 – 30 min	-	-
Axiadis Estándar	30 seg a 5 min promedio	Tiene 14 algoritmos diferentes, en su mayoría heurísticos	Es parametrizable por el usuario
Axiadis Profesional	30 seg a 5 min promedio	Tiene 14 algoritmos diferentes, en su mayoría heurísticos	Es parametrizable por el usuario
DataRutas	10 min	-	-
Network Analyst	1 – 30 min	-	-
Roadnet Transportation Suite	≤ 1 min – 1,7 Ghz, 1,25 GB RAM	Algoritmos heurísticos	No se utilizan aproximaciones
Sinmaf Vehicle Router	Instancias Solomon = 3,5 min Instancias de gran escala (50.000 nodos) = 25 min	MOANT: MultiObjective ANT Colonies; SPEA – II	Si el problema es multi-depósito se realiza un procedimiento Cluster/Assign first, then Route
SpicaR	20 – 30 min	-	-
TransCad	5 min	-	-

**Tabla 13. Funciones de ruteo**

Producto	Por nodos	Por arcos	Programación de paradas en tiempo real	Permite hacer ruteo diario	Planeación y análisis de ruteo	Incorpora información de tráfico en tiempo real	Diseño de viajes tipo “Multimodal”
ARC Logistics	S	-	N	S	S	N	N
Axiadis Estándar	S	S	S	S	S	N	N
Axiadis	S	S	S	S	S	N	S

Profesional							
DataRutas	S	-	S	S	S	S	S
Network Analyst	S	-	S Programable	S	S	S Programable	S
Roadnet Transportation Suite	S	S	S	S	S	S	S
Sinmaf Vehicle Router	S	S	-	S	S	-	S
SpicaR	-	-	S	S	S	N	S
TransCad	S	S	N	S	S	S	N

Producto	Considera prioridades de entrega	Cálculo de rutas considerando reglas de pausa	Reconstrucción automática de rutas existentes	Cálculo de mejoras sobre rutas existentes	Simula cambios a planes propuestos	Análisis de consolidación con despacho directo y Cross-docking
ARC Logistics	S	S	S	S	S	N
Axiadis Estándar	S	N	N	N	S	N
Axiadis Profesional	S	S	S	S	S	S
DataRutas	S	N	S	S	S	N
Network Analyst	S	S	S	S	S	S Programable
Roadnet Transportation Suite	S	S	S	S	S	S
Sinmaf Vehicle Router	S	-	S	-	-	S
SpicaR	S	S	S	S	S	S
TransCad	S	N	S	S	S	S

**Tabla 14. Capacidad de los algoritmos**

Producto	Criterios		Si maneja varios criterios, ¿cómo los prioriza?	¿Cuáles criterios utiliza?					
	Uno	Dos o más		Costo	Número de vehículos	Distancia	Cumplimiento de horarios	Atractivo visual	Otro
ARC Logistics	-	S	Costo	S	S	S	S	S	-
Axiadis Estándar	-	S	Usuario	S	S	S	S	N	Utilización vehículos
Axiadis	-	S	Usuario	S	S	S	S	N	Utilización

Profesional									vehículos
DataRutas	-	S	Usuario	N	S	S	S	S	-
Network Analyst	-	S	Usuario	S	S	S	S	S	Peso Seguridad
Roadnet Transportation Suite	S	S	Usuario	S	S	S	S	S	Usuario personaliza
Sinmaf Vehicle Router	-	S	MOANT	S	S	S	S	-	Balance de carga
SpicaR	-	S	Usuario	-	S	S	S	-	-
TransCad	S	S	Diverso	S	S	S	S	N	-

El diseño de rutas de vehículos es una tarea de carácter táctico y operativo en el ámbito del transporte en las cadenas de suministro, cuya gestión es determinante en la eficiencia del sistema de distribución y recolección de cualquier empresa de producción de bienes y servicios. En este sentido, la secuenciación de las rutas que día a día ejecuta una flota de transporte, la cual en la mayoría de los casos es limitada y costosa, es una decisión que no puede asumirse como una tarea operativa, sino como una actividad que requiere planeación en el mediano plazo, y que debe estar soportada por métodos más evolucionados que la intuición y la experiencia operativa.

Las aplicaciones computacionales y los desarrollos de software, que involucran los múltiples componentes del sistema de distribución de bienes y servicios, permiten dar soporte a las decisiones de diseño de rutas de los vehículos de una manera práctica, en la que mediante algoritmos sencillos y en algunos casos más elaborados, se le da solución a un problema que en la práctica actual, toma horas de dedicación de una o más personas, y que cada día se vuelve más complejo dadas las condiciones cambiantes del sistema logístico de transporte.

De este modo es importante que las empresas transportadoras, los operadores logísticos y las empresas generadoras de carga que realizan su transporte, empiecen a considerar la implementación de aplicaciones computacionales que permitan darle soporte a las decisiones de secuenciación de vehículos, involucrando las variables complejas del sistema y sistematizando la experiencia práctica que se ha ganado.

### **2.3.3. Alternativas de solución**

Ante la situación que se presenta en la línea de Botelleros, se han considerado varias alternativas para mejorar el cumplimiento, reducir sus costos, aumentar los ingresos y mejorar la rentabilidad de la línea:<sup>28</sup>

- La programación de los viajes y volumetría tiene un componente significativo en los desplazamientos, por lo mismo se debe planear de tal manera que permita reducir

<sup>28</sup> ORTEGA, R. *Análisis de alternativas financieras sobre el parque automotor que labora en los principales clientes de la empresa COLTANQUES LTDA. y sugerir alternativas financieras para definir futuros negocios*. Medellín, 2008, 24 – 25 p. Monografía (Especialista en Ingeniería Financiera). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.

notoriamente los tiempos de espera tanto en el cargue como en el descargue y por ende, permita disminuir los costos asociados a la operación de los vehículos y los costos asociados a nómina.

- Desarrollar una buena relación cliente – proveedor, que comprometa al cliente en el mejoramiento de los tiempos de operación que son su responsabilidad (cargue y descargue); ya que las variaciones en estos tiempos proporcionan retrasos en la programación previamente diseñada.
- La asignación de los viajes debe programarse de acuerdo con un análisis detallado de las necesidades reales del cliente y debe corresponder a programaciones periódicas que se realicen conjuntamente con el cliente, con el fin de fortalecer el sistema de Planeación; sin embargo, Coltanques debe estar en la capacidad de variar la programación de los vehículos, de acuerdo con las modificaciones que haga en último momento el cliente.
- Se debe tener prioridades sobre los nodos de mayor movimiento, y la programación de los vehículos debe obedecer a los requerimientos específicos de la demanda de cada nodo, y no a los intereses particulares de los conductores para aumentar sus bonificaciones.<sup>29</sup>
- Considerar la posibilidad de vender o rematar los vehículos con uso superior a los 10 años, medida con la cual se recupera parte de la inversión y se puede reinvertir en otros vehículos. En caso de conservar dichos vehículos, estudiar la posibilidad de que los vehículos de modelos superiores a 10 años no tengan desplazamientos largos debido a su alto costo por kilómetro recorrido. Adicionalmente, garantizar el cumplimiento de los programas de mantenimiento, para evitar contratiempos por fallas en los vehículos.
- Finalmente, el problema que el presente trabajo resolverá es la definición de un mecanismo eficiente para la programación de los viajes en el frente Botelleros desde su origen en los nodos, de tal forma que mejore el proceso de distribución, optimice el uso de los recursos y responda a las necesidades de la empresa, permitiéndole mejorar el servicio a sus clientes.

---

<sup>29</sup> El pago de bonificaciones en la línea Botelleros se realiza con base en el recorrido de cada vehículo y se califica por puntos, donde cada punto vale \$55.194 y equivale a 392 kilómetros recorridos.

### 3. MODELO MATEMÁTICO

Ante el problema que se presenta en el frente de Botelleros de Coltanques, la primera alternativa es la construcción de un modelo matemático que permita abstraer la esencia del problema real para elaborar una representación suficientemente precisa de las características esenciales de la situación para obtener soluciones que sean válidas para el problema real.

#### 3.1. Modelos revisados

En el [Anexo 10](#) se encuentra la explicación de cada uno de los modelos teóricos considerados para la formulación del modelo matemático. Tras la revisión hecha a estos modelos, se concluyó:

##### 3.1.1. *Problema del flujo de costo mínimo*

Este tipo de problema se puede ajustar al problema de la línea de Botelleros de Coltanques, estableciendo las plantas embotelladoras como los nodos fuente, los centros de distribución como los nodos demanda, establecer nodos trasbordo que indiquen los horarios de salida adecuados de las plantas para llegar a los centros de distribución en los horarios de las ventanas de atención de cada centro de distribución, la capacidad de cada nodo es la demanda de cada CEDI y el objetivo es minimizar el costo total de este transporte, pero indicando la secuencia de envío de los vehículos desde cada planta hacia cada centro de distribución.

Sin embargo, no se puede aplicar este modelo a la problemática de Botelleros porque parte de un número fijo de recursos, por lo cual no intentará maximizar la utilización de los recursos; adicionalmente, no se puede hablar de minimizar el costo de los viajes ya que este es fijo: número de viajes establecidos, distancias fijas entre la planta y los centros de distribución y costos por kilómetro fijos.

##### 3.1.2. *Problema de ruteo con ventanas de tiempo (VRPTW)*

Este problema se puede adaptar a las características del problema actual de Coltanques en su línea de Botelleros, en cuanto a que existe un número determinado de clientes con demandas específicas y ventanas de tiempo para atención (centros de distribución), depósitos (plantas embotelladoras), flota heterogénea de vehículos y costos asociados a cada posible ruta.

El inconveniente radica en el hecho que los vehículos asignados por Coltanques a su línea de Botelleros no son suficientes para abastecer la demanda de los centros de distribución desde las plantas en un solo viaje, sino que es necesario realizar una secuencia de viajes

específica todos los días, para cubrir dicha demanda. A través de un modelo de este tipo, no es posible establecer el número de vehículos que se deben usar (intentará usarlos todos si eso garantiza atención más rápida de los clientes) y tenemos el mismo inconveniente que se tenía con el problema del flujo de costo mínimo al intentar minimizar un costo que es fijo: número de viajes establecidos, distancias fijas entre la planta y los centros de distribución y costos por kilómetro fijos.

### **3.1.3. Problema Job Shop**

Este problema, relacionado con la programación de trabajos en un taller, puede ser adaptado al problema de la línea de Botelleros de Coltanques, donde los trabajos son los pedidos que deben ser llevados desde cada planta hacia cada centro de distribución, las máquinas son los vehículos disponibles para hacer los viajes, las operaciones es el transporte de la mercancía y se deben determinar los tiempos de inicio para cada operación (viaje). Sin embargo, la diferencia radica en que cada viaje (operación) debe ser realizado (procesado) solo por un vehículo (máquina) y no por todos; de la misma forma, no hay forma de determinar a través de este modelo cuántos recursos se necesitan, solo busca utilizarlos al máximo para minimizar el tiempo total de los viajes.

## **3.2. Definición del modelo**

Ante la imposibilidad de adaptar un modelo ya existente a la problemática de la línea de Botelleros de Coltanques, se diseñó un modelo matemático ajustado a las características específicas. A continuación se presenta y explica el modelo, el cual inicialmente se desarrolló relajando algunas restricciones (muelles disponibles, restricciones de circulación, inventario en planta y carro de valores) con el fin de ir verificando su factibilidad y posibilidad de solución. Adicionalmente, se inicia con la programación de un solo día de viajes, teniendo en cuenta, que después se debe extender el modelo a una semana, para programar conjuntamente todos los días.

Cada nodo funciona con sus propios recursos y sus propios centros de distribución para abastecer, así que cada uno se puede considerar como un problema independiente.

### **3.2.1. Conjuntos**

Se definieron dos conjuntos:

#### **R: Recursos (i)**

Recursos hace referencia a los camiones utilizados para realizar los viajes, es un conjunto de tamaño fijo, que depende del número de camiones preasignados al nodo en estudio. De esta forma, recursos tiene un tamaño de 22 para Bogotá, 19 para Barranquilla y 11 para Cali y Bucaramanga.

#### **D: Viaje por distribuidora (j)**



Representa cada uno de los viajes que se deben ejecutar en el nodo bajo estudio, por eso es variable su tamaño para cada día que se esté considerando y corresponde a la suma de todos los viajes a ejecutar en un nodo.

### 3.2.2. *Parámetros del modelo*

Todos los parámetros que se refieran a características de la distribuidora, es necesario alimentarlos cuantas veces como viajes haya, ya que se está considerando cada viaje de forma independiente.

La información de entrada para el modelo matemático debe ser la siguiente:

**N:** Número máximo de recursos disponibles

Indica el máximo número de camiones que se pueden utilizar para ejecutar todos los viajes. Es igual al tamaño del conjunto R.

**Apertura  $j$ :** Hora apertura ventana de tiempo distribuidora  $j$

Indica la hora de apertura de la ventana de tiempo en la distribuidora  $j$ , es decir la menor hora a la cual el recurso puede arribar a la distribuidora. Se ha utilizado una relajación de este parámetro, que implica que las ventanas de tiempo son continuas y únicas para cada distribuidora.

**Cierre  $j$ :** Hora cierre ventana de tiempo distribuidora  $j$

Indica la hora de cierre de la ventana de tiempo en la distribuidora  $j$ , es decir la máxima hora a la cual el recurso puede arribar a la distribuidora. Se ha utilizado una relajación de este parámetro, que implica que las ventanas de tiempo son continuas y únicas para cada distribuidora.

**Cargue  $j$ :** Tiempo de cargue para la distribuidora  $j$

Este parámetro contiene el tiempo que tarda el cargue de un viaje para la distribuidora  $j$  en la planta embotelladora.

**Descargue  $j$ :** Tiempo de descargue para la distribuidora  $j$

Este parámetro contiene el tiempo que tarda el descargue de un viaje en la distribuidora  $j$ .

**Ida  $j$ :** Tiempo de ida para la distribuidora  $j$

Este parámetro contiene el tiempo que tarda el recurso en desplazarse desde la planta embotelladora hasta la distribuidora  $j$ .

**Retorno  $j$ :** Tiempo de cargue para la distribuidora  $j$

Este parámetro contiene el tiempo que tarda el recurso en desplazarse desde la distribuidora  $j$  hasta la planta embotelladora, una vez ha descargado el producto en el CEDI.

**Ciclo  $j$ :** Tiempo de ciclo para la distribuidora  $j$

Este parámetro contiene el tiempo que tarda todo el ciclo de un viaje a la distribuidora  $j$ , desde el momento que se empieza a cargar, hasta cuando el recurso regrese a la planta embotelladora y está disponible para iniciar un nuevo viaje, es decir:

$$\text{Ciclo}_j = \text{Cargue}_j + \text{Ida}_j + \text{Descargue}_j + \text{Retorno}_j$$

### 3.2.3. Variables del modelo

A partir del modelo matemático se busca determinar:

**Hora**  $i, j$ : Variable que indica el momento en el cual el recurso  $i$  inicia el ciclo de la distribuidora  $j$

Hora a la cual debe empezar a cargar el recurso  $i$  para iniciar su viaje a la distribuidora  $j$ .

**Ocupación**  $i, j$ : Variable binaria que indica si el recurso  $i$  está ocupado en el ciclo de la distribuidora  $j$

Una vez el recurso  $i$  se ha asignado para iniciar un viaje a la distribuidora  $j$ , se debe indicar que el recurso está ocupado y no puede ser asignado a ningún otro viaje hasta haber terminado todo el ciclo del viaje anterior, por esa razón, esta variable toma el valor de 1 para indicar que el recurso está ocupado o 0 para indicar que está libre y puede ser asignado.

**Utilización**: Número de recursos utilizados

Indica el número final de recursos que deben ser utilizados de acuerdo a su ocupación, para ejecutar los viajes requeridos. Esta variable debe ser menor o igual al parámetro  $N$ .

### 3.2.4. Función objetivo del modelo

$$\text{Min: Utilización} = \sum_{i=1}^N \prod_{j=1 | \text{Ocupación}_{i,j} > 0}^M \text{Ocupación}_{i,j}$$

Se establece la variable Utilización como la suma sobre todos los recursos de los productos de la variable Ocupación  $i, j$  en todos los viajes, siempre y cuando Ocupación  $i, j$  sea mayor que cero.

El objetivo del modelo matemático es minimizar el número de recursos que se necesitan para satisfacer la demanda de viajes, de forma tal que se maximice la ocupación de los recursos disponibles, es decir, que estén ejecutando viajes durante una fracción de tiempo mayor, con respecto al tiempo total que cada uno tiene disponible.

### 3.2.5. Restricciones del modelo

Estas restricciones son las que determinarán en qué momento se puede asignar un recurso para iniciar un viaje:

#### 1. Viajes:

Garantiza que se cumpla cada viaje de la distribuidora  $j$ . Al sumar las variables Ocupación en todos los recursos para cada distribuidora, el valor debe ser uno (1).

$$\sum_{i=1}^N \text{Ocupación}_{i,j} = 1 \quad \forall j \in D$$

## 2. Apertura ventana de tiempo:

Garantiza que se cumpla con la apertura de la ventana de tiempo por viaje de la distribuidora  $j$  (el recurso debe llegar después de esta hora a la distribuidora), pero se multiplica a ambos lados de la desigualdad por el parámetro Ocupación  $_{i,j}$  para que la restricción no limite la solución cuando esa variable es 0, es decir, cuando el recurso no está ejecutando un viaje a la distribuidora  $j$  en ese momento. La hora de llegada se considera como el tiempo después de que el recurso ha cargado y ha hecho el recorrido de ida a la distribuidora.

$$\text{Apertura}_j \times \text{Ocupación}_{i,j} \leq \text{Hora}_{i,j} + [(\text{Cargue}_j + \text{Ida}_j) \times \text{Ocupación}_{i,j}] \\ \forall i \in R \text{ y } \forall j \in D$$

## 3. Cierre ventana de tiempo:

Garantiza que se cumpla con el cierre de la ventana de tiempo por viaje de la distribuidora  $j$  (el recurso debe llegar antes de esta hora a la distribuidora), pero se multiplica a ambos lados de la desigualdad por el parámetro Ocupación  $_{i,j}$  para que la restricción no limite la solución cuando esa variable es 0, es decir, cuando el recurso no está ejecutando un viaje a la distribuidora  $j$  en ese momento. La hora de llegada a la distribuidora se considera como el tiempo después de que el camión ha cargado y ha hecho el recorrido de ida a la distribuidora.

$$\text{Hora}_{i,j} + [(\text{Cargue}_j + \text{Ida}_j) \times \text{Ocupación}_{i,j}] \leq \text{Cierre}_j \times \text{Ocupación}_{i,j} \\ \forall i \in R \text{ y } \forall j \in D$$

## 4. Secuencia de los viajes y utilización de los recursos:

Garantiza que un recurso no inicie el ciclo de un viaje a la distribuidora  $k$  hasta haber terminado el ciclo de un viaje a la distribuidora  $j$  anterior. Esta restricción lo que hace es calcular la diferencia en valor absoluto entre los tiempos de inicio de ciclo de dos viajes en el mismo recurso, siendo  $j \neq k$ , diferencia que debe ser mayor o igual que el ciclo de uno de los viajes, para garantizar que un recurso no se ocupe simultáneamente en dos viajes. Adicionalmente, esta misma restricción es la que obliga a las variables Ocupación  $_{i,j}$  y Ocupación  $_{i,k}$  a tomar los valores de 1 o 0 según se haya asignado los viajes a las distribuidoras  $j, k$  en ese recurso.

$$|\text{Hora}_{i,k} - \text{Hora}_{i,j}| \geq \text{Ciclo}_j \times \text{Ocupación}_{i,j} - [(1 - \text{Ocupación}_{i,k}) \times 1000] \\ \forall i \in R \text{ y } \forall k, j \in D | k \neq j$$

### 5. Límite variable Utilización:

Determina que la variable Utilización debe ser menor o igual que N, número máximo de recursos disponibles. Garantiza que la solución sea no factible, en caso que se necesiten más recursos de los disponibles para ejecutar todos los viajes y cumplir todas las restricciones.

$$\text{Utilización} \leq N$$

### 6. Define variables binarias:

Determina que la variable Ocupación  $i,j$  es binaria. 1 si el recurso  $i$  está ocupado, 0 en caso contrario. Permite el desarrollo del modelo bajo las condiciones establecidas.

$$\text{Ocupación}_{i,j} \in \{0,1\} \quad \forall i \in R \text{ y } \forall j \in D$$

### 7. Rango de la variable Hora $i,j$ :

Determina que la variable Hora  $i,j$  solo puede tomar valores entre -2 y 24. -2 indica las 22 horas del día anterior, ya que es posible empezar a hacer los cargues desde el día anterior para ganar tiempo. Inicialmente, se considera que estamos programando los viajes de un día lunes, ya que en los siguientes días, el cargue se puede iniciar mucho antes, en cuanto el recurso esté disponible, después de haber ejecutado todos los viajes que tenía asignados para ese día.

$$\text{Hora}_{i,j} \in \{-2, 24\} \quad \forall i \in R \text{ y } \forall j \in D$$

### 8. Día en que se debe ejecutar cada viaje:

Al considerar solo un día de programación, se omite la restricción que indique qué viajes deben ser ejecutados cada día, es decir, indicar que la hora de llegada a la distribuidora para ese viaje, debe estar entre las 0 y 24 horas de ese día.

## 3.3. Solución del modelo

Una vez definido un modelo preliminar, se utilizó el software LINGO para hallar una solución, sin embargo nos encontramos ante problemas de capacidad del software, para aceptar las variables y restricciones planteadas. No fue posible probarlo en otros software por el alto costo que tienen este tipo de software.

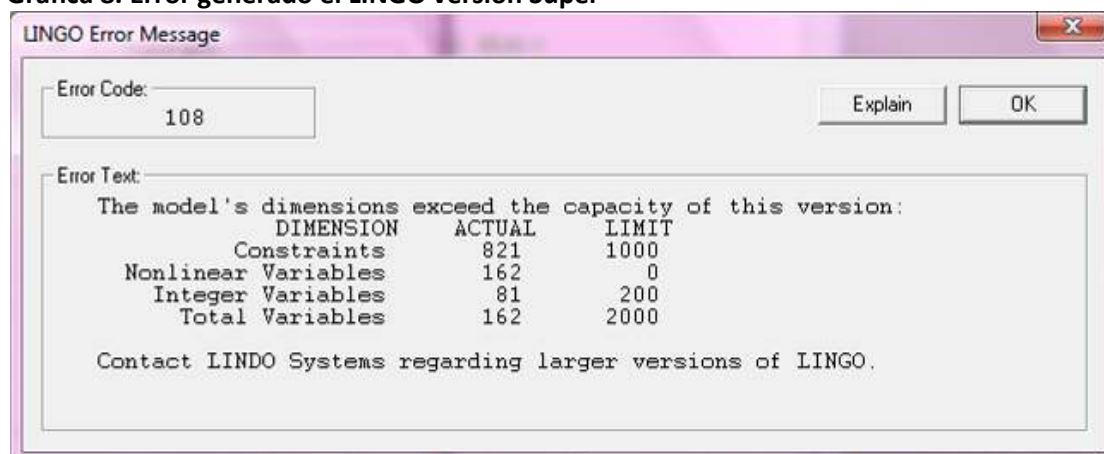
La versión Super de LINGO en la cual se corrió el modelo tiene las siguientes características:

Restricciones	1000
Variables	2000
Variables enteras	200
Variables no lineales	0
Variables globales	0
Generador de memoria (Mb)	32

Para probar el modelo se disminuyeron el número de viajes (solamente se consideraron 9 viajes), distribuidoras (solamente se consideraron 3 distribuidoras) y recursos (se consideraron 9 recursos), representando el problema real de forma más pequeña; sin embargo, la presencia de restricciones no lineales impiden la solución del mismo en esta versión de LINGO: la restricción 5 que secuencia los viajes y utilización de los recursos, la cual tiene un **valor absoluto** que hace que la restricción sea no lineal; y la restricción 7 que calcula la variable Utilización a través del **producto** de otras variables.

El error generado fue el siguiente:

**Gráfica 8. Error generado el LINGO versión Super**



Si pretendemos ingresar el modelo completo, tenemos para el nodo más grande (Bogotá con 14 distribuidoras) y para el día con el mayor número de viajes (37):

Restricciones	30.971
Variables	1.628
Variables enteras	814

Se revisaron las versiones existentes de LINGO para revisar cual se requiere, y se concluye que solo se podría correr el modelo en la versión extendida. En la Tabla 9 se ven las especificaciones de cada versión:

**Tabla 15. Versiones de LINGO**

Capacidad	Base			No lineales Variables no lineales	Global	
	Modelos lineales				Multistart Variables	Global Solver
	Restricciones	Variables	Enteros			
Super	1,000	2,000	200	200	200	10
Hyper	4,000	8,000	800	800	800	20
Industrial	16,000	32,000	3,200	3,200	3,200	50
Extended	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado

En este punto se debe considerar la pertinencia de adquirir un software como LINGO o cualquier otro software para optimización, con el fin de solucionar el modelo matemático planteado, teniendo en cuenta que su costo es de US\$6.495 ([Anexo 8](#)). Este costo se

considera muy alto, si se tiene en cuenta que no se puede conocer previamente el beneficio de dicha inversión, al no haber seguridad en los resultados que se vayan a obtener del mismo y del tiempo que vaya a tomar su solución (en caso de que exista una solución factible); luego, no es una decisión acertada el pensar en adquirir un software de optimización.

Al analizar con mayor detenimiento el modelo matemático planteado y el problema bajo consideración, dimensionalmente tiene un tamaño de  $m \times n$ , siendo  $m$  el número de viajes a ejecutar y  $n$  el número de recursos disponibles. Con un espacio de solución de  $(m!)^n$ , así el problema para el nodo Bogotá ( $37 \times 22$ ), puede tener al menos  $1,1277 \times 10^{949}$  posibles soluciones. Una completa enumeración de todas estas posibilidades para identificar programaciones factibles no es práctica.

Ante esta situación, se hace necesario revisar la viabilidad de resolver el problema de Botelleros a través de un método exacto. Para ello, se estudió el problema de ruteo con ventanas de tiempo (VRPTW), el cual tiene gran similitud con las características del problema actual de Coltanques en su línea de Botelleros; en cuanto a que existe un número determinado de clientes con demandas específicas y ventanas de tiempo para atención (centros de distribución), depósitos (plantas embotelladoras), flota heterogénea de vehículos y costos asociados a cada posible ruta. Para el problema del VRPTW y los problemas de ruteo de vehículos en general, tenemos que:

La optimización de las rutas de los vehículos (VRP) es un problema combinatorio que pertenece a ese conjunto especialmente difícil de resolver denominado NP-hard (Lenstra y Rinnooy Kan, 1981<sup>30</sup>); es decir, que el esfuerzo computacional requerido para resolverlos, aumenta exponencialmente con el tamaño del problema y es deseable obtener soluciones aproximadas con rapidez y que sean lo suficientemente exactas para tal fin, tales como las obtenidas a través de heurísticas y metaheurísticas, que hacen uso de las propiedades internas del problema y que se han empleado satisfactoriamente en la resolución de problemas de ruteo.<sup>31</sup>

Por otra parte, Savelsberg (1985<sup>32</sup>) demostró que encontrar una solución factible al VRPTW es un problema NP-completo, esto significa que no se conoce ningún algoritmo polinomial que pueda encontrar una solución exacta al problema, lo cual implica que los algoritmos heurísticos que sean capaces de encontrar soluciones próximas a la óptima en tiempo polinomial con el número de clientes  $n$ , ofrecen una atractiva alternativa a la búsqueda determinística de la solución

---

<sup>30</sup> LENSTRA, J. y RINNOOY KAN, A. Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks* 11, 1981, 221 – 227 p.

<sup>31</sup> DREZEWSKI, R., DRONKA, L. y KOZLAK, J., *Co-operative Co-evolutionary System for Solving Dynamic VRPTW Problems with Crisis Situations*, [documento en línea]. Department of Computer Science AGH University of Science and Technology, Cracovia, Polonia, 2007, [citado 09-12-2009]. Disponible en Internet: <http://www.springerlink.com/content/a55375t22mm83276/fulltext.pdf?page=1>

<sup>32</sup> SAVELSBERGH, M.W.P. Local search for routings problems with time windows. *Annals of Operations Research* 4, 1985, 285- 305 p.

óptima.<sup>33</sup> El uso de algoritmos exactos para solucionar el VPRTW sólo es factible en instancias de orden reducido (Cormen, Leiserson y Rivest, 1999<sup>34</sup>).<sup>35</sup>

Luego, por extensión, podemos decir que el problema de la línea de Botelleros de Coltanques se clasifica también como NP-Hard y que encontrar una solución factible para él, es un problema NP-completo; esto implica que no se conoce ningún método exacto para su resolución. Esto se puede afirmar con base en las características similares del problema de Botelleros con cualquier problema de ruteo y su complejidad adicional por las restricciones de circulación, inventario y carro de valores.

En este punto, el problema presenta tres características básicas:<sup>36</sup>

- Es de una naturaleza tal que no se conoce ningún método exacto para su resolución: Al revisar modelos básicos de investigación de operaciones, vemos que el problema no se adapta a ninguno de ellos, tales como problema del flujo de costo mínimo, problema de ruteo con ventanas de tiempo y programación de la producción.
- Aunque existe un método exacto para resolver el problema, su uso es computacionalmente muy costoso o inviable: Se ha planteado un modelo matemático, que no se puede solucionar con los software de optimización de los cuales se dispone. La adquisición de un software más amplio es costosa e incierta, ya que no se sabe si el modelo es realmente factible, o si se puede resolver en un tiempo polinomial.
- Un método heurístico sería más flexible que un método exacto, permitiendo, por ejemplo, la incorporación de condiciones de difícil modelación: Dado el problema de la línea de Botelleros y el modelo matemático ya desarrollado, no se han incorporado algunas restricciones, cuya modelación bajo las variables y parámetros actualmente planteados, no se ha analizado si es viable.

Debido a la naturaleza exponencial del problema y su similitud con otros modelos conocidos en la literatura, podemos concluir que su complejidad conduce a la necesidad de buscar una solución por medio de heurísticas, que permita dar soluciones en poco tiempo, pero que nos proporcionen una programación mejor a la que actualmente se tiene para la línea de Botelleros.

---

<sup>33</sup> YEPES, V y MEDINA, J., *Optimización del problema generalizado de las rutas con restricciones temporales y de capacidad (CVRPSTW)*, [documento en línea]. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes, España, 2000, [citado 29-09-2009]. Disponible en Internet: <http://personales.upv.es/vyepesp/00YMX13.pdf>

<sup>34</sup> CORMEN, T., LEISERSON, C. Y RIVEST, R., *Introduction to algorithms*. Cambridge: MIT Press, 1999.

<sup>35</sup> BRANDÃO, H. YVASCONCELOS, G., *A hybrid search method for the vehicle routing problem with time windows*, [documento en línea]. Springer, 2008, [citado 29-09-2009]. Disponible en Internet: <http://www.springerlink.com/content/f863257kn036x1rp/fulltext.pdf>

<sup>36</sup> MARTÍ, R., *Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria*, [documento en línea]. Universidad de Valencia, Facultad de Matemáticas, Departamento de Estadística e Investigación de Operaciones, España, 2001, [citado 29-09-2009]. Disponible en Internet: <http://www.uv.es/~rmarti/paper/docs/heur1.pdf>

## 4. HEURÍSTICA

### 4.1. Conceptos básicos

#### 4.1.1. Definición heurística <sup>37</sup>

El término heurístico proviene de la palabra griega *heuriskein* que significa encontrar o descubrir. Está relacionado con la tarea de resolver problemas inteligentemente utilizando la información disponible.

En investigación de operaciones, se califica de heurístico a un procedimiento para el que se tiene un alto grado de confianza en que encuentra soluciones de alta calidad con un costo computacional razonable, aunque no se garantice su optimalidad o su factibilidad, e incluso, en algunos casos, no se llegue a establecer lo cerca que se está de dicha situación. Se usa el calificativo heurístico en contraposición a exacto, que se aplica los procedimientos a los que se les exige que la solución aportada sea óptima o factible.

También es usual aplicar el término heurística cuando, utilizando el conocimiento que se tiene del problema, se realizan modificaciones en el procedimiento de solución del problema que, aunque no afectan a la complejidad del mismo, mejoran el rendimiento en su comportamiento práctico. En los métodos heurísticos o aproximados, la rapidez del proceso es tan importante como la calidad de la solución obtenida

Unas heurísticas para resolver un problema de optimización pueden ser más generales o específicas que otras. Los métodos heurísticos específicos deben ser diseñados a propósito para cada problema, utilizando toda la información disponible y el análisis teórico del modelo. Los procedimientos específicos bien diseñados suelen tener un rendimiento significativamente más alto que las heurísticas generales. Las heurísticas más generales, por el contrario, presentan otro tipo de ventajas, como la sencillez, adaptabilidad y robustez de los procedimientos. <sup>38</sup>

Un método heurístico debe partir de un problema de optimización bien definido mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza de forma inteligente para obtener una buena solución:

Se considera un problema bien definido cuando están definidas las posibles entradas, la forma de la solución y lo que se quiere lograr (la función objetivo) aunque no haya un método de solución evidente. El uso inteligente de la estructura del problema implica aprovechar el conocimiento adquirido por los actores directamente involucrados en el mismo (tanto de los “dueños” del problema como la de los encargados de darle solución) utilizando reconocimiento de similitudes,

---

<sup>37</sup> RIOJAS, A. op. cit., 21 – 25 p.

<sup>38</sup> BELÉN, M., MORENO, J. y MORENO, M., “*Metaheurísticas: una visión global*”, [documento en línea]. Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, España, 2003, [citado 29-09-2009]. Disponible en Internet: <http://www.aepia.org/>



inducción, procesos de razonamiento lógico, reflexión, etc., más que habilidades innatas; para hacer un algoritmo de solución ad-hoc para dicho problema. Por lo tanto es necesario referirse a un problema concreto para estudiar con detalle los procedimientos heurísticos.<sup>39</sup>

#### **4.1.2. ¿En qué casos usar un método heurístico y cómo seleccionar el adecuado?**

Actualmente las complejidades e incertidumbres en sistemas complejos son la razón principal de que se seleccionen métodos heurísticos para tratar problemas de decisión:

Muchos de los problemas del mundo real en la optimización son demasiado complejos para ser tratados a través de modelos matemáticos. En una amplia gama de aplicaciones, las formulaciones clásicas tales como enteros y los problemas de programación mixta, pueden tardar días en ser resueltos usando los mejores solvers disponibles. Las soluciones resultantes pueden estar drásticamente lejos del óptimo o incluso dejar de satisfacer los requisitos de factibilidad. Además, frecuentemente, esas formulaciones omiten los aspectos clave de la configuración del mundo real.

Los problemas prácticos generalmente contienen no linealidades, relaciones combinatorias e incertidumbres que no se pueden modelar de manera efectiva con la simple enumeración de un objetivo y una serie de restricciones en un modelo matemático. En estos casos, la formulación de heurísticas se convierte en una herramienta muy valiosa en estos entornos.<sup>40</sup>

Las técnicas de programación heurística se utilizan más a menudo cuando el problema es de tal tamaño y complejidad que no hay algoritmos optimizadores disponibles o que no son económicos. El enfoque de programación heurística busca soluciones basadas en características de aceptabilidad más que en reglas optimizadoras, considera explícitamente cierto número de factores (como capacidad del computador y tiempo para generar la solución) y no solo la calidad de la solución obtenida, cuya evaluación se hace usualmente por procedimientos inductivos, más que por procedimientos deductivos. Los programas heurísticos específicos no se justifican porque obtengan una solución óptima verificable por procedimientos analíticos, sino porque se ha probado experimentalmente que son útiles en la práctica.<sup>41</sup>

Bajo estas condiciones, se usan métodos heurísticos para hallar soluciones aproximadas, si el problema de optimización, determinístico o no, es difícil, es decir:<sup>42</sup>

<sup>39</sup> DÍAZ, A., y GLOVER, F. Optimización Heurística y Redes Neuronales. Madrid: Editorial Paraninfo, 1996.

<sup>40</sup> APRIL, J., GLOVER, F., KELLY, J. Y LAGUNA, M. *Simulation/Optimization using "Real-World" Applications*, [documento en línea]. Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference, Estados Unidos, 2001, [citado 29-09-2009]. Disponible en Internet: <http://www.informs-cs.org/wsc01papers/016.PDF>

<sup>41</sup> IGNIZIO, J., WYSKIDA, R., y WILHELM, M., *A rationale for heuristic program selection and evaluation*, [documento en línea]. Universidad de Alabama, Estados Unidos, 1973, [citado 29-09-2009]. Disponible en Internet: <http://delivery.acm.org/10.1145/1070000/1061402/p4-ignizio.pdf?key1=1061402&key2=0490934521&coll=portal&dl=ACM&CFID=15151515&CFTOKEN=6184618>

<sup>42</sup> MARTÍ, R. *Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria*, op. cit., 3 p.

- El problema es de una naturaleza tal que no se conoce ningún método exacto para su resolución.
- Aunque existe un método exacto para resolver el problema, su uso es computacionalmente muy costoso o inviable.
- El método heurístico es más flexible que un método exacto, permitiendo, por ejemplo, la incorporación de condiciones de difícil modelización.

#### 4.1.3. Clasificación de los métodos heurísticos <sup>43</sup>

Existen muchos métodos heurísticos de naturaleza muy diferente, por lo que es complicado dar una clasificación completa, además, generalmente éstos se diseñan para un problema específico sin posibilidad de generalización o aplicación a otros problemas similares.

El siguiente esquema trata de dar unas categorías amplias, no excluyentes, en donde ubicar a los métodos heurísticos más conocidos:

- **Métodos de Descomposición:** El problema original se descompone en subproblemas más sencillos de resolver, teniendo en cuenta, aunque sea de manera general, que éstos pertenecen al mismo problema.
- **Métodos Inductivos:** La idea de estos métodos es generalizar de versiones pequeñas o más sencillas al caso completo. Propiedades o técnicas identificadas en estos casos más fáciles de analizar pueden ser aplicadas al problema completo.
- **Métodos de Reducción:** Consiste en identificar propiedades que se cumplen mayoritariamente en las buenas soluciones e introducirlas como restricciones del problema. El objeto es restringir el espacio de soluciones simplificando el problema. El riesgo obvio es dejar fuera las soluciones óptimas del problema original.
- **Métodos Constructivos:** Procedimiento iterativo que, en cada paso añade un elemento hasta completar una solución. Usualmente son métodos deterministas y están basados en seleccionar, en cada iteración, el elemento con mejor evaluación. Estos métodos han sido muy utilizados en problemas clásicos como el del agente viajero.
- **Métodos de Búsqueda Local:** A diferencia de los métodos anteriores, los procedimientos de búsqueda o mejora local, comienzan con una solución del problema y la mejoran progresivamente. El procedimiento realiza en cada paso un movimiento de una solución a otra con mejor valor. El método finaliza cuando no existe ninguna solución accesible que mejore la anterior.

---

<sup>43</sup> MARTÍ, R., *Algoritmos Heurísticos en Optimización Combinatoria*, [documento en línea]. Universidad de Valencia, Facultad de Matemáticas, Departamento de Estadística e Investigación de Operaciones, España, 2004, [citado 29-09-2009]. Disponible en Internet: <http://yalma.fime.uanl.mx/~roger/work/teaching/mecbs5122/1-Introduction/Intro-by-Rafa%20Marti.pdf>

#### 4.1.4. Nivel de aspiración <sup>44</sup>

Una vez se ha decidido utilizar un método heurístico dadas las características del problema bajo estudio, se debe seleccionar el más adecuado entre las infinitas técnicas disponibles. El método de selección puede basarse en un “nivel de aspiración” preestablecido.

El nivel de aspiración indica el nivel que se desea para todos los atributos pertinentes, tales como límites al tamaño del problema, tiempo de cómputo, factores económicos, deseos de quien toma las soluciones y así sucesivamente. Después de determinar estos niveles se determinan reglas heurísticas (intuitivamente) iniciando con la más simple. Una vez que una combinación de estas reglas heurísticas (o programa heurístico) se ha diseñado y que satisfacen los niveles de aspiración, acaba el proceso de selección.

Los niveles de aspiración del programa heurístico que se esté considerando deben ser establecidos después de una revisión de las técnicas de solución existentes y de haber considerado cuáles atributos serían probablemente los más pertinentes en un problema real. La satisfacción de estos niveles de aspiración sirve como una medida de la calidad y eficiencia del programa heurístico.

#### 4.1.5. Medición de la calidad de un algoritmo <sup>45</sup>

Al resolver un problema de forma heurística se debe medir la calidad y eficiencia de un algoritmo para poder determinar su validez frente a otros métodos de resolución del problema, puesto que la optimalidad no está garantizada.

Los programas heurísticos no se justifican porque obtengan una solución óptima verificable por procedimientos analíticos, sino porque se ha probado experimentalmente que son útiles en la práctica. Como la experimentación en el problema real es usualmente impráctica, se deben utilizar otros métodos de prueba más prácticos.

Un buen algoritmo heurístico debe tener las siguientes propiedades:

1. **Eficiente:** Un esfuerzo computacional realista para obtener la solución.
2. **Bueno:** La solución debe estar, en promedio, cerca del óptimo.
3. **Robusto:** La probabilidad de obtener una mala solución (lejos del óptimo) debe ser baja.

Para medir la calidad de una heurística existen diversos procedimientos, entre los que se encuentran los siguientes:<sup>46</sup>

---

<sup>44</sup> IGNIZIO, J., op. cit., 5 p.

<sup>45</sup> MARTÍ, R. *Algoritmos Heurísticos en Optimización Combinatoria.*, op. cit., 9 p.

<sup>46</sup> RIOJAS, A., op. cit., 25

### **Comparación con la solución óptima**

Aunque normalmente se recurre al algoritmo aproximado por no existir un método exacto para obtener el óptimo, o por ser éste computacionalmente muy costoso, en ocasiones puede que dispongamos de un procedimiento que proporcione el óptimo para un conjunto limitado de ejemplos (usualmente de tamaño reducido). Este conjunto de ejemplos puede servir para medir la calidad del método heurístico.

Normalmente se mide, para cada uno de los ejemplos, la desviación porcentual de la solución heurística frente a la óptima, calculando posteriormente el promedio de dichas desviaciones. Si llamamos  $c_h$  al costo de la solución del algoritmo heurístico y  $c_{opt}$  al costo de la solución óptima de un ejemplo dado, en un problema de minimización la desviación porcentual viene dada por la expresión:

$$\frac{c_h - c_{opt}}{c_{opt}} \times 100$$

### **Comparación con un método exacto truncado**

Un método enumerativo como el de Ramificación y Acotación explora una gran cantidad de soluciones, aunque sea únicamente una fracción del total, por lo que los problemas de grandes dimensiones pueden resultar computacionalmente inabordables con estos métodos. Sin embargo, podemos establecer un límite de iteraciones (o de tiempo) máximo de ejecución para el algoritmo exacto. También podemos saturar un nodo en un problema de maximización cuando su cota inferior sea menor o igual que la cota superior global más un cierto  $\alpha$  (análogamente para el caso de minimizar). De esta forma se garantiza que el valor de la mejor solución proporcionada por el procedimiento no dista más de  $\alpha$  del valor óptimo del problema. En cualquier caso, la mejor solución encontrada con estos procedimientos truncados proporciona una cota con la que contrastar el heurístico.

### **Comparación con una cota**

En ocasiones el óptimo del problema no está disponible ni siquiera para un conjunto limitado de ejemplos. Un método alternativo de evaluación consiste en comparar el valor de la solución que proporciona el heurístico con una cota del problema (inferior si es un problema de minimización y superior si es de maximización). Obviamente la bondad de esta medida dependerá de la bondad de la cota (ceranía de ésta al óptimo), por lo que, de alguna manera, tendremos que tener información de lo buena que es dicha cota. En caso contrario la comparación propuesta no tiene demasiado interés.

### **Comparación con otros heurísticos**

Este es uno de los métodos más empleados en problemas difíciles (NP-hard) sobre los que se ha trabajado durante tiempo y para los que se conocen algunos buenos heurísticos. Al

igual que ocurre con la comparación con las cotas, la conclusión de dicha comparación está en función de la bondad del heurístico escogido.

### **Análisis del peor caso**

Uno de los métodos que durante un tiempo tuvo bastante aceptación es analizar el comportamiento en el peor caso del algoritmo heurístico; esto es, considerar los ejemplos que sean más desfavorables para el algoritmo y acotar analíticamente la máxima desviación respecto del óptimo del problema. Lo mejor de este método es que acota el resultado del algoritmo para cualquier ejemplo; sin embargo, por esto mismo, los resultados no suelen ser representativos del comportamiento medio del algoritmo. Además, el análisis puede ser muy complicado para los heurísticos más sofisticados.

Aquellos algoritmos que, para cualquier ejemplo, producen soluciones cuyo costo no se aleja de un porcentaje  $\epsilon$  del costo de la solución óptima, se llaman *Algoritmos  $\epsilon$ -Aproximados*. Esto es; en un problema de minimización se tiene que cumplir para un  $\epsilon > 0$  que:  $C_h \leq (1+\epsilon) C_{opt}$

La comparación con la solución óptima o con un método exacto no son convenientes, porque cualquier comparación contra resultados de la utilización de un método exacto, no nos permite validar ni rechazar un esquema heurístico. No tiene sentido evaluar la calidad y eficiencia de una heurística que está usualmente, si no siempre, destinada a la solución de problemas de tamaño real de miles de variables, contra los métodos exactos que están casi invariablemente restringidos a problemas irrealmente pequeños de unas docenas de variables.<sup>47</sup>

El análisis del peor caso o la comparación con la mejor solución disponible, si pueden resultar bastante útiles para evaluar la calidad y eficiencia de la solución de una heurística, ya que se trata de comparaciones con soluciones reales del problema: en el primer caso, con la mejor solución disponible, y en el segundo caso, con la peor solución. En nuestro caso de la línea de Botelleros, esta opción podría ser muy útil, ya que la mejor solución es aquella que tienen implementada hoy en día, y la peor solución es aquella en la cual se necesiten más recursos de los que actualmente están disponibles para cada nodo.

Comparar con una cota también es una buena metodología si se conoce cuál es el valor ideal para la función objetivo de la heurística. De esta forma, se puede medir la calidad y eficiencia del resultado obtenido a través del método heurístico midiendo su desviación con respecto a la cota.

De la misma forma, se puede comparar el resultado obtenido con el de otras heurísticas; sin embargo, es difícil que para el mismo problema se dispongan de diversas heurísticas para pensar en la posibilidad de compararlas entre sí. De cualquier manera, sería una buena metodología en caso de disponer de la información.

---

<sup>47</sup> IGNIZIO, J., op. cit., 5 – 6 p.

De cualquier manera, la evaluación de la calidad y eficiencia de una heurística depende en gran medida del conocimiento que se tenga del problema bajo estudio, de los métodos anteriores aplicados para solucionarlo y de los recursos que demande para proporcionar una buena solución. Por eso, para evaluar la solución propuesta para la línea de Botelleros de Coltanques, se hará uso de programaciones previas usadas por la empresa y un análisis detenido de la ejecución de viajes hecha en los últimos meses.

## 4.2. Esquema del algoritmo heurístico

### 4.2.1. Descripción de la heurística

Una vez descritas las características del problema de la línea de Botelleros de Coltanques y analizar la naturaleza de los métodos heurísticos, se decidió diseñar una heurística específica para este problema que permita superar las dificultades encontradas:

- Imposibilidad de ajustarlo a los modelos matemáticos existentes.
- Incertidumbre de solucionarlo a través de un modelo matemático por su costo y tiempo.
- Dificultad de plantear en un lenguaje matemático todas las restricciones inherentes al problema (especialmente las relacionadas con el nodo Bogotá).
- Dada la cantidad de restricciones que posee el problema, es difícil la aplicación de una metaheurística existente.
- Aprovechar el profundo conocimiento que se tiene del problema y la existencia de soluciones previas que proporcionan un buen patrón de comparación.

La heurística fue diseñada bajo tres métodos:

- **Descomposición**, ya que se trata cada nodo como un subproblema del problema general, esto debido a que cada uno tiene sus propios recursos y centros de distribución que debe atender, por eso se puede manejar cada nodo como un problema independiente. Adicionalmente, el problema de cada nodo se descompone en días, para simplificar el problema, pero teniendo en cuenta que los horarios programados para un camión en un día, afectan la programación que se puede hacer en el día siguiente.
- **Constructivo aleatorizado**, porque la solución se construye paso a paso, buscando las distribuidoras candidatas a ser asignadas a cada camión en cada período de tiempo, de forma tal que cumplan todas las condiciones y permitan ocupar de mejor forma el tiempo disponible del recurso; luego, entre las distribuidoras candidatas se escoge aleatoriamente una para ser incluida en la solución. Este procedimiento se repite hasta haber asignado todos los viajes.<sup>48</sup>

---

<sup>48</sup> Todos los métodos heurísticos de inserción presentan un tiempo de ejecución de  $O(n^2)$ , excepto la inserción más cercana que es de  $O(n^2 \log n)$ . Respecto al estudio empírico sobre los 30 grafos en el problema del TSP (agente viajero), los porcentajes de desviación del óptimo son de 20%, 9.9%, 16.8% y 11.1% para el más cercano, más lejano, más barato y aleatorio, respectivamente, aunque el tiempo de ejecución del más barato es mucho mayor.

El algoritmo constructivo aleatorizado puede que produzca una solución de peor calidad que la del algoritmo original. Sin embargo, dado que el proceso no es completamente determinista, cada vez que lo realicemos sobre un mismo ejemplo obtendremos resultados diferentes. Esto permite definir un proceso iterativo consistente en ejecutar un número prefijado de veces el algoritmo y quedarnos con la mejor de las soluciones obtenidas. Por esa razón, se utilizó también un método iterativo.<sup>49</sup>

- **Iterativo**, porque cada iteración de la heurística implica la realización de una búsqueda de una nueva solución que puede ser mejor que la solución que se encontró con anterioridad. Cuando el algoritmo termina después de cierto número de iteraciones (de acuerdo con la regla de detención establecida), la solución que proporciona es la mejor que se pueda encontrar en cualquier iteración.

Para el diseño del algoritmo heurístico se utilizó Visual Basic, por la sencillez del lenguaje de programación orientado a eventos, porque posee una curva de aprendizaje muy rápida y por su interfaz con Excel, que permite ejecutarlo en cualquier computador con Microsoft Office, facilitando su diseño, implementación y uso. Al usuario final, se le presenta una aplicación en Microsoft Office Excel que le permitirá manipular la información y copiarla fácilmente a cualquier otra aplicación.

A continuación se presenta paso a paso el algoritmo heurístico, y en el [Anexo 16](#) se encuentra el código de programación de la heurística en Visual Basic.

#### **4.2.2. Iteración**

1. La heurística inicia borrando las soluciones y asignaciones de recursos previas, de acuerdo con los días seleccionados.
2. A continuación, se hace la lectura de los parámetros del problema y el establecimiento de las dimensiones de los vectores y matrices que se van a usar para calcular y almacenar la solución.
  - Leer y almacenar en las variables correspondientes los parámetros básicos para encontrar la solución:
    - Número de distribuidoras a ser visitadas.
    - Número de camiones disponibles.
    - Viajes requeridos por cada distribuidora cada día de la semana.
    - Hora de apertura y de cierre de las ventanas de tiempo en cada distribuidora.
    - Tiempos de cargue, descargue, ida y retorno para cada distribuidora.
  - Calcular y almacenar en las variables correspondientes los parámetros básicos para encontrar la solución:
    - Llegada o tiempo que el camión tarda en llegar a la distribuidora y duración total del ciclo.

---

<sup>49</sup> MARTÍ, R. *Algoritmos Heurísticos en Optimización Combinatoria.*, op. cit., 22 p.

- Tamaño de las matrices para contabilizar uso de muelles en la planta y en distribuidoras.
  - Tamaño de la matriz que almacena las distribuidoras candidatas a ser parte de la solución.
  - Inicializa en cero la matriz muelles ocupados en distribuidora.
3. Una vez almacenados todos los parámetros, se validan qué días se van a programar, dependiendo de las opciones escogidas previamente.
  4. Dependiendo del día de la semana cuyos viajes se van a programar, se establecen los parámetros necesarios para determinar la programación de esos días.
    - 0 = Lunes
    - 1 = Martes
    - 2 = Miércoles
    - 3 = Jueves
    - 4 = Viernes
    - 5 = Sábado
    - 6 = Domingo
  5. Para cada día de la semana que se vaya a programar, se toma cada camión disponible en el nodo y se evalúa en cada período de tiempo (30 minutos) la factibilidad de asignar el inicio de un viaje en ese período de tiempo para ese camión. Dentro de la matriz Solución solo se pueden asignar viajes en aquellos espacios con valor de cero (0).
  6. La factibilidad se evalúa a partir de las siguientes condiciones:
    - El horario de cargue para los viajes no se debe cruzar con los horarios de inventario en planta. Se garantiza sumando al parámetro que tiene asociado el período de tiempo, las unidades necesarias para que no haya posibilidad de asignar inicios de viaje en los horarios de inventario. Ésta solo afecta los nodos Bogotá, Cali y Bucaramanga.
    - Desplazamientos durante pico y placa ambiental en el nodo Bogotá, se garantiza sumando al parámetro que tiene asociado el período de tiempo, las unidades necesarias para que no haya posibilidad que se cruce el momento entre el cual el vehículo sale de la planta y llega a las afuera de Bogotá, con el pico y placa ambiental establecido para vehículos de carga en Bogotá. De esta forma no solo se evitan desplazamientos en ese horario, sino que se evita que el vehículo.
    - El horario de fin de cargue para los viajes no se debe cruzar con el horario en el cual el carro de valores está en las instalaciones de la planta. Para ello, se suma al parámetro que tiene asociado el período de tiempo, las unidades necesarias para garantizar que no se asignen viajes en un horario que al terminar el cargue, coincida con los horarios del carro de valores en la planta, de forma que retrase la salida del vehículo. Ésta solo afecta los nodos Bogotá, Cali y Bucaramanga.
    - Muelles disponibles en planta para cargue, lo cual se valida a través de un condicional incluido en un ciclo, que valida cada período de tiempo hasta encontrar



uno en el cual haya asignados menos de cuatro cargues en la planta. Además, valida no solo el período actual, sino los períodos posteriores para garantizar que en ningún momento haya más de cuatro vehículos cargando.

7. Una vez se ha asegurado el cumplimiento de las restricciones de inventario, carro de valores, pico y placa y disponibilidad de muelles en planta, inicializa la lista de candidatos en cero, para poder almacenar los viajes candidatos a ser parte de la solución, para ese camión en ese período específico, y empieza a recorrer cada distribuidora para evaluar las características de cada una.
8. Una vez se toma el parámetro correspondiente a cada centro de distribución, se deben evaluar dos condiciones: restricciones de circulación particulares y muelles disponibles para cada CEDI. Si en ese horario en particular no se cumple alguna de estas restricciones, se pasa a evaluar la siguiente distribuidora, hasta encontrar un viaje de un CEDI que se pueda asignar a esa hora, o se determine que a esa hora no es posible iniciar ningún viaje.
9. El siguiente paso es validar si hay viajes pendientes en la distribuidora, ya que si todos los viajes de ese centro de distribución ya están asignados, no tiene sentido asignar más viajes de los demandados por el cliente.
10. Una vez se determine si la distribuidora cumple con las restricciones y tiene viajes pendientes, se revisa si iniciando el viaje a esa hora, se cumple con las ventanas de tiempo del CEDI. En la misma línea se validan las dos ventanas de tiempo (para las distribuidoras que tienen ventanas de tiempo fraccionadas), ya que es indiferente en cuál de las dos llegue el viaje al CEDI.
11. Cuando se ha validado la posibilidad de asignar un viaje de una distribuidora en cierto horario y se garantiza el cumplimiento de las ventanas de tiempos, se debe validar la última restricción correspondiente a restricciones de circulación de puentes festivos, Semana Santa y temporada vacacional de fin de año ([Anexo 3](#)). Para ello, se revisa qué viajes se pueden realizar antes que inicie la restricción, cuáles viajes se deben realizar después de la restricción y cuáles deben ser partidos (desplazarse a la distribuidora antes de la restricción y retorna a la planta embotelladora una vez culmine la restricción).
12. Cada una de las distribuidoras que cumpla en cada período de tiempo con las restricciones de ventana de tiempo, inventario, carro de valores, muelles disponibles y circulación se almacena como candidato en un vector. Una vez se confirme el cumplimiento de las restricciones, se incluye esa distribuidora dentro de los candidatos para hacer parte de la solución y se incrementa en 1 la variable candidatos.
13. Luego, entre las distribuidoras almacenadas en dicho vector, se escoge una aleatoriamente.
14. Una vez seleccionada la distribuidora hacia la cual se va a realizar el viaje, se descuenta ese viaje del total de viajes que se debían realizar a la distribuidora, y se determina la ocupación de los muelles en la planta y en la distribuidora para ese viaje, marcando con

el valor de uno (1) las matrices MuellesP y MuellesD, lo cual significa que está ocupado el muelle.

15. Se procede a escribir el viaje en la matriz Solución, ocupando tantos espacios como tiempo se demore el ciclo completo del viaje. Para escribir el viaje se utilizan dos identificadores: el número de la distribuidora hacia al cual se va a realizar el viaje y el día de la semana en el cual se realiza.
16. Cuando hay días festivos en la semana que se está programando, se utiliza el siguiente algoritmo para poder escribir la solución fraccionada, en caso que la restricción de circulación impida realizar en un solo tramo el viaje. Primero se realiza el desplazamiento hasta la distribuidora, allí el vehículo espera hasta que termine la restricción y una vez termine, retorna a la planta embotelladora.
17. Se realizan los cálculos para ocupación de muelles en la planta embotelladora en la siguiente fracción de tiempo. Para ello se inicializa en cero toda la matriz que realiza la suma del número de muelles ocupados en la planta, y después, se contabilizan los muelles ocupados en la planta hasta ese momento, incluyendo el último viaje asignado.
18. Inicia nuevamente la validación en el siguiente período de tiempo o en el siguiente camión, según corresponda, hasta que se hayan asignado todos los viajes o hasta que las restricciones no permitan asignar más viajes.
19. Una vez se haya construido la solución, se evalúa si se asignaron todos los viajes, en caso que no se hayan asignado todos, se vuelve a construir la solución. Este procedimiento se repite hasta que se construya una solución que incluya todos los viajes programados para los días que se estén ejecutando. Aquí se incluyó un criterio de detención para evitar que se ejecute infinitamente el algoritmo en caso que no haya soluciones factibles (cuando no se pueden asignar todos los viajes).

#### **4.2.3. Regla de detención**

1. Cuando se tiene la solución completa con todos los viajes asignados, comienza la fase iterativa, en la cual se buscarán nuevas formas para asignar los viajes que permitan mejorar el uso de los recursos. En este punto, se debe establecer entonces la regla de detención para el algoritmo.

Basados en el tiempo que actualmente tarda el coordinador de cada nodo elaborando la programación diaria de los botelleros (30 minutos en promedio), se ha determinado realizar 20 iteraciones del algoritmo. Esto garantiza la generación de suficientes soluciones para que la solución final sea bastante buena, usando la menor cantidad posible de recursos, maximizando su utilización y exigiendo un tiempo de ejecución no mayor a 30 minutos.

Sin embargo, cuando no es posible asignar todos los viajes, se incluyó una regla de detención que automáticamente lleva a la finalización del algoritmo y le muestra un

mensaje de error al usuario, devolviéndolo a la ventana donde ingresó el número de viajes a programar.

2. Una vez se han hecho las 20 iteraciones para hallar 20 soluciones, se contabilizan el número de camiones utilizados en cada una de ellas.
3. Se establece cuál de las soluciones utiliza un menor número de camiones. Si hay dos soluciones que utilicen el mismo número de camiones, se escoge aleatoriamente una de las dos. El algoritmo heurístico retorna el subíndice que indica cuál de las soluciones encontradas es la mejor.
4. Se escribe la solución en la hoja de Excel que visualizará el usuario, junto con el inicio de cada viaje que permitirá hacer la asignación de camiones según kilómetros recorridos.
5. Finalmente, de acuerdo con los viajes realizados por cada camión, se contabiliza el total de kilómetros que recorre cada uno en la semana, se ordenan de mayor a menor kilometraje y se asignan las placas de los recursos, vinculando el camión de menor costo por kilómetro a la ruta con mayor número de kilómetros recorridos y viceversa.

### **4.3. Herramienta computacional**

En el CD que se encuentra adjunto a este documento ([Anexo 11](#)), hay un aplicativo en Excel para cada uno de los nodos bajo estudio, que ejecuta el algoritmo heurístico. En el [Anexo 12](#) se encuentran las especificaciones técnicas para el correcto uso y ejecución del algoritmo heurístico.

Con este aplicativo el usuario, a partir de un entrenamiento básico, puede:

- Ingresar de forma rápida y fácil la información requerida por la heurística (días, restricciones de festivos y número de viajes).
- Procesar dicha información a través del algoritmo.
- Obtener los recursos y programación de viajes para los días o semana que el usuario desee.

Junto con el aplicativo, se encuentran los resultados de la ejecución de la heurística para los meses de Abril, Mayo y Junio de 2009 y el tutorial de uso del aplicativo:

**Anexo 11.1.** Heurística nodo Barranquilla

**Anexo 11.2.** Resultados programación nodo Barranquilla

**Anexo 11.3.** Heurística nodo Bogotá

**Anexo 11.4.** Resultados programación nodo Bogotá

**Anexo 11.5.** Heurística nodo Bucaramanga

**Anexo 11.6.** Resultados programación nodo Bucaramanga

**Anexo 11.7.** Heurística nodo Cali

**Anexo 11.8.** Resultados programación nodo Cali

**Anexo 11.9.** Tutorial de uso

## 5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Una vez explicada la heurística utilizada, se utilizó para el algoritmo para generar soluciones a diferentes programaciones de la línea de Botelleros, comparando los resultados obtenidos frente a las ejecuciones realizadas previamente por Coltanques en los meses de Abril, Mayo y Junio de 2009

En el [Anexo 13](#) se encuentran detallados semana a semana los viajes programados a través del algoritmo heurístico. A partir de la programación obtenida, se analizarán los resultados obtenidos, y la utilización de los recursos para medir si hay mejoras o no en el proceso de distribución realizado por Coltanques en su línea de Botelleros.

### 5.1. Utilización recursos

De acuerdo con los resultados obtenidos, los recursos necesarios para cumplir los viajes de la línea Botelleros son:

**Tabla 16. Recursos utilizados en la programación**

Nodo	Recursos actuales	Recursos Propuesta (heurística)													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Máximo
Barranquilla	19	15	16	14	14	14	14	13	14	12	15	15	14	14	16
Bogotá	22	16	14	17	17	16	18	16	16	15	16	16	17	11	18
Bucaramanga	11	11	9	11	11	11	10	10	10	10	11	10	11	11	11
Cali	11	8	7	7	7	6	7	8	7	6	9	8	6	7	9

Para el nodo Bogotá, se requieren 4 camiones menos para ejecutar los viajes, en Barranquilla con 3 camiones menos se pueden ejecutar los viajes sin incumplir ninguna restricción, para Cali, se necesitan 2 vehículos menos, y en Bucaramanga se continúan usando los 11 recursos.

Como vemos en la Tabla 16, el máximo de recursos usados para programar, a través de la heurística, el mismo número de viajes que se ejecutaron en los meses de Abril, Mayo y Junio de 2009, es menor que el usado actualmente en cada nodo, lo cual implica un aumento en la ocupación de los recursos, tal como se aprecia en la Tabla 17.

**Tabla 17. Porcentaje de ocupación de los recursos** <sup>50</sup>

		Barranquilla	Bogotá	Bucaramanga	Cali
<b>Tiempo total de viajes (horas)</b>		17.068,25	19.738,15	12.399,33	9.931,65
<b>Tiempo disponible recursos (horas)</b>	Actual	41.496	48.048	24.024	24.024
	Propuesta	34.944	39.312	24.024	19.656
<b>Porcentaje ocupación recursos</b>	Actual	41,13%	41,08%	51,61%	41,34%
	Propuesta	48,84%	50,21%	51,61%	50,53%
	Diferencia	7,71%	9,13%	0,00%	9,19%

Aunque en Bucaramanga no se presentan mejoras significativas en el porcentaje de ocupación de los recursos, si se garantiza el cumplimiento de todas las restricciones, lo que deriva en un mejor servicio al cliente y mayor eficiencia en el proceso de distribución. En los otros tres nodos, mejora la ocupación de los recursos en porcentajes superiores al 7%, además se garantiza el cumplimiento de las restricciones (especialmente las existentes en Bogotá que actualmente generan tiempos muertos amplios) y un buen servicio al cliente, al poder cumplir con los viajes programados y las citas de cargue y descargue en la planta y en los centros de distribución.

## 5.2. Costo – Beneficio

Ante los resultados obtenidos, se deben evaluar financieramente los ahorros, inversiones y gastos adicionales que generaría la línea de Botelleros al implementar la propuesta.

Se plantea la posibilidad de vender o rematar los vehículos con uso superior a los 10 años, medida con la cual se recupera parte de la inversión y se puede reinvertir en otros vehículos. Para los vehículos de modelos superiores a 10 años que se conserven, se debe garantizar que no tengan desplazamientos largos debido a su alto costo por kilómetro recorrido.

### 5.2.1. Asignación de recursos

El algoritmo heurístico diseñado asigna automáticamente a las rutas, los recursos de acuerdo con su costo por kilómetro recorrido, de forma tal que los vehículos que generan mayores costos por kilómetro se asignan a las rutas con menor cantidad de kilómetros recorridos y viceversa para los vehículos con menores costos. Los gastos operativos promedio por camión de la línea de Botelleros (calculados con base en el consolidado de gastos de los meses Julio a Diciembre de 2008) se observan en el [Anexo 14](#), donde además se resaltan aquellos recursos más costosos, que pueden ser considerados para la venta.

<sup>50</sup> - El tiempo total de viajes corresponde a la suma de los tiempos de ciclo para cada uno de los viajes realizados.  
 - El tiempo disponible de recursos se calcula como los recursos disponibles, multiplicado por 13 semanas (que es el período bajo estudio), por 7 días de la semana y multiplicado por 24 horas diarias.  
 - El porcentaje de ocupación de los recursos corresponde a la razón entre el tiempo total de viajes y el tiempo disponible de recursos.

De esta forma, se reducen los costos de la línea Botelleros, maximizando el uso de los recursos más eficientes y evitando costos operativos excesivos. Al realizar un análisis con base en los viajes de los meses Abril, Mayo y Junio de 2009 ([Anexo 15](#)), la asignación de recursos bajo la metodología de heurística, permite los siguientes ahorros en un trimestre:

**Tabla 18. Ahorros generados por asignación de recursos según costo promedio por kilómetro**

Nodo	Actual *	Propuesta *	Ahorro *	Porcentaje
Barranquilla	778.978.937	\$ 731.000.906,65	\$ 47.978.029,96	6,16%
Bogotá	\$ 835.973.305,79	\$ 763.952.842,50	\$ 72.020.463,29	8,62%
Bucaramanga	\$ 413.241.580,55	\$ 395.128.389,01	\$ 18.113.191,54	4,38%
Cali	\$ 522.109.934,56	\$ 407.217.859,58	\$ 114.892.074,98	22,01%
<b>Total</b>	<b>\$ 2.550.303.757,90</b>	<b>\$ 2.297.299.997,74</b>	<b>\$ 253.003.760,16</b>	<b>9,92%</b>

\* Valores en pesos colombianos (\$)

El nodo en el cual se generan los mayores ahorros es Cali, con el 22,01%, seguido por Bogotá con el 8,62% y Barranquilla con el 6,16%. Se debe observar que en Bucaramanga, a pesar que no se están utilizando menos recursos, se generan ahorros del 4,38% al asignar de forma conveniente los recursos a las rutas según los kilómetros de cada una.

El total de ahorros en el trimestre bajo análisis ascienden a \$253.003.760, por lo cual, es conveniente que se implemente esta metodología para asignación de los recursos, aunque es importante también, que se mantenga un equilibrio en el total de kilómetros recorridos por cada recurso, para que el desgaste sea parejo y se mantengan razonables los costos de mantenimiento.

A continuación, se evaluará la conveniencia de vender los camiones de modelos más antiguos, con el fin de renovar la flota de Botelleros y reducir los costos de mantenimiento generados.

### **5.2.2. Venta y adquisición de nuevos tracto camiones**

Ya vimos que el usar vehículos con menores costos por kilómetro permite reducir considerablemente los costos y generar grandes ahorros. En la Tabla 10 se muestra que, al realizar la programación de los viajes a través de la heurística, se necesitan nueve recursos menos, por esa razón, se propone vender los vehículos modelo 1993 (son los más antiguos que hay en la línea de Botelleros) y adquirir modelos nuevos.

Para analizar la inversión y ahorros generados con la venta de los vehículos modelo 1993 y la adquisición de modelos nuevos se debe tener en cuenta el valor comercial de los vehículos para la venta, el costo de la reparación de motor que se debe realizar para poner a la venta el vehículo y el valor de adquisición de un nuevo vehículo, los cuales se presentan en la Tabla 19.

**Tabla 19. Inversión para adquisición de un nuevo vehículo**

Concepto	Valor *
Valor residual vehículo modelo 1993	\$ 124.200.000
Valor reparación motor	(\$ 30.000.000)
Valor adquisición nuevo vehículo	(\$ 250.000.000)
<b>Total</b>	<b>(\$ 155.800.000)</b>

\* Valores en pesos colombianos (\$)

De acuerdo con estos valores, se pretende vender 18 vehículos modelo 1993 y reemplazarlos por 9 vehículos nuevos (se pueden adquirir 9 vehículos menos gracias a la optimización en el uso de los recursos generado con la programación a través de la heurística). La inversión total asciende a \$2.250.000.000, tal como se muestra en la Tabla 20:

**Tabla 20. Inversión total para la renovación de la flota de Botelleros**

Concepto	Valor *	Cantidad	Valor Total *
Valor comercial vehículo modelo 1993	\$ 124.200.000	18	\$ 2.235.600.000
Valor reparación motor	(\$ 30.000.000)	18	(\$ 540.000.000)
Valor adquisición nuevo vehículo	(\$ 250.000.000)	9	(\$ 2.250.000.000)
<b>Total</b>	<b>(\$ 155.800.000)</b>	<b>(9)</b>	<b>(\$ 554.400.000)</b>

\* Valores en pesos colombianos (\$)

Los ahorros generados con la adquisición de un vehículo nuevo son:

**Tabla 21. Diferencia entre gastos operativos vehículo modelo 1993 y modelo 2008**

Concepto	Modelo		Diferencia
	1993*	2008*	
Promedio \$ / km Combustibles	\$ 705,87	\$ 753,89	(\$ 48,02)
Promedio \$ / km Llantas	\$ 117,93	\$ 52,63	\$ 65,30
Promedio \$ / km Filtros y Lubricantes	\$ 22,43	\$ 19,34	\$ 3,08
Promedio \$ / km Otros Gastos, Seguros e Impuestos	\$ 93,48	\$ 129,23	(\$ 35,74)
Promedio \$ / km Gastos de Mantenimiento y Reparación	\$ 246,21	\$ 61,25	\$ 184,96
<b>Promedio \$ / km de Gastos Operativos</b>	<b>\$ 1.185,93</b>	<b>\$ 1.016,35</b>	<b>\$ 169,58</b>

\* Valores en pesos colombianos (\$)

Vemos que los gastos en combustible, seguros e impuestos son mayores para el vehículo de modelo más reciente, sin embargo, los gastos de mantenimiento y reparación son notablemente menores, lo cual hace que la inversión en un vehículo nuevo permita generar un ahorro promedio de \$169,58 por kilómetro.

De acuerdo con este ahorro y con el monto inicial de la inversión, se deben recorrer 3.269.238 kilómetros para recuperar la inversión, lo que equivale a 363.248 kilómetros por

cada vehículo nuevo. Según el promedio de kilómetros que recorre un vehículo en cada uno de los nodos, el tiempo estimado de recuperación de la inversión para cada recurso sería:

**Tabla 22. Tiempo de recuperación de la inversión**

Nodo	Promedio kilómetros mensuales por nodo	Promedio kilómetros mensuales por recurso	Tiempo de recuperación de la inversión (meses)	Tiempo de recuperación de la inversión (años)
Barranquilla	218.951	13.684,44	26,5	2,2
Bogotá	166.246	9.235,91	39,3	3,3
Bucaramanga	90.969	8.269,88	43,9	3,7
Cali	110.511	12.278,96	29,6	2,5

El tiempo estimado de recuperación de la inversión es alto (más de dos años), pero si consideramos que la vida útil de un tracto camión como los utilizados en el frente de Botelleros es en promedio de 10 años (cuando el vehículo alcanza un kilometraje igual a 1.000.000), el tiempo de recuperación de la inversión es aceptable, y consideramos viable la propuesta de renovación de la flota de Botelleros.

### 5.3. Análisis de sensibilidad

La naturaleza del algoritmo heurístico y su diseño, permiten ejecutarlo cuantas veces sea necesario, en períodos cortos de tiempo (no superior a 30 minutos) y para los días necesarios. En la ventana inicial de la heurística, se pregunta qué días se desean programar y sobre la solución inicial de la semana (que debe ejecutarse previamente), se busca una nueva solución que incluya los cambios en los viajes realizados hasta el día anterior por el cliente.

Debido a estas características de la heurística, pierde significado la realización de un análisis de sensibilidad, porque en este caso es viable generar nuevamente la solución completa: se pueden realizar modificaciones rápidas a la programación de rutas y la asignación de vehículos preliminar, de acuerdo con los cambios efectuados por el cliente a sus reportes de requerimientos mensuales de servicio.



## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones

- Dada la problemática actual de la línea de Botelleros de Coltanques, se hizo necesario revisar las oportunidades de mejora que tiene la operación, para reducir los costos y poder responder rápidamente a las variaciones en los requerimientos de servicio por parte de los clientes, optimizando los recursos de la empresa y mejorando el servicio a los clientes.

En un principio, se pretendió solucionar el problema a través de la formulación de un modelo matemático; sin embargo, debimos enfrentarnos a la imposibilidad de adaptarlo a un modelo ya existente, la carencia de un software que admitiera un problema de ese tamaño, incertidumbre en el posible tiempo de solución del problema y dificultad en el modelamiento de algunas de las restricciones; razones por las cuales, se decidió buscar un método heurístico para solucionarlo, que resultó ser mucho más eficiente y práctico.

- A partir de la experiencia derivada del desarrollo, en el presente trabajo, de una solución de optimización para un problema de ruteo, se ratifica la tendencia mundial actual de desarrollar y aplicar heurísticas para la solución de problemas de gran tamaño. Las técnicas heurísticas, son muy usadas en la actualidad, pues a pesar de que con los métodos heurísticos sólo se obtienen soluciones satisfactorias y casi nunca la solución óptima, los mismos son muy efectivos para problemas de gran tamaño y complejidad, si son escogidas convenientemente, de acuerdo al tipo de problema.

Las heurísticas permiten sortear los problemas del mundo real, que son demasiado complejos para ser tratados a través de modelos matemáticos, porque pueden tardar días en ser resueltos usando los mejores solvers disponibles (en caso que se disponga de ellos), las soluciones resultantes pueden estar drásticamente lejos del óptimo o incluso dejar de satisfacer los requisitos de factibilidad porque generalmente contienen no linealidades, relaciones combinatorias e incertidumbres que no se pueden modelar de manera efectiva. En estos casos, la formulación de heurísticas se convierte en una herramienta muy valiosa.

- La formulación del modelo matemático para el problema de la línea de Botelleros de Coltanques resultó no ser viable para solucionarlo; sin embargo, permitió entender y estructurar el problema, definiendo claramente el objetivo que se pretendía (aumentar la ocupación de los camiones), estableciendo las variables de decisión (ocupación de los recursos e inicio de los viajes) y los parámetros que deben alimentar el modelo. Esta definición facilitó el desarrollo de la heurística, porque al tener una definición formal del problema, se pudo diseñar de manera metódica el algoritmo, dando respuesta al mismo objetivo y variables planteadas inicialmente para el modelo matemático.

- Al analizar las soluciones obtenidas a través del aplicativo en Excel que ejecuta el algoritmo heurístico, se verifica que esta alternativa permite mejorar la programación actual de los viajes de la línea de Botelleros y mejorar su eficiencia por medio de:
  - Aumento del porcentaje de utilización de los recursos. Al realizar la programación a través de la heurística, se requieren nueve recursos menos lo que permite aumentar la ocupación de los vehículos en porcentajes entre el 7 y el 9%, haciendo un mejor uso de ellos.
  - Reducción de los gastos operativos, a través de la asignación de los recursos con menores costos promedio por kilómetro a las rutas más largas. El ahorro en tres meses para los cuales se generaron soluciones con la heurística, ascienden a \$253.003.760, equivalentes a un 9,92% del total de gastos operativos.
  - La utilización de un menor número de recursos permite diseñar un programa de renovación de la flota de Botelleros, cuya inversión inicial se recupera con base en los ahorros generados en gastos de mantenimiento, en un tiempo promedio de 2,9 años, tiempo razonable si se considerada la vida útil de un vehículo de este tipo.
- La aplicación de un algoritmo heurístico para elaborar la programación de viajes de la línea de Botelleros, responde a los principales intereses que promovieron su desarrollo: agilizar el proceso de programación permitiendo cambios rápidos en ella, para responder a las variaciones en los requerimientos de servicio; reducción de los costos de la línea y mejora en el servicio al cliente, al garantizarse el cumplimiento de las restricciones del problema.

## **6.2. Recomendaciones**

- Implementar el algoritmo heurístico diseñado para la programación de los viajes de la línea Botelleros, dados los beneficios que proporciona y el mejoramiento de la operación que genera; manteniendo un cuidadoso análisis sobre los costos operativos de cada uno de los recursos y procurando un uso equilibrado de los mismos.
- Un factor complementario a la mejora que proporciona la implementación de la heurística para la programación de los viajes, es el desarrollo de una buena relación cliente – proveedor, que comprometa al cliente en el mejoramiento de los tiempos de operación que son su responsabilidad (cargue y descargue); ya que las variaciones en estos tiempos proporcionan también grandes retrasos en la programación previamente diseñada.
- Promover el buen manejo y cuidado de los recursos por parte de los conductores, y programar mantenimientos preventivos periódicos que reduzcan los retrasos por mantenimientos correctivos no programados y reparaciones de emergencia a los vehículos, que faciliten el mantener controlados los gastos por este concepto. Además,

incluir los mantenimientos preventivos dentro de la programación de viajes para evitar la sustitución de los vehículos que se encuentran en mantenimiento.

- Diseñar y aplicar programas de renovación de la flota de Botelleros para aumentar la eficiencia de la línea y recuperar la inversión a partir de la reducción en costos que proporciona la utilización de modelos más recientes de vehículos.
- Para futuros trabajos de investigación, pensar en el diseño y aplicación de una metaheurística (meta significa “más allá” o “a un nivel superior”) al mismo problema de la línea de Botelleros, para mejorar la calidad de la solución. Las metaheurísticas se sitúan conceptualmente “por encima” de las heurísticas en el sentido que guían el diseño de éstas y pueden estar compuestas por una combinación de algunas heurísticas para encontrar una mejor solución; son estrategias inteligentes para diseñar o mejorar procedimientos heurísticos muy generales con un alto rendimiento.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- AARDAL, K. *Handbooks in Operations Research and Management Science: Discrete Optimization*. Volume 12. Amsterdam; Boston, Massachusetts: Elsevier, 2005.
- BALLOU, R. *Logística: Administración de la Cadena de Suministro*. Quinta Edición. México: Pearson Education, 2004.
- CORMEN, T., LEISERSON, C. Y RIVEST, R., *Introduction to algorithms*. Cambridge: MIT Press, 1999.
- DÍAZ, A., y GLOVER, F. *Optimización Heurística y Redes Neuronales*. Madrid: Editorial Paraninfo, 1996.
- GARCIA, O. *Administración Financiera, Fundamentos y Aplicaciones*. 3ª Edición, Cali: Prensa Moderna Impresores, 1999.
- GLOVER, F y KOCHENBERGER, G. *Handbook of Metaheuristics*. Boston, Massachusett; London: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- HILLIER, F y LIEBERMAN, G. *Investigación de Operaciones*. Séptima Edición. México: McGraw Hill, 2002.
- HILLIER, F y LIEBERMAN, G. *Introducción a la investigación de operaciones*. Octava Edición. México: McGraw Hill, 2006.
- JAIN, A y MEERAN, S. *Deterministic job-shop scheduling: Past, present and future*. Department of Applied Physics and Electronic and Mechanical Engineering, University of Dundee, Dundee, Scotland: Elsevier, 1997.
- KENDALL, K y KENDALL, J. *Análisis y Diseño de Sistemas*. Sexta Edición. México: Prentice Hall, 2005.
- LENSTRA, J. y RINNOOY KAN, A. *Complexity of vehicle routing and scheduling problems*. Networks 11, 1981, 221 – 227 p.
- ORTEGA, R. *Análisis de alternativas financieras sobre el parque automotor que labora en los principales clientes de la empresa COLTANQUES LTDA. y sugerir alternativas financieras para definir futuros negocios*. Medellín. Monografía (Especialista en Ingeniería Financiera). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.
- OSMAN, I y KELLY, J. *Meta-Heuristics: Theory and Applications*. Boston, USA: Editorial Kluwer Academic, 1996.
- SAVELSBERGH, M.W.P. *Local search for routings problems with time windows*. Annals of Operations Research 4, 1985, 285- 305 p.

- SIMCHI-LEVI, D. *The logic of Logistics: Theory, Algorithms, and Applications for Logistics and Supply Chain Management*. Second Edition. New York: Springer Series in Operations Research, 2005.
- ALEGRE, J., CASADO, S., DELGADO, C. y PACHECO, J., *Análisis de un problema logístico a varios niveles en la industria del automóvil. Diseño de soluciones aproximadas*, [documento en línea]. Departamento Economía Aplicada, Universidad de Burgos, España, 2002, [citado 09-12-2009]. Disponible en Internet: <http://www.uv.es/asepuma/X/E51C.pdf>
- APRIL, J., GLOVER, F., KELLY, J. Y LAGUNA, M. *Simulation/Optimization using "Real-World" Applications*, [documento en línea]. Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference, Estados Unidos, 2001, [citado 29-09-2009]. Disponible en Internet: <http://www.informs-cs.org/wsc01papers/016.PDF>
- ARIAS, L., *El rezago vial colombiano*, [página web en línea]. Tratado de Libre Comercio Andino – EEUU, Colombia, Octubre 15 de 2004, [citado 21-03-2008]. Disponible en Internet: <http://www.tlc.gov.co/eContent/NewsDetail.asp?ID=3448&IDCompany=26>
- AZUARA, M., *El problema de los 45 millones de dólares*, [documento en línea]. Estudiante de Matemáticas Aplicadas del ITAM, [citado 09-12-2009]. Disponible en Internet: <http://laberintos.itam.mx/files/275.pdf>
- BARRERA, M., *Recuperación y reciclaje de envases en la Industria cervecera*, [página web en línea]. Énfasis Logística Online, México, 2006, [citado 09-12-2009]. Disponible en Internet: <http://www.logistica.enfasis.com/notas/3840-recuperacion-y-reciclaje-envases-la-industria-cervecera>
- BELÉN, M., MORENO, J. y MORENO, M., *"Metaheurísticas: una visión global"*, [documento en línea]. Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, España, 2003, [citado 29-09-2009]. Disponible en Internet: <http://www.aepia.org/>
- BRANDÃO, H. y VASCONCELOS, G., *A hybrid search method for the vehicle routing problem with time windows*, [documento en línea]. Springer, 2008, [citado 29-09-2009]. Disponible en Internet: <http://www.springerlink.com/content/f863257kn036x1rp/fulltext.pdf>
- COLTANQUES Ltda. *Gestión Integral de la Carga*, [página web en línea]. Colombia, 2005, [citado 21-03-2008]. Disponible en Internet: <http://www.coltanques.com.co/Gic/Gestion%20integral.htm>
- *Complejidad computacional*, [página web en línea]. Wikipedia, [citado 17-09-2009]. Disponible en Internet: [http://es.wikipedia.org/wiki/Complejidad\\_computacional](http://es.wikipedia.org/wiki/Complejidad_computacional)

- *Definiciones y categorías de vehículo*, [página web en línea]. AUTOCity.com, [citado 24-09-2009]. Disponible en Internet: [http://motos.autocity.es/tramites\\_dgt/legislacion/reglamento\\_vehiculos/anexo2.html](http://motos.autocity.es/tramites_dgt/legislacion/reglamento_vehiculos/anexo2.html)
- DREZEWSKI, R., DRONKA, L. y KOZLAK, J., *Co-operative Co-evolutionary System for Solving Dynamic VRPTW Problems with Crisis Situations*, [documento en línea]. Department of Computer Science AGH University of Science and Technology, Cracovia, Polonia, 2007, [citado 09-12-2009]. Disponible en Internet: <http://www.springerlink.com/content/a55375t22mm83276/fulltext.pdf?page=1>
- GÓMEZ, H., *Mejorando la Competitividad en Colombia*, [boletín en línea]. Consejo Privado de Competitividad, Bogotá, Colombia, junio 11 de 2008, [citado 17-09-2009]. Disponible en Internet: <http://www.compitemw.com/spccompitemw/resources/getresource.aspx?ID=313>
- GUTIERREZ, V., PALACIO, J. y VILLEGAS, J., *Reseña del software disponible en Colombia para el diseño de rutas de distribución y servicios*, [documento en línea]. Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2007, [citado 09-12-2009]. Disponible en Internet: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/215/21514507.pdf>
- HERNÁNDEZ, S., *El TLC: ¿A lomo de mula?*, [página web en línea]. Opinet, Colombia, Mayo 15 de 2006, [citado 21-03-2008]. Disponible en Internet: [http://www.opinet.net/index.php?option=com\\_frontpage&Itemid=1](http://www.opinet.net/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1)
- IGNIZIO, J., WYSKIDA, R., y WILHELM, M., *A rationale for heuristic program selection and evaluation*, [documento en línea]. Universidad de Alabama, Estados Unidos, 1973, [citado 29-09-2009]. Disponible en Internet: <http://delivery.acm.org/10.1145/1070000/1061402/p4-ignizio.pdf?key1=1061402&key2=0490934521&coll=portal&dl=ACM&CFID=15151515&CFTOKEN=6184618>
- *Informe Nacional de Competitividad 2008-2009*, [boletín en línea]. Consejo Privado de Competitividad, Bogotá, Colombia, Octubre de 2008, [citado 17-09-2009]. Disponible en Internet: <http://www.compitemw.com/spccompitemw/resources/getresource.aspx?ID=352>
- *LINGO 11.0 - Optimization Modeling Software for Linear, Nonlinear, and Integer Programming*, [página web en línea]. LINDO SYSTEMS, [citado 23-09-2009]. Disponible en Internet: [http://www.lindo.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2&Itemid=10](http://www.lindo.com/index.php?option=com_content&view=article&id=2&Itemid=10)
- MARTÍ, R., *Algoritmos Heurísticos en Optimización Combinatoria*, [documento en línea]. Universidad de Valencia, Facultad de Matemáticas, Departamento de Estadística e Investigación de Operaciones, España, 2004, [citado 29-09-2009]. Disponible en Internet: <http://yalma.fime.uanl.mx/~roger/work/teaching/mecbs5122/1-Introduction/Intro-by-Rafa%20Marti.pdf>

- MARTÍ, R., *Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria*, [documento en línea]. Universidad de Valencia, Facultad de Matemáticas, Departamento de Estadística e Investigación de Operaciones, España, 2001, [citado 29-09-2009]. Disponible en Internet: <http://www.uv.es/~rmarti/paper/docs/heur1.pdf>
  
- MINISTERIO DE TRANSPORTE, *Anuario Estadístico 2007*, [boletín en línea]. Colombia, Diciembre 9 de 2007, [citado 02-04-2008]. Disponible en Internet: <http://www.mintransporte.gov.co/Servicios/Estadisticas/home.htm>
  
- MINISTERIO DE TRANSPORTE, *Caracterización del Transporte en Colombia: Diagnóstico y Proyectos de Transporte e Infraestructura*, [documento en línea]. Colombia, Febrero de 2005, [citado 02-04-2008]. Disponible en Internet: <http://www.intelexport.com.co/VBeContent/library/documents/DocNewsNo6265DocumentNo5245.PDF>
  
- MINISTERIO DE TRANSPORTE, *Resolución 4626 de 2006*, [página web en línea]. Bogotá, Colombia. Octubre 13 de 2006, [citado 18-07-2009]. Disponible en Internet: [http://www.avancejuridico.com/actualidad/documentosoficiales/2006/46420/r\\_mt\\_4626\\_2006.html](http://www.avancejuridico.com/actualidad/documentosoficiales/2006/46420/r_mt_4626_2006.html)
  
- OLIVERA, A. *Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos*, [documento en línea]. Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, Agosto 2004, [citado 17-09-2009]. Disponible en Internet: <http://www.fing.edu.uy/inco/pedeciba/bibliote/reptec/TR0408.pdf>
  
- OPTI-TIME. *TourSolver*, [página web en línea]. [Citado 09-12-2009]. Disponible en Internet: [http://www.opti-time.com/es/organizacion\\_rutas/index.asp](http://www.opti-time.com/es/organizacion_rutas/index.asp)
  
- RIOJAS, A., *Búsqueda Tabú: Conceptos, algoritmo y aplicación al problema de las N-reinas*, [documento en línea], Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad Ciencias Matemáticas, E.A.P. de Investigación operativa, Lima, Perú, 2005, [citado 17-09-2009]. Disponible en Internet: [http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtual/monografias/Basic/riojas\\_ca/contenido.htm](http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtual/monografias/Basic/riojas_ca/contenido.htm)
  
- SCHRAGE, L., *Optimization Modeling with LINGO*, [documento en línea]. LINGO Documentation, Abril 29 de 2008, [citado 22-06-2009]. Disponible en Internet: [http://www.lindo.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=38&Itemid=24](http://www.lindo.com/index.php?option=com_content&view=article&id=38&Itemid=24)
  
- SKU Logistics. *Transporte: Routing & Scheduling*, [página web en línea]. [Citado 09-12-2009]. Disponible en Internet: <http://www.skulogistics.com/transporte.php>
  
- YEPES, V y MEDINA, J., *Optimización del problema generalizado de las rutas con restricciones temporales y de capacidad (CVRPSTW)*, [documento en línea]. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes, España, 2000, [citado 29-09-2009]. Disponible en Internet: <http://personales.upv.es/vyepesp/00YMX13.pdf>

## 8. ANEXOS

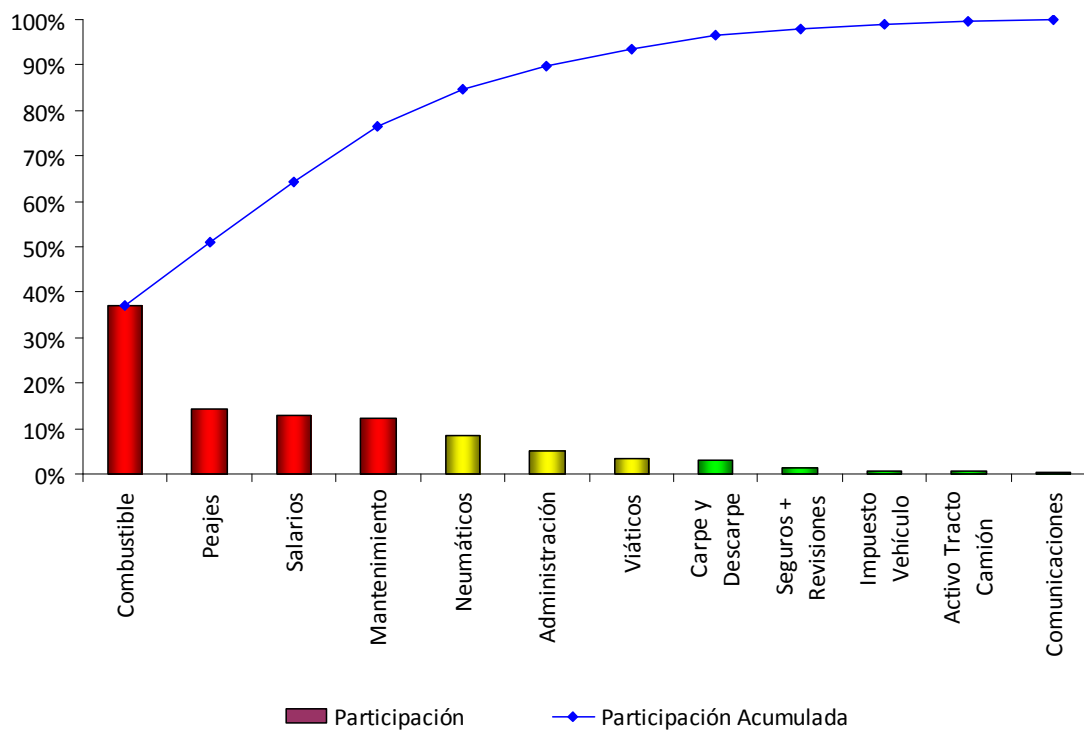
### Anexo 1: Resumen gastos operativos línea Botelleros

Tabla 23. Resumen de gastos en la línea Botelleros (Datos en Pesos)

Concepto	Costo mensual promedio *	Participación	Pareto	Tipo
Combustible	\$ 594.783.605	37,0%	37,0%	A
Peajes	\$ 227.105.336	14,1%	51,2%	A
Salarios	\$ 210.184.608	13,1%	64,3%	A
Mantenimiento	\$ 194.389.856	12,1%	76,4%	A
Neumáticos	\$ 134.134.558	8,4%	84,7%	B
Administración	\$ 82.457.586	5,1%	89,9%	B
Viáticos	\$ 56.578.472	3,5%	93,4%	B
Carpe y Descarpe	\$ 49.986.993	3,1%	96,5%	C
Seguros + Revisiones	\$ 24.248.975	1,5%	98,0%	C
Impuesto Vehículo	\$ 13.635.528	0,8%	98,9%	C
Activo Tracto Camión	\$ 12.655.404	0,8%	99,6%	C
Comunicaciones	\$ 5.858.385	0,4%	100,0%	C
<b>Total</b>	<b>\$ 1.606.019.307</b>	<b>100,0%</b>		

\* Valores en pesos colombianos (\$)

Gráfica 9. Resumen de gastos en la línea Botelleros





## Anexo 2: Características de los Tracto camiones y Botelleros

Tabla 24. Antigüedad Botelleros

Modelo	Nodo				Total	Porcentaje	Pareto	Tipo
	Barranquilla	Bogotá	Bucaramanga	Cali				
2007	1	12		6	19	18,6%	63,7%	A
2006	7	9	3	5	24	23,5%	23,5%	A
2005	8	9	5		22	21,6%	45,1%	A
1998			4		4	3,9%	93,1%	B
1997	1	4	1	2	8	7,8%	82,4%	B
1996	2	3	1	1	7	6,9%	89,2%	B
1994			1	3	4	3,9%	97,1%	B
1993	9		1	1	11	10,8%	74,5%	A
1992			1		1	1,0%	98,0%	C
1991			1		1	1,0%	99,0%	C
1989				1	1	1,0%	100,0%	C
<b>Total</b>	<b>28</b>	<b>37</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>102</b>	<b>100,0%</b>		

Tabla 25. Capacidad Botelleros

N° Estibas	Nodo				Total	Porcentaje	Pareto	Tipo
	Barranquilla	Bogotá	Bucaramanga	Cali				
40	16	29		11	56	54,9%	54,9%	A
36	11		9	4	24	23,5%	78,4%	A
30		4		4	8	7,8%	86,3%	B
34			7		7	6,9%	93,1%	B
32	1	3	2		6	5,9%	99,0%	C
20		1			1	1,0%	100,0%	B
<b>Total</b>	<b>28</b>	<b>37</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>102</b>	<b>100,0%</b>		

Tabla 26. Antigüedad Tracto camiones

Modelo	Nodo				Total	Porcentaje	Pareto	Tipo
	Barranquilla	Bogotá	Bucaramanga	Cali				
2007	12	1		1	14	12,3%	86,8%	B
2005	9	1	11	1	22	19,3%	40,4%	A
2004	5	1	1	4	11	9,6%	96,5%	B
2003		1		2	3	2,6%	99,1%	C
1997	4	7		13	24	21,1%	21,1%	A
1995		20			20	17,5%	57,9%	A
1993	19				19	16,7%	74,6%	A
1988		1			1	0,9%	100,0%	C
<b>Total</b>	<b>49</b>	<b>32</b>	<b>12</b>	<b>21</b>	<b>114</b>	<b>100,0%</b>		

**Tabla 27. Gastos Tractocamiones según modelo**

Modelo	1988	1993	1995	1997	2003	2004	2005	2007	Promedio
\$/Km Gastos de Combustibles *	510,9	705,9	957,4	833,5	814,7	803,8	840,1	753,9	819,3
	829,2				806,5				
\$/Km Gastos de Mantenimiento y Reparación *	416,5	246,2	440,6	422,8	198,0	190,3	179,1	61,2	276,1
	375,1				148,9				

\* Valores en pesos colombianos (\$)

### Anexo 3: Restricciones de circulación

#### Resolución 4626 del 13 de octubre de 2006

Se prohíbe el tránsito de los vehículos de carga con capacidad de tres y media (3,5) toneladas o más, en los siguientes horarios:

1. Domingos (que no hacen parte de puentes festivos o temporada alta vacacional): Desde las 12:00 a las 22:00 horas.
2. Puentes festivos: El primer día del puente desde las 8:00 a las 18:00 horas y el último día de este desde las 12:00 a las 22:00 horas.
3. Temporada de Semana Santa: el día sábado anterior al domingo de ramos, el miércoles y el jueves santo desde las 12:00 hasta las 22:00 horas; el día domingo de ramos desde las 12:00 hasta las 22:00 horas; y el día domingo de resurrección desde las 8:00 hasta las 22:00 horas.
4. Temporada vacacional de navidad y año nuevo: los días 24, 25, 26 y 31 de diciembre desde las 10:00 hasta las 22:00 horas; el 1° y 2 de enero desde las 10:00 hasta las 22:00 horas. El puente festivo de reyes la restricción se aplicará así: el día sábado desde las 10:00 hasta las 20:00 horas, el día domingo desde las 10:00 hasta las 24:00 horas y el día lunes festivo desde las 8:00 hasta las 24:00 horas.

Las vías en las cuales aplica restricción de circulación según la resolución 4626 del 13 de octubre de 2006 son:

1. Bogotá-La Vega-Villeta (por la calle 80)
2. Bogotá-Villavicencio-Granada
3. Briceño-Zipacquirá-Chiquinquirá-Barbosa-San Gil-Bucaramanga-Pamplona-Cúcuta
4. Bogotá-Chocontá-Tunja-Barbosa
5. Bogotá-Chusacá-Fusagasugá-Girardot-Espinal-Ibagué-Armenia
6. Chusacá-Alto de San Miguel-Fusagasugá
7. Mosquera-La Mesa-Girardot
8. Barranquilla-Puerto Colombia-Cartagena (vía al Mar)
9. Cali-Santander de Quilichao-Popayán
10. Hatillo-Barbosa (Antioquia)
11. Tunja-Duitama-Sogamoso

### Anexo 4. Datos operativos Plantas embotelladoras y Centros de Distribución

Tabla 28. Datos operativos Plantas embotelladoras y Centros de Distribución

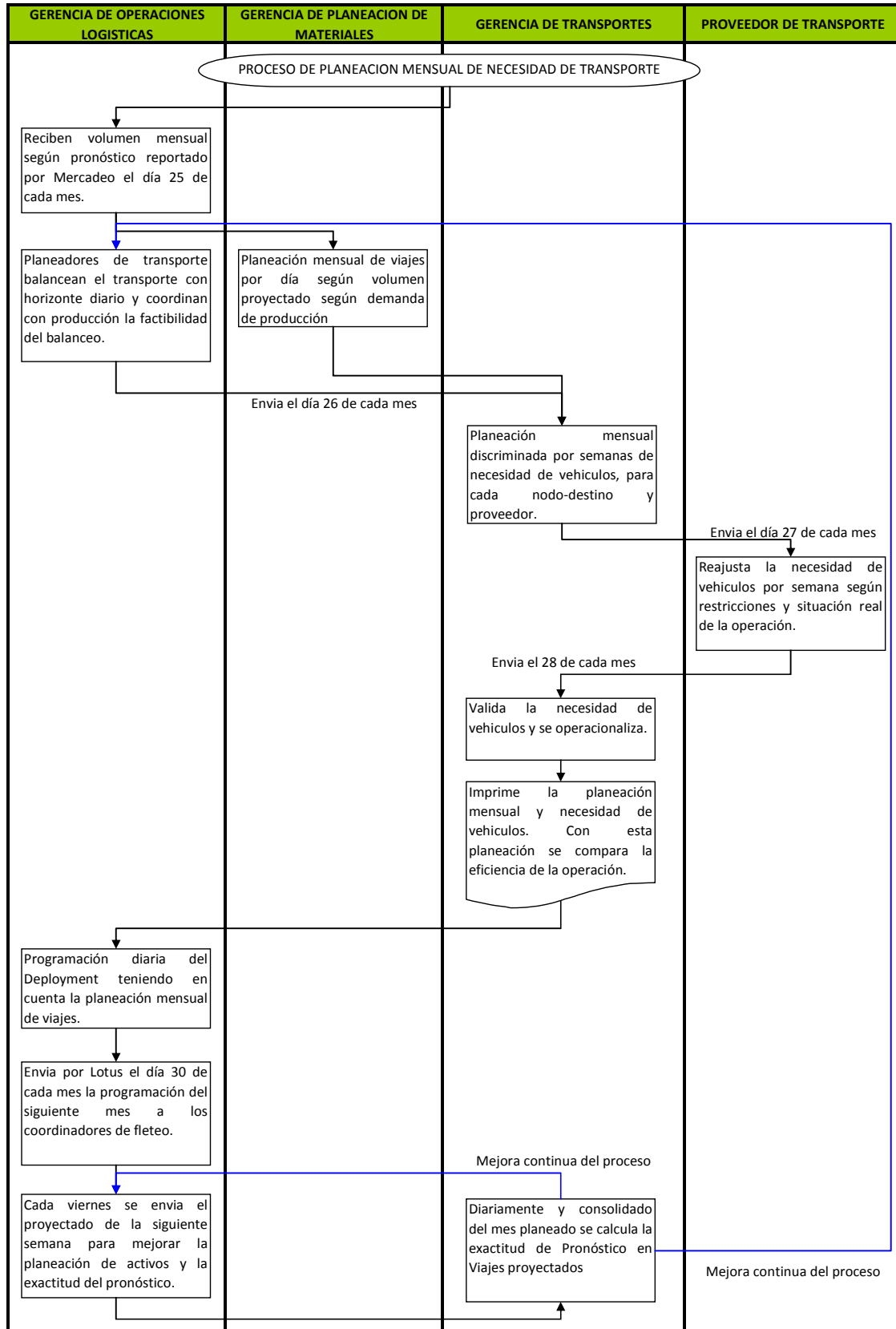
Centro de Distribución	Apertura Ventana	Cierre Ingreso Ventana	Cierre Ventana	Kilómetros Ciclo	Tiempo Cargue	Tiempo Descargue	Tiempo Ida	Tiempo Retorno	Tiempo Ciclo	Flete
<b>NODO BARRANQUILLA</b>										
Cartagena *	06:00	22:00	23:00	290	1,15	1,00	3,00	2,50	7,65	\$ 682.950
Corozal	08:00	18:00	19:00	427	1,15	2,00	6,00	5,50	14,65	\$ 1.109.346
Montería	09:00	21:00	22:00	700	1,15	1,50	8,00	7,50	18,15	\$ 1.780.100
Santa Marta *	06:00	20:00	21:00	200	1,15	0,75	2,00	1,50	5,40	\$ 474.600
Valledupar *	07:00	19:00	20:00	630	1,15	1,00	6,00	5,50	13,65	\$ 1.648.080
<b>NODO BUCARAMANGA</b>										
Aguachica *	07:00	17:00	18:00	364	0,83	0,75	6,00	5,50	13,08	\$ 1.100.656
Barrancabermeja *	07:00	18:00	19:00	224	0,83	0,75	5,00	4,50	11,08	\$ 734.727
Cúcuta *	06:00	18:00	20:00	485	0,83	1,50	10,00	9,50	21,83	\$ 1.441.677
San Gil	07:00	15:00	18:00	220	0,83	2,00	5,50	5,00	13,33	\$ 744.158
<b>NODO CALI</b>										
Armenia *	07:00	18:00	19:00	390	0,70	0,50	5,00	4,50	10,70	\$ 1.037.696
Buenaventura *	07:00	16:00	17:00	360	0,70	0,75	6,00	5,50	12,95	\$ 932.468
Buga *	07:00	16:00	17:00	170	0,70	0,75	2,50	2,00	5,95	\$ 456.262
Manizales *	16:00	00:00	01:00	568	0,70	0,75	7,00	6,50	14,95	\$ 1.488.312
Pasto	07:00	18:00	19:00	820	0,70	3,00	12,00	11,50	27,20	\$ 2.040.143
Pereira *	17:00	05:00	06:00	468	0,70	0,75	5,50	5,00	11,95	\$ 1.253.355
Popayán	07:00	17:00	18:00	255	0,70	2,00	3,50	3,00	9,20	\$ 678.494

\* Botelleros disponibles de Enganche y Desenganche. Esto se ve reflejado en menores tiempos de atención para descarga.

Centro de Distribución	Apertura Ventana	Cierre Ingreso Ventana	Cierre Ventana	Kilómetros Ciclo	Tiempo Cargue	Tiempo Descargue	Tiempo Ida	Tiempo Retorno	Tiempo Ciclo	Flete
<b>NODO BOGOTÁ</b>										
Barbosa	07:00	16:00	17:00	372	1,50	2,50	6,00	5,50	15,50	\$ 1.104.096
Bogotá Sur *	05:00	18:00	19:00	36	1,50	0,50	0,75	0,75	3,50	\$ 115.920
Chiquinquirá	07:00	15:00	16:00	292	1,50	1,55	4,00	4,00	11,05	\$ 885.928
Duitama *	07:00	22:00	23:00	400	1,50	0,75	5,00	4,50	11,75	\$ 1.187.200
Fusagasugá	07:00	13:00	14:00	156	1,50	2,00	2,50	2,50	8,50	\$ 504.192
Girardot	07:00	15:00	16:00	274	1,50	1,90	4,00	4,00	11,40	\$ 788.800
Granada	07:00	15:00	16:00	462	1,50	1,75	6,00	5,50	14,75	\$ 1.646.106
Ibagué *	07:00	18:00	19:00	426	1,50	1,00	5,50	5,50	13,50	\$ 1.192.800
La Dorada	07:00	16:00	17:00	326	1,50	1,85	7,00	6,50	16,85	\$ 1.036.680
Neiva	07:00	15:00	16:00	652	1,50	2,25	7,50	7,50	18,75	\$ 1.785.176
Tunja	07:00	13:00	14:00	240	1,50	1,75	4,00	4,00	11,25	\$ 712.320
Villavicencio *	07:00	12:00	13:00	270	1,50	0,85	4,00	3,50	9,85	\$ 1.011.690
Villeta	07:00	15:00	16:00	195	2,00	2,50	3,00	3,00	10,50	\$ 612.584
Zipaquirá *	22:00	05:00	06:00	99	1,50	0,25	1,50	1,50	4,75	\$ 300.366

\* Botelleros disponibles de Enganche y Desenganche. Esto se ve reflejado en menores tiempos de atención para descarga.

### Anexo 5: Proceso Planeación y Ejecución de Transporte



### Anexo 6: Viajes Planeados y Ejecutados en la línea Botelleros (Abril a Junio de 2009)

Tabla 29. Viajes Planeados y Ejecutados en la línea de Botelleros para los meses de Abril, Mayo y Junio de 2009

Nodo	Distribuidora	Planeados				Ejecutados				Diferencia			
		Abril	Mayo	Junio	Total	Abril	Mayo	Junio	Total	Abril	Mayo	Junio	Total
Barranquilla	Cartagena	176	221	198	595	239	198	192	629	136%	90%	97%	106%
	Corozal	47	51	39	137	57	48	44	149	121%	94%	113%	109%
	Montería	98	102	80	280	94	93	78	265	96%	91%	98%	95%
	Santa Marta	96	118	96	310	135	114	109	358	141%	97%	114%	115%
	Valledupar	81	87	74	242	95	79	70	244	117%	91%	95%	101%
<b>Total Barranquilla</b>		<b>498</b>	<b>579</b>	<b>487</b>	<b>1.564</b>	<b>620</b>	<b>532</b>	<b>493</b>	<b>1.645</b>	<b>124%</b>	<b>92%</b>	<b>101%</b>	<b>105%</b>
Bogotá	Barbosa	12	18	14	44	17	15	18	50	142%	83%	129%	114%
	Bogotá Sur	393	499	442	1.334	241	224	198	663	61%	45%	45%	50%
	Chiquinquirá	25	27	26	78	23	17	2	42	92%	63%	8%	54%
	Duitama	74	82	85	241	58	48	51	157	78%	59%	60%	65%
	Fusagasugá	13	16	15	44	13	11	12	36	100%	69%	80%	82%
	Girardot	75	113	86	274	61	54	55	170	81%	48%	64%	62%
	Granada	12	8	11	31	12	12	11	35	100%	150%	100%	113%
	Ibagué	71	105	110	286	60	63	54	177	85%	60%	49%	62%
	La Dorada	65	45	36	146	30	30	33	93	46%	67%	92%	64%
	Neiva	69	110	141	320	42	43	39	124	61%	39%	28%	39%
	Tunja	64	51	46	161	33	30	34	97	52%	59%	74%	60%
	Villavicencio	100	167	165	432	96	93	71	260	96%	56%	43%	60%
	Villeta	19	21	20	60	20	23	15	58	105%	110%	75%	97%
Zipaquirá	75	95	87	257	74	73	70	217	99%	77%	80%	84%	
<b>Total Bogotá</b>		<b>1067</b>	<b>1357</b>	<b>1284</b>	<b>3.708</b>	<b>780</b>	<b>736</b>	<b>663</b>	<b>2.179</b>	<b>73%</b>	<b>54%</b>	<b>52%</b>	<b>59%</b>
Bucaramanga	Aguachica	25	26	23	74	22	22	24	68	88%	85%	104%	92%
	Barrancabermeja	51	47	46	144	46	33	32	111	90%	70%	70%	77%
	Cúcuta	115	184	159	458	132	148	150	430	115%	80%	94%	94%
	San Gil	19	27	25	71	21	22	24	67	111%	81%	96%	94%
<b>Total Bucaramanga</b>		<b>210</b>	<b>284</b>	<b>253</b>	<b>747</b>	<b>221</b>	<b>225</b>	<b>230</b>	<b>676</b>	<b>105%</b>	<b>79%</b>	<b>91%</b>	<b>90%</b>
Cali	Armenia	31	40	30	101	36	33	30	99	116%	83%	100%	98%
	Buenaventura	27	35	26	88	36	32	32	100	133%	91%	123%	114%
	Buga	32	56	47	135	54	57	50	161	169%	102%	106%	119%
	Manizales	36	36	30	102	35	29	32	96	97%	81%	107%	94%
	Pasto	31	45	48	124	32	23	30	85	103%	51%	63%	69%
	Pereira	60	68	73	201	65	66	57	188	108%	97%	78%	94%
	Popayán	21	21	21	63	25	21	22	68	119%	100%	105%	108%
<b>Total Cali</b>		<b>238</b>	<b>301</b>	<b>275</b>	<b>814</b>	<b>283</b>	<b>261</b>	<b>253</b>	<b>797</b>	<b>119%</b>	<b>87%</b>	<b>92%</b>	<b>98%</b>
<b>Total</b>		<b>2.013</b>	<b>2.521</b>	<b>2.299</b>	<b>6.833</b>	<b>1.904</b>	<b>1.754</b>	<b>1.639</b>	<b>5.297</b>	<b>95%</b>	<b>70%</b>	<b>71%</b>	<b>78%</b>

### Anexo 7: Incumplimiento de restricciones en los viajes

Tabla 30. Viajes en los cuales hubo incumplimiento de al menos una restricción para los meses de Abril, Mayo y Junio de 2009

Nodo	Distribuidora	Viajes	Viajes con incumplimiento de restricciones	Porcentaje
Barranquilla	Cartagena	629	26	4,13%
	Corozal	149	13	8,72%
	Montería	265	14	5,28%
	Santa Marta	358	64	17,88%
	Valledupar	244	9	3,69%
<b>Barranquilla Total</b>		<b>1.645</b>	<b>126</b>	<b>7,66%</b>
Bogotá	Barbosa	50	10	20,00%
	Bogotá Sur	663	104	15,69%
	Chiquinquirá	42	16	38,10%
	Duitama	157	16	10,19%
	Fusagasugá	36	27	75,00%
	Girardot	170	147	86,47%
	Granada	35	14	40,00%
	Ibagué	177	107	60,45%
	La Dorada	93	11	11,83%
	Neiva	124	76	61,29%
	Tunja	97	14	14,43%
	Villavicencio	260	47	18,08%
	Villeta	58	24	41,38%
Zipaquirá	217	56	25,81%	
<b>Bogotá Total</b>		<b>2.179</b>	<b>669</b>	<b>30,70%</b>
Bucaramanga	Aguachica	68	21	30,88%
	Barrancabermeja	111	25	22,52%
	Cúcuta	430	46	10,70%
	San Gil	67	31	46,27%
<b>Bucaramanga Total</b>		<b>676</b>	<b>123</b>	<b>18,20%</b>
Cali	Armenia	99	19	19,19%
	Buenaventura	100	28	28,00%
	Buga	161	60	37,27%
	Manizales	96	49	51,04%
	Pasto	85	1	1,18%
	Pereira	188	116	61,70%
Popayán	68	14	20,59%	
<b>Cali Total</b>		<b>797</b>	<b>287</b>	<b>36,01%</b>
<b>Total</b>		<b>5.297</b>	<b>1.205</b>	<b>22,75%</b>

**Tabla 31. Restricciones incumplidas en los viajes de los meses de Abril, Mayo y Junio de 2009**

Nodo	Distribuidora	Ventana de Tiempo	Inventario en Planta	Bosa Soacha Ida	Bosa Soacha Retorno	Carro de valores	Pico y Placa ambiental	Restricción Girardot	Restricción Zipaquirá
Barranquilla	Cartagena	26							
	Corozal	14							
	Montería	13							
	Santa Marta	62							
	Valledupar	11							
	<b>Total</b>	<b>126</b>							
Bogotá	Barbosa	6	3				1		
	Bogotá Sur	14	57			2	35		
	Chiquinquirá	9	4						
	Duitama	7	5				4		
	Fusagasugá	10	2	12	2		1		
	Girardot	31	17	33	27		2	38	
	Granada	12	2						
	Ibagué	18	15	32	36	1	7		
	La Dorada	9	1						
	Neiva	15	5	44	9	1	1		
	Tunja	12	3				1		
	Villavicencio	33	6				4		
	Zipaquirá	22	1				1		
	Zipaquirá	16				24			16
	<b>Total</b>	<b>214</b>	<b>121</b>	<b>121</b>	<b>74</b>	<b>28</b>	<b>57</b>	<b>38</b>	<b>16</b>
Bucaramanga	Aguachica	20							
	Barrancabermeja	21				5			
	Cúcuta	41	1			4			
	San Gil	31							
	<b>Total</b>	<b>113</b>	<b>1</b>			<b>9</b>			
Cali	Armenia	13	4			2			
	Buenaventura	21	6			1			
	Buga	34	16			9			
	Manizales	46	3						
	Pasto	1							
	Pereira	101	4			11			
	Popayán	11	4						
	<b>Total</b>	<b>227</b>	<b>37</b>			<b>23</b>			
<b>Total</b>		<b>680</b>	<b>159</b>	<b>121</b>	<b>74</b>	<b>60</b>	<b>57</b>	<b>38</b>	<b>16</b>
<b>Porcentaje</b>		<b>56,43%</b>	<b>13,20%</b>	<b>10,04%</b>	<b>6,14%</b>	<b>4,98%</b>	<b>4,73%</b>	<b>3,15%</b>	<b>1,33%</b>
<b>Pareto</b>		<b>56,43%</b>	<b>69,63%</b>	<b>79,67%</b>	<b>85,81%</b>	<b>90,79%</b>	<b>95,52%</b>	<b>98,67%</b>	<b>100,00%</b>
<b>Tipo</b>		<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>B</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>C</b>



## Anexo 8: Precios LINGO

Los siguientes valores están expresados en dólares estadounidenses (US\$)

**Tabla 32. Precios y especificaciones versión educativa**

Versión	Base	Opciones			Total
		Lineal	No lineal	Global	
Super	\$245	\$75	\$75	\$75	\$ 320
Hyper	\$495	\$150	\$150	\$150	\$ 645
Industrial	\$795	\$240	\$240	\$240	\$ 1.035
Extended	\$1.195	\$360	\$360	\$360	\$ 1.555

**Tabla 33. Precios y especificaciones versión comercial**

Versión	Base	Opciones			Total
		Lineal	No lineal	Global	
Super	\$495	\$150	\$150	\$150	\$ 645
Hyper	\$995	\$300	\$300	\$300	\$ 1.295
Industrial	\$2.995	\$900	\$900	\$900	\$ 3.895
Extended	\$4.995	\$1.500	\$1.500	\$1.500	\$ 6.495

## Anexo 9: Clases de complejidad

**Tabla 34. Clases de complejidad**

Clase de complejidad	Problemas que pertenecen a la clase	Tipo de solución
P	Corresponde a los problemas cuyos algoritmos de solución son de complejidad en tiempo polinomial.	Tratable
NP	Contiene a los problemas cuya solución hasta la fecha no han podido ser resueltos de manera exacta por medio de algoritmos deterministas, pero que pueden ser resueltos por algoritmos no-deterministas y cuya solución son de complejidad en tiempo polinomial (Su solución puede ser verificada en tiempo polinomial). (La N de no-determinísticos y la P de polinómicos).	Intratable
NP-completo	Estos problemas se caracterizan por ser todos "iguales" en el sentido de que si se descubriera una solución S para alguno de ellos, esta solución sería fácilmente aplicable a todos ellos. Cumplen dos condiciones: 1. es un problema NP y 2. todo problema de NP se puede transformar polinomialmente en él.	Intratable
NP-hard	Un problema que satisface la segunda condición pero no la primera pertenece a la clase NP-hard.	Intratable

## Anexo 10: Modelos matemáticos revisados

### 1. Problema del flujo de costo mínimo <sup>51</sup>

El problema del flujo de costo mínimo tiene una posición central entre los modelos de optimización de redes al abarcar una clase amplia de aplicaciones y generar soluciones muy eficientes. A continuación se describe el problema:

1. La red es una red dirigida y conexa.
2. Al menos uno de los nodos es un nodo fuente.
3. Al menos uno de los nodos es un nodo demanda.
4. El resto de los nodos son nodos trasbordo.
5. Se permite el flujo a través de un arco sólo en la dirección indicada por la flecha, donde la cantidad máxima de flujo está dada por la capacidad del arco (si el flujo puede ocurrir en ambas direcciones, debe representarse por un par de nodos con direcciones opuestas)
6. La red tiene suficientes arcos con suficiente capacidad para permitir que todos los flujos generados por los nodos fuente lleguen a los nodos demanda.
7. El costo del flujo a través del arco es proporcional a la cantidad de ese flujo, donde se conoce el costo por unidad.
8. El objetivo es minimizar el costo total de enviar el suministro disponible a través de la red para satisfacer la demanda dada (un objetivo alternativo es maximizar la ganancia total del envío).

La formulación del modelo es la siguiente:

Considere una red conexa dirigida en la que los  $n$  nodos incluyen al menos un nodo origen y un nodo destino. Las variables de decisión son

$x_{ij}$  = flujo a través del arco  $i \rightarrow j$ ,

y la información dada incluye

$c_{ij}$  = costo por unidad de flujo a través del arco  $i \rightarrow j$ ,

$u_{ij}$  = capacidad del arco  $i \rightarrow j$ ,

$b_i$  = flujo neto generado por el nodo  $i$ .

El valor de  $b_i$  depende de la naturaleza del nodo  $i$ , donde

$b_i > 0$  si  $i$  es un nodo fuente,

$b_i < 0$  si  $i$  es un nodo demanda,

$b_i = 0$  si  $i$  es un nodo trasbordo.

El objetivo es minimizar el costo total de mandar los recursos disponibles a través de la red para satisfacer la demanda.

Si se usa la convención de que las sumas se toman sólo sobre arcos existentes, la formulación de programación lineal de este problema es

---

<sup>51</sup> HILLIER, F y LIEBERMAN, G. Introducción a la Investigación de Operaciones. Octava Edición. México: McGraw Hill, 2006, 396 – 400 p.

$$\min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \times x_{ij}$$

sujeta a

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1}^n x_{ji} = b_i, \text{ para cada nodo } i,$$

y

$$0 \leq x_{ij} \leq u_{ij}, \text{ para cada arco } i \rightarrow j$$

## 2. Problema de ruteo con ventanas de tiempo (VRPTW) <sup>52</sup>

El Problema con Capacidades (VRP: Vehicle Routing Problem) es una extensión del m-TSP (Problema de los m agentes viajeros) en la cual cada cliente  $i \in V \setminus \{0\}$  tiene asociada una demanda  $d_i$  y cada vehículo tiene una capacidad  $C$  (la flota es homogénea). En este problema la cantidad de rutas no es fijada de antemano como en el TSP y en el m-TSP.

En los Problemas con Flota Heterogénea (FSMVRP: Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem) 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,  $q^{k_1} \leq q^{k_2}$  para  $k_1, k_2 \in T, k_1 < k_2$ ).

En la variante del problema, con ventanas de tiempo (VRPTW: Vehicle Routing Problem with Time Window Constraints), además de capacidades, cada cliente  $i \in V \setminus \{0\}$  tiene asociada una ventana de tiempo  $[e_i, l_i]$  que establece un horario de servicio permitido para que un vehículo arribe a él y un tiempo de servicio o demora  $s_i$ . Si  $(i, j)$  es un arco de la solución y  $t_i$  y  $t_j$  son las horas de arribo a los clientes  $i$  y  $j$ , las ventanas de tiempo implican que necesariamente debe cumplirse  $t_i \leq l_i$  y  $t_j \leq l_j$ . Por otro lado, si  $t_i < e_i$ , entonces el vehículo deberá esperar hasta que el cliente "abra" y necesariamente  $t_j = e_i + s_i + t_{ij}$ .

Utilizando los nodos 0 y  $n + 1$  para representar al depósito y el conjunto  $K$  para representar a los vehículos (no a los tipos de vehículos como en el FSMVRP), el problema se formula para una flota de vehículos posiblemente heterogénea, de la siguiente manera (Cordeau, Desaulniers, Desrosiers, Solomon y Soumis, 1999):

$$\min \sum_{(i,j) \in E} c_{ij}^k \times x_{ij}^k \quad (1)$$

sujeto a

---

<sup>52</sup> OLIVERA, A., op. cit., 8 p.

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in \Delta^-(i)} x_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0, n+1\} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in \Delta^+(0)} x_{0j}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ij}^k - \sum_{j \in \Delta^-(i)} x_{ji}^k = 0 \quad \forall k \in K, i \in V \setminus \{0, n+1\} \quad (4)$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{0, n+1\}} \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ij}^k \leq q^k \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$y_j^k - y_i^k \geq s_i + t_{ij}^k - M(1 - x_{ij}^k) \quad \forall i, j \in V \setminus \{0, n+1\}, k \in K \quad (6)$$

$$e_i \leq y_i^k \leq l_i \quad \forall i \in V \setminus \{0, n+1\}, k \in K \quad (7)$$

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

$$y_i^k \geq 0 \quad \forall i \in V \setminus \{0, n+1\}, k \in K$$

Las variables  $x_{ij}^k$  indican si el arco  $(i, j)$  es recorrido por el vehículo  $k$ . Las variables  $y_i^k$  indican la hora de arribo al cliente  $i$  cuando es visitado por el vehículo  $k$  (si el cliente no es visitado por dicho vehículo el valor de la variable no tiene significado). La función objetivo (1) es el costo total de las rutas.

La restricción (2) indica que todos los clientes deben ser visitados. Las restricciones (3) y (4) determinan que cada vehículo  $k \in K$  recorre un camino de 0 a  $n + 1$ . La capacidad de cada vehículo es impuesta en (5). Siendo  $M$  una constante lo suficientemente grande, la restricción (6) asegura que si un vehículo  $k$  viaja de  $i$  a  $j$ , no puede llegar a  $j$  antes que  $y_i + s_i + t_{ij}^k$ , y actúan además como restricciones de eliminación de sub-tours. Finalmente, los límites de las ventanas de tiempo son impuestos en (7).

### 3. Problema Job Shop<sup>53</sup>

Este modelo responde a una situación de mercado caracterizada por la alta diversidad en las necesidades de los consumidores, la rápida variación de la demanda, los cortos ciclos de vida de los productos y la presión de la competencia, que obligan a las empresas a reducir sus costos. Este conflicto demanda eficiencia, efectividad y exactitud en la Programación, la cual está relacionada con la solución de un Constraint Optimisation Problem (COP) y directamente relacionado con el problema que afronta la línea de Botelleros en Coltanques.

El problema determinístico denominado job-shop scheduling problem  $(\Pi_j)$ , en el contexto de la manufactura, implica encontrar una asignación secuencial de los recursos (que son limitados) que permita optimizar la función objetivo.

<sup>53</sup> JAIN, A y MEERAN, S. Deterministic job-shop scheduling: Past, present and future. Department of Applied Physics and Electronic and Mechanical Engineering, University of Dundee, Dundee, Scotland: Elsevier, 1997.

$\Pi_j$  está compuesto por un número conjunto finito  $J$  de  $n$  trabajos  $\{J_i\}_{i=1}^n$  que deben ser procesados en un conjunto finito  $M$  de  $m$  máquinas  $\{M_k\}_{k=1}^m$ . Cada trabajo  $J_i$  debe ser procesado en todas las máquinas, para completar una cadena de complejas operaciones  $O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{im}$ , las cuales tienen que ser programadas en un orden dado predeterminado (restricción de precedencia). Hay  $N$  operaciones en total,  $N = \sum_{i=1}^n m_i$ .  $O_{ik}$  es la operación del trabajo  $J_i$ , el cual tiene que ser procesado en la máquina  $M_k$  por un período de tiempo continuo  $\tau_{ik}$  y ninguna operación puede ser pre-variado.

Cada trabajo tiene su propio patrón de flujo individual a través de las máquinas, el cual es independiente de los otros trabajos. Cada máquina puede procesar un solo trabajo y cada trabajo puede ser procesado por sólo una máquina a la vez (restricción de capacidad). El tiempo en el cual todos los trabajos están completos se denomina *makespan*  $C_{max}$ . El único objetivo es determinar los tiempos de inicio para cada operación,  $t_{ik} \geq 0$ , que minimicen  $C_{max}$  mientras satisfacen todas las restricciones de precedencia y capacidad:

$$C_{max}^* = \min(C_{max}) = \min_{\text{Programación factible}} (\max(t_{ik} + \tau_{ik}): \forall J_i \in J, m_k \in M)$$

Dimensionalmente cada caso de  $\Pi_j$  tiene un tamaño de  $n \times m$ , con un espacio de solución de  $(n!)^m$ , así un problema de  $20 \times 10$  puede tener al menos  $7,2651 \times 10^{183}$  posibles soluciones. Una completa enumeración de todas estas posibilidades para identificar programaciones factibles no es práctico. Debido a esta naturaleza exponencial de  $\Pi_j$  es considerado parte de los problemas tipo NP-hard.

### [Anexo 11: Heurística](#)

En el CD que encuentra adjunto a este documento encontrará:

**Anexo 11.1.** Heurística para el nodo Barranquilla

**Anexo 11.2.** Resultados programación nodo Barranquilla

**Anexo 11.3.** Heurística para el nodo Bogotá

**Anexo 11.4.** Resultados programación nodo Bogotá

**Anexo 11.5.** Heurística para el nodo Bucaramanga

**Anexo 11.6.** Resultados programación nodo Bucaramanga

**Anexo 11.7.** Heurística para el nodo Cali

**Anexo 11.8.** Resultados programación nodo Cali

**Anexo 11.9.** Tutorial de uso

## Anexo 12: Especificaciones técnicas para el correcto uso del algoritmo heurístico

### 1. Especificaciones de hardware

Las especificaciones que se darán a continuación, son los requerimientos mínimos para que el algoritmo heurístico, proporcione soluciones en un tiempo razonable. En cuanto a máquina se debe tener:

- Procesador Pentium 4 o superior.
- Mínimo 1GB en RAM.
- Al menos 20GB de espacio en disco duro.

### 2. Especificaciones de software

Las siguientes especificaciones, son obligatorias para poder ejecutar el algoritmo heurístico:

- Microsoft Excel 2007 o superior.

### 3. Especificaciones del algoritmo heurístico

Este algoritmo heurístico está programado en Visual Basic, para generar soluciones específicamente en Microsoft Excel.

Las interfaces son desarrolladas con formularios, de tal forma que el algoritmo lleve al usuario paso por paso, dando la libertad de editar los datos ingresados o borrarlos. Cada uno de los formularios posee validaciones para que no haya cabida a errores de manejo de software:

- **Validaciones para el formulario “Ingresar Datos”**
  - Se valida que si se selecciona el campo tipo check, “Seleccionar toda la semana”, se seleccionen automáticamente todos los campos para las semanas y además se inhabiliten para evitar generaciones de errores.
  - Si se selecciona un día de la semana el sistema automáticamente seleccionara los días faltantes para ejecutar la semana y además los inhabilitará.
  - Si se selecciona que si hay días festivos, al hacer clic en el botón, “Ingresar datos de viajes”, se abrirá la ventana “Ingresar Restricciones”, caso contrario si se selecciona que no hay días festivos, se abrirá la ventana “Ingresar datos de los viajes”.
  - Al hacer clic sobre el botón “Ir a última solución generada”, se cerrará la ventana de ingreso de datos y se mostrarán los datos guardados en el archivo, en caso de querer ingresar otra vez los datos, el usuario deberá hacer clic sobre el botón “Generar nueva solución”.
  - Al hacer clic sobre el botón “Ingresar datos de viajes”, el sistema validará que se haya seleccionado al menos un día de la semana.
  - Se deshabilita el botón para cerrar la ventana actual.

- **Validaciones para el formulario “Ingresar restricciones”**
  - Solo se habilitarán los campos para los días seleccionados.
  - Para hacer más restrictivo el ingreso de datos y reducir la probabilidad de errores de digitación se usan campos tipo list para seleccionar los datos.
  - El sistema valida que si se selecciona un dato de inicio para un día, se seleccione también para el final y viceversa.
  - Al hacer clic sobre el botón, “Volver al inicio”, se abrirá la ventana “Ingresar Datos” cargando los datos digitados anteriormente.
  - Al hacer clic sobre el botón, “Guardar restricciones”, se abrirá la ventana, “Ingresar datos de los viajes”.
  - Se deshabilita el botón para cerrar la ventana actual.
  
- **Validaciones para el formulario “Ingresar datos de los viajes”**
  - Solo se habilitarán los campos para los días seleccionados.
  - En cada uno de los campos de texto se valida que se puedan ingresar máximo 2 caracteres, además cada vez que se digita en estos campos, el sistema hace una validación por medio de ASCII, para asegurarse que solo se puedan ingresar números.
  - Al hacer clic en el botón, “Volver al inicio”, el sistema abrirá la ventana, “Ingresar datos”, en la cual serán cargados los datos ingresados inicialmente.
  - Al hacer clic en el botón, “Generar Solución”, se comenzará a ejecutar el algoritmo heurístico el cual puede demorarse un tiempo considerable ya que generará 20 soluciones posibles a los viajes ingresados, de las cuales se seleccionara la mejor solución encontrada para mostrarla como solución final.
  - Se deshabilita el botón para cerrar la ventana actual.

#### **4. Consideraciones de uso del algoritmo heurístico**

- Este algoritmo está diseñado para hallar una buena solución para la programación de los viajes ingresados, pero en caso de ingresar una cantidad de viajes muy grande, no se mostrará ninguna solución, y a través de una ventana de aviso, se le indicará al usuario que no hay soluciones factibles y se debe disminuir el número de viajes.
- Ya que este algoritmo toma soluciones anteriormente generadas, para sobre estas generar las nuevas soluciones, siempre después de generada una solución este archivo debe ser guardado y no se debe modificar, para asegurar el éxito del algoritmo al ejecutar semanas posteriores.
- De ninguna forma pueden ser cambiados los datos ocultos del archivo, ya que con cualquier cambio, se pueden generar errores en el algoritmo.
- En caso que se esté generando una solución y no responda el programa, no lo fuerce a cerrarse, ya que es normal que se congele y tarde un tiempo considerable para generar la solución final.







		Semana 7										Semana 8										Semana 9										Semana 10						
S	9	0	8	0	0	3	0	4	1	1	2	3	1	3	1	2	0	0	0	0	0	1	2	1	3	1	0	4	1									
D	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	1	2	0	0	0	0									
L	11	7	2	5	4	4	1	11	1	2	0	2	0	3	1	2	1	4	1	4	1	4	1	4	1	7	1	2	2	3	0							
M	12	9	1	4	6	3	0	9	1	4	0	2	1	4	1	1	1	2	1	3	0	1	5	1	2	1	1	1	2	1	1							
MI	13	8	2	3	4	3	1	10	1	2	1	2	0	3	1	3	1	4	1	4	1	4	1	4	1	1	1	2	1	1	2	2						
J	14	8	2	2	4	3	0	9	0	2	1	3	1	2	1	2	1	4	0	3	0	3	5	1	2	1	2	0	0	3	5	1	0					
V	15	7	2	4	4	4	1	7	1	2	0	2	0	3	1	2	1	5	1	3	1	3	1	3	1	6	2	2	2	3	1	2	1	1				
S	16	8	2	5	6	2	0	8	0	2	1	3	0	3	1	2	0	5	2	1	2	1	6	0	2	1	6	0	2	1	2	0	4	1	1			
D	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
L	18	11	2	4	5	3	1	8	1	1	0	2	2	3	1	1	2	4	2	3	1	1	7	1	1	1	7	1	1	2	1	1	3	1	3	1	1	
M	19	9	2	4	5	5	1	13	2	1	0	0	1	3	1	1	1	2	1	5	1	1	6	1	1	2	4	2	0	2	0	2	0	2	2	2	2	2
MI	20	7	2	4	4	5	1	10	1	2	2	1	1	2	2	1	1	4	1	3	1	1	6	1	1	0	2	1	0	2	1	0	3	3	3	3	3	3
J	21	8	1	3	6	3	0	9	1	1	0	3	0	4	2	1	2	6	0	1	1	1	7	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	1	1	0	0
V	22	11	1	4	4	3	1	9	1	3	0	4	0	2	2	2	1	3	1	3	2	0	7	1	1	2	3	1	2	3	1	2	3	0	0	0	0	0
S	23	4	3	5	4	4	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	1	0	2	2	0	0	2	0	2	0	2	0	2	0	0
D	24	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	1	0	1	1	1	2	2	1	2	0	0	1	0	1	0	0	0	2	2	0	2	2	2	2	2	2	2
L	25	4	3	1	4	2	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	6	0	0	1	3	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	
M	26	8	2	4	4	3	1	6	0	1	0	2	1	3	2	1	2	4	1	3	0	0	5	1	2	1	2	2	0	3	1	2	0	3	1	3	1	1
MI	27	8	1	3	3	1	1	9	0	2	1	2	0	3	1	2	1	6	1	4	1	1	7	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	0	0
J	28	5	2	4	5	4	0	10	1	1	0	2	1	2	1	4	1	2	1	4	1	3	1	1	3	1	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	1
V	29	11	1	2	5	2	1	5	0	3	1	1	1	1	1	3	1	3	0	4	1	1	7	1	0	3	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1
S	30	6	1	4	4	3	1	10	0	3	1	2	0	2	1	1	2	4	2	1	0	1	8	1	2	1	3	1	0	4	1	2	1	3	1	0	4	1
D	31	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L	1	11	1	3	3	3	1	9	0	2	0	4	0	3	0	2	1	2	0	3	2	2	6	1	1	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1
M	2	6	2	3	6	1	0	6	0	2	0	2	1	1	3	2	2	2	1	4	1	1	6	1	1	1	3	1	2	4	0	4	0	4	0	4	0	0
MI	3	8	2	2	4	4	1	9	0	1	1	3	0	2	2	2	0	5	1	5	2	2	5	2	2	2	2	1	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1



**Anexo 14: Costo promedio por kilómetro por vehículo**

**Tabla 36. Costo promedio por kilómetro (valores en pesos colombianos \$)**

Nodo	Modelos	Placa	Combustibles	Llantas	Filtros y Lubricantes	Otros Gastos, Seguros e Impuestos	Mantenimiento y Reparación	Total Gastos Operativos	
Barranquilla	1993	SYK279	\$ 696,31	\$ 134,17	\$ 19,78	\$ 93,47	\$ 86,57	\$ 1.030,30	
		SYK282	\$ 715,52	\$ 86,56	\$ 15,87	\$ 91,40	\$ 124,65	\$ 1.034,00	
		SYK285	\$ 690,30	\$ 86,68	\$ 18,35	\$ 88,88	\$ 156,57	\$ 1.040,78	
		SYK284	\$ 682,35	\$ 149,47	\$ 22,33	\$ 92,15	\$ 160,58	\$ 1.106,87	
		SYK275	\$ 720,81	\$ 86,08	\$ 27,64	\$ 94,32	\$ 194,74	\$ 1.123,59	
		SYK269	\$ 657,65	\$ 102,22	\$ 22,44	\$ 92,03	\$ 269,88	\$ 1.144,22	
		SYK277	\$ 685,11	\$ 135,36	\$ 32,28	\$ 92,40	\$ 204,67	\$ 1.149,82	
		SYK287	\$ 729,59	\$ 140,75	\$ 22,60	\$ 92,78	\$ 164,53	\$ 1.150,26	
		SYK286	\$ 722,65	\$ 111,75	\$ 22,35	\$ 93,70	\$ 204,52	\$ 1.154,98	
		SYK270	\$ 691,85	\$ 115,42	\$ 16,47	\$ 88,95	\$ 245,67	\$ 1.158,36	
		SYK321	\$ 709,39	\$ 103,37	\$ 27,80	\$ 98,80	\$ 224,26	\$ 1.163,62	
		SYK268	\$ 689,91	\$ 124,94	\$ 21,21	\$ 90,30	\$ 241,29	\$ 1.167,64	
		SYK273	\$ 702,62	\$ 133,07	\$ 26,71	\$ 93,00	\$ 216,94	\$ 1.172,34	
		SYK272	\$ 718,37	\$ 142,30	\$ 18,78	\$ 95,21	\$ 241,25	\$ 1.215,91	
		SYK271	\$ 709,03	\$ 114,80	\$ 26,68	\$ 92,12	\$ 287,79	\$ 1.230,42	
		SYK278	\$ 701,71	\$ 100,16	\$ 17,31	\$ 93,00	\$ 332,99	\$ 1.245,17	
				SYK276	\$ 710,96	\$ 108,65	\$ 16,41	\$ 91,35	\$ 358,96
		SYK274	\$ 745,16	\$ 105,01	\$ 25,76	\$ 106,18	\$ 336,29	\$ 1.318,39	
		SYK267	\$ 732,29	\$ 159,98	\$ 25,31	\$ 96,11	\$ 625,89	\$ 1.639,59	
<b>Promedio Barranquilla</b>			<b>\$ 705,87</b>	<b>\$ 117,93</b>	<b>\$ 22,43</b>	<b>\$ 93,48</b>	<b>\$ 246,21</b>	<b>\$ 1.185,93</b>	
Bogotá	1995	SYK682	\$ 965,19	\$ 114,41	\$ 28,51	\$ 113,71	\$ 187,54	\$ 1.409,35	
		SYK667	\$ 941,26	\$ 134,15	\$ 20,76	\$ 116,33	\$ 242,09	\$ 1.454,59	
		SYK686	\$ 933,96	\$ 122,35	\$ 31,93	\$ 111,62	\$ 308,94	\$ 1.508,81	
		SYK679	\$ 939,92	\$ 135,60	\$ 26,22	\$ 116,90	\$ 313,49	\$ 1.532,14	
		SYK680	\$ 969,41	\$ 166,75	\$ 27,40	\$ 116,05	\$ 256,01	\$ 1.535,62	
		SYK668	\$ 962,31	\$ 116,09	\$ 39,04	\$ 112,93	\$ 319,85	\$ 1.550,22	
		SYK665	\$ 968,02	\$ 173,79	\$ 24,26	\$ 115,35	\$ 313,30	\$ 1.594,71	
		SYK673	\$ 949,83	\$ 184,90	\$ 24,51	\$ 121,03	\$ 343,72	\$ 1.623,99	
		SYK672	\$ 947,91	\$ 137,38	\$ 35,41	\$ 120,37	\$ 412,47	\$ 1.653,55	
		SYK666	\$ 985,09	\$ 114,93	\$ 27,45	\$ 111,25	\$ 420,20	\$ 1.658,92	
		SYK681	\$ 936,86	\$ 121,04	\$ 43,31	\$ 119,53	\$ 466,72	\$ 1.687,45	
		SYK678	\$ 967,32	\$ 111,95	\$ 25,61	\$ 122,38	\$ 493,28	\$ 1.720,54	
		SYK669	\$ 1.023,36	\$ 140,80	\$ 36,80	\$ 120,48	\$ 399,72	\$ 1.721,16	
		SYK684	\$ 920,33	\$ 103,20	\$ 45,45	\$ 120,57	\$ 614,93	\$ 1.804,48	
		SYK685	\$ 992,29	\$ 185,14	\$ 44,48	\$ 120,13	\$ 468,63	\$ 1.810,68	
		SYK664	\$ 948,92	\$ 89,92	\$ 33,45	\$ 123,96	\$ 631,78	\$ 1.828,03	
				SYK687	\$ 972,32	\$ 125,81	\$ 40,41	\$ 139,68	\$ 566,94
			SYK683	\$ 919,58	\$ 110,27	\$ 53,10	\$ 133,64	\$ 667,22	\$ 1.883,82
			SYK670	\$ 963,28	\$ 149,57	\$ 47,78	\$ 116,47	\$ 633,39	\$ 1.910,49
			SYK671	\$ 940,30	\$ 105,26	\$ 38,97	\$ 153,70	\$ 752,09	\$ 1.990,33
	1997	SYL533	\$ 925,61	\$ 130,33	\$ 20,50	\$ 145,05	\$ 132,20	\$ 1.353,69	
		UFQ098	\$ 682,06	\$ 223,43	\$ 34,35	\$ 200,71	\$ 657,57	\$ 1.798,11	
<b>Promedio Bogotá</b>			<b>\$ 943,42</b>	<b>\$ 136,23</b>	<b>\$ 34,08</b>	<b>\$ 125,99</b>	<b>\$ 436,46</b>	<b>\$ 1.676,17</b>	

Nodo	Modelos	Placa	Combustibles	Llantas	Filtros y Lubrificantes	Otros Gastos, Seguros e Impuestos	Mantenimiento y Reparación	Total Gastos Operativos
Bucaramanga	2004	SYR928	\$ 947,41	\$ 354,53	\$ 40,37	\$ 137,21	\$ 430,96	\$ 1.910,49
	2005	SYS816	\$ 734,42	\$ 61,56	\$ 12,44	\$ 106,80	\$ 93,51	\$ 1.008,73
		SYS832	\$ 833,46	\$ 34,17	\$ 19,16	\$ 141,33	\$ 152,36	\$ 1.180,47
		SYS814	\$ 857,52	\$ 124,44	\$ 15,99	\$ 145,34	\$ 137,84	\$ 1.281,12
		SYS714	\$ 854,22	\$ 206,26	\$ 24,92	\$ 128,68	\$ 230,02	\$ 1.444,11
		SYS705	\$ 924,60	\$ 356,43	\$ 22,59	\$ 123,45	\$ 126,16	\$ 1.553,23
		SYS634	\$ 913,24	\$ 342,34	\$ 21,16	\$ 119,74	\$ 169,97	\$ 1.566,45
		SYS712	\$ 938,58	\$ 335,94	\$ 27,33	\$ 123,17	\$ 160,88	\$ 1.585,90
		SYS708	\$ 943,55	\$ 314,74	\$ 19,78	\$ 120,67	\$ 201,56	\$ 1.600,30
		SYS815	\$ 947,26	\$ 355,75	\$ 27,77	\$ 141,10	\$ 283,34	\$ 1.755,23
SYS640	\$ 929,04	\$ 384,88	\$ 44,24	\$ 123,81	\$ 288,49	\$ 1.770,47		
<b>Promedio Bucaramanga</b>			<b>\$ 893,03</b>	<b>\$ 261,00</b>	<b>\$ 25,07</b>	<b>\$ 128,30</b>	<b>\$ 206,83</b>	<b>\$ 1.514,23</b>
Cali	1997	SYL426	\$ 750,13	\$ 167,95	\$ 13,59	\$ 95,12	\$ 133,54	\$ 1.160,32
		SYL435	\$ 775,04	\$ 163,43	\$ 26,87	\$ 92,20	\$ 155,31	\$ 1.212,85
		SYL389	\$ 781,17	\$ 194,83	\$ 15,75	\$ 93,52	\$ 156,63	\$ 1.241,90
		SYL402	\$ 798,83	\$ 181,35	\$ 19,92	\$ 92,65	\$ 186,94	\$ 1.279,68
		SYL425	\$ 801,34	\$ 203,51	\$ 19,81	\$ 93,65	\$ 162,61	\$ 1.280,91
		SYL438	\$ 784,80	\$ 168,84	\$ 24,93	\$ 88,20	\$ 239,75	\$ 1.306,52
		SYL428	\$ 782,57	\$ 176,86	\$ 18,25	\$ 92,50	\$ 253,25	\$ 1.323,43
		SYL404	\$ 814,96	\$ 49,53	\$ 35,39	\$ 124,64	\$ 374,72	\$ 1.399,24
		SYL391	\$ 838,38	\$ 116,87	\$ 32,08	\$ 118,38	\$ 478,47	\$ 1.584,17
	SYL436	\$ 764,72	\$ 268,61	\$ 160,18	\$ 284,57	\$ 2.818,65	\$ 4.296,73	
2004	SYR939	\$ 834,25	\$ 120,27	\$ 16,79	\$ 139,16	\$ 127,00	\$ 1.237,49	
<b>Promedio Cali</b>			<b>\$ 793,29</b>	<b>\$ 164,73</b>	<b>\$ 34,87</b>	<b>\$ 119,51</b>	<b>\$ 462,44</b>	<b>\$ 1.574,84</b>

**Anexo 15: Asignación de recursos según costo promedio por kilómetro**

**Tabla 37. Reducción de costos por asignación de recursos según costo por kilómetro (valores en pesos colombianos)**

Nodo	Recursos		Kilómetros y costos por recurso			
	Placa	\$ / km Gastos Operativos	Actual		Propuesta	
Barranquilla	SYK279	\$ 1.030,30	34.571	\$ 35.618.606,02	69.447	\$ 71.551.018,75
	SYK282	\$ 1.034,00	34.571	\$ 35.746.783,48	67.599	\$ 69.897.662,81
	SYK285	\$ 1.040,78	34.571	\$ 35.981.191,68	61.762	\$ 64.280.953,05
	SYK284	\$ 1.106,87	34.571	\$ 38.265.685,43	57.333	\$ 63.459.928,35
	SYK275	\$ 1.123,59	34.571	\$ 38.843.848,25	55.396	\$ 62.242.362,50
	SYK269	\$ 1.144,22	34.571	\$ 39.557.207,73	54.460	\$ 62.314.437,37
	SYK277	\$ 1.149,82	34.571	\$ 39.750.685,41	52.697	\$ 60.592.089,11
	SYK287	\$ 1.150,26	34.571	\$ 39.765.723,96	51.061	\$ 58.733.194,47
	SYK286	\$ 1.154,98	34.571	\$ 39.928.899,08	48.528	\$ 56.048.648,14
	SYK270	\$ 1.158,36	34.571	\$ 40.045.935,84	44.368	\$ 51.394.152,95
	SYK321	\$ 1.163,62	34.571	\$ 40.227.579,66	37.500	\$ 43.635.563,07
	SYK268	\$ 1.167,64	34.571	\$ 40.366.783,66	26.961	\$ 31.480.785,25
	SYK273	\$ 1.172,34	34.571	\$ 40.529.257,03	19.111	\$ 22.404.614,11
	SYK272	\$ 1.215,91	34.571	\$ 42.035.438,21	8.050	\$ 9.788.065,63
	SYK271	\$ 1.230,42	34.571	\$ 42.537.086,70	2.380	\$ 2.928.398,07
	SYK278	\$ 1.245,17	34.571	\$ 43.046.863,66	200	\$ 249.033,01
	SYK276	\$ 1.286,34	34.571	\$ 44.470.342,62	0	\$ 0,00
	SYK274	\$ 1.318,39	34.571	\$ 45.578.449,32	0	\$ 0,00
	SYK267	\$ 1.639,59	34.571	\$ 56.682.568,86	0	\$ 0,00
<b>Total Barranquilla</b>			<b>656.853</b>	<b>778.978.937</b>	<b>656.853</b>	<b>\$ 731.000.906,65</b>
Bogotá	SYL533	\$ 1.353,69	22.670	\$ 30.688.177,03	61.982	\$ 83.904.649,44
	SYK682	\$ 1.409,35	22.670	\$ 31.949.866,01	54.212	\$ 76.403.599,88
	SYK667	\$ 1.454,59	22.670	\$ 32.975.460,23	49.647	\$ 72.215.966,32
	SYK686	\$ 1.508,81	22.670	\$ 34.204.650,55	46.569	\$ 70.263.765,55
	SYK679	\$ 1.532,14	22.670	\$ 34.733.468,51	43.132	\$ 66.084.118,56
	SYK680	\$ 1.535,62	22.670	\$ 34.812.541,07	40.048	\$ 61.498.696,09
	SYK668	\$ 1.550,22	22.670	\$ 35.143.456,54	38.081	\$ 59.033.994,35
	SYK665	\$ 1.594,71	22.670	\$ 36.151.980,25	33.780	\$ 53.869.269,58
	SYK673	\$ 1.623,99	22.670	\$ 36.815.687,37	30.143	\$ 48.951.808,09
	SYK672	\$ 1.653,55	22.670	\$ 37.485.796,00	25.141	\$ 41.571.781,51
	SYK666	\$ 1.658,92	22.670	\$ 37.607.722,67	21.346	\$ 35.411.383,23
	SYK681	\$ 1.687,45	22.670	\$ 38.254.375,23	19.009	\$ 32.076.703,87
	SYK678	\$ 1.720,54	22.670	\$ 39.004.563,22	12.673	\$ 21.804.403,21
	SYK669	\$ 1.721,16	22.670	\$ 39.018.556,05	7.047	\$ 12.128.994,96
	UFQ098	\$ 1.798,11	22.670	\$ 40.762.989,22	6.570	\$ 11.813.558,72
	SYK684	\$ 1.804,48	22.670	\$ 40.907.481,52	6.477	\$ 11.687.617,51
	SYK685	\$ 1.810,68	22.670	\$ 41.047.933,21	2.066	\$ 3.740.855,76
	SYK664	\$ 1.828,03	22.670	\$ 41.441.451,31	816	\$ 1.491.675,87
	SYK687	\$ 1.845,16	22.670	\$ 41.829.783,23	0	\$ 0,00
	SYK683	\$ 1.883,82	22.670	\$ 42.706.002,93	0	\$ 0,00
SYK670	\$ 1.910,49	22.670	\$ 43.310.655,89	0	\$ 0,00	
SYK671	\$ 1.990,33	22.670	\$ 45.120.707,75	0	\$ 0,00	
<b>Total Bogotá</b>			<b>498.739</b>	<b>\$ 835.973.305,79</b>	<b>498.739</b>	<b>\$ 763.952.842,50</b>

Nodo	Recursos		Kilómetros y costos por recurso			
	Placa	\$ / km Gastos Operativos	Actual		Propuesta	
Bucaramanga	SYR928	\$ 1.910,49	24.810	\$ 47.398.594,58	39.491	\$ 75.447.212,18
	SYS816	\$ 1.008,73	24.810	\$ 25.026.180,80	37.304	\$ 37.629.598,23
	SYS832	\$ 1.180,47	24.810	\$ 29.287.115,85	36.353	\$ 42.913.749,59
	SYS814	\$ 1.281,12	24.810	\$ 31.784.141,59	34.801	\$ 44.584.285,52
	SYS714	\$ 1.444,11	24.810	\$ 35.827.720,20	32.084	\$ 46.332.665,19
	SYS705	\$ 1.553,23	24.810	\$ 38.534.965,30	28.443	\$ 44.178.399,16
	SYS634	\$ 1.566,45	24.810	\$ 38.863.131,99	22.830	\$ 35.762.124,46
	SYS712	\$ 1.585,90	24.810	\$ 39.345.533,92	16.798	\$ 26.639.901,90
	SYS708	\$ 1.600,30	24.810	\$ 39.702.907,82	12.532	\$ 20.054.983,21
	SYS815	\$ 1.755,23	24.810	\$ 43.546.639,15	9.068	\$ 15.916.433,36
	SYS640	\$ 1.770,47	24.810	\$ 43.924.649,33	3.202	\$ 5.669.036,22
<b>Total Bucaramanga</b>			<b>272.906</b>	<b>\$ 413.241.580,55</b>	<b>272.906</b>	<b>\$ 395.128.389,01</b>
Cali	SYL426	\$ 1.160,32	30.139	\$ 34.971.319,81	70.666	\$ 81.995.451,85
	SYL435	\$ 1.212,85	30.139	\$ 36.554.361,71	65.700	\$ 79.684.124,63
	SYR939	\$ 1.237,49	30.139	\$ 37.296.917,71	61.088	\$ 75.595.523,80
	SYL389	\$ 1.241,90	30.139	\$ 37.429.977,69	54.771	\$ 68.020.131,97
	SYL402	\$ 1.279,68	30.139	\$ 38.568.561,05	42.303	\$ 54.134.213,95
	SYL425	\$ 1.280,91	30.139	\$ 38.605.790,97	24.188	\$ 30.982.727,44
	SYL438	\$ 1.306,52	30.139	\$ 39.377.474,69	10.331	\$ 13.497.627,98
	SYL428	\$ 1.323,43	30.139	\$ 39.887.250,36	2.230	\$ 2.951.251,32
	SYL404	\$ 1.399,24	30.139	\$ 42.172.128,21	255	\$ 356.806,64
	SYL391	\$ 1.584,17	30.139	\$ 47.745.736,34	0	\$ 0,00
	SYL436	\$ 4.296,73	30.139	\$ 129.500.416,02	0	\$ 0,00
<b>Total Cali</b>			<b>331.532</b>	<b>\$ 522.109.934,56</b>	<b>331.532</b>	<b>\$ 407.217.859,58</b>

## Anexo 16: Código del algoritmo heurístico

```

Option Explicit
Public Distribuidoras As Integer 'Almacena el número de distribuidoras a visitar
Public Camiones As Integer 'Almacena el número de camiones disponibles para realizar los viajes
Public Viajes () 'Almacena el número de viajes requeridos por cada distribuidora
Public Cargue () 'Almacena el tiempo de cargue en la planta
Public Descargue () 'Almacena el tiempo de descargue en cada distribuidora
Public Ida () 'Almacena el tiempo de ida para cada distribuidora
Public Retorno () 'Almacena el tiempo de retorno para en cada distribuidora
Public Apertura1 () 'Almacena la primera apertura de la ventana de tiempo en cada distribuidora
Public Apertura2 () 'Almacena la segunda apertura de la ventana de tiempo en cada distribuidora
Public Cierre1 () 'Almacena el primer cierre de la ventana de tiempo en cada distribuidora
Public Cierre2 () 'Almacena el segundo cierre de la ventana de tiempo en cada distribuidora
Public Total () 'Almacena la duración total de un viaje de cada distribuidora
Public Llegada () 'Almacena el tiempo que tarda un camión en llegar a la distribuidora desde que empieza a cargar en l
Public Solucion () 'Almacena la solución
Public Lista () 'Lista de posibles candidatos a formar parte de la solución
Public SumaP () 'Contabiliza muelles ocupados en planta
Public MuellesP () 'Indica muelles de la planta ocupados
Public MuellesD () 'Indica muelles de las distribuidoras ocupados
Public Soluciones () 'Matriz que almacena todas las posibles soluciones
Public Asigna () 'Matriz que almacena el inicio de cada viaje
Public Asigna_Final () 'Matriz que almacena el inicio de cada viaje en la solución final
Public i, j, K, m, n, p, q, Candidatos, RDM, Veces, Dia, Iniciar, Minimo, Inicio, Fin, Password As Integer

'Llamar los procedimientos necesarios para encontrar la solución
Sub Ejecutar()

    Dim Y, Sumaviajes, Suma, Cuenta(20), Aleatorio(2), Iteraciones
    Veces = 0

    Call UnProtectSheet

    'Determina el tamaño de la matriz Solucion
    ReDim Solucion(370, 22)
    ReDim Soluciones(370, 22, 20)
    ReDim Asigna(370, 22)
    ReDim Asigna_Final(370, 22, 20)

    Call Borrar
    For i = 1 To 370
        For j = 1 To 22
            Asigna(i, j) = ""
            Worksheets("Asignación").Cells(i + 2, j + 3).Value = ""

            For k = 1 To 20
                Asigna_Final(i, j, k) = ""
            Next k
        Next j
    Next i

    Do

        Iteraciones = 0

        Do

            Sumaviajes = 0

            Call Leer_Parametros

            'Inicializa la matriz Solucion
            For i = 1 To 370
                For j = 1 To Camiones
                    Solucion(i, j) = Worksheets("Solución").Cells(i + 3, j + 3).Value
                Next j
            Next i

            'Valida que días se seleccionaron para programar

            'Lunes
            If Worksheets("Dias").Cells(2, 2).Value = True Then
                Call Crear_Lunes
                For i = 1 To Distribuidoras
                    Sumaviajes = Sumaviajes + Viajes(i, 1)
                Next i
            End If

            'Martes
            If Worksheets("Dias").Cells(3, 2).Value = True Then
                Call Crear_Martes
                For i = 1 To Distribuidoras
                    Sumaviajes = Sumaviajes + Viajes(i, 2)
                Next i
            End If

            'Miércoles
            If Worksheets("Dias").Cells(4, 2).Value = True Then
                Call Crear_Miercoles
                For i = 1 To Distribuidoras
                    Sumaviajes = Sumaviajes + Viajes(i, 3)
                Next i
            End If

            'Jueves
            If Worksheets("Dias").Cells(5, 2).Value = True Then
                Call Crear_Jueves
                For i = 1 To Distribuidoras
                    Sumaviajes = Sumaviajes + Viajes(i, 4)
                Next i
            End If

        Loop

    Loop

End Sub

```



```

'Viernes
If Worksheets("Dias").Cells(6, 2).Value = True Then
    Call Crear_Viernes
    For i = 1 To Distribuidoras
        Sumaviajes = Sumaviajes + Viajes(i, 5)
    Next i
End If

'Sábado
If Worksheets("Dias").Cells(7, 2).Value = True Then
    Call Crear_Sabado
    For i = 1 To Distribuidoras
        Sumaviajes = Sumaviajes + Viajes(i, 6)
    Next i
End If

'Domingo
If Worksheets("Dias").Cells(8, 2).Value = True Then
    Call Crear_Domingo
    For i = 1 To Distribuidoras
        Sumaviajes = Sumaviajes + Viajes(i, 7)
    Next i
End If

Iteraciones = Iteraciones + 1

Loop Until Sumaviajes = 0 Or Iteraciones = 50

If Iteraciones = 50 Then
    Y = MsgBox("No hay soluciones factibles" + Chr(13) + "Disminuya el número de viajes que está programando", , "Error!")
    Veces = 19
    IngresarViajes.Show
End If

Veces = Veces + 1

For i = 1 To 370
    For j = 1 To Camiones
        Soluciones(i, j, Veces) = Solucion(i, j)
        Asigna_Final(i, j, Veces) = Asigna(i, j)
    Next j
Next i

For i = 1 To 370
    For j = 1 To Camiones
        Asigna(i, j) = ""
    Next j
Next i

Loop Until Veces = 20

'Cuanta el número de camiones utilizados por cada solución
For k = 1 To Veces
    Cuenta(k) = 0
    For j = 1 To Camiones
        Suma = 0
        For i = 1 To 370
            If Soluciones(i, j, k) <> 0 Then
                Suma = Suma + 1
            End If
        Next i

        If Suma > 0 Then
            Cuenta(k) = Cuenta(k) + 1
        End If
    Next j
Next k

'Escoge la mejor solución entre las generadas
Minimo = 1
For i = 1 To Veces
    If Cuenta(i) <= Cuenta(Minimo) Then
        If Cuenta(i) = Cuenta(Minimo) Then
            Aleatorio(1) = Minimo
            Aleatorio(2) = i
            Minimo = Aleatorio(Generar_aleatorio(1, 2))
        Else
            Minimo = i
        End If
    End If
End If
Next i

'Escribe en la hoja de Excel la mejor solución encontrada
Call Escribir_Solucion(Minimo)

'Asigna las placas según costos a cada camión
Call Ordenar_Camiones

'Se ubica en la hoja donde se muestra la solución final
Worksheets("Solución").Activate
Range("A1").Select

Call ProtectSheet

End Sub

'Borrar la información almacenada previamente en la hoja Solución

Sub Borrar()

If Worksheets("Dias").Cells(8, 2).Value = True Then

    'Toma la solución del domingo de la semana anterior, en caso que ésta llegue hasta el lunes siguiente
    If Worksheets("Dias").Cells(2, 2).Value = True Then
        For i = 1 To 34

```

```

        For j = 1 To 22
            Worksheets("Solución").Cells(i + 3, j + 3).Value = Worksheets("Solución").Cells(i + 340, j + 3).Value
        Next j
    Next i
End If

'Borra la solución del domingo
Worksheets("Solución").Activate
Range("D272:Y373").Select
Selection.Replace What:="Domingo", Replacement:="0", LookAt:=xlPart, _
SearchOrder:=xlByRows, MatchCase:=False, SearchFormat:=False, _
ReplaceFormat:=False

'Borra la solución del sábado
If Worksheets("Dias").Cells(7, 2).Value = True Then
    Worksheets("Solución").Activate
    Range("D4:Y373").Select
    Selection.Replace What:="Sábado", Replacement:="0", LookAt:=xlPart, _
    SearchOrder:=xlByRows, MatchCase:=False, SearchFormat:=False, _
    ReplaceFormat:=False

'Borra la solución del viernes
If Worksheets("Dias").Cells(6, 2).Value = True Then
    Selection.Replace What:="Viernes", Replacement:="0", LookAt:=xlPart, _
    SearchOrder:=xlByRows, MatchCase:=False, SearchFormat:=False, _
    ReplaceFormat:=False

'Borra la solución del jueves
If Worksheets("Dias").Cells(5, 2).Value = True Then
    Selection.Replace What:="Jueves", Replacement:="0", LookAt:=xlPart, _
    SearchOrder:=xlByRows, MatchCase:=False, SearchFormat:=False, _
    ReplaceFormat:=False

'Borra la solución del miércoles
If Worksheets("Dias").Cells(4, 2).Value = True Then
    Selection.Replace What:="Miércoles", Replacement:="0", LookAt:=xlPart, _
    SearchOrder:=xlByRows, MatchCase:=False, SearchFormat:=False, _
    ReplaceFormat:=False

'Borra la solución del martes
If Worksheets("Dias").Cells(3, 2).Value = True Then
    Selection.Replace What:="Martes", Replacement:="0", LookAt:=xlPart, _
    SearchOrder:=xlByRows, MatchCase:=False, SearchFormat:=False, _
    ReplaceFormat:=False

'Borra la solución del lunes
If Worksheets("Dias").Cells(2, 2).Value = True Then
    Selection.Replace What:="Lunes", Replacement:="0", LookAt:=xlPart, _
    SearchOrder:=xlByRows, MatchCase:=False, SearchFormat:=False, _
    ReplaceFormat:=False
End If

End If

End If

End If

End If

End If

End If

'Llena con ceros la hoja solución
Worksheets("Solución").Activate
Range("D4:Y373").Select
Selection.Replace What:="", Replacement:="0", LookAt:=xlPart, _
SearchOrder:=xlByRows, MatchCase:=False, SearchFormat:=False, _
ReplaceFormat:=False

End Sub

'Leer y almacenar en las variables correspondientes los parámetros básicos para encontrar la solución:
'Número de distribuidoras a ser visitadas
'Número de camiones disponibles
'Viajes requeridos por cada distribuidora cada día de la semana
'Hora de apertura y de cierre de las ventanas de tiempo en cada distribuidora
'Tiempos de cargue, descargue, ida y retorno para cada distribuidora

'Calcular y almacenar en las variables correspondientes los parámetros básicos para encontrar la solución:
'Llegada o tiempo que el camión tarda en llegar a la distribuidora y duración total del ciclo
'Tamaño de las matrices solución
'Tamaño de las matrices para contabilizar uso de muelles en la planta y en distribuidoras
'Tamaño de la matriz que almacena las distribuidoras candidatas a ser parte de la solución
'Inicializa en cero la matriz muelles ocupados en distribuidora

Sub Leer_Parametros ()

    'Toma el número de distribuidoras
    Distribuidoras = Worksheets("Datos").Cells(1, 5).Value

    'Toma el número de camiones disponibles
    Camiones = Worksheets("Datos").Cells(1, 9).Value

    'Matriz que almacena el número de viajes requeridos por cada distribuidora en cada día
    ReDim Viajes(Distribuidoras, 7)
    For i = 1 To Distribuidoras
        For j = 1 To 7
            Viajes(i, j) = Worksheets("Datos").Cells(4 + i, 4 + (j * 5)).Value
        Next j
    Next i

    'Toma el tiempo de cargue para cada distribuidora
    ReDim Cargue(Distribuidoras)
    For i = 1 To Distribuidoras

```

```

    Cargue(i) = Worksheets("Datos").Cells(4 + i, 3).Value
Next i

'Toma el tiempo de descargue para cada distribuidora
ReDim Descargue(Distribuidoras)
For i = 1 To Distribuidoras
    Descargue(i) = Worksheets("Datos").Cells(4 + i, 4).Value
Next i

'Toma el tiempo de ida para cada distribuidora
ReDim Ida(Distribuidoras)
For i = 1 To Distribuidoras
    Ida(i) = Worksheets("Datos").Cells(4 + i, 5).Value
Next i

'Toma el tiempo de retorno para cada distribuidora
ReDim Retorno(Distribuidoras)
For i = 1 To Distribuidoras
    Retorno(i) = Worksheets("Datos").Cells(4 + i, 6).Value
Next i

'Toma las fracciones totales de tiempo para el ciclo de cada distribuidora
ReDim Total(Distribuidoras)
For i = 1 To Distribuidoras
    Total(i) = Application.RoundUp(Worksheets("Datos").Cells(4 + i, 7).Value * 2, 0)
Next i

'Calcula el tiempo que el camión tarda en llegar a cada distribuidora
ReDim Llegada(Distribuidoras)
For i = 1 To Distribuidoras
    Llegada(i) = Cargue(i) + Ida(i)
Next i

'Almacena la primera apertura de la ventana de tiempo en cada distribuidora para cada día de la semana
ReDim Apertura1(Distribuidoras, 7)
For i = 1 To Distribuidoras
    For j = 1 To 7
        Apertura1(i, j) = Worksheets("Datos").Cells(4 + i, 5 + (j * 5)).Value
    Next j
Next i

'Almacena el primer cierre de la ventana de tiempo en cada distribuidora para cada día de la semana
ReDim Cierre1(Distribuidoras, 7)
For i = 1 To Distribuidoras
    For j = 1 To 7
        Cierre1(i, j) = Worksheets("Datos").Cells(4 + i, 6 + (j * 5)).Value
    Next j
Next i

'Almacena la segunda apertura de la ventana de tiempo en cada distribuidora para cada día de la semana
ReDim Apertura2(Distribuidoras, 7)
For i = 1 To Distribuidoras
    For j = 1 To 7
        Apertura2(i, j) = Worksheets("Datos").Cells(4 + i, 7 + (j * 5)).Value
    Next j
Next i

'Almacena el segundo cierre de la ventana de tiempo en cada distribuidora para cada día de la semana
ReDim Cierre2(Distribuidoras, 7)
For i = 1 To Distribuidoras
    For j = 1 To 7
        Cierre2(i, j) = Worksheets("Datos").Cells(4 + i, 8 + (j * 5)).Value
    Next j
Next i

'Determina tamaño de las matrices para contabilizar uso de muelles en la planta y en distribuidoras
ReDim MuellesP(370, Camiones)
ReDim MuellesD(370, Distribuidoras)

'Determina el tamaño de la matriz que almacena las distribuidoras candidatas a ser parte de la solución
ReDim Lista(Distribuidoras)

'Inicializa en cero la matriz muelles ocupados en distribuidora
For i = 1 To 370
    For j = 1 To Distribuidoras
        MuellesD(i, j) = 0
    Next j
Next i

End Sub

```

---

```

'Escribir la solución en la hoja "Solución"
Sub Escribir_Solucion(Minimo)
    Dim i, j As Integer

    For i = 1 To 370
        For j = 1 To Camiones
            'Escribe la solución en la hoja de excel
            Worksheets("Solución").Cells(3 + i, 3 + j).Value = Soluciones(i, j, Minimo)
            Worksheets("Asignación").Cells(2 + i, 3 + j).Value = Asigna_Final(i, j, Minimo)
        Next j
    Next i
End Sub

```

---

```

'Ordena cada camión según kilometraje recorrido
Sub Ordenar_Camiones()

    Worksheets("Camiones").Activate
    Range("B8").Select
    Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
    ActiveWorkbook.Worksheets("Camiones").Sort.SortFields.Clear

```

```

ActiveWorkbook.Worksheets("Camiones").Sort.SortFields.Add Key:=Range("B9:W9") _
, SortOn:=xlSortOnValues, Order:=xlDescending, DataOption:=xlSortNormal
With ActiveWorkbook.Worksheets("Camiones").Sort
.SetRange Range("B8:W381")
.Header = xlGuess
.MatchCase = False
.Orientation = xlLeftToRight
.SortMethod = xlPinYin
.Apply
End With

End Sub

'Generar números aleatorios para escoger una solución entre los candidatos
Function Generar_aleatorio(X, Y)
Dim u
Randomize
u = Rnd()
Generar_aleatorio = X + Int((Y - X) * u)
End Function

'Determina que el día de la semana para el cual se va a construir la solución es Lunes
Sub Crear_Lunes()

Dia = 0
Iniciar = 1
Call Crear_Solucion(Dia, Iniciar)

End Sub

'Determina que el día de la semana para el cual se va a construir la solución es Martes
Sub Crear_Martes()

Dia = 1
Iniciar = 29
Call Crear_Solucion(Dia, Iniciar)

End Sub

'Determina que el día de la semana para el cual se va a construir la solución es Miércoles
Sub Crear_Miercoles()

Dia = 2
Iniciar = 77
Call Crear_Solucion(Dia, Iniciar)

End Sub

'Determina que el día de la semana para el cual se va a construir la solución es Jueves
Sub Crear_Jueves()

Dia = 3
Iniciar = 125
Call Crear_Solucion(Dia, Iniciar)

End Sub

'Determina que el día de la semana para el cual se va a construir la solución es Viernes
Sub Crear_Viernes()

Dia = 4
Iniciar = 173
Call Crear_Solucion(Dia, Iniciar)

End Sub

'Determina que el día de la semana para el cual se va a construir la solución es Sábado
Sub Crear_Sabado()

Dia = 5
Iniciar = 221
Call Crear_Solucion(Dia, Iniciar)

End Sub

'Determina que el día de la semana para el cual se va a construir la solución es Domingo
Sub Crear_Domingo()

Dim SumaP(370), Sumar
Dia = 6
Sumar = Dia * 48

'Recorre todas los camiones que se pueden utilizar para cumplir los viajes
For j = 1 To Camiones

'Recorre todas las posibles horas en las que un camión puede iniciar el viaje a cada distribuidora
For i = 269 To 52 + Sumar

'Restricciones en planta
Select Case i
'Restricción inventario en planta 6 a 7,5
Case 15 + Sumar
i = i + 7
Case 16 + Sumar
i = i + 6
Case 17 + Sumar
i = i + 5
Case 18 + Sumar
i = i + 4

```

```

Case 19 + Sumar
    i = i + 3
End Select

'Restricción número de muelles disponibles para cargue
For m = 2 To 0 Step -1
    If SumaP(i + m) >= 4 Then
        Do While SumaP(i + m) >= 4
            i = i + 1 + m
        Loop
    End If
Next m

'Escoge las distribuidoras candidatas a ser parte de la solución
If Solucion(i, j) = 0 Then

    Candidatos = 0

    'Inicializa en cero la lista de candidatos
    For n = 1 To Distribuidoras
        Lista(n) = 0
    Next n

    'Recorre todas las distribuidoras para buscar las candidatas
    For k = 1 To Distribuidoras

        'Restricción Bosa-Soacha 5 a 8 y 17 a 20
        'Fusagasugá
        If k = 5 And (i = 11 + Sumar Or i = 12 + Sumar Or i = 13 + Sumar Or i = 14 + Sumar Or i = 15 + Sumar Or i = 16 + Sumar)
            k = k + 1
        End If

        'Girardor
        If k = 6 And (i = 11 + Sumar Or i = 12 + Sumar Or i = 13 + Sumar Or i = 14 + Sumar Or i = 15 + Sumar Or i = 16 + Sumar)
            k = k + 1
        End If

        'Ibagué
        If k = 8 And (i = 11 + Sumar Or i = 12 + Sumar Or i = 13 + Sumar Or i = 14 + Sumar Or i = 15 + Sumar Or i = 16 + Sumar)
            k = k + 1
        End If

        'Neiva
        If k = 10 And (i = 3 + Sumar Or i = 4 + Sumar Or i = 5 + Sumar Or i = 6 + Sumar Or i = 7 + Sumar Or i = 8 + Sumar Or i = 9 + Sumar)
            k = k + 1
        End If
        'Fin restricción Bosa-Soacha 5 a 8 y 17 a 20

        'Restricción muelles ocupados en distribuidora
        Do While MuellesD(i, k) >= 3
            If k < 14 Then
                k = k + 1
            Else
                i = i + 1
            End If
        Loop

        'Valida si hay viajes pendientes en la distribuidora k
        If Viajes(k, Dia + 1) > 0 Then

            'Valida el cumplimiento de las ventanas de tiempo
            If (Llegada(k) + (i / 2) - 2.5 >= Apertural(k, Dia + 1) And Llegada(k) + (i / 2) - 2.5 <= Cierrel(k, Dia + 1)) Or
                (Worksheets("Dias").Cells(Dia + 2, 3).Value = Empty Or k = 2 Then
                Candidatos = Candidatos + 1
                Lista(Candidatos) = k
            Else
                Inicio = Worksheets("Dias").Cells(Dia + 2, 3).Value
                Fin = Worksheets("Dias").Cells(Dia + 2, 4).Value

                If Application.RoundUp(((Llegada(k) * 2) + i - 1), 0) <= (Inicio * 2) + 5 + Sumar Then
                    Candidatos = Candidatos + 1
                    Lista(Candidatos) = k
                End If
            End If
        End If

    Next k

    'Escoge aleatoriamente la distribuidora a ser visitada, entre la lista de candidatos
    If Candidatos > 0 Then

        RDM = Generar_aleatorio(1, Candidatos)

        'Descuenta un viaje para la distribuidora escogida
        Viajes(Lista(RDM), Dia + 1) = Viajes(Lista(RDM), Dia + 1) - 1

        'Determina el inicio de cada viaje y la ocupación de muelles en planta
        For m = i To (i + Cargue(Lista(RDM)) * 2 - 1)
            MuellesP(m, j) = 1
        Next m

        Asigna(i, j) = Lista(RDM)

        'Determina la ocupación de muelles en la distribuidora
        For p = i To Application.RoundUp((i + Descargue(Lista(RDM)) * 2 - 1), 0)
            MuellesD(p, Lista(RDM)) = MuellesD(p, Lista(RDM)) + 1
        Next p

        'Introduce la distribuidora escogida en la matriz solución
        If Worksheets("Dias").Cells(Dia + 2, 3).Value = Empty Or Lista(RDM) = 2 Then
            For m = i To Application.RoundUp((Total(Lista(RDM)) + i - 1), 0)
                Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Domingo"
            Next m
        Else

```



```

        k = k + 1
    End If

'Restricción Bosa-Soacha 5 a 8 y 17 a 20
'Fusagasugá
If k = 5 And (i = 11 + Sumar Or i = 12 + Sumar Or i = 13 + Sumar Or i = 14 + Sumar Or i = 15 + Sumar Or i = 16 + Sum
    k = k + 1
End If

'Girardot
If k = 6 And (i = 11 + Sumar Or i = 12 + Sumar Or i = 13 + Sumar Or i = 14 + Sumar Or i = 15 + Sumar Or i = 16 + Sum
    k = k + 1
End If

'Ibagué
If k = 8 And (i = 11 + Sumar Or i = 12 + Sumar Or i = 13 + Sumar Or i = 14 + Sumar Or i = 15 + Sumar Or i = 16 + Sum
    k = k + 1
End If

'Neiva
If k = 10 And (i = 3 + Sumar Or i = 4 + Sumar Or i = 5 + Sumar Or i = 6 + Sumar Or i = 7 + Sumar Or i = 8 + Sumar Or
    k = k + 1
End If
'Fin restricción Bosa-Soacha 5 a 8 y 17 a 20

'Restricción muelles ocupados en distribuidora
Do While MuellesD(i, k) >= 3
    If k < 14 Then
        k = k + 1
    Else
        i = i + 1
    End If
Loop

'Valida si hay viajes pendientes en la distribuidora k
If Viajes(k, Dia + 1) > 0 Then

'Valida el cumplimiento de las ventanas de tiempo
If (Llegada(k) + (i / 2) - 2.5 >= Apertural(k, Dia + 1) And Llegada(k) + (i / 2) - 2.5 <= Cierrel(k, Dia + 1)) O
    If Worksheets("Dias").Cells(10, 2).Value = "NO" Or k = 2 Then
        Candidatos = Candidatos + 1
        Lista(Candidatos) = k
        'Se ejecuta en caso que el día sea festivo
    Else
        If Worksheets("Dias").Cells(Dia + 2, 3).Value = Empty Then
            Candidatos = Candidatos + 1
            Lista(Candidatos) = k
        Else
            Inicio = Worksheets("Dias").Cells(Dia + 2, 3).Value
            Fin = Worksheets("Dias").Cells(Dia + 2, 4).Value

            If Application.RoundUp(((Llegada(k) * 2) + i - 1), 0) <= (Inicio * 2) + 5 + Sumar Then
                Candidatos = Candidatos + 1
                Lista(Candidatos) = k
            End If
        End If
    End If
End If

End If

Next k

'Escoge aleatoriamente la distribuidora a ser visitada, entre la lista de candidatos
If Candidatos > 0 Then

    RDM = Generar_aleatorio(1, Candidatos)

'Descuenta un viaje para la distribuidora escogida
Viajes(Lista(RDM), Dia + 1) = Viajes(Lista(RDM), Dia + 1) - 1

'Determina el inicio de cada viaje y la ocupación de muelles en planta
For m = i To (i + Cargue(Lista(RDM)) * 2 - 1)
    MuellesP(m, j) = 1
Next m

'Determina el inicio de cada viaje
Asigna(i, j) = Lista(RDM)

'Determina la ocupación de muelles en la distribuidora
For p = i To Application.RoundUp((i + Descargue(Lista(RDM)) * 2 - 1), 0)
    MuellesD(p, Lista(RDM)) = MuellesD(p, Lista(RDM)) + 1
Next p

'Introduce la distribuidora escogida en la matriz solución
If Worksheets("Dias").Cells(10, 2).Value = "NO" Or Lista(RDM) = 2 Then

    For m = i To Application.RoundUp((Total(Lista(RDM)) + i - 1), 0)
        Select Case Dia
            Case 0
                Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Lunes"
            Case 1
                Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Martes"
            Case 2
                Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Miércoles"
            Case 3
                Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Jueves"
            Case 4
                Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Viernes"
            Case 5
                Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Sábado"
        End Select
    Next m

'Permite escribir la solución cuando son días festivos
Else

```

```

If Worksheets("Dias").Cells(Dia + 2, 3).Value = Empty Then
  For m = 1 To Application.RoundUp((Total(Lista(RDM)) + i - 1), 0)
    Select Case Dia
      Case 0
        Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Lunes"
      Case 1
        Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Martes"
      Case 2
        Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Miércoles"
      Case 3
        Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Jueves"
      Case 4
        Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Viernes"
      Case 5
        Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Sábado"
    End Select
  Next m
Else
  If Application.RoundUp((Total(Lista(RDM)) + i - 1), 0) <= (Inicio * 2) + 8 + Sumar Then
    For m = 1 To Application.RoundUp((Total(Lista(RDM)) + i - 1), 0)
      Select Case Dia
        Case 0
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Lunes"
        Case 1
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Martes"
        Case 2
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Miércoles"
        Case 3
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Jueves"
        Case 4
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Viernes"
        Case 5
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Sábado"
      End Select
    Next m
  Else
    For m = 1 To Application.RoundUp(((Llegada(Lista(RDM)) + Descargue(Lista(RDM))) * 2 + i - 1), 0)
      Select Case Dia
        Case 0
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Lunes"
        Case 1
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Martes"
        Case 2
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Miércoles"
        Case 3
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Jueves"
        Case 4
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Viernes"
        Case 5
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Sábado"
      End Select
    Next m
    For m = Application.RoundUp(((Llegada(Lista(RDM)) + Descargue(Lista(RDM))) * 2 + i), 0) To ((Fin * 2) +
      Select Case Dia
        Case 0
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " E-Lunes"
        Case 1
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " E-Martes"
        Case 2
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " E-Miércoles"
        Case 3
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " E-Jueves"
        Case 4
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " E-Viernes"
        Case 5
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " E-Sábado"
      End Select
    Next m
    For m = ((Fin * 2) + 5 + Sumar) To ((Fin * 2) + 4 + Sumar) + Application.RoundUp(((Retorno(Lista(RDM)) *
      Select Case Dia
        Case 0
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Lunes"
        Case 1
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Martes"
        Case 2
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Miércoles"
        Case 3
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Jueves"
        Case 4
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Viernes"
        Case 5
          Solucion(m, j) = Lista(RDM) & " Sábado"
      End Select
    Next m
  End If
End If
End If
End If
End If
'Iniciliza en cero el vector SumaP (número de muelles ocupados en planta)
For n = 1 To 370
  SumaP(n) = 0
Next n
'Contabiliza el número de muelles ocupados en planta
For q = 1 To Camiones
  For p = 1 To 370

```



```
        SumaP(n) = 0
    Next n

    'Contabiliza el número de muelles ocupados en planta
    For q = 1 To Camiones
        For p = 1 To 370
            SumaP(p) = SumaP(p) + MuellesP(p, q)
        Next p
    Next q

Next i

Next j

End Sub
```