

**DESARROLLO DE UN MODELO DE LOCALIZACIÓN DE CONTENEDORES PARA  
LA RECOLECCIÓN DE PILAS USADAS EN EL ÁREA METROPOLITANA PARA LA  
EMPRESA TRONEX S.A**

**JUANITA GALLEGO DÁVILA  
YURI ALEJANDRA VÁSQUEZ**

**UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS  
MEDELLÍN  
2012**

**DESARROLLO DE UN MODELO DE LOCALIZACIÓN DE CONTENEDORES PARA  
LA RECOLECCIÓN DE PILAS USADAS EN EL ÁREA METROPOLITANA PARA LA  
EMPRESA TRONEX S.A**

**JUANITA GALLEGO DÁVILA  
YURI ALEJANDRA VÁSQUEZ**

**Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero de Procesos**

**Asesor**

**Carlos Alberto Castro Zuluaga  
Docente Ingeniería de Producción**

**UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS**

**MEDELLÍN  
2012**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Firma del Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

---

Medellín, Abril de 2012

## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestros más sinceros agradecimientos a:

Dios por facilitarnos las cosas en el camino y por darnos la oportunidad de estudiar una maravillosa carrera profesional.

Mario César Vélez Gallego por ser un pilar fundamental en todo mi proceso de formación académica y por su enorme contribución a este trabajo.

Mis padres por darme apoyo, a mi familia por darme ánimo en los momentos difíciles.

Juan Carlos Marín y Esteban Jaramillo por sus acertadas observaciones.

Jairo Maya por su valioso aporte.

Carlos Castro por su asesoría y paciencia.

Juan Guillermo Villegas Ramírez por facilitarnos las cosas.

Javier Sánchez por enseñarnos cómo hacer las cosas de una manera más sencilla.

La empresa Tronex S.A., especialmente a Laura García Taborda quien nos dio la idea para desarrollar el problema tratado.

A la mejor compañera que pude encontrar en el ámbito académico y personal. Y a todos aquellos que nos preguntaban todos los días la fecha de la graduación.

Y finalmente a la Universidad EAFIT por abrirnos las puertas al mundo.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>11</b>
<b>2. OBJETIVO GENERAL</b> .....	<b>14</b>
<b>3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>15</b>
<b>4. MARCO REFERENCIAL</b> .....	<b>16</b>
4.1. <i>Logística Inversa</i> .....	16
4.1.1. Definiciones de logística inversa .....	16
4.1.2. Origen de la logística inversa .....	17
4.1.3. Elementos de un sistema de logística inversa .....	17
4.2. <i>Investigación de operaciones</i> . .....	19
4.2.1. Tipos De Modelos .....	20
4.2.1.1. Modelos prescriptivos o de optimización .....	20
4.2.1.2. Modelos estáticos y dinámicos .....	21
4.2.1.3. Modelos determinísticos y estocásticos.....	21
4.2.2. Modelos de Localización, Ruteo y Localización-Ruteo .....	21
4.2.2.1. Modelos de localización.....	21
4.2.2.2. Problemas de ruteo .....	23
4.2.2.3. Modelos de localización ruteo .....	23
4.2.3. Otras aplicaciones de los modelos en la Investigación de Operaciones .....	24
4.2.3.1. Teoría de colas .....	24
4.2.3.2. Teoría de juegos.....	24
4.2.3.3. Orienteering Problem y sus variaciones. ....	25
4.2.4. Métodos utilizados para la solución de modelos en la Investigación De Operaciones.....	29
4.2.4.1. Métodos exactos .....	29
4.2.4.2. Métodos de simulación .....	29
4.2.4.3. Métodos heurísticos.....	30
4.2.5. Metodología para diseñar un modelo matemático o algoritmo.....	30
i) Definición del problema .....	30
ii) Construcción del modelo .....	30

iii)	Solución del modelo .....	30
iv)	Validación del modelo.....	31
v)	Implementación del modelo.....	31
<b>5.</b>	<b>ANTECEDENTES.....</b>	<b>32</b>
5.1.	<i>Estudios y aplicaciones de logística inversa a nivel mundial .....</i>	<i>32</i>
5.2.	<i>Estudios de logística inversa enfocados a baterías .....</i>	<i>33</i>
5.3.	<i>Aplicación de las etapas de logística en la logística inversa: modelos de localización y ruteo .....</i>	<i>35</i>
5.4.	<i>Métodos utilizados para la solución de problemas TOP .....</i>	<i>39</i>
<b>6.</b>	<b>CASO DE ESTUDIO.....</b>	<b>42</b>
6.1.	<i>Descripción de la empresa .....</i>	<i>42</i>
6.1.1.	<i>Campaña RECOPILA®.....</i>	<i>42</i>
<b>7.</b>	<b>SOLUCIÓN PROPUESTA.....</b>	<b>46</b>
7.1.	<i>Planteamiento del problema .....</i>	<i>46</i>
7.2.	<i>Formulación del problema. ....</i>	<i>47</i>
7.3.	<i>Modelo Propuesto.....</i>	<i>48</i>
7.3.1	<i>Modelo exacto o matemático. ....</i>	<i>48</i>
7.3.2.	<i>Modelo heurístico.....</i>	<i>50</i>
7.3.2.1.	<i>Seudocódigo.....</i>	<i>52</i>
<b>8.</b>	<b>METODOLOGÍA UTILIZADA EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO.....</b>	<b>54</b>
8.1.	<i>Datos .....</i>	<i>54</i>
8.1.1.	<i>Porcentaje de llenado de los contenedores. ....</i>	<i>54</i>
8.1.2.	<i>Distancias entre nodos.....</i>	<i>55</i>
8.2.	<i>Herramientas utilizadas .....</i>	<i>55</i>
<b>9.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>56</b>
9.1.	<i>Resultados parciales obtenido con el método exacto.....</i>	<i>56</i>
9.2.	<i>Resultados obtenidos con el método heurístico. ....</i>	<i>57</i>
9.2.1.	<i>Escenario 1 .....</i>	<i>58</i>
9.2.2.	<i>Escenario 2 .....</i>	<i>60</i>
9.2.3.	<i>Escenario 3 .....</i>	<i>62</i>
9.3.	<i>Estimación de tiempos para rutas encontradas.....</i>	<i>67</i>

<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>68</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>76</b>
<b>ANEXO 1 .....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXO 2 .....</b>	<b>78</b>
<b>ANEXO 3 .....</b>	<b>79</b>
<b>ANEXO 4 .....</b>	<b>81</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>83</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrategias para diseño de una red de logística inversa (Tibben-Lembke, 1998)	18
Figura 2. Conjunto de puntos con un puntaje especificado. (Fuente: particular).	26
Figura 3. Contenedor de pilas usadas de la campaña RECOPILA®. (Fuente: Tronex)..	44
Figura 4. Super Carry utilizado para el transporte de las pilas usadas. (Fuente: Tronex).	44
Figura 5.a. Nodos candidatos para diseño de ruta. Fuente: diseño particular	48
Figura 5.b. Conjunto de nodos seleccionados y desarrollo de la ruta. (Fuente: diseño particular)	48
Figura 6. Inserción del nodo k en los nodos i y j. (Fuente: diseño particular)	51
Figura 7. Distribución de nodos en las rutas obtenidas para recolección de pilas usadas. Escenario 1.	59
Figura 8: Distribución de nodos en las rutas obtenidas para recolección de pilas usadas. Escenario 2.	61
Figura 9: Distribución de nodos en las rutas obtenidas para recolección de pilas usadas. Escenario 3.	64
Figura 10. Resultados obtenidos para el escenario 1.	81
Figura 11. Resultados obtenidos para el escenario 2.	81
Figura 12. Resultados obtenidos para el escenario 3	82

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Toneladas de pilas que debe recolectar la empresa Tronex S.A en su campaña RECOPILA® desde el año 2012 hasta el 2022. (Fuente propia). .....	43
Gráfica 2. Número de contenedores totales a instalar en cada escenario .....	66
Gráfica 3. Distancia total recorrida por escenarios .....	66
Gráfica 4. Cantidades de pilas totales recolectadas en cada escenario. ....	66

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Porcentaje de llenado en los puntos candidatos para la instalación de contenedores de pilas usadas .....	54
Tabla 2: Resultados consolidados obtenidos con el método exacto. Escenario 1. ....	56
Tabla 3: Resultados consolidados obtenidos con el método exacto. Escenario 1. ....	57
Tabla 4. Resultados consolidados obtenidos con el método heurístico para el escenario 1. ....	58
Tabla 5. Resumen de resultados obtenidos por el modelo heurístico para el escenario 1. ....	60
Tabla 6. Resultados obtenidos por el modelo heurístico para el escenario 2. ....	60
Tabla 7. Resumen de resultados obtenidos por el modelo heurístico para escenario 2. ....	62
Tabla 8. Resultados obtenidos por el modelo heurístico para el escenario 3. ....	63
Tabla 9. Resumen de resultados obtenidos por el modelo heurístico para escenario 3. ....	65
Tabla 10. Tiempo total estimado de recorrido para los escenarios 1, 2 y 3. ....	67
Tabla 11. Resultados de tiempos computacionales obtenidos en otros estudios que resuelven el problema TOP mediante metodologías heurísticas. (Souffriau, <i>et al</i> , 2011).....	69
Tabla 12: Listado y clasificación de puntos candidatos para ubicación de contenedores de pilas usadas .....	77
Tabla 13: Coordenadas geográficas de cada punto candidato para la instalación de contenedores de pilas usadas, utilizadas para crear la matriz de distancias entre todos los nodos.....	78
Tabla 14: Resultados obtenidos por el método exacto para las rutas 1 y 2. Escenario 1.....	79
Tabla 15: Resultados obtenidos por el método exacto para las rutas 3 y 4. Escenario 1.....	79
Tabla 16: Resultados obtenidos por el método exacto para las rutas 5 y 6. Escenario 1.....	79
Tabla 17: Resultados obtenidos por el método exacto para las rutas 7. Escenario 1.....	80

## 1. INTRODUCCIÓN

Los programas de posconsumo surgen a partir de la necesidad de tratar los componentes de diferentes productos al final de su vida útil. En el caso de las pilas se han implementado en muchos países programas para su recolección, transporte y tratamiento final que se debe llevar a cabo para cumplir legislaciones ambientales y/o gubernamentales. La importancia de estos programas de posconsumo de pilas en todo el mundo han tenido como objetivo principal la disminución de efectos adversos al medio ambiente y a las personas, siendo una de las principales responsabilidades de las empresas, la adecuada disposición final de los productos recolectados al final de su vida útil, esto debido a que las pilas son consideradas residuos potencialmente peligrosos cuando están compuestos por metales pesados como Mercurio, Níquel, Cadmio y Plomo (Romano, *et al*, 2008).

Además de los programas de posconsumo existen otras fuentes generadoras de residuos de pilas que surgen de las actividades cotidianas de cualquier empresa productora y/o comercializadora de las mismas; tales como devoluciones, obsolescencia de producto, rechazos en el área de producción etc.

Lo mencionado anteriormente da como resultado un flujo de material cuyo manejo se puede abarcar desde el punto de vista de la logística inversa área de la ingeniería que permite crear sistemas de recolección económicamente viables y ambientalmente sostenibles mediante la planeación de puntos de recolección y rutas adecuadas.

Se estima que los costos de la logística directa corresponden a un 25% y ocupan una segunda posición detrás de los costos de compra que constituyen aproximadamente de un 50 a 60% de las ventas para una empresa manufacturera promedio (Ballou, 2004). Por su parte, los costos de logística inversa son difíciles de determinar especialmente porque la mayoría de las empresas no los tienen estimados; sin embargo se ha encontrado que en algunas empresas alcanza hasta el 4% de los costos logísticos totales (Roger & Tibben-Lemke, 1998).

Es por esto que es de vital importancia implementar un programa de logística inversa

adecuado para que no genere un impacto negativo en los costos totales de los programas de posconsumo y así las empresas puedan mantener en el tiempo dichos programas y se pueda garantizar una rentabilidad de los mismos. Teniendo en cuenta que las regulaciones del gobierno respecto a planes de posconsumo determinan que las empresas deben asumir el 100% de los costos del programa y en ningún momento se debe cargar el mismo al consumidor. Además, como consecuencia del incumplimiento de las metas de recolección dispuestas por el gobierno, las empresas pueden verse afectadas por el cobro de multas que pueden llevar al cierre de las mismas.

Una de las decisiones principales en el diseño de una cadena de logística inversa se centra en la ubicación de puntos de recolección del producto al final de su vida útil, esta se constituye como una variable estratégica para lograr un alto flujo de de residuo y con ello lograr los objetivos que se plantean las empresas en lo relacionado con el cumplimiento de los requerimientos legales y además se relaciona directamente con los costos totales de la campaña. La ubicación de puntos de recolección de residuos se ha resuelto a través de modelos de localización y modelos de localización-ruteo, que general plantean y desarrollan modelos matemáticos que permiten predecir bajo ciertas condiciones el comportamiento de algunos programas de posconsumo, haciendo que se tenga información previa antes de su implementación y por lo tanto dicha opción de convierte en una alternativa para la toma de decisiones al interior de las empresas, evitando sobrecostos en los programas.

Para el caso particular de estudio se tiene el problema de Tronex S.A, una empresa colombiana ubicada en Medellín cuya actividad económica se centra en la fabricación de pilas Zinc-Carbón y la comercialización de pilas de todo tipo de electroquímica: alcalinas, recargables, pilas de moneda y pilas de zinc-aire entre otras. Desde el año 2011 dicha empresa ha comenzado a implementar un programa de posconsumo de pilas primarias y secundarias en Antioquia, con miras a extender dicho programa a las principales ciudades del país, con el fin de cumplir las exigencias gubernamentales planteadas en la Resolución 1297 de 2010 *“Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Residuos de Pilas y/o Acumuladores y se adoptan*

*otras disposiciones”* (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Una de las etapas del programa de posconsumo de Tronex es la recolección de pilas electroquímicas usadas, a través de vehículos propios o de terceros autorizados para este propósito en cada uno de los contenedores instalados en Medellín y diferentes municipios del departamento de Antioquia. Dichos contenedores tienen una capacidad de almacenamiento entre 80 y 120Kg y se tiene estimado para finales de 2012 deben estar instalados 100 contenedores en Antioquia. Según la Resolución del Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, la meta de recolección para el caso de Tronex S.A es de un 4% de las unidades puestas en el mercado en el 2012 hasta llegar a un 49% en el 2022, con un crecimiento lineal anual; lo que corresponde a 35 toneladas anuales de pilas primarias y secundarias en el 2012 y de aproximadamente 435 toneladas de pilas para el año 2022 (García & Gómez, 2011). Estas cifras hacen que el tema relacionado con la ubicación de contenedores y la recolección de las mismas sea de completa relevancia para la empresa en los próximos 10 años.

Para el desarrollo del modelo de localización se cuenta inicialmente con los puntos de recolección definidos por la empresa, los cuales fueron seleccionados basados en criterios de afluencia de personas y presencia de la marca; estos fueron clasificados en las siguientes categorías: sector público, sector institucional y sector privado. El interés sobre el cual radica este trabajo y el aporte del mismo a la empresa, se centra en la determinación de los puntos de ubicación de los contenedores de recolección de pilas definidos por la empresa mediante el desarrollo de un modelo de localización, con el fin de lograr la meta de recolección que se debe cumplir, reduciendo los costos del programa. El modelo desarrollado incluye los puntos y contenedores para el Área Metropolitana, pero éste puede ser modificado para ser aplicado a otros municipios o departamentos que abarque el programa de posconsumo de la empresa Tronex. S,A.

En el caso desarrollado no se tienen en cuenta variables como: servicio al cliente, mercadeo, probabilidad de que las personas lleven las pilas a los puntos candidatos, entre otras variables de las cuales depende el éxito del programa.

## **2. OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un modelo de localización para la empresa Tronex S.A que permita apoyar y soportar las decisiones sobre la ubicación de contenedores de pilas usadas en el Área Metropolitana.

### **3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar una búsqueda de información en lo relacionado con los problemas de localización con el fin de identificar los modelos que más se ajusten a la solución del problema planteado.
- Desarrollar un modelo de localización para definir los puntos donde se deben ubicar una cantidad de contenedores de pilas usadas en el Área Metropolitana para cumplir una meta específica de recolección.
- Implementar el modelo de localización en una herramienta computacional adecuada, que apoye el proceso de toma de decisiones de ubicación de contenedores para la empresa Tronex. S.A.

## 4. MARCO REFERENCIAL

### 4.1. Logística Inversa

“El manejo de productos al final de su vida útil es un tema que recientemente ha cobrado prioridad en diferentes sectores a nivel mundial. Tradicionalmente las cadenas de suministro habían sido consideradas como estructuras lineales, las cuales tenían como objetivo la distribución de bienes de productores a proveedores, mayoristas, vendedores, y terminar finalmente con los consumidores. Sin embargo, las complejas relaciones comerciales entre diferentes industrias que existen en la actualidad, han demostrado la existencia de flujos inversos de materiales. Estos flujos se dan durante la producción, distribución y el consumo de diferentes bienes y por esta razón es que el manejo de estos flujos de materiales se ha convertido en objeto de una nueva área de estudio, la logística inversa.” (Cruz-Rivera & Ertel, 2009)

#### 4.1.1. Definiciones de logística inversa

- “El proceso de planeación, implementación y control del flujo inverso de materiales, inventario en proceso, empaçado y productos terminados, proveniente de la manufactura, distribución o punto de consumo, al punto de recuperación o punto adecuado de disposición” , Red Europea de Investigación en Logística Inversa (REVLOG por sus siglas en inglés) (REVLOG, 1998)
- “Término comúnmente usado para referirse al papel de la logística en el reciclaje, disposición de residuos y manejo de materiales peligrosos; una amplia perspectiva que incluye todo lo relacionado con las actividades logísticas llevadas a cabo en la reducción de recursos, reciclaje, sustitución, reutilización de materiales y disposición” (The Council of Logistics Management (CLM), 1998)
- “El proceso de planear, implementar y controlar la eficiencia, costo efectivo del flujo de materias primas, inventario en proceso, bienes finales e información

relacionada desde el punto de consumo al punto de origen con el propósito de recuperar valor o disponerlo adecuadamente” (Tibben-Lembke & Rogers, 1998)

#### **4.1.2. Origen de la logística inversa**

La logística inversa surge debido a que se presenta un flujo de material por diferentes procesos como:

- Devoluciones de fabricación: Aquellos componentes o productos que son recuperados en la fase de producción tales como excedentes
- Devoluciones de distribución: Las que son iniciadas por uno de los actores de la cadena de suministro durante la distribución luego de que el producto ha sido fabricado (incluyendo el fabricante).
- Devoluciones usuario/cliente: Se dan como resultado de un uso o consumo, por razones tales como garantías de reembolso (cambio de producto por no satisfacer expectativas) y que por ende requieren de disposición final. (De Brito & Dekker, 2002)
- Programas posconsumo: regulaciones gubernamentales exigen la disposición de productos al final de su vida útil, como ejemplo existen regulaciones para la recolección de medicamentos, herbicidas, pilas, y baterías.

#### **4.1.3. Elementos de un sistema de logística inversa**

Un sistema de logística inversa consiste en una serie de actividades como:

- La recolección: se refiere a las actividades de compra, transporte y almacenaje en el lugar de disposición, de productos usados, desechos o devueltos.
- Inspección/Separación: Son las operaciones que determinan si un producto es reutilizable y de qué manera, clasificando los productos de acuerdo a su posible disposición.
- Reprocesado: transformación de los productos recolectados en productos útiles o en sus materias primas componentes

- Eliminación: Proceso (incluyendo el transporte) que se realiza a los materiales que no pueden ser reutilizados
- Redistribución: se refiere a la gestión y transporte de productos reutilizables a mercados y usuarios. Abarca actividades como la venta, el transporte y el almacenaje. (Ortega, 2004)

Por lo tanto es importante, para la planeación de una red de logística inversa, definir estrategias para diseñar y definir algunos de los procesos anteriormente mencionados, tal como se muestra en la Figura 1.

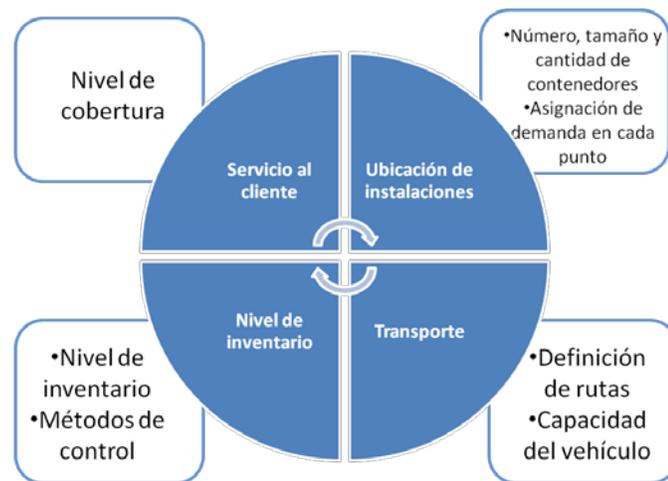


Figura 1. Estrategias para diseño de una red de logística inversa (Tibben-Lembke, 1998)

Como se puede observar en la Figura 1, un componente principal para definir la red de logística inversa es la localización de contenedores y definición de las rutas. Esto influye directamente en los costos del programa de posconsumo y por lo tanto constituyen temas críticos para la toma de decisiones en las empresas que deben implementar este tipo de programas.

Algunas herramientas como los modelos matemáticos han sido utilizadas para simular diferentes escenarios y evaluar dónde se deben ubicar contenedores y cuáles deben ser las rutas de recolección de los mismos, con el objetivo de minimizar costos y obtener buenos resultados. Dichos modelos surgen de una rama de las matemáticas llamada

investigación de operaciones que consiste en modelos matemáticos con objeto de realizar un proceso de toma de decisiones.

#### **4.2. Investigación de operaciones.**

La Investigación Operativa (IO) es la aplicación del método científico por equipos interdisciplinarios a problemas que comprenden el control y gestión de sistemas organizados (hombre- máquina); con el objetivo de encontrar soluciones que sirvan mejor a los propósitos del sistema u organización como un todo, enmarcados en procesos de toma de decisiones (Buffa, *et al*, 1978). Esta se aplica a problemas que se refieren a la conducción y coordinación de operaciones (o actividades) dentro de una organización. La naturaleza de la organización es esencialmente inmaterial y, de hecho, la investigación de operaciones se ha aplicado de manera extensa en áreas tan diversas como la manufactura, el transporte, la construcción, las telecomunicaciones, la planificación financiera, el cuidado de la salud, la milicia y los servicios públicos, por nombrar sólo unas cuantas. Así, la gama de aplicaciones es extraordinariamente amplia. (Buffa, *et al*, 1978).

En general, el proceso comienza por 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 lo suficientemente precisa de las características esenciales de la situación como para que las conclusiones (soluciones) obtenidas sean válidas también para el problema real. Después, se llevan a cabo los experimentos adecuados para probar esta hipótesis, modificarla si es necesario y eventualmente verificarla con frecuencia este paso se conoce como *validación del modelo* (Hillier & Lieberman, 1997). Los modelos de IO se pueden representar con ecuaciones las que, aunque puedan resultar complejas, tienen una estructura muy sencilla, como en el siguiente caso:

$$U = f(X_i, Y_i)$$

Donde:

$U$  es la utilidad o valor de ejecución del sistema

$X_i$  son las variables no controlables, o dependientes, cuyos valores dependerán de las interrelaciones y valores de las variables independientes.

$Y_i$  son las variables controlables, o independientes, con valores dados.

$f$  es la función en  $X_i$  en  $Y_i$ .

Una vez obtenido el modelo, éste puede usarse para encontrar aproximadamente los valores óptimos de las variables no controlables y aquellas que producen la mejor ejecución del sistema, es decir, la solución al problema (Prawda, 2004).

#### **4.2.1. Tipos De Modelos**

Existen diferentes modelos desarrollados para la solución de problemas en la Investigación de Operaciones, de modo muy general se presentan a continuación algunos de estos.

##### **4.2.1.1. Modelos prescriptivos o de optimización**

Antes de dar una definición es importante definir los elementos presenten en este tipo de modelo:

- **Función objetivo:** es la función que se quiere maximizar o minimizar y que describe el objetivo principal al que se quiere llegar.
- **Variables de decisión:** son las variables que se pueden controlar e influyen en el desempeño del sistema, está ligada a las variables presenten en la función objetivo y que tienen valores o rangos de valores para cada solución obtenida.
- **Restricciones:** En la mayoría de los casos solo son posibles ciertos valores de las variables de decisión, estas limitaciones son descritas en un modelo mediante restricciones.

Ahora, un modelo de este tipo trata de encontrar valores, entre el conjunto de todos los valores para la variable de decisión, que optimicen (maximicen o minimicen) una función objetivo que satisfaga las restricciones dadas (Winston, 2005) mediante el uso de teorías de cálculo diferencial.

#### **4.2.1.2. Modelos estáticos y dinámicos**

Uno modelo estático es uno en el cual las variables de decisión no requieren sucesiones de decisiones para períodos múltiples. Un modelo dinámico es uno en el cual las variables de decisión sí requieren sucesiones de decisiones para periodos múltiples.

#### **4.2.1.3. Modelos determinísticos y estocásticos**

Se dice que un modelo es determinístico si conocidas las variables de respuesta, el resultado es totalmente previsible. Este presenta un único resultado para un conjunto de datos.

Un modelo estocástico o aleatorio proporciona un conjunto de posibles resultados ponderados por sus probabilidades. Este tipo de modelos son esquemas abstractos capaces de representar aquellos fenómenos cuya evolución está sometida a leyes aleatorias y contienen probabilidades de suceso como parte integral del modelo (González, 2003).

### **4.2.2. Modelos de Localización, Ruteo y Localización-Ruteo**

En muchos sistemas de distribución, la ubicación de las instalaciones y el ruteo de los vehículos de dichas instalaciones son independientes. Aunque esta independencia es reconocida los intentos de integrar esas dos decisiones ha sido limitada. Se describen a continuación este tipo de modelos.

#### **4.2.2.1. Modelos de localización**

La Localización de instalaciones investiga donde disponer físicamente un conjunto de instalaciones, con el objetivo de satisfacer las demandas de un grupo de clientes. Esta ubicación está sujeta a una suma de restricciones como capacidad,

tamaño, espacio físico, distancia etc. para seleccionar un conjunto óptimo de instalaciones en ciertos puntos candidatos, con el fin de optimizar alguna función objetivo. Se debe entender el término instalación en un amplio sentido, ya que puede incluir entidades como hospitales, industrias, colegios, puertos, centros de distribución y centros de acopio (contenedores) entre otros, etc. En el caso de nuestro estudio se basa en la ubicación de contenedores para la recolección de una cantidad específica de pilas usadas.

Los modelos de Localización son aplicados a casos específicos, esto es, su estructura (objetivos, restricciones y variables) depende de cada caso en estudio. Esto implica que no existe un modelo genérico que sea apropiado para todos los problemas y que por lo tanto modelos con distintos objetivos, pueden provocar diferentes soluciones para el mismo caso en estudio, como por ejemplo:

- ✓ P-Centro: el problema p-centro pertenece a los modelos de máxima distancia. El objetivo de este modelo es minimizar la máxima distancia entre un nodo de demanda y su instalación más cercana, dado que se tiene un número predeterminado de ubicaciones por instalar.
- ✓ P-Mediana: a diferencia del modelo anterior el modelo p-mediana encuentra la ubicación de p instalaciones con el fin de minimizar el factor demanda-distancia total entre los nodos de demanda y la instalación la cual son asignados, es por esto, que este modelo pertenece a los modelos de distancia total o promedio.
- ✓ Modelo de localización para una planta y almacén multi producto: El problema es Localizar un conjunto de plantas y almacenes de un conjunto de sitios candidatos, además de solucionar la asignación de clientes a los almacenes y la asignación de almacenes a las plantas. El objetivo de este modelo es minimizar los costos fijos de establecer y operar plantas y almacenes, además de minimizar los costos de transporte desde las plantas hacia los almacenes y desde estos hacia los clientes. Tanto las plantas como los almacenes poseen cierta capacidad. (Araneda & Moraga, 2005)

#### 4.2.2.2 Problemas de ruteo

Los problemas de ruteo o VPR (por sus siglas en inglés Vehicle Routing Problem) son unos de los problemas más desafiantes en cuanto a la optimización para el diseño de conjuntos de rutas que sirvan a una serie dada de clientes con una flota de vehículos. Un VPR en un sentido amplio es un nombre genérico dado a un tipo de problemas en los que un conjunto de rutas para una flota de vehículos se basa en uno o varios depósitos los cuales deben ser determinados por el número de ciudades o clientes localizados geográficamente. Se pueden encontrar diferentes subclases de VPR:

- ✓ VPR de capacidad limitada o (CVPR: Capacitated Vehicle Routing Problem) es el más simple. En este caso los vehículos son idénticos y la capacidad de los mismos define la restricción del problema.
- ✓ VPR condistancia restrictiva o DCVPR (Distance-Constrained Vehicle Routing Problem) que difiere del CVPR en que cada ruta presenta una longitud limitada en vez de considerar la capacidad como restricción.
- ✓ VPR con “tiempo ventana” o VPRTW (VPR with time Windows) representa que cada cliente  $i$  es ocupado en el tiempo  $\{a_i, b_i\}$  llamado “tiempo ventana”. En este caso cada punto tiene asociado un tiempo límite de visita o una restricción de horario llamado “tiempo ventana”.
- ✓ VPR con retorno (VPR with Backhauls: VPRB) El problema VPR con Backhauls (VPRB) es la extensión de la VPR en el que el conjunto de clientes  $V \setminus \{v_0\}$  se divide en dos subconjuntos donde el primero contiene clientes atendidos con una cantidad definida de productos a entregar y el segundo subconjunto incluye a los clientes donde una cantidad dada de productos deben ser recogidos. (Polat, 2008).

#### 4.2.2.3. Modelos de localización ruteo

Los problemas de localización-ruteo combinan los 3 componentes del diseño de la cadena de suministro: ubicación de la instalación, asignación de clientes a las instalaciones y ruteo de vehículos. Muchas instalaciones como las subestaciones de recolección de residuos sólidos y centros de distribución suministran funciones

de recolección y distribución en los cuales la demanda es dada por rutas de recolección y entrega. En estos casos la eficacia del esquema de diseño de la instalación depende no solo de las distancias de las demandas individuales sino también de la eficiencia de las rutas vehiculares necesarias para servir las múltiples demandas. Acá se tienen en cuenta 3 tipos de decisiones: dónde ubicar las instalaciones, cómo asignar las instalaciones a los clientes y cómo enrutar los vehículos a los clientes. (Drezner & Hamacher, 2001).

#### **4.2.3. Otras aplicaciones de los modelos en la Investigación de Operaciones**

Existen numerosas aplicaciones de la investigación de operaciones en la toma de decisiones al interior de las empresas, en este caso se explicarán algunos modelos utilizados para solucionar problemas logísticos y especialmente se hará la descripción del modelo que mejor representa el problema de ubicación de instalaciones que se trata en el presente trabajo:

##### **4.2.3.1. Teoría de colas**

La teoría de colas estudia el comportamiento de los sistemas de atención sujetos a diferentes condiciones de funcionamiento, en que los clientes a veces deben esperar por el servicio. Su aplicabilidad es muy amplia, pues cuantifica el dilema de muchas empresas e instituciones entre la eficacia (dar un buen servicio) y la eficiencia (mantener bajos los costos). Sin embargo, los modelos no siempre tienen una interpretación directa, haciendo que pierdan utilidad práctica (Singer, *et al*, 2008).

##### **4.2.3.2. Teoría de juegos**

Estudia situaciones de conflicto y cooperación a las que denominan juegos, en las que interactúan individuos racionales, analizando comportamientos y resultados que son de esperar, bien mediante decisiones individuales (juegos no cooperativos), o mediante acuerdos entre los participantes (juegos cooperativos) (Zoroa, 1958).

Se convierte en un área estudiada en la investigación de operaciones porque la característica los juegos es tomar decisiones que más convenga para ganar, teniendo en cuenta cumplir las reglas del juego y sabiendo que los demás jugadores también influyen en los resultados con sus decisiones. Uno de los modelos que se presentan de este tipo es el Travel Salesman Problem TSP donde el objetivo es encontrar una ruta para un agente viajero quien empieza en un punto inicial y debe visitar un conjunto de ciudades donde están sus clientes; además al final debe regresar al punto inicial de tal forma que la distancia recorrida sea mínima y se visite cada ciudad una sola vez (Gutin & Punnen, 2002).

#### **4.2.3.3. Orienteering Problem y sus variaciones.**

El OP (Orienteering Problem) se puede ubicar dentro de los problemas TSP ya que, dado un conjunto de clientes potenciales con beneficios asociados y considerando las distancias entre pares éstos, se tiene como objetivo encontrar el subconjunto de aquellos para los cuales la ganancia recolectada sea máxima dada una restricción de longitud del tour. (Archetti, et a, 2007). Este problema se describe a continuación:

El Orienteering Problem es un deporte al aire libre que se juega usualmente en un bosque o en un área montañosa. En este los competidores parten en un punto específico y de allí deben tratar de visitar la mayor cantidad de puntos posibles en un tiempo límite y deben llegar al punto final. Cada punto está asociado a un puntaje, por lo tanto el objetivo principal del Orienteering Problem es maximizar el puntaje total. El competidor que llegue después del tiempo límite al punto final es descalificado y el competidor con un mayor puntaje se declara el ganador. Debido a que el tiempo es limitado, un competidor no puede pasar por todos los puntos y este debe seleccionar la serie de puntos donde maximice el puntaje total. Esta competencia es la conocida como El Single-Orienteering Problem (OP) (Chao, *et al*, 1996).

En resumen, en el OP un conjunto  $N$  de  $i$  vértices es dado, cada uno asociado a un puntaje  $S_i$ . El punto de partida (vértice 1) y el punto final (Vértice  $N$ ) (ver Figura 2) se especifican desde el inicio. El tiempo  $t_{ij}$  necesario para viajar de un vértice  $i$  hasta un vértice  $j$  es conocido para todos los vértices. No todos los vértices pueden ser visitados ya que se tiene un tiempo límite  $T_{max}$ . El objetivo del OP es determinar una ruta, limitada por  $T_{max}$  donde se visiten algunos vértices con miras a maximizar el puntaje total (Souffriau, *et al*, 2011).

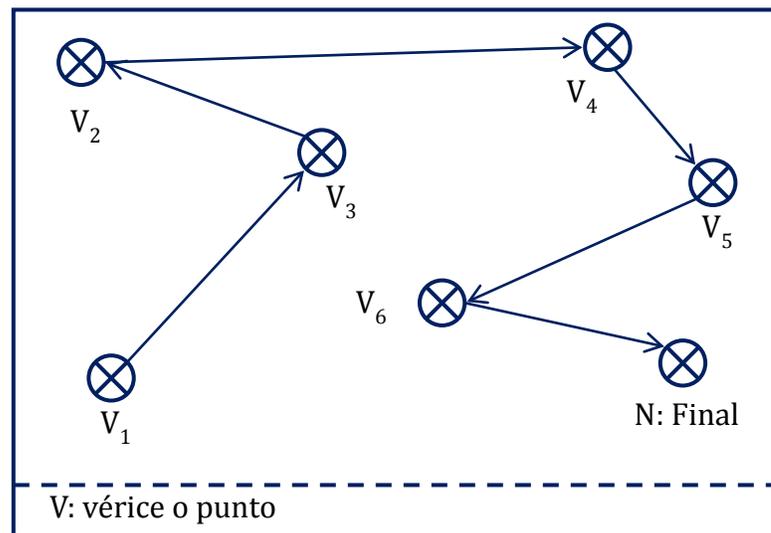


Figura 2. Conjunto de puntos con un puntaje especificado. (Fuente: diseño propio).

Una variación existente de este juego es el Team Orienteering que consiste en conformar grupos que varían entre 2 a 4 personas que comienzan el juego en un mismo punto de partida. Cada miembro del grupo debe tratar de visitar la mayor cantidad de puntos posibles en un tiempo límite y luego retornar al punto final. Una vez un miembro del equipo visite un punto este queda deshabilitado para los demás miembros de su equipo, por esto cada miembro del equipo debe seleccionar un conjunto de puntos a visitar con el objetivo de cumplir el tiempo límite, maximizar el puntaje total y evitar visitar un mismo punto. Este juego es conocido como el Team Orienteering Problem (TOP) (Chao, *et al*, 1996).

El TOP es un OP donde el objetivo es determinar  $P$  rutas, cada una limitada por un  $T_{max}$ , y se debe maximizar el puntaje total, éste puede formularse como un

problema integrado con las siguientes variables de decisión (Souffriau, et al, 2011):

$$X_{ijp} \begin{cases} 1 & \text{si, para una ruta } k, \text{ una visita al v\u00e9rtice } i \text{ es seguida por una visita al v\u00e9rtice } j \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

$$Y_{ip} = \begin{cases} 1 & \text{si el v\u00e9rtice } i \text{ es visitado en una ruta } j \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

$U_{ip}$  = posici\u00f3n del v\u00e9rtice  $i$  en la ruta  $p$

Adem\u00e1s se tiene la siguiente funci\u00f3n objetivo:

$$Max \sum_{p=1}^P \sum_{i=2}^{N-1} S_i y_{ip}$$

Y se tienen las siguientes restricciones:

- i. Esta restricci\u00f3n garantiza que cada ruta comience en el v\u00e9rtice 1 y termine en el v\u00e9rtice N.

$$\sum_{p=1}^P \sum_{j=2}^N X_{1jp} = \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^{N-1} X_{iNp} = P$$

- ii. Esta restricci\u00f3n asegura que todo v\u00e9rtice es visitado al menos una vez.

$$\sum_{p=1}^P y_{kp} \leq 1; \forall k = 2, \dots, N - 1$$

- iii. Esta restricci\u00f3n garantiza la conectividad de cada ruta

$$\sum_{i=1}^{N-1} x_{ikp} = \sum_{j=2}^N x_{kjp} = y_{kp}; \forall k = 2, \dots, N - 1; \forall p = 1, \dots, P,$$

- iv. Esta constante asegura el l\u00edmite de tiempo de cada ruta

$$\sum_{i=1}^{N-1} x_{ikp} \sum_{j=2}^N t_{ij} x_{ijp} \leq T_{max}; \forall p = 1, \dots, P,$$

v. Estas constantes son necesarias para prevenir rutas superpuestas

$$2 \leq U_{ip} \leq N; \forall i = 2, \dots, N; \forall p = 1, \dots, P$$

$$U_{ip} - U_{jp} + 1 \leq (N - 1)(1 - x_{ijp}); \forall i, j = 2, \dots, N;$$

$$\forall p = 1, \dots, P,$$

$$x_{ijp} y_{ip} \in \{0, 1\}; \forall i, j = 1, \dots, N; \forall p = 1, \dots, P$$

Otras variaciones del OP se describen a continuación:

- ✓ **Orienteering Problem y Team Orienteering Problem with time window:** en esta variación cada visita a un punto está asociado con un tiempo denominado “tiempo ventana”, en el cual la visita a cada punto solo puede ser realizada en un tiempo determinado (Tricoire, *et al*, 2010). El objetivo principal sigue siendo recolectar la mayor cantidad de puntaje pero con una restricción adicional que consiste en el tiempo de inicio del servicio de acuerdo al “tiempo ventana”. Un ejemplo de esta situación se presenta en planear itinerarios de turistas donde se debe tomar en cuenta la hora en la que abren las atracciones o sitios a visitar.
- ✓ **Resource Constrained Travel Salesman Problem (RCTSP):** en este caso un conjunto determinado de puntos o vértices es dado, y viajar de un vértice a otro incurre en un costo por el consumo de un recurso. El objetivo entonces, es encontrar una ruta de tal manera que se tenga un costo mínimo; además en este caso el consumo de recurso es constante dada y se conoce su valor. Este problema puede convertirse en un OP si no todos los puntos deben ser visitados, el costo de viajar entre un vértice y otro es reemplazado por un vértice con puntaje negativo y el costo de viajar es considerado un consumo de recursos.

#### **4.2.4. Métodos utilizados para la solución de modelos en la Investigación De Operaciones.**

##### **4.2.4.1. Métodos exactos**

Se refieren a los procedimientos con la capacidad de garantizar una solución matemática óptima al problema de ubicación, o al menos una solución de precisión conocida. Este método puede causar largos tiempos de ejecución de cómputo, amplios requerimientos de memoria y una definición comprometida del problema cuando se aplica a problemas prácticos (Ballou, 2004).

Es el caso de la Programación Lineal, en la cual se pretende encontrar mediante el uso de ecuaciones lineales un programa óptimo de actividades interdependientes a realizar, tomando en consideración el límite de recursos disponibles para efectuarlos. Esta consiste en la construcción, solución y análisis del modelo lineal de un problema dado y es utilizada normalmente para resolver problemas de asignación de recursos. Por el contrario, a los modelos cuya función objetivo y restricciones son de carácter no lineal se resuelve mediante la programación No lineal.

##### **4.2.4.2. Métodos de simulación**

Un modelo de simulación de la ubicación de instalaciones consiste es una representación matemática de un sistema lógico mediante expresiones algebraicas o lógicas que pueden manipularse con la ayuda de una computadora. Dada una representación realista de las relaciones económicas y estadísticas, se utiliza el modelo de simulación para evaluar el impacto de diversas configuraciones. Un modelo de simulación intenta encontrar la mejor red mediante la aplicación repetida del modelo, dadas diferentes opciones de almacenamiento y patrones de asignación (Ballou, 2004).

#### **4.2.4.3. Métodos heurísticos**

La heurística se refiere a todos los principios o conceptos que contribuyen a reducir el tiempo promedio de búsqueda de una solución. En ocasiones se denominan reglas empíricas que guían resolución de problemas. Al aplicarla a los problemas de ubicación, tales reglas empíricas, que son consecuencia de un entendimiento de los procesos de solución, permiten que se obtengan soluciones adecuadas en forma rápida a partir de numerosas alternativas (Ballou, 2004).

#### **4.2.5. Metodología para diseñar un modelo matemático o algoritmo.**

No existe una metodología específica para desarrollar un modelo matemático o algoritmo que represente un sistema, sin embargo existen algunos pasos que se llevan a cabo a nivel general en la investigación de operaciones, se describe una serie de pasos planteados por Hamndy (2004):

**i) Definición del problema:** Implica definir el alcance del problema que se investiga. El objetivo principal es identificar la descripción de las alternativas de decisión (definición de variables de decisión), la determinación del objeto del estudio (definición de función objetivo) y la especificación de las limitaciones bajo las cuales funciona el sistema (definición de restricciones).

**ii) Construcción del modelo:** Implica traducir la definición del problema a relaciones matemáticas. Si el modelo que resulta se ajusta a uno de los modelos matemáticos normales, como lo es la programación lineal, se puede llegar a una solución empleando los algoritmos disponibles. Si las relaciones matemáticas son muy complejas se pueden utilizar métodos heurísticos o se puede recurrir a la simulación. En algunos casos se podrá usar una combinación de los anteriores para resolver el problema de decisiones.

**iii) Solución del modelo:** Se utilizan algoritmos bien definidos que describan el modelo matemático desarrollado. Un modelo importante de la fase de solución del

modelo es el análisis de sensibilidad que tiene que ver con la obtención de información adicional sobre el comportamiento de la solución óptima cuando el modelo sufre ciertos cambios de parámetros.

**iv) Validación del modelo:** en esta parte se comprueba si el modelo propuesto hace lo que se quiere que haga, se verifica si el modelo predice de forma adecuada el comportamiento del sistema que se estudia. Una forma de hacerlo es realizar la comparación con datos históricos, si el modelo propuesto representa un sistema nuevo, no existente se podrá recurrir a una simulación, como herramienta independiente para verificar los resultados del modelo matemático.

**v) Implementación del modelo:** es la traducción de los resultados a las instrucciones de operación, emitidas en forma comprensible para las personas que administrarán al sistema estudiado.

En el presente trabajo se pretende plantear el problema tratado como un Team Orienteering Problem con miras a facilitar el proceso de planeación de la cadena de logística inversa y en la toma de decisiones en lo que concierne al programa de posconsumo RECOPILA® de la empresa Tronex S.A. Además se tiene como objetivo evaluar cuáles de los modelos descritos anteriormente se puede utilizar para resolver dicho problema.

## 5. ANTECEDENTES

### 5.1. Estudios y aplicaciones de logística inversa a nivel mundial

Las actividades de recuperación y reutilización de materiales han sido practicadas desde la antigüedad debido a la escasez de recursos, sin embargo a inicios de los 70's el Club de Roma auguró una crisis de la humanidad alrededor del 2050 llamando la atención sobre la sostenibilidad como la única solución. Con esto la conciencia a las situaciones ambientales siguientes condujo a la familiaridad de términos como reciclaje, reutilización, reducción de recursos, responsabilidad ambiental y fabricación de productos verdes (De Brito & Dekker, 2002). Debido a esto, a mediados de los 90's, especialmente en Europa, se iniciaron las reglamentaciones para disposición adecuada de los materiales, tales como las realizadas por la ELV europea (por sus siglas en inglés, End-of-life Vehicles Directive), la WEEE (por sus siglas en inglés: Waste Electrical and Electronic Equipment Directive) y la RoHS (por sus siglas en inglés: Restriction of Use of certain Hazardous Substances Directive).

Asimismo, los rellenos sanitarios de EEUU empezaron a ser más costosos y el cruce de materiales entre países más restrictivo, por lo que también se crearon instituciones tales como la ELV estadounidense donde se tiene proyectado para el 2015 que el 95% del peso de un vehículo sea reusado o reciclado, un 10% de energía recuperada y un máximo de 5% puede ser dispuesto como residuo (Kumar & Putnam, 2008)

Numerosos estudios e implementaciones de estrategias de logística inversa se han hecho, especialmente en los sectores automovilístico, electrónico y eléctrico: refrigeradores, televisores, teléfonos móviles, fotocopiadoras, computadoras, baterías y pilas, como por ejemplo:

- **Kroon & Vrijens, (1995)**, Realizan un estudio de la reutilización sobre embalajes secundarios así como de métodos para la elaboración de un sistema logístico aplicado a recolección de contenedores. Se expone a manera de

ilustración un modelo cuantitativo para simulación y optimización (Localización clásica de planta) utilizado en los Países bajos y que se puede aplicar para apoyar el proceso de planificación que se realiza.

- **Shih, LH, (2001)**, Describe el diseño de un sistema de logística inversa para reciclaje de electrodomésticos y computadores en Taiwan teniendo en cuenta los puntos de recolección, almacenamiento y tratamiento o disposición de los mismos.
- **Schultmann, F, et al, (2006)**, Basados en un ejemplo sobre tratamientos de autos al final de su vida en Alemania, se muestra un estudio realizado que involucra diferentes opciones de diseño para un sistema de logística inversa, enfocándose en la manera de manejar y revertir los flujos de materiales con respecto a su re inserción en las cadenas originales.
- **Mutha & Shaligram, (2009)**, Realizan un modelo matemático para el diseño de una red inversa para productos devueltos que deben ser consolidados en almacenes antes de ser enviados a centros de reprocesamiento para la inspección y desmontaje. El uso del modelo se muestra a través de su aplicación en un ejemplo numérico donde se basan en la demanda como una variable importante.

Se puede entonces evidenciar como la logística inversa se ha convertido en un importante proceso, ya que incluye todas las etapas de las cadenas de suministro en varios sectores industriales y permite definir estrategias de recolección que contribuyan a una organizada disposición y por tanto, una contribución al medio ambiente y la economía de quienes la implementan.

## **5.2. Estudios de logística inversa enfocados a baterías**

Como se puso observar anteriormente, se han realizado múltiples estudios en la

definición de algunas etapas de la cadena de logística inversa aplicada a diversos tipos de industrias: automovilística, electrodomésticos, etc. En cuanto a la industria de las baterías, algunos estudios se enfocan en el desarrollo de modelos para optimizar y definir las rutas de recolección e incluso para determinar el proceso de retorno completo (Shultman, F, *et al*, 2003) donde se realiza una revisión de literatura y de la legislación y a su vez, en la etapa de recolección de baterías usadas, el desarrollo de un modelo de localización con dos escenarios en los que se utilizan 450 puntos de recolección que representan municipalidades alemanas incluyendo además todos los 11 tipos de tratamiento en 29 localidades (con 8 EAF, Electrical Arc Furnaces por sus siglas en inglés, incluidos en el escenario 2). En el primer escenario se supone que solo el 10% de baterías Mg-alkalina y zinc-carbón están libres de mercurio así como que 4 instalaciones ya ubicadas continuarían sus operaciones, mientras que en el escenario Nro. 2, 90% de ese tipo de baterías están libres de mercurio. Los autores utilizan primero una simulación flow-sheeting para determinar la viabilidad de reciclar las baterías que pueden utilizarse para operaciones metalúrgicas y luego con base a los resultados utilizan un capacitated two-level facility location problem para determinar el diseño óptimo de la cadena. Este problema fue modificado de tal manera que los depósitos representan las instalaciones de clasificación de las baterías, los clientes representan las instalaciones de reciclaje, y las plantas representan los puntos de recogida para las pilas. Se encontró con esto que para el escenario Nro. 1 8.128 toneladas por año de pilas alcalinas de manganeso y zinc-carbono todavía van a los vertederos, dando lugar a un porcentaje de reciclaje de sólo 28% ciento.

En el escenario Nro. 2, la solución óptima sugiere que se incluyan dos lugares de clasificación nuevos, Jena y Augsburg al diseño de la cadena realizado, que comparado con el escenario Nro. 1 dobla el volumen de baterías recolectadas y clasificadas.

Por otra parte, Rogulski & Czerwinski (2006) realizan un estudio acerca del avance que ha tenido el programa de posconsumo de baterías en Polonia, implementado desde el 2001, el cual abarca desde la comercialización, recolección y reciclaje de baterías, teniendo como objetivo primordial un nivel de recolección y reciclaje del 100% para

baterías plomo-ácido y un 40% de recolección para las demás baterías (como acumuladores Nikel-cadmio y Nikel-hierro), en el año 2014. Una de las clasificaciones que se realizan se hacen con base en los principales tipos de fuentes de energía electroquímica: pilas alcalinas de Dióxido de Manganeso y Zinc-Carbón. La segunda y tercera clasificación hace referencia a los mercados que están representados principalmente por los acumuladores de Plomo-ácido. La última clasificación corresponde a un segmento creciente en el país: las baterías portátiles y recargables representadas por Ni-Cd, Ni-MH, Li-ion, Li-polímero y acumuladores de Plomo-ácido. Los puntos donde se da la recolección están compuestos de las escuelas (72%), comercio minorista y mayorista, puntos de servicios, compañías que recogen y separan los sólidos municipales y residuos urbanos (RSU) (11%), los usuarios finales (17%).

En España, Ponce-Cueto, *et al* (2011), realizan un estudio para desarrollar un modelo de localización con el fin de recolectar el mayor número de pilas y acumuladores portátiles. Para esto hicieron el proyecto en dos etapas: la primera, la definición de puntos candidatos posibles mediante un modelo de decisión multicriterio denominado AHP (Analytic Hierarchy Process por sus siglas en inglés) donde se hace una comparación entre 8 grupos: centros comerciales, supermercados, tiendas pequeñas, universidades, centros públicos, escuelas, compañías y por persona, considerando 3 criterios: accesibilidad, afluencia y conciencia pública. La segunda parte consistió de la dispersión geográfica de los puntos seleccionados en la primera parte, con el fin de que las distancias entre los puntos seleccionados sea la maximización de las áreas geográficas cubiertas con el fin de obtener soluciones eficientes.

### **5.3. Aplicación de las etapas de logística en la logística inversa: modelos de localización y ruteo**

Como se definió previamente, el diseño de una red logística inversa incluye la definición de las rutas, definición de los puntos de recolección, definición de puntos de almacenamiento del producto al final de su vida útil y evaluación de métodos de reciclaje

o reutilización. La aplicación de modelos integrados de localización-ruteo o LRP por sus siglas en inglés (Location-Routing Problem) ha sido ampliamente empleado tanto en la logística directa como la logística inversa. En cuanto a esta última diversos autores han aplicado estos modelos para recolección de residuos sólidos tales como:

- **Gottinger, H.W, (1988)**, propone un modelo de flujo de red para manejo de residuos sólidos regionales que minimiza una única función objetivo para los costos totales de transporte, proceso y construcción. Algunos modelos tienen por objetivo maximizar la distancia promedio de separación, algunos maximizan la mínima distancia de separación y otros minimizan el número de personas dentro de alguna distancia crítica o radios de impacto.
- **ReVelle, C, et al, (1991)**, desarrollan un estudio para un sistema de almacenamiento de barras de combustible usado en los reactores nucleares y que considera el desarrollo de un modelo que ubica las instalaciones de almacenamiento y asignar reactores a esas instalaciones, clasificando las rutas de envío del combustible usado. Se define que el problema es multiobjetivo en el componente de transporte ya que el envío se realiza bajo dos criterios: carga mínima de transporte y mínimo riesgo percibido. Debido a la función multiobjetivo, se combinan el método de los caminos más cortos, un programa matemático Cero-Uno para localización y el método de la ponderación de la programación multiobjetivo para mostrar las soluciones más óptimas para este problema.
- **Giannikos, I, (1998)**, presenta un modelo multi objetivo para localizar instalaciones de dos tipos: disposición final y tratamiento de residuos peligrosos. En este se consideran cuatro objetivos: minimización de costos totales de operación, minimización del riesgo total percibido, distribución equitativa de riesgos entre centros de población y distribución equitativa del daño causado por el funcionamiento en las instalaciones de tratamiento. Un modelo de programación de lineal multiobjetivo es desarrollado para resolver este tipo de problemas y se presenta un ejemplo hipotético para ilustrar como algunas

funciones pueden ser utilizadas para obtener soluciones satisfactorias en ejemplos de la vida real.

- **Ayanoglu, C, (2007)**, se realiza un estudio sobre el sistema de manejo de residuos sólidos municipales, para determinar el número y las ubicaciones de las instalaciones de transferencia que sirven para la recolección del residuo sólido y el relleno sanitario. Adicionalmente los planos de rutas son construidos para los vehículos que recolectan el residuo sólido en los puntos de recolección, teniendo en cuenta la capacidad de carga de dichos vehículos y la restricción de tiempo. Este estudio fue formulado como un problema de localización ruteo con dos niveles de instalación aplicando un proceso iterativo de clustering, basado en heurística.

De acuerdo a lo anterior se puede apreciar que los problemas de VPR (Vehicle Routing Problems) son algunos de los problemas más ampliamente estudiados en la literatura, al igual que los problemas de tipo TSP entre los cuales se enmarcan los Orienteering Problem, que son descritos a continuación:

- **Golden, et al, (1987)**, Se describe el problema de la entrega de combustible en casa: Una flota de camiones debe entregar a un gran número de clientes sobre una base diaria. El nivel de inventario de combustible de los clientes debe ser mantenido en un valor adecuado todo el tiempo. El nivel previsto de inventario se considera como una medida de urgencia. El objetivo principal es seleccionar un subconjunto de clientes a visitar cada día en cuanto se requiera una entrega urgente y se agrupan de tal manera que se pudiera construir caminos eficientes para los camiones. Este paso de selección de subconjuntos se modela como un OP donde la urgencia de entrega a un cliente es utilizado como el puntaje.
- **Polat, E, (2008)**, realiza un estudio donde el objetivo es determinar las ubicaciones de centros de acopio de botellas usadas para la recolección de vidrio reciclado. Dicha recolección se lleva a cabo por una flota de vehículos que

visita algunos puntos de recolección predeterminados, como restaurantes y hospitales. La ubicación de centros de acopio de botellas depende de la cercanía de éstos a las zonas de población donde se genera el reciclado, así como a la cercanía a los puntos de recolección predeterminados. Se presenta un modelo matemático, que combina el problema cobertura máxima en presencia de la cobertura parcial y el problema de enrutamiento de vehículos con ganancia. Procedimientos heurísticos son propuestos para la solución del Orienteering Problem.

Asimismo, en problemas de aplicaciones turísticas donde el OP es muy utilizado; el Team Orienteering Problem (TOP) es una extensión del Orienteering Problem para el caso de tours múltiples donde el objetivo es determinar un número  $P$  de caminos, cada uno delimitado por un tiempo máximo que maximice el total de puntaje recolectado (Souffriau, *et al*, 2011). El TOP es una variante del TSP y aunque el OP ha atraído la atención de muchos investigadores, el TOP no ha recibido mucha atención en la literatura abierta. (Chao, *et al*, 1996), aun así, se han conocido ciertos estudios del modelo para muchas aplicaciones reales diferentes tales como:

- **Butt & Cavalier, (1992)**, se estudia una versión TOP donde el punto inicial y el punto final son los mismos. Se aplicó un método heurístico a pequeños problemas con menos de 15 puntos y se comparan los resultados de este método contra los resultados obtenidos por un modelo matemático programado formulado por los autores. Basados en estos resultados concluyeron que su método debía trabajar adecuadamente en problemas grandes pero aun así no lo aplicaron a TOP's de gran tamaño.
- **Ballou & Chowdhury, (1980)**, describen un modelo heurístico en computador usado para asistencia de firmas de negocio y organizaciones para mejorar la utilización de sus flotas de camiones de propiedad privada. El modelo trata con el problema de seleccionar entre vehículos propios y alquilados así como la programación de la ruta para los vehículos propios. La característica única del

modelo es su ámbito de aplicación para hacer frente a las entregas y recogidas en la misma ruta. Dos aplicaciones que se describen en estas características adicionales ayudaron a identificar posibles ahorros en el orden del 15% de los costos totales del transporte

- **Hall & Racer, (1995)**, se desarrolló un procedimiento aproximado para determinar si una parada deber ser realizada por un recolector privado en una camioneta local o una empresa de servicio público. El costo de utilizar recolectores privados declina a medida que se disminuye el espacio principal entre paradas: cuando más paradas son asignadas al operador privado, la distancia media disminuye y el costo promedio de adicionar otra parada disminuye también. La metodología que ellos presentan para asignar las paradas tanto para operadores privados como públicos para determinar el costo mediante aproximación a la ruta con la raíz cuadrada de longitud de distancias. Técnicas analíticas son presentadas para sistemas con ciclo de envío fijo para todas las paradas con una variable de tamaño de la flota; ciclo de envío fijo para todas las paradas con un tamaño de la flota fija; y ciclos de envío variable con un tamaño de la flota variable. En el último caso, la solución representa tanto el transporte y los costos de inventario.
- **Tang & Miller Hooks, (2005)**, describieron un modelo de heurística de búsqueda tabú para resolver el TOP. Un modelo de heurística de búsqueda tabú es un tipo de metaheurística que ha sido ampliamente utilizada para resolver problemas complejos de optimización combinatorial. Los resultados computacionales obtenidos condujeron a una serie de problemas test publicados que demuestran que la técnica propuesta arrojan soluciones de alta calidad y supera otras heurísticas publicadas para solución de problemas TOP.

#### **5.4. Métodos utilizados para la solución de problemas TOP**

En el año de 1987, Golden *et al* concluyen que el OP es un problema de tipo NP-hard, es decir que no se ha creado un algoritmo que lo resuelva de manera óptima en un

tiempo polinomial; esto implica que algoritmos con soluciones exactas consumen mucho tiempo computacional, por ende, para dar solución a aplicaciones prácticas los métodos heurísticos serían necesarios.

El primer estudio realizado para resolver el problema del TOP por medio de un modelo heurístico fue publicado por Chao *et al* (1996), en el cual resuelve 353 problemas cuyo tamaño de puntos o nodos que varían entre 21 y 102 donde las instancias de estos varían entre 2,3 o 4 rutas; los resultados de este, muestran que el modelo heurístico utilizado presenta una buena eficiencia computacional y por ende lo convierte en una herramienta para resolver este tipo de problemas. Por los resultados obtenidos y basado en el estudio de Golden *et al* (1987), Chao *et al* (1996), determinan que los problemas TOP pueden ser considerados NP-hard.

Estudios más recientes de modelos heurísticos en la solución de TOP han sido presentados por autores como Archetti *et al* (2007) donde resuelven un problema TOP mediante dos métodos meta heurísticos: Variable Neighborhood search y Tabu Search Algorithms, obteniendo tiempos computacionales máximos de 531.5 segundos, Ke *et al* (2008) proponen un modelo ACO(Ant Colony Optimization) para un problema de tipo TOP y obtienen un tiempo computacional máximo de 252.3 segundos. De igual forma Vansteenwegen *et al* (2009) resuelven un TOP con time Windows mediante dos métodos metaheurísticos: Guided local search (GLS) and variable neighbourhood search (VNS) con tiempos computacionales obtenidos de máximo 3.8 segundos.

Por otro lado, algunos métodos exactos han sido utilizados para dar solución a este tipo de problemas es el caso presentado por Butt & Ryan (1999) quienes desarrollaron un algoritmo exacto, usando el método de “column generation” y de esta manera pudieron resolver un problema en un período razonable de tiempo con más de 100 vértices, donde el número de vértices en cada ruta se mantiene pequeño.

En un estudio más reciente presentado por Boussier *et al* (2007) se desarrolla un método exacto para resolver un TOP y un TOP with time Windows. La solución

comienza utilizando el método de “column generation” y utilizan posteriormente el algoritmo Branch and Bound. Con el objetivo de mejorar el desempeño del modelo, técnicas como “limited discrepancy search”, “label loading” y “meta extensions” fueron aplicadas. Problemas con 100 vértices donde, en cada uno, pueden ser seleccionadas acerca de 15 rutas, se resuelven en menos de dos horas de tiempo computacional.

Como conclusión del presente capítulo y con base a la recopilación de estudios realizados, tanto para aplicaciones de problemas TOP así como métodos de solución de dichos problemas, no se encontraron modelos que describan el problema de la empresa Tronex S.A en cuanto a la función objetivo y las restricciones que deben cumplir. Para este caso, el modelo que mejor describe el problema de localización de instalaciones para pilas usadas en el caso Tronex S.A es el Team Orienteering Problem descrito en el numeral 4. En el caso de estudio, cada punto o vértice puede ser representado por un punto candidato para la instalación de un contenedor de pilas, el cual está asociado a un porcentaje de recolección según su ubicación, lo que se puede ver como un puntaje asociado a cada punto. Dicho puntaje o porcentaje de recolección debe maximizarse para cumplir con las metas de recolección que establece el gobierno, lo que es acorde con la función objetivo del TOP. Además se necesita más de una ruta para lograr la recolección, porque la capacidad del vehículo es limitada, por ende cada ruta representa un equipo diferente.

Por otra parte aunque muchos investigadores proponen resolver el TOP con algoritmos exactos como Branch and Bound y Branch and Cut, con los cuales se han obtenido respuestas óptimas en problemas con más de 500 vértices; por ser el TOP un problema de tipo NP-hard, dichos algoritmos consumen gran cantidad de tiempo computacional, es por esto que la mayoría de investigaciones en OP y TOP se enfocan en desarrollar modelos heurísticos y metaheurísticos (Ke, L. *et al.* 2008). Para el caso particular de Tronex se evalúan 115 puntos donde, para cumplir la meta de recolección según un porcentaje específico de llenado, se necesitan más de 6 rutas. Por esto se evaluará tanto un modelo exacto como uno heurístico.

## **6. CASO DE ESTUDIO**

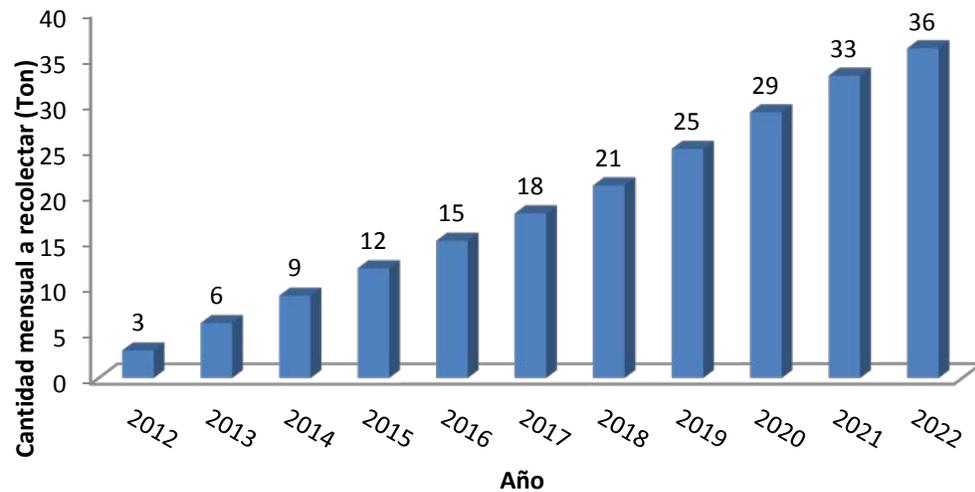
### **6.1. Descripción de la empresa**

Tronex S.A es una empresa del sector comercial ubicada en la ciudad de Medellín cuyas principales actividades comerciales son: la fabricación, importación, exportación, distribución y venta de pilas eléctricas de cualquier sistema químico primario y secundario de baterías. La gestión ambiental responsable es uno de los principales objetivos de la empresa; por esto crea un programa de posconsumo que pretende incentivar en nuestra sociedad una cultura en la cual las pilas, así como el cartón y el plástico, deben separarse de los de más tipos de residuos, tienen un lugar especial donde se deben disponer. Uno de los principales propósitos del programa es evitar impactos negativos al medio ambiente, que puedan afectar a las personas o a los recursos naturales, por la inadecuada disposición de los residuos al final de su vida útil. Esto indica que la compañía es consciente de la importancia que presenta controlar las variables que afectan al ambiente en las diferentes etapas de su ciclo de vida, esto es, desde la consecución de materias primas hasta su disposición final.

#### **6.1.1. Campaña RECOPILA®**

Es un programa que surge en mayo de 2010 como una iniciativa para recolectar las pilas y baterías al final de su vida útil, entre las que se encuentran las pilas AAA, AA, 9 voltios, pilas de celulares, baterías de computadores, pilas tipo moneda o reloj, pilas alcalinas, recargables, entre otros tipos. El objetivo general de esta campaña es diseñar el sistema de recolección selectiva y de gestión ambiental de residuos de pilas y acumuladores para Tronex S.A. , de manera que la empresa pueda cumplir con las metas anuales de recolección que exige el Ministerio de Medio Ambiente en términos de peso, que para el año 2012 es de 3 toneladas de pilas mensuales. Dicho plan debe aumentar gradualmente su porcentaje de recolección hasta llegar a un 49% de las pilas puestas en el mercado en el 2022. En la Gráfica 1 se muestra la cantidad anual de toneladas que Tronex S.A debe recolectar en el periodo de tiempo comprendido entre los años 2012-2022. Estas

cantidades fueron calculadas teniendo en cuenta las ventas y la posición de la marca en el área metropolitana y en el peso promedio de cada tipo de pila a la que le aplica el programa de posconsumo, esto está presente en mayor detalle en el plan presentado al ministerio (García & Gómez, 2011).



Gráfica 1. Toneladas de pilas que debe recolectar la empresa Tronex S.A en su campaña RECOPILA® desde el año 2012 hasta el 2022. (Fuente propia).

Para la campaña Recopila®, la compañía desarrolló un contenedor para la recolección de pilas usadas, los cuales son fabricados en fibra de vidrio y de forma cilíndrica con una capacidad máxima de almacenamiento de 100Kg (figura 3); este contiene los logotipos de Tronex y de la campaña RECOPILA®. Para el proceso de recolección de los contenedores, la empresa cuenta con un vehículo propio tipo Super Carry (figura 4) con una capacidad máxima de carga de 500Kg por viaje.

En el 2011 Tronex S.A presentó un plan de acción ante el Ministerio de Medio Ambiente, donde a criterio de la compañía se identifican 115 posibles puntos candidatos para la instalación de los contenedores, los cuales se clasifican en 3 grupos principales: 1) entidades departamentales gubernamentales y municipios, 2) sitios de asistencia masiva e instituciones educativas y 3) entidades privadas. Surge un cuarto grupo denominado puntos instalados, que, son aquellos puntos en los que

actualmente se tiene un contenedor instalado y que son objeto de estudio en el presente trabajo. Dichos puntos se especifican en el Anexo 1.



Figura 3. Contenedor de pilas usadas de la campaña RECOPILA®. (Fuente: Tronex).



Figura 4. Super Carry utilizado para el transporte de las pilas usadas. (Fuente: Tronex).

Un aspecto importante es que los costos de la campaña en cuanto al diseño, fabricación e instalación de contenedores, la logística, el mercadeo, y la disposición final de las pilas, entre otros, deben ser asumidos en un 100% por la empresa y no se pueden trasladar de forma directa o indirecta al consumidor, incrementando a su vez los costos totales de la empresa.

La solución desarrollada en el presente trabajo surge frente a la necesidad de la empresa de resolver un problema de decisión en lo que respecta a la ubicación de instalaciones y la definición de las rutas de recolección del programa RECOPILA®; con el propósito de estimar los costos mínimos posibles, de manera que el proyecto sea rentable y sustentable, así como un apoyo para la planeación del programa.

## 7. SOLUCIÓN PROPUESTA

Para garantizar que un programa como RECOPILA® sea sostenible, es decir que sea viable y rentable en el tiempo y que a la vez presente beneficios para la comunidad y para el medio ambiente, se deben tomar decisiones acerca de la cantidad y los sitios a instalar los contenedores, de manera que representen una ventaja estratégica para la empresa. Esta decisión influye directamente en otros aspectos del programa como lo son las rutas a seguir para la recolección de las pilas usadas, lo que finalmente influye en los costos totales de la campaña y en el cumplimiento de los objetivos de recolección.

### 7.1. Planteamiento del problema

Para el planteamiento de la solución a este problema se tuvo en cuenta las siguientes condiciones: los puntos candidatos para localizar contenedores, la capacidad máxima de carga del vehículo y las metas de recolección mensuales en toneladas de pilas para el año 2012. Se suponen los porcentajes de recolección para cada grupo de puntos y se asume que los contenedores pueden ser ubicados en los puntos seleccionados sin ningún tipo de restricción.

En general el problema puede ser planteado de la siguiente manera:

Se tiene un conjunto de puntos candidatos en el área metropolitana para la instalación de contenedores de pilas usadas, cada uno asociado a un porcentaje de llenado mensual; además se tiene a disposición un vehículo, con capacidad de carga específica, para realizar la recolección de dichas baterías.

El objetivo es definir en cuáles de estos puntos se instalarán contenedores y a la vez definir las rutas de recolección que el vehículo debe realizar, de tal modo que se minimice la distancia a recorrer y se cumplan las siguientes condiciones:

- Cumplir con la meta específica de recolección para el año 2012, es decir, 3 toneladas mensuales de pilas.

- En cada ruta, el peso recolectado no puede superar la capacidad máxima del vehículo, es decir, 500Kg.
- Para todas las rutas el punto de inicio y fin será la empresa Tronex S.A.

## 7.2. Formulación del problema.

El problema descrito en el numeral anterior se puede formular de la siguiente manera:

Se tiene un conjunto  $N$  de  $n$  nodos los cuales representan los puntos candidatos en los que se puede ubicar un contenedor para la recolección de pilas usadas, cada uno de los cuales está asociado a un porcentaje de recolección medido en Kg,  $S_i$  (figura 5.a y figura 5.b). El punto de partida (nodo  $n_0$ ) y el punto final (nodo  $N$ ) se especifican desde el inicio. Es importante aclarar que para el caso de Tronex corresponden a un punto con la misma ubicación geográfica. La distancia recorrida  $t_{ij}$  para viajar de un nodo  $i$  hasta un nodo  $j$  es conocida para todos los nodos y esta se mide en metros. Así mismo, se cuenta con un vehículo de capacidad máxima  $Q_{max}$  para realizar la recolección de pilas en cada nodo.

El problema consiste en determinar  $P$  rutas, con miras a minimizar la distancia total recorrida garantizando que: a) el vehículo no exceda su capacidad máxima de carga, b) se satisfaga la cantidad mínima kilogramos a recolectar mensualmente,  $C_{min}$  y c) cada nodo corresponda o se encuentre en una y solo una ruta del conjunto  $P$ .

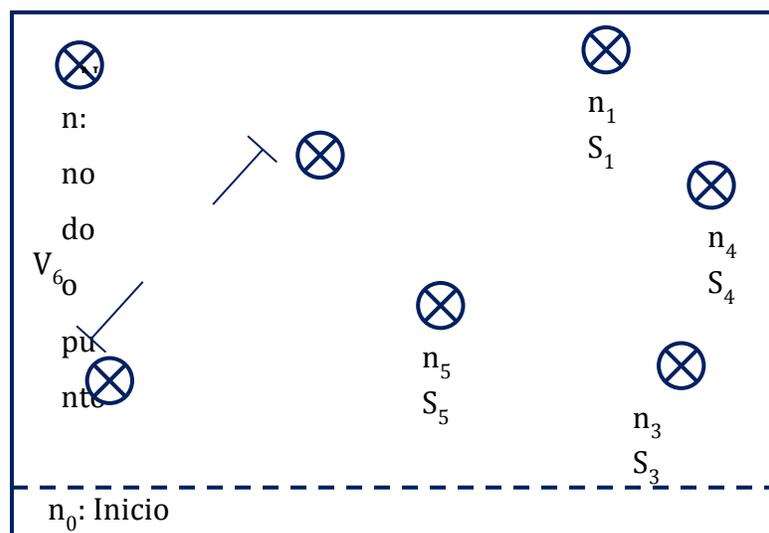


Figura 5.a. Nodos candidatos para diseño de ruta. Fuente: diseño propio

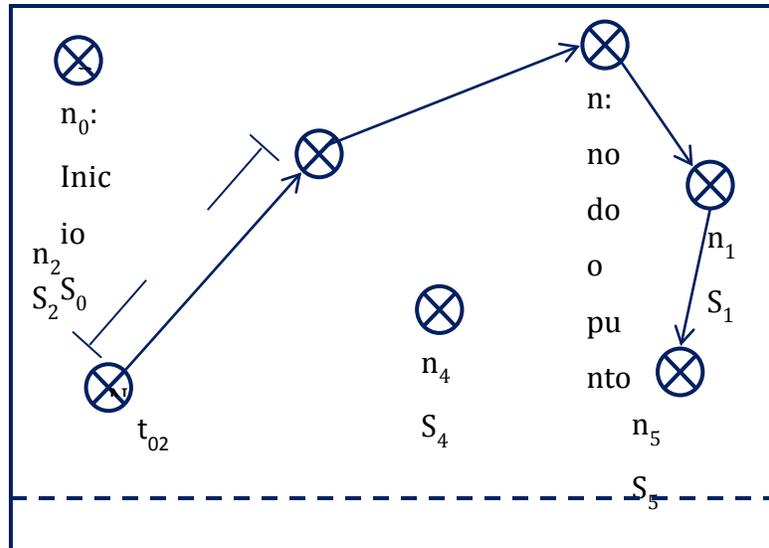


Figura 5.b. Conjunto de nodos seleccionados y desarrollo de la ruta. (Fuente: diseño propio)

### 7.3. Modelo Propuesto

Para dar solución al problema planteado se proponen dos soluciones: un modelo exacto y un modelo heurístico, los cuales se describen en mayor detalle a continuación:

#### 7.3.1 Modelo exacto o matemático.

Como se mencionó anteriormente, el modelo matemático propuesto corresponde a un TOP, el cual se define de la siguiente forma:

- **Parámetros**

- ✓  $U_{ik} \in N^+$
- ✓  $X_{ij} \{1,0\}$
- ✓  $C_{min} = 3000$
- ✓  $Q_{max} = 500$
- ✓  $P = 7$

Este último valor se define realizando la relación entre los parámetros  $Q_{max}$  y  $C_{min}$  de la siguiente manera:

$$\frac{C_{min}}{Q_{max}} = \frac{3000 Kg}{500Kg} = 6$$

Esto quiere decir que se necesitan como mínimo 6 rutas para realizar la recolección, Como se sabe que en cada ruta no se llena el camión hasta su capacidad máxima, es necesario agregar una ruta adicional.

- **Variables de decisión:**

$$X_{ij} \begin{cases} 1 & \text{Si el nodo } i \text{ va inmediatamente antes del nodo } j \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

$$U_{ik} \in N^+ \text{ Indica la posición del nodo } i \text{ en la ruta } k$$

$$Y_{ik} \begin{cases} 1 & \text{Si el nodo } i \text{ hace parte de la ruta } k \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

**Función Objetivo:**

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=2}^N (t_{ij})(X_{ijk})$$

Donde:

$t_{ij}$  representa la distancia entre nodos. Por tanto la función objetivo consiste en minimizar la distancia entre nodos para cada ruta  $k$ .

- **Restricciones:**

- i Esta restricción garantiza que, en todas las rutas, se comience en el nodo 1 y finalice en el nodo N.

$$\sum_{k=1}^P \sum_{j=2}^N X_{1jk} = \sum_{k=1}^P \sum_{i=1}^{N-1} X_{iNk} = P$$

- ii Esta restricción garantiza que a cada nodo llega y de cada nodo sale una sola ruta, garantizando que no se repitan nodos en una misma ruta

$$\sum_i^{N-1} X_{ijk} \sum_j^N X_{ijk} = Y_{ik} \quad \forall i, \forall k$$

- iii La siguiente restricción define la posición de cada nodo en la ruta, de tal manera que determina la secuencia de la ruta.

$$U_i - U_j + 1 \leq M (1 - X_{ij}) \quad \forall i, j = 2, \dots, N; \forall p = 1, \dots, P$$

- iv Se define la siguiente restricción para que la cantidad de pilas recolectadas cumpla con la cantidad mínima requerida  $C_{min}$ :

$$\sum_{k=1}^P \sum_{i=2}^{N-1} S_i Y_{ik} \geq C_{min}$$

- v Por otra parte, se debe definir la restricción para cada ruta  $k$  en la cual se debe recoger una cantidad de pilas que no exceda la capacidad máxima del vehículo  $Q_{max}$  :

$$\sum_{i=2}^{N-1} S_i Y_{ik} \leq Q_{max}$$

### 7.3.2. Modelo heurístico.

La estrategia de solución que se propone en este trabajo se basa en un algoritmo que consiste en crear una solución mediante sucesivas inserciones de nodos en las rutas. El algoritmo de inserción propuesto consiste en un procedimiento “greedy” o codicioso basado en el manejo de una secuencia preseleccionada de los puntos que se incluirán en cada ruta. Esta secuencia se toma como base para la construcción sucesiva de la ruta propuesta. En cada fase de construcción de la ruta, se insertará un punto o nodo, procurando optimizar la nueva ruta, sin violar las restricciones del problema.

Supóngase que la ruta actual del vehículo es la secuencia de nodos:



- b. Se crea una ruta o conjunto  $P$  de nodos, con la inserción de un nodo de tal manera que  $P = \{n_i, n_k, n_j\}$ .
- c. Se evalúa cada posible inserción de un nodo en  $P$ . Dicha evaluación se basa en escoger el nodo que mayor beneficio represente, el cual se calcula de la siguiente manera:

$$B_n = \frac{S_i}{\delta T}$$

Donde:

$$\delta T = S(i, k) + S(k, j) - S(i, j)$$

Dicho factor asegura que se recolecte la mayor cantidad de peso y se minimice la distancia total recorrida en cada ruta. Una vez incluido un nodo en una ruta, este será descartado y no se tendrá en cuenta en las siguientes rutas.

- d. El paso c se repite hasta que el peso recolectado en todos los nodos de la ruta evaluada sea menor o igual a 500Kg.
- e. Los pasos a, b, c y d se repiten hasta que el peso recolectado en todas las rutas sea mayor o igual a 3000Kg.

### 7.3.2.1. Seudocódigo

Variables:

- ✓ Peso\_falta: peso objetivo – suma del peso total de todas las rutas
- ✓ Capacidad\_disponible\_camión: Capacidad del camión – suma del peso de nodos en cada ruta.

- ✓ N: cantidad de nodos a incluir
- ✓ Solución: archivo que contiene una fila por cada ruta seleccionada

Algoritmo:

Peso\_falta=peso objetivo

Ruta=1

Ruta\_en\_solución=1

While Peso\_falta>0

For Primer\_nodo= 2 to n-1

If Primer\_nodo no ha sido asignado a las rutas then

Capacidad\_disponible\_camión= Capacidad del camión

While Capacidad\_disponible\_camión>0

1. Seleccione un nodo no asignado a las rutas
2. Seleccione un arco uniendo dos nodos ya asignados a una de las rutas de manera que al insertar el nodo en el arco se obtenga el máximo beneficio marginal; esto es, el cociente entre el incremento en kilogramos recogidos y el incremento en distancia , de tal manera que ésta sea mínima.
3. Capacidad\_disponible\_camión= Capacidad\_disponible\_camión – Peso del nodo seleccionado

While end

Ruta=Ruta +1

End if

Next Primer\_nodo

1. Incluye en la ruta con mayor relación entre la suma del peso total de los nodos / recorrido de la ruta.
2. Ruta\_en\_solución=Ruta\_en\_solución +1
3. Peso\_falta=Peso\_falta – Suma\_peso\_nodos en ruta

While end

Guarda la solución en un archivo

## 8. METODOLOGÍA UTILIZADA EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

Para la implementación del modelo se deben definir los datos a utilizar en el mismo, los cuales son descritos a continuación.

### 8.1. Datos

Los siguientes fueron datos utilizados para la implementación del modelo planteado.

#### 8.1.1. Porcentaje de llenado de los contenedores.

Una de las variables más importantes del modelo es el porcentaje de llenado de los contenedores en cada uno de los puntos. Debido a la falta de información histórica y real en cuanto al porcentaje de llenado de los contenedores ubicados actualmente, no se puede determinar un comportamiento de los mismos, por lo tanto estos datos fueron supuestos bajo criterio personal de los autores de este informe teniendo en cuenta que debía ser un porcentaje mayor al 26% en cada punto porque si es menor se necesita instalar los 115 puntos candidatos.

Con el fin de tener mayor información para tomar la decisión de donde se deben instalar los diferentes contenedores y determinar los efectos de esta variable en el modelo, se evaluaron tres escenarios, como se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1: Porcentaje supuesto de llenado en los puntos candidatos para la instalación de contenedores de pilas usadas

Grupos	Nivel de llenado		
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Entidades departamentales gubernamentales y municipios	72%	82%	62%
Sitios de asistencia masiva e instituciones educativas	48%	58%	38%
Empresas privadas	36%	46%	26%
Puntos instalados	72%	82%	62%

Los Kg/mes son determinados con base a la capacidad máxima de llenado de cada contenedor que corresponde a 100Kg.

### **8.1.2. Distancias entre nodos**

Para el cálculo de la distancia entre cada nodo, se construyó una matriz de distancias basadas en las coordenadas geográficas de cada punto. Para la geocodificación de los puntos se utilizó el servicio de Google Maps™ con su respectivo API (<https://developers.google.com/maps/>) implementándolo en un código escrito en JavaScript™.

Dicha herramienta permite realizar diversas consultas de manera simultánea y plasma los resultados en un documento de texto; por lo tanto se tienen distancias lineales que tienen en cuenta la malla vial para realizar los recorridos.

### **8.2. Herramientas utilizadas**

Para la solución del modelo matemático se utilizó el software FICO® Xpress IVE 7.2 de 64 bits, en un computador de escritorio de 8 procesadores intelCore i7 a 22.93 GHz y 16 GB de memoria RAM.

Para la solución del modelo heurístico se utilizó la herramienta de Visual Basic de Microsoft® Office Excel 2007.

## 9. RESULTADOS

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos tanto por el método exacto como por el método heurístico para el problema de localización de contenedores y ruteo desarrollado para la empresa Tronex S.A.

### 9.1. Resultados parciales obtenido con el método exacto.

Como se mencionó en el capítulo anterior, para obtener los resultados al problema planteado por medio del método exacto se utilizó XPress®. En la tabla 2 se presentan los resultados consolidados para el método exacto utilizando las tasas de llenado del Escenario 1.

Tabla 2: Resultados consolidados obtenidos con el método exacto. Escenario 1.

Número de ruta	Distancia total recorrida (m)	Peso total recolectado (Kg)	Número de contenedores
1	3.4642	324	6
2	135.844	492	8
3	91.387	420	7
4	71.266	420	7
5	79.317	480	9
6	43.781	480	6
7	68.189	492	8
<b>Total</b>	<b>524.426</b>	<b>3.108</b>	<b>51</b>

La solución factible obtenida muestra que se deben instalar 51 contenedores y se debe recorrer una distancia total de 524Km.

Esta solución incluye una ruta en la cual uno de los nodos está ubicado en el municipio de Rionegro, (tabla 3, ruta 2, nodo 4) en este caso el trayecto desde Club el Campeste y dicho nodo (Vestimundo) genera una distancia muy grande a recorrer en comparación con los demás nodos, y que equivale a 134 Km aprox. Finalmente durante el proceso de ejecución de algoritmo, no se encontró una mejor solución.

Tabla 3: Resultados consolidados obtenidos con el método exacto. Escenario 1.

ESCENARIO 1							
NODO	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	RUTA 5	RUTA 6	RUTA 7
1	Tronex S.A	Tronex S.A	Tronex S.A	Tronex S.A	Tronex S.A	Tronex S.A	Tronex S.A
2	Monterrey	Papyser Ltda	Zoológico Sta Fe	Tránsito Departamental	Noel	Club El Rodeo	Colcafé
3	Politecnico Jaime Isaza Cadavid	Campestre	Oviedo	Corona	Colombus School	FLA	Nacho minas
4	San Fernando Plaza	Vestimundo	Unicentro Congregación	Metro Niquia	U. San Martin	Escuela Ingeniería	Pascual Bravo
5	Colegio Mayor	IPS Universitaria	Mariana	ITM	U. Cooperativa	EAFIT	Explora
6	Salazar y Herrera	C.C El hueco	Terminal Norte	Isagen	UPB	Aves Marias	Bancolombia
7	Cryogas	Sena	Zenú	Plaza Mayor	IDEA	Asamblea	Mayorca
8	Corantioquia	Indeportes	EPM	Linea Comunicaciones	Argos regional	Tronex S.A	Corpaul
9	Tronex S.A	C.C Paseo la Playa	Tronex S.A	Tronex S.A	Alcaldia		Clinica Medellín
10		Tronex S.A			Consejo Medellín		Tronex S.A
11					Tronex S.A		

Asimismo, el gap (medida de cuán alejada se encuentra una solución factible del óptimo global) de la solución obtenida a las 6 horas de ejecución supera el 90 %, lo que evidencia del carácter dificultoso que pueden llegar a ser los problemas cuando el número de variables binarias crece considerablemente. Esto hace que la metodología utilizada pierda practicidad debido a que para encontrar una solución óptima, se tienen largos tiempos de ejecución o se necesitan herramientas computacionales muy avanzadas.

Estos resultados son acordes a lo encontrado en la literatura, descritos en el numeral 5.4, donde los métodos exactos requieren tiempos computacionales muy largos y en algunas ocasiones la solución presentada no es la solución óptima; además tiene sentido que para el problema planteado, el cual implica la evaluación de 117 nodos y la conformación de 7 rutas, sea difícil evaluar todas las posibles rutas y arrojar una solución óptima.

En consecuencia a lo anterior se optó por seleccionar un modelo heurístico para la solución del problema planteado.

## 9.2. Resultados obtenidos con el método heurístico.

A continuación se muestran los resultados obtenidos por el método heurístico para los 3 escenarios evaluados para el problema planteado.

### 9.2.1. Escenario 1

Los siguientes son los resultados obtenidos por el modelo heurístico para el escenario 1 en un tiempo de ejecución de 61.57 segundos:

Tabla 4. Resultados consolidados obtenidos con el método heurístico para el escenario 1.

ESCENARIO 1							
NODO	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	RUTA 5	RUTA 6	RUTA 7
1	Tronex S.A	Tronex S.A	Tronex S.A	Tronex S.A	Tronex S.A	Tronex S.A	Tronex S.A
2	Noel	Coltabaco	Consejo de Medellín	El Colombiano	El Colombiano	Holasa	Pintuco
3	Centro Comercial Monterrey	Nacional de Chocolates	Asamblea Departamental	Línea comunicaciones	CC. Unicentro	Almatex	CC. Paseo La Playa
4	Politecnico Jaime Isaza Cadavid	Edificio General Bancolombia	Gobernación de Antioquia	C.C Santa fé	EPM	C.C San Diego	Prodevases Crown
5	Universidad EAFIT	Área Metropolitana	EDATEL S.A E.S.P	Panamericana	Corantioquia	Microplast y Coldeplast	Plaza Minorista
6	CORPAUL	IDEA	Plaza Mayor	C.C Oviedo	Biblioteca Piloto	Club Rotario de Medellín	SENA
7	Familia Sancela	Alcaldía de Medellín	Argos(Santa Fe)	Kimberly	Universidad Nacional	Estacion del Metro, San Antonio	Universidad Luis Amigó
8	Tránsito Departamental	Teleantioquia	Zoológico Santa fe	San Fernando Plaza	UPB	Multienlace Call center	Colegio San Ignacio
9	Colcafé	Club El Rodeo	Tronex S.A	ISAGEN	Colegio UPB	Cryogas	Indeportes
10	Tronex S.A	Tronex S.A		Terminal de transporte del sur	Tronex S.A	CC. Camino real	C.C Los Molinos
11				Tronex S.A		Centro Comercial La Cascada	Tronex S.A
12						C.C El Hueco	
13						Tronex S.A	

De las tablas anteriores se puede ver que el radio de cobertura es de máximo 7Km a la redonda, como resultado de esto se puede esperar que el tiempo que debe operar el vehículo para realizar la recolección en las 7 rutas de la solución, sea considerablemente corto.

Con base a los resultados anteriores, se ubicaron los contenedores y se determinaron las rutas de recolección, tal como se muestra en el mapa de la Figura 7.

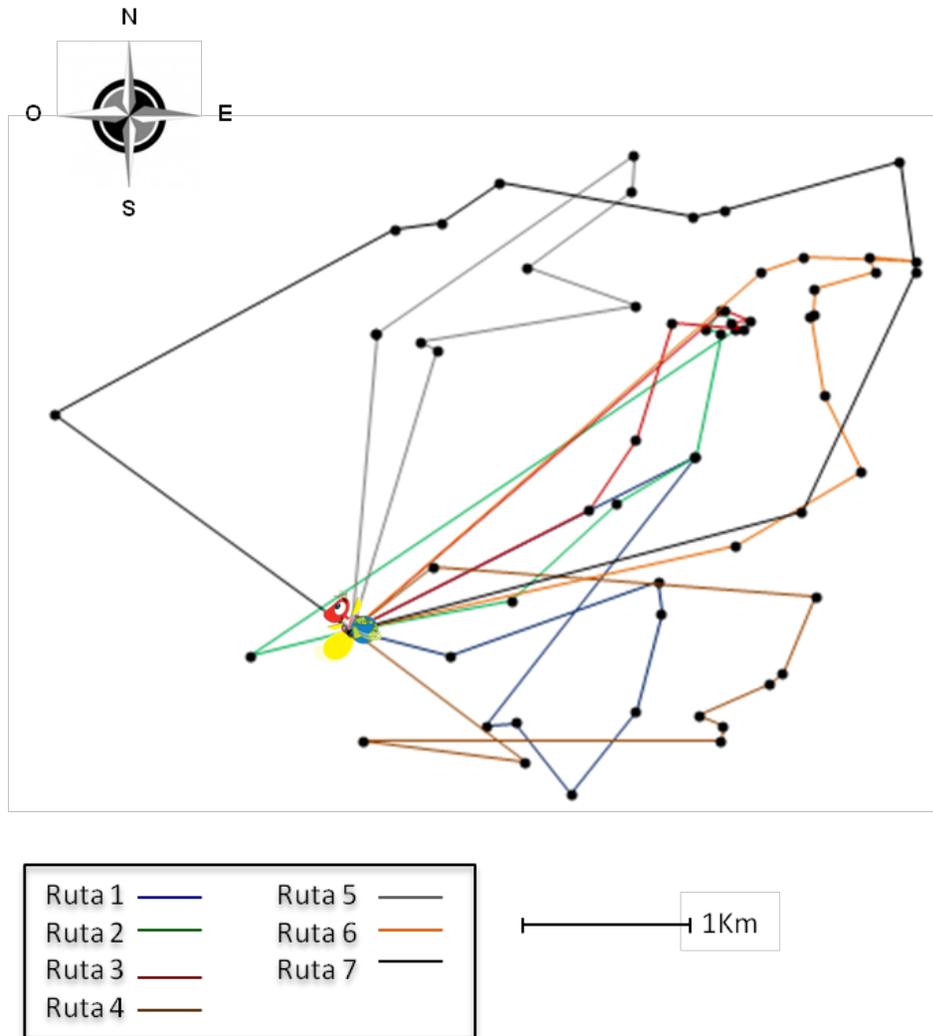


Figura 7. Distribución de nodos en las rutas obtenidas para recolección de pilas usadas.  
Escenario 1.

En la figura 7 se puede observar que las rutas se entrecruzan y los puntos escogidos son muy cercanos entre sí.

Los resultados consolidados se muestran a continuación:

Tabla 5. Resumen de resultados obtenidos por el modelo heurístico para el escenario 1.

Número de ruta	Distancia total recorrida (m)	Peso total recolectado (Kg)	Número de contenedores
1	10.436	480	8
2	12.430	480	8
3	14.576	468	7
4	14.593	468	9
5	18.992	492	8
6	19.105	492	11
7	23.526	480	9
<b>Total</b>	<b>113.694</b>	<b>3.360</b>	<b>60</b>

El resultado de esta solución propone la instalación de 60 contenedores en los puntos especificados anteriormente para una distancia total recorrida de 113 Km. Finalmente se recolecta una cantidad de 3.36 Toneladas de pilas mensuales, superando la meta que debe cumplir la compañía.

### 9.2.2. Escenario 2

En este escenario el porcentaje de llenado de todos los nodos se incrementa en 10% en relación a los porcentajes utilizados en el escenario 1. Los resultados obtenidos por el modelo heurístico en un tiempo de ejecución de 53.1 segundos para este escenario se muestran en la Tabla 6:

Tabla 6. Resultados obtenidos por el modelo heurístico para el escenario 2.

ESCENARIO 2							
NODO	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	RUTA 5	RUTA 6	RUTA 7
1	Tronex S.A	Tronex S.A	Tronex S.A	Tronex S.A	Tronex S.A	Tronex S.A	Tronex S.A
2	Noel	Coltabaco	Línea comunicaciones S.A.S	Alcaldía de Medellín	Holasa	Terminal de transporte del sur	CC. Unicentro
3	Centro Comercial Monterrey	Nacional de Chocolates	CORPAUL	Consejo de Medellín	Microplast y Coldeplast	El Colombiano	Corantioquia
4	Politecnico Jaime Isaza Cadavid	Edificio General Bancolombia	C.C Santa fé	Gobernación de Antioquia	Club Rotario de Medellín	EPM	Universidad Luis Amigó
5	Universidad EAFIT	Área Metropolitana	Panamericana	Plaza Mayor	Estacion del Metro, San	Asamblea Departamental	Biblioteca Piloto
6	Familia Sancela	IDEA	Kimberly	Argos(Santa Fe)	Multienlace Call center	EDATEL S.A E.S.P	Colegio San Ignacio
7	Tránsito Departamental	Teleantioquia	San Fernando Plaza	Zoológico Santa fe	Cryogas	Escuela de Ingeniería de Antioquia	UPB
8	Colcafé	Club El Rodeo	ISAGEN	Tronex S.A	CC. Camino Centro	PAPYSER LTDA	Colegio UPB
9	Tronex S.A	Tronex S.A	Tronex S.A		Comercial La C.C El Huevo	Tronex S.A	Tronex S.A
10					Tronex S.A		
11							

En la solución de este escenario se recorre un radio máximo de de 6Km a la redonda, lo que representa una disminución con respecto al primero escenario de un 15% en el área de cobertura. De igual manera se espera que el tiempo necesario para realizar la recolección de todos los puntos presentados en la solución sea menor que en el primer escenario.

Con base en los resultados anteriores, se ubicaron las rutas obtenidas en el mapa que se muestra en la Figura 8.

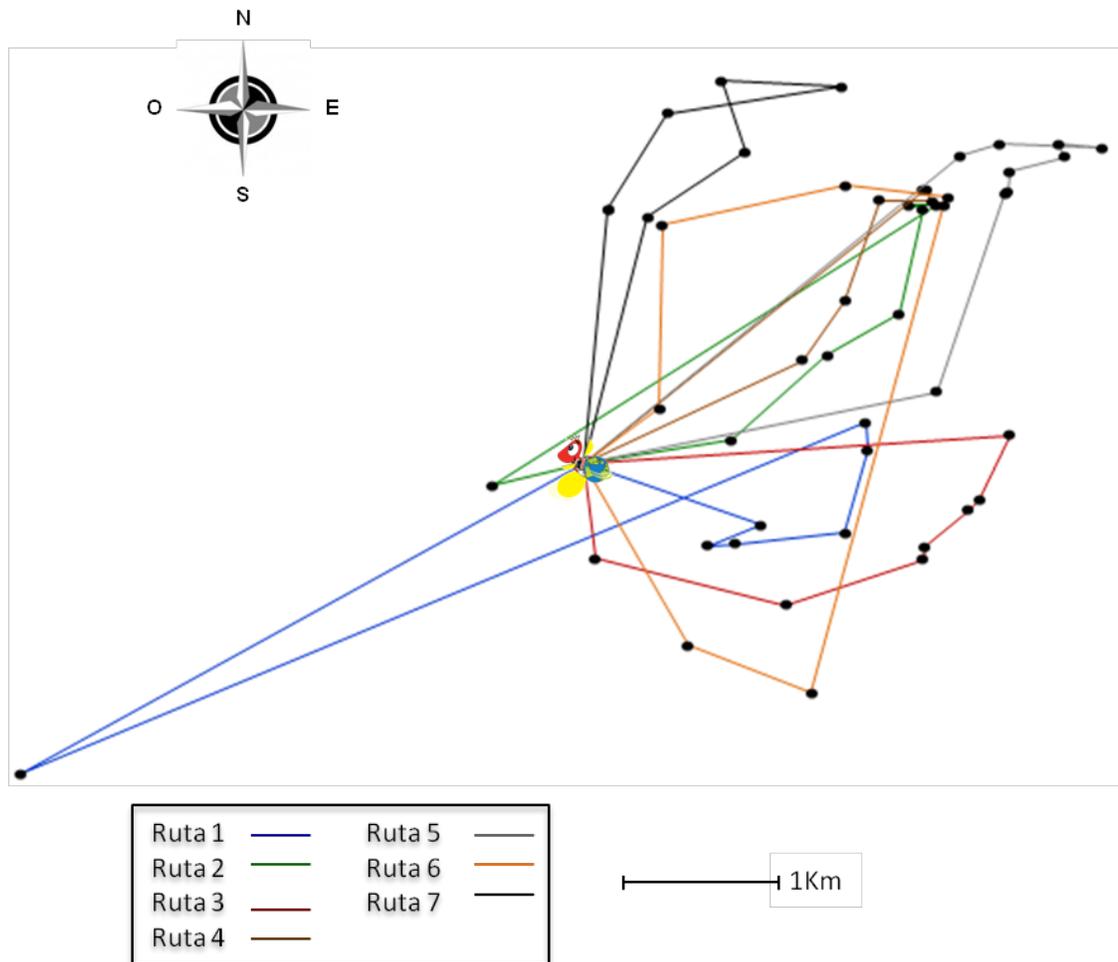


Figura 8: Distribución de nodos en las rutas obtenidas para recolección de pilas usadas.  
Escenario 2.

De igual manera que el anterior escenario, los puntos escogidos para la instalación de un contenedor son próximos entre sí. En resumen, los resultados obtenidos en este escenario, se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Resumen de resultados obtenidos por el modelo heurístico para escenario 2.

<b>Número de ruta</b>	<b>Distancia total recorrida (m)</b>	<b>Peso total recolectado (Kg)</b>	<b>Número de contenedores</b>
1	9.170	478	7
2	12.046	478	7
3	12.794	478	7
4	13.271	456	6
5	17.630	498	9
6	17.443	490	7
7	18.699	478	7
<b>Total</b>	<b>101.053</b>	<b>3.356</b>	<b>49</b>

En esta solución se deben instalar 49 contenedores, presentando una diferencia de 11 unidades con respecto al primer escenario (ver gráfica 2), resultado esperado debido al aumento en las tasas de llenado de los contenedores. En esta situación, en total se deben recorrer 101Km (ver gráfica 3), lo que representaría una disminución del 12% en la distancia total recorrida por el vehículo. Finalmente se recolectan 3.36 Toneladas de pilas, respecto al escenario 1, variando la cantidad de pilas recolectadas en un 0.12 % (ver gráfica 4); lo que permite concluir que se recolecta aproximadamente la misma cantidad de pilas pero se presenta un ahorro significativo en el número de contenedores.

### 9.2.3. Escenario 3

En este escenario el porcentaje de llenado de todos los nodos se disminuyó en 10% en relación a los porcentajes utilizados en el escenario 1.

Los resultados obtenidos por el modelo heurístico para este escenario se muestran en la Tabla 8, los cuales fueron hallados utilizando un tiempo de ejecución de 53.1 segundos.

Tabla 8. Resultados obtenidos por el modelo heurístico para el escenario 3.

ESCENARIO 3							
NODO	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	RUTA 5	RUTA 6	RUTA 7
1	Tronex S.A	Tronex S.A	Tronex S.A	Tronex S.A	Tronex S.A	Tronex S.A	Tronex S.A
2	Nacional de Chocolates	Centro Comercial Monterrey	Coltabaco	Línea comunicaciones S.A.S	Terminal de transporte del sur	Universidad Nacional sede Medellín	Club El Campestre
3	IDEA	Politecnico Jaime Isaza Cadavid (Poblado)	Edificio General Bancolombia	El Colombiano	ISAGEN	Plaza Minorista	Panamericana
4	Alcaldía de Medellín	C.C Oviedo	Área Metropolitana	CC. Unicentro	Almatex	SENA	Kimberly
5	Consejo de Medellín	San Fernando Plaza	EDATEL S.A E.S.P	EPM	C.C San Diego	U de Antioquia	Colegio San José de la Salle
6	Asamblea Departamental	Universidad EAFIT	Teleantioquia	Corantioquia	Universidad Cooperativa	Parque Explora	Universidad CES
7	Gobernación de Antioquia	CORPAUL	Microplast y Coldeplast	Universidad Luis Amigó	Congregación Mariana	Tecnológico Pascual Bravo	ISA
8	Plaza Mayor	Familia Sancela	Club Rotario de Medellín	Biblioteca Piloto	Clinica Medellin S.A	ITM	C.C El Tesoro
9	Argos(Santa Fe)	Tránsito Departamental	Multienlace Call center	Colegio San Ignacio	CC. Paseo La Playa	Esumer	C.C Santa fé
10	Zoológico Santa Fé	Colcafé	Cryogas	UPB	Centro Comercial La Cascada	Universidad Nacional (Facultad de minas)	Escuela de Ingeniería de Antioquia
11	Tronex S.A	Noel	CC. Camino real	Colegio UPB	C.C El Hueco	C.C Los Molinos	AKT
12		Tronex S.A	Club El Rodeo	Tronex S.A	Estacion del Metro, San Antonio	Tronex S.A	PAPYSER LTDA
13			Tronex S.A		Pintuco		FLA
14					Tronex S.A		Tronex S.A

Este último escenario evaluado presenta un radio de cobertura de 8Km a la redonda, lo que representa un aumento del 14% de éste con respecto al escenario 1 y de un 28% con respecto al escenario 2. Se espera que el tiempo para realizar la recolección en todos los puntos instalados sea mayor que en los demás escenarios planteados.

En comparación con los puntos escogidos para cada escenario, se puede observar que algunos de ellos siempre son incluidos en las rutas.

Con base a los resultados anteriores, se ubicaron las rutas obtenidas en el mapa: que se muestra en la Figura 9.

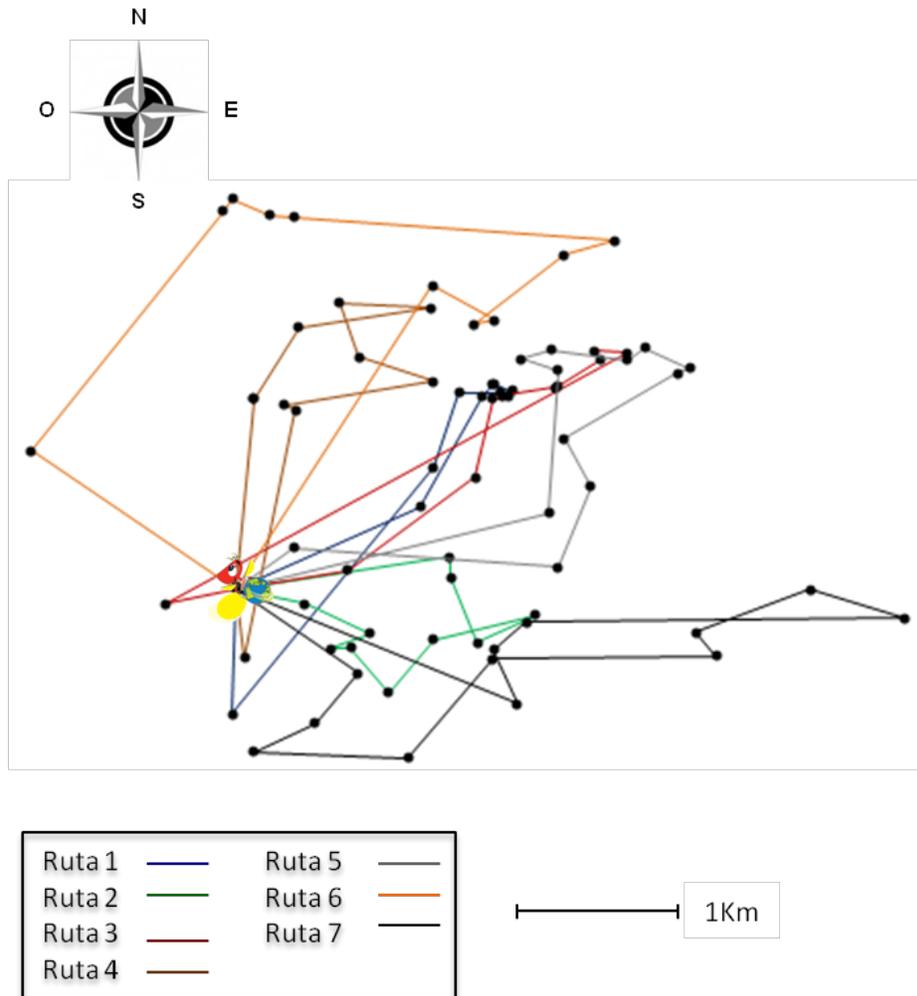


Figura 9: Distribución de nodos en las rutas obtenidas para recolección de pilas usadas.

Escenario 3.

La figura 9 muestra un comportamiento similar a los escenarios 1 y 2 respecto a la distribución de los nodos, es decir que existe una proximidad entre puntos asignados para realizar el proceso de recolección.

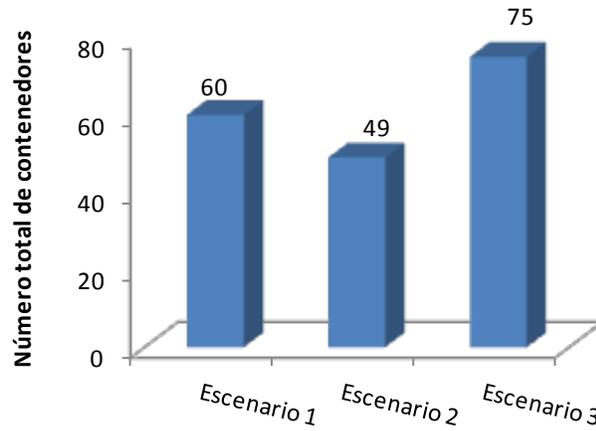
El resumen de los resultados obtenidos en este escenario se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Resumen de resultados obtenidos por el modelo heurístico para escenario 3.

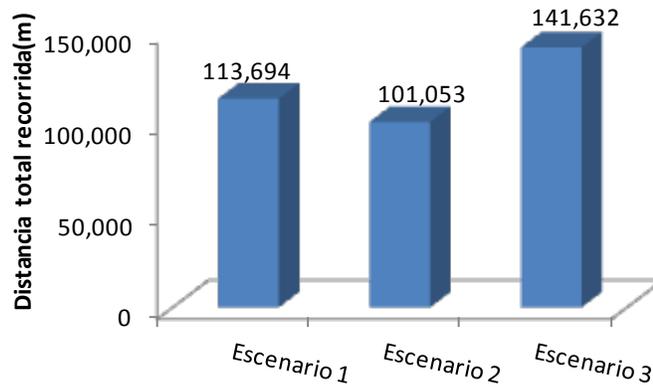
<b>Número de ruta</b>	<b>Distancia total recorrida (m)</b>	<b>Peso total recolectado (Kg)</b>	<b>Número de contenedores</b>
<b>1</b>	13.358	486	9
<b>2</b>	13.794	476	10
<b>3</b>	14.500	490	11
<b>4</b>	21.378	488	10
<b>5</b>	22.153	492	12
<b>6</b>	27.011	476	10
<b>7</b>	29.438	480	12
<b>Total</b>	<b>141.632</b>	<b>3.388</b>	<b>75</b>

Para esta solución se tiene que se deben instalar 75 contenedores para cumplir la meta de recolección, esto equivale a un aumento del 25% respecto al escenario 1 (gráfica 2). En este caso se debe recorrer una distancia total de 141Km, es decir un aumento de 24% en la distancia total a recorrer (gráfica 3). Finalmente se recolecta una cantidad de 3.39 Toneladas de pilas, lo que representa un aumento del 0.88% respecto al escenario 1 (gráfica 4). Se puede concluir entonces que una disminución en las tasas de llenado en los puntos asignados, trae como consecuencia un aumento considerable tanto en la distancia a recorrer, como en el número de contenedores, con casi la misma cantidad de toneladas de pilas a recolectar.

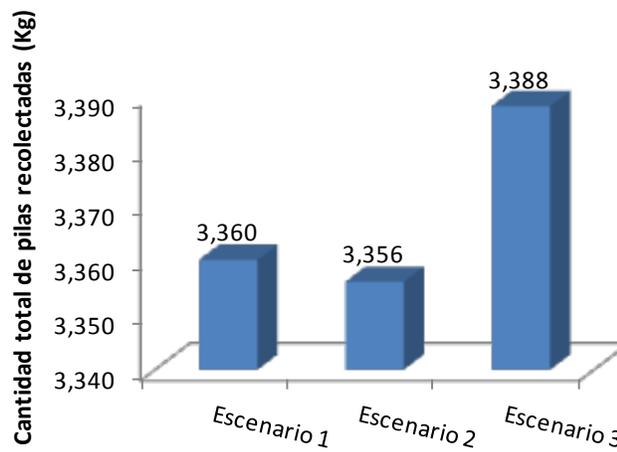
Finalmente en los 3 escenarios evaluados, es decir todas las veces que se corrió el modelo, se incluyeron en las rutas los puntos 64, 28, 102, 101, 112, 65, 14, 107, 72, 67, 104, 6, 13, 2, 103, 32, 12, 11, 105, 114, 109, 90, 108, 116, 98, 93, 73, 27, 10, 17, 61, 97, 4, 7, 8, 42, 54, 85, 30, 58, 80, 89, 96, 29, 25, 51 y 55. Podemos decir que esto muestra cierto nivel de robustez del modelo ya que en las corridas realizadas se dieron como puntos insertados en alguna ruta los 47 nodos mencionados anteriormente.



Gráfica 2. Número de contenedores totales a instalar en cada escenario



Gráfica 3. Distancia total recorrida por escenarios



Gráfica 4. Cantidades de pilas totales recolectadas en cada escenario.

### 9.3. Estimación de tiempos para rutas encontradas

La interacción de cantidades de vehículos y personas en las vías de la ciudad, producen una velocidad promedio de desplazamiento vehicular en Medellín de 34 km/h (Secretaría de Transportes y Tránsito de Medellín, 2012). Se supone esta velocidad para hacer los cálculos del tiempo que toma el vehículo disponible en realizar la ruta de recolección en los 3 escenarios planteados, los cuales se muestran en la Tabla 10:

Tabla 10. Tiempo total estimado de recorrido para los escenarios 1, 2 y 3.

<b>Escenario</b>	<b>Distancia (Km)</b>	<b>Velocidad (Km/h)</b>	<b>Tiempo (h)</b>
<b>1</b>	113.694	34	3.34
<b>2</b>	101.053	34	2.97
<b>3</b>	141.632	34	4.17

Es importante anotar que según los resultados obtenidos, la relación que existe entre tasa de llenado y tiempo (o distancia recorrida) no es lineal, ya que si la tasa de llenado de los contenedores se disminuye en un 10%, la distancia y el tiempo se incrementan en un 24%, en comparación con una disminución en los tiempos y en las distancias recorridas del 11% cuando las tasas de llenado se incrementan en un 10%.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

El modelo heurístico desarrollado presentó resultados factibles en tiempos de computación cuantiosamente menores que los requeridos por el modelo exacto, tardando 61.57 segundos en ejecutar el código para evaluar el escenario 1, 53.1 segundos para el escenario 2 y 87,01 segundos para el escenario 3. (Anexo 4), en comparación con las 6 horas de computo utilizadas con el modelo exacto, las cuales no fueron suficientes para obtener un resultado cercano al óptimo (gap de >90%). Estos resultados ser acordes a lo mencionado en el capítulo 5 donde se muestra que los métodos heurísticos presentan un mejor desempeño para la solución de este tipo de problemas (tabla 11). Aunque los problemas resueltos no presentan las mismas variables, se puede realizar una comparación con los estudios realizados con el objetivo de ilustrar que, mediante la aplicación de métodos heurísticos, se obtienen cortos tiempos computacionales para problemas que varían entre 60 y 102 nodos, por lo tanto es un método práctico para la solución de los problemas TOP. La tabla 11, muestra una comparación entre tiempos computacionales obtenidos en la aplicación de métodos heurísticos para solución de problemas TOP, donde se evidencia que a mayor cantidad de nodos presentes en el problema, mayor es el tiempo computacional necesario para la ejecución del mismo, de igual forma esto se ve afectado por el tipo de método heurístico así como las características del equipo utilizado. Sin embargo, a pesar de que el tiempo computacional aumenta conforme aumenta la cantidad de nodos, el tiempo computacional requerido en comparación con los métodos exactos es mucho menor.

Al resolver los tres escenarios planteados; tasa de llenado, media, alta y baja, este último presenta el mayor tiempo de ejecución ya que en cada ruta se requiere insertar una mayor cantidad de nodos, al recolectar menor cantidad de kilos en cada punto.

Según los resultados obtenidos y mostrados en la gráfica 2 se deben instalar 60, 49 y 75 contenedores para los escenarios 1,2 y 3 respectivamente, lo que representa una disminución del 18% en el número de contenedores a instalar en el escenario 2 en

comparación con el escenario 1 y un aumento en el porcentaje del 25% del escenario 3 en comparación con el 1.

Tabla 11. Resultados de tiempos computacionales obtenidos en otros estudios que resuelven el problema TOP mediante metodologías heurísticas. (Souffriau, *et al*, 2011)

Referencia	Máximo de nodo evaluados	Especificación del equipo	Técnica	Tiempo de ejecución (s)
Archetti <i>et al</i> (2007)	102	Intel Pentium 4 1GB RAM 2.8 GHz	Variable Neighborhood Search Tabu Search Algorithms	531.5
Ke <i>et al</i> (2008)	102	PC 3.0 GHz	Ant colony optimization	252.3
Vansteenwegen <i>et al</i> (2009)	66	Intel Pentium 4 1GB RAM 2.8 GHz	Variable Neighborhood Search	3.8

Para cada escenario el número total de rutas fue de siete (7); número constante para todos los casos debido a que se obtiene un mayor beneficio al incluir muchos nodos con porcentajes de recolección bajos pero con una menor distancia de recorrido, en comparación con rutas con mayor porcentaje de recolección pero mayores distancias recorridas.

Para los escenarios simulados se obtuvieron distancias totales a recorrer de 113.7Km, 101Km y 141.7Km para los escenarios 1, 2 y 3 respectivamente. Las distancias recorridas presentan una variación considerable, disminuyendo un 11% del escenario 2 con respecto al escenario 1 y aumentando un 24% del escenario 3 con respecto al 1, por lo que se puede concluir que la tasa de llenado es la variable que más relevancia presenta en el modelo ya que de ésta dependen los cambios significativos del mismo en cuanto a número de contenedores y distancia recorrida, lo que eventualmente se traduce en costos.

Para realizar el recorrido de recolección de las 7 rutas en los 3 escenarios presentados, se tiene un promedio de 3.5 horas aproximadamente; esto quiere decir que el vehículo

podrá hacer las recolecciones en los puntos posiblemente una vez al mes, lo que presenta una ventaja para la compañía ya que el vehículo no sólo cumple esta función, si no que se utiliza como vehículo supernumerario, por consiguiente se evitaría el sobrecosto por la compra o contratación de un vehículo adicional para el proceso de recolección de los contenedores

A pesar de que el vehículo puede realizar el recorrido de las rutas en uno o dos días, teniendo en cuenta los tiempos de demora de recolección en cada punto, el carro debe regresar a Tronex S.A. una vez haya alcanzado su capacidad máxima, es decir 7 veces, lo que impide integrar y unificar las rutas de modo tal que sean consecutivas, por lo que se podría considerar invertir en un vehículo con mayor capacidad ya sea por inversión propia de la empresa o contratación de terceros.

Consistentemente, se evidencia que las rutas (figuras 7, 8 y 9) están compuestas por nodos muy cercanos a Tronex S.A, con un radio promedio de cobertura de 7Km a la redonda, lo que se evidencia en que los puntos de recolección hallados por medio del modelo heurístico se trasponen en el mapa; las cuales son soluciones factibles bastantes buenas ya que obtiene soluciones que minimizan la distancia recorrida, objetivo propuesto al plantear, desarrollar e implementar el modelo de localización-ruteo planteado en el presente trabajo.

Es importante resaltar que los escenarios planteados permitieron llegar a la conclusión que los resultados que se obtienen tanto con el modelo exacto, como con el modelo heurístico dependen considerablemente del porcentaje de llenado en cada punto o nodo. Para el primer escenario se supuso un alto porcentaje de llenado, cuyo valor no varía mucho entre nodos (solo se supusieron 3 diferentes porcentajes: 72%, 48% y 36% acorde a la clasificación anteriormente descrita), por lo que se presentaron rutas cercanas al punto inicial ya que si se evalúan dos nodos con el mismo porcentaje de llenado pero con diferentes distancias respecto al punto de destino, se descartará de la ruta el nodo que presente mayor distancia. Esto da como resultado que la cobertura del programa abarque en mayor parte la zona sur de Medellín, área cercana a la ubicación

geográfica de Tronex S.A.

El modelo desarrollado no considera las consecuencias que puede presentar un punto muy cercano a otro, principalmente porque puntos muy cercanos entre sí tienen un mismo público objetivo, por lo tanto puede presentarse una reducción en el porcentaje de llenado de uno de los contenedores. Un ejemplo de esta situación lo conforma el punto de la UPB donde se tiene en cuenta tanto la universidad como el colegio, estos dos puntos fueron seleccionados en los 3 escenarios ya que son puntos muy cercanos entre sí, instalar un contenedor en uno de los puntos sería suficiente ya que se tiene el mismo público objetivo para llenar el contenedor.

Cuando los porcentajes de llenado difieran, ya sea que presenten mayor o menor porcentaje de llenado, entre puntos es necesario evaluar cuáles de estos presentan un mayor beneficio a pesar de que la distancia recorrida sea mayor, y de esta manera se pueda aumentar la cobertura del programa RECOPILA® en el Área Metropolitana, que finalmente es uno de los requisitos que debe cumplir la campaña ante la autoridad ambiental.

Los porcentajes de llenado de los contenedores planteados en el presente problema son relativamente altos en comparación con lo que puede presentarse en la primera etapa de implementación del programa donde hay diversos factores que influyen en esta variable, tales como el mercadeo y la publicidad realizados para dar a conocer la campaña, la educación de las personas para separar los residuos generados en la vida cotidiana; este último es quizá el mayor problema al que se enfrenta la campaña ya que es difícil cambiar la cultura de las personas en poco tiempo en un país como Colombia que apenas hace pocos años comenzó a implementar programas de posconsumo y otras estrategias gubernamentales para el cuidado del medio ambiente.

Aunque pueden existir otras rutas que minimicen aún más la distancia recorrida y cumplan las restricciones, el resultado que se muestra es bueno ya que presenta un corto tiempo de ejecución y resultados coherentes; además se puede decir que es

robusto en cuanto a los resultados, ya que al evaluar los diferentes escenarios se puede ver que usualmente se escogen unos puntos en común para las rutas respectivas. Por lo tanto, el modelo desarrollado puede ser utilizado como una herramienta para obtener diseños preliminares de las rutas, las cuales pueden ser mejoradas utilizando datos reales acerca del porcentaje de llenado. Por otra parte el modelo brinda una estimación inicial del orden de magnitud de la distancia a recorrer y de la cantidad de contenedores a instalar, facilitando la toma de decisiones al interior de la empresa permitiendo realizar una aproximación de los costos y apoyando la planeación de la cadena de logística inversa en cuanto a definición de rutas e instalación de contenedores. Sin embargo la definición de la cantidad y ubicación de puntos de recolección es apenas una etapa del proceso, no obstante la cadena de logística inversa debe ser profundizada y complementada por estudios que se enfoquen en el tratamiento adecuado de los residuos recolectados y la definición de etapas intermedias, como de la separación de tipos de baterías.

Debido a que el programa RECOPILA® debe ser implementado en las demás ciudades donde Tronex S.A comercializa sus pilas (al menos en las principales), es importante resaltar que el modelo se puede aplicar en otros escenarios siempre y cuando no se aumente considerablemente el número de puntos a evaluar ya que esto influye en los resultados arrojados por cada tipo de metodología para resolver los problemas de localización-ruteo.

## CONCLUSIONES

- Luego de una revisión de literatura se llegó a la conclusión que el problema que se enfrentaba mostraba mayor similitud con los descritos en la literatura como Team Orienteering Problem; este tipo de modelos hacen parte de las teorías de juego estudiadas en la Investigación de Operaciones. Esta similitud se encontró luego de definir las restricciones y función objetivo del problema propio y de comparar las mismas con los modelos desarrollados por diversos autores.
- El modelo exacto no presentó resultados óptimos para el problema evaluado ya que no presentó una solución óptima luego de 6 horas de ejecución con un gap superior al 90%, por lo que se puede concluir que no es un método rápido ni práctico para resolver el problema planteado.
- El modelo heurístico planteado arrojó resultados coherentes en cuanto a las restricciones y la función objetivo, además presentó cortos tiempos computacionales. Por lo que se concluye que éste es un método apropiado y práctico para resolver el problema que se planteó como un Team Orienteering Problem con 117 nodos para determinar 7 rutas, como el problema resuelto en el proyecto.
- El tiempo computacional resultante para el modelo matemático fue de 6 horas, para hallar una solución factible, pero muy alejada del valor óptimo, mientras la solución utilizando el método heurístico presentó un tiempo de ejecución máximo de 0.0242 horas. Se concluye que este tipo de problemas se pueden clasificar como difíciles respecto al tiempo que toma explorar el espacio solución y por lo tanto los métodos heurísticos presentan una buena alternativa de solución con respecto a tiempos de ejecución mínimos, sin necesidad de esfuerzos computacionales muy grandes, características deseables para problemas de toma de decisiones en ambientes industriales.

- Es posible que el problema desarrollado en el presente trabajo pueda abarcarse desde un modelo exacto si este es complementado con métodos heurísticos que reduzcan el espacio-solución permitiendo disminuir tiempos computacionales.
- La definición de variables y parámetros es una de las etapas más importantes e influyentes en la estructuración de cualquier tipo de modelo que tenga como objetivo realizar una representación de un fenómeno real. Para el caso de Tronex S.A., el modelo planteado se desarrolla para apoyar la toma de decisiones al interior de la empresa y la variable que mayor importancia presenta para el caso planteado es el porcentaje de llenado de los contenedores para la recolección de pilas usadas.
- Se pudo evidenciar que a menor porcentaje de recolección de los contenedores se requiere instalar un mayor número de estos para cumplir las regulaciones del gobierno. En el peor de los escenarios los 117 contenedores deben ser ubicados y deberán llenarse hasta un 26% de la capacidad máxima para poder cumplir con la meta de recolección mensual de 3 toneladas.
- Para el escenario donde se presentan porcentajes de recolección de 16,38% y 62% deben instalarse un total de 75 contenedores, para el escenario donde se presentan mayores porcentajes de recolección, 46,58% y 82%, se deben instalar en total 51 contenedores. Se presenta una diferencia significativa entre ambos escenarios y de nuevo se evidencia la relevancia del porcentaje de llenado en los contenedores en los resultados del modelo.
- El porcentaje de recolección de cada punto es determinante en la variación de resultados del modelo ya que el beneficio que se obtiene por instalar un contenedor de pilas usadas depende directamente de este. Además porque los costos directos del programa están relacionados con la compra de contenedores y el transporte de las pilas y baterías recolectadas.

- El modelo planteado se basa en porcentajes de llenado supuestos, es por esto que para facilitar la toma de decisiones en la empresa Tronex S.A respecto a la cantidad de contenedores a instalar en el programa RECOPILA® es necesario realizar un seguimiento a los contenedores que hay instalados actualmente para crear un archivo histórico del cual se pueda realizar un posterior análisis de probabilidad y así el modelo pueda trabajar con datos más aproximados a la realidad.
- La ruta de recolección para los 3 escenarios planteados puede llevarse a cabo en 6 horas aproximadamente, o en una jornada laboral ya que se recorren máximo 141.7Km; con esto la empresa puede optimizar el recurso de transporte.
- El modelo presentado se puede utilizar como una herramienta que apoya la toma de decisiones en el proceso de construcción de la cadena de logística inversa para el caso del programa de posconsumo de pilas; éste puede ser replicado en otras ciudades donde se presente un número similar de puntos candidatos con restricciones similares. Además puede ser utilizado para estimar costos totales del programa de posconsumo.
- La definición de la cantidad y localización de contenedores de pilas usadas y la definición de las rutas a realizar por el vehículo, son etapas iniciales a definir en la construcción de una cadena de logística inversa; posteriormente se deben definir otras etapas posteriores a este proceso como el almacenamiento, clasificación y tratamiento de los residuos.

## RECOMENDACIONES

Para futuros estudios se recomienda incluir en el modelo, variables como la densidad de población, afluencia de personas, público objetivo en cuanto a condiciones socioeconómicas y culturales; para realizar un acercamiento más profundo del problema planteado, lo cual se puede hacer en la medida que se recopile este tipo de información, la cual no está aún disponible.

Para aumentar la robustez del modelo planteado, este debe evaluarse en lo posible con porcentajes de recolección reales, obtenidos al realizar un seguimiento detallado de los contenedores instalados actualmente de tal manera que los datos puedan analizarse y proyectarse en el tiempo.

Realizar una evaluación de los puntos no incluidos en las rutas inicialmente pero se encuentran concentrados en otras zonas de la ciudad, con el fin de evaluar el beneficio de estos con miras a maximizar la cobertura del programa.

A medida que el programa RECOPILA® se implemente irán apareciendo otras restricciones como distancias máximas o mínimas entre contenedores, puntos obligatorios para instalar un contenedor, otros puntos candidatos para instalación etc. Estas deben ser incluidas en el modelo, desde su etapa de diseño, para arrojar resultados que apoyen realmente el proceso de tomas de decisión dentro de la empresa Tronex S.A.

## ANEXO 1

Tabla 12: Listado y clasificación de puntos candidatos para ubicación de contenedores de pilas usadas

Número de nodo	Nodo	Clasificación de zona	Número de nodo	Nodo	Clasificación de zona	Número de nodo	Nodo	Clasificación de zona
1	Alcaldía de Medellín	Grupo 1: Entidades departamentales gubernamentales y municipios	33	Club El Campestre	Grupo 2: Sitios de asistencia masiva e instituciones educativas	64	Noel	Grupo 3: Empresas privadas, tiendas y supermercados
2	Parque Explora		34	Country Club Ejecutivos		65	Familia Sancela	
3	EPM		35	Iglesia Señor caído de Girardota		66	Pintuco	
4	SENA		36	Iglesia Sabaneta María Auxiliadora(Santa Ana)		67	Nacional de Chocolates	
5	Área Metropolitana		37	U de Antioquia		68	Cervunión	
6	Corantioquia		38	ITM		69	FLA	
7	Biblioteca Piloto		39	Escuela de Ingeniería de Antioquia		70	AKT	
8	ISA		40	U de Medellín		71	Sofasa	
9	ISAGEN		41	USB		72	Coltabaco	
10	Asamblea Departamental		42	UPB		73	Kimberly	
11	Consejo de Medellín		43	Esumer		74	Zenu	
12	IDEA		44	Universidad Cooperativa		75	Colanta	
13	Tránsito Departamental		45	Tecnológico Pascual Bravo		76	Enka de Colombia	
14	Indeportes		46	Universidad CES		77	Abracol	
15	Terminal de transporte del norte		47	Colegio Mayor de Antioquia		78	Solla	
16	Terminal de transporte del sur	Grupo 2: Sitios de asistencia masiva e instituciones educativas	48	Colegiatura Colombiana de Diseño	79	Interquím		
17	Central Mayorista de Antioquia		49	U. San Martín	80	Multienlace Call center		
18	Plaza Minorista		50	Corporación universitaria lasallista	81	Fabricato		
19	C.C Oviedo		51	Universidad Luis Amigó	82	Vestimundo		
20	C.C El Tesoro		52	Colegio Cumbres	83	Didetexco		
21	C.C San Diego		53	Colegio Columbus School	84	Almatex		
22	C.C Los Molinos		54	Colegio UPB	85	Microplast y Coldeplast		
23	C.C Mayorca		55	Colegio San Ignacio	86	Holasa		
24	C.C El Hueco		56	Colegio San José de la Salle	87	Prodenvas Crown – Grupo Mundial		
25	C.C Aves maría – Sabaneta		57	Colegio Salazar y Herrera	88	Corona		
26	San Fernando Plaza		58	Estacion del Metro, San Antonio	89	Cryogas		
27	Centro Comercial Monterrey		59	Estación del Metro, Niquia	90	Argos(Santa Fe)		
28	Centro Comercial La Cascada		60	Estación del Metro, Itagui	91	Argos(El que queda por la regional)		
29	Club Rotario de Medellín		61	El Colombiano	92	Argos(El que queda por Coca-Cola)		
30	Club Rotario Envigado		62	El Mundo	93	Panamericana		
32	Club El Rodeo		63	CNPML (Edificio los espejos)	94	Clinica Medellin S.A		

## ANEXO 2

Tabla 13: Coordenadas geográficas de cada punto candidato para la instalación de contenedores de pilas usadas, utilizadas para crear la matriz de distancias entre todos los nodos.

Nodo	Punto	Latitud	Longitud	Nodo	Punto	Latitud	Longitud
1	Tronex S.A	6.208816	-75.590771	60	Estación del Metro, Itagui	6.163425	-75.606803
2	Alcaldía de Medellín	6.244900	-75.573973	61	El Colombiano	6.240351	-75.586856
3	Parque Explora	6.270274	-75.565979	62	El Mundo	6.263827	-75.588849
4	EPM	6.245484	-75.577818	63	CNPML (Edificio los espejos)	6.252864	-75.563242
5	SENA	6.255477	-75.575195	64	Noel	6.206032	-75.586255
6	Área Metropolitana	6.242428	-75.573973	65	Familia Sancela	6.198368	-75.583281
7	Corantioquia	6.249846	-75.582759	66	Pintuco	6.222116	-75.570266
8	Biblioteca Piloto	6.258479	-75.577990	67	Nacional de Chocolates	6.223150	-75.578714
9	ISA	6.200971	-75.560669	68	Cervunión	6.168161	-75.618683
10	ISAGEN	6.212661	-75.569666	69	FLA	6.193827	-75.582808
11	Asamblea Departamental	6.243889	-75.572670	70	AKT	6.179926	-75.589596
12	Consejo de Medellín	6.244892	-75.573818	71	Sofasa	6.171228	-75.597457
13	IDEA	6.242951	-75.574638	72	Coltabaco	6.212042	-75.583463
14	Tránsito Departamental	6.198123	-75.584611	73	Kimberly	6.202789	-75.571755
15	Indeportes	6.254202	-75.588779	74	Zenu	6.302915	-75.564430
16	Terminal de transporte del norte	6.279073	-75.571138	75	Colanta	6.272063	-75.572624
17	Terminal de transporte del sur	6.216087	-75.587033	76	Enka de Colombia	6.384907	-75.449276
18	Central Mayorista de Antioquia	6.186491	-75.590981	77	Abracol	6.238045	-75.553331
19	Plaza Minorista	6.256306	-75.573810	78	Solla	6.313123	-75.557086
20	C.C Oviedo	6.199248	-75.574987	79	Interquim	6.381409	-75.442815
21	C.C El Tesoro	6.196896	-75.559328	80	Multienlace Call center	6.249291	-75.566958
22	C.C San Diego	6.235346	-75.569295	81	Fabricato	6.329929	-75.556326
23	C.C Los Molinos	6.233165	-75.604194	82	Vestimundo	6.177206	-75.358958
24	C.C Mayorca	6.161852	-75.605132	83	Didetexco	6.173845	-75.592057
25	C.C El Hueco	6.249358	-75.572109	84	Almatex	6.226843	-75.567576
26	C.C Aves maría – Sabaneta	6.148713	-75.616594	85	Microplast y Coldeplast	6.244347	-75.569907
27	San Fernando Plaza	6.204067	-75.571181	86	Holasa	6.218410	-75.573297
28	Centro Comercial Monterrey	6.214311	-75.576811	87	Prodenvas Crown – Grupo Mundial	6.261660	-75.565856
29	Centro Comercial La Cascada	6.250971	-75.570173	88	Corona	6.153057	-75.618553
30	Club Rotario de Medellín	6.244607	-75.569765	89	Cryogas	6.250896	-75.567269
31	Club Rotario Envigado	6.164289	-75.577397	90	Argos	6.230323	-75.577835
32	Club El Rodeo	6.206005	-75.595323	91	Argos (regional)	6.278443	-75.575432
33	Club El Campestre	6.188441	-75.572399	92	Argos (Coca-Cola)	6.276225	-75.573647
34	Country Club Ejecutivos	6.219412	-75.560739	93	Panamericana	6.198035	-75.573893
35	Iglesia Señor caído de Girardota	6.377102	-75.446032	94	Clínica Medellín S.A	6.251472	-75.563994
36	Iglesia Sabaneta María Auxiliador	6.151334	-75.615104	95	CC. Paseo La Playa	6.249313	-75.565129
37	U de Antioquia	6.267779	-75.569301	96	CC. Camino real	6.250491	-75.565132
38	ITM	6.274884	-75.588554	97	CC. Unicentro	6.241314	-75.587625
39	Escuela de Ingeniería de Antioquia	6.178724	-75.579493	98	C.C Santa fé	6.196331	-75.573964
40	U de Medellín	6.231883	-75.610985	99	Universidad Nacional sede Medellín	6.262393	-75.577902
41	USB	6.331294	-75.569825	100	Universidad Nacional (minas)	6.275521	-75.591645
42	UPB	6.242372	-75.589586	101	Universidad EAFIT	6.199776	-75.577837
43	Esumer	6.277705	-75.591032	102	Politecnico Jaime Isaza Cadavid	6.210773	-75.576689
44	Universidad Cooperativa	6.246798	-75.561855	103	Teleantioquia	6.242945	-75.573299
45	Tecnológico Pascual Bravo	6.274599	-75.586907	104	Edificio General Bancolombia	6.228547	-75.575128
46	Universidad CES	6.208562	-75.553162	105	Gobernación de Antioquia	6.243468	-75.573535
47	Colegio Mayor de Antioquia	6.273311	-75.591121	106	IPS Universitaria	6.266552	-75.565435
48	Colegiatura Colombiana de Diseño	6.208981	-75.546371	107	Colcafé	6.200848	-75.581989
49	U. San Martín	6.142704	-75.612794	108	Zoológico Santa fe	6.222494	-75.579929
50	Corporación universitaria lasallista	6.099980	-75.638891	109	Plaza Mayor	6.243524	-75.576155
51	Universidad Luis Amigó	6.25926	-75.583970	110	Haceb	6.351447	-75.512912
52	Colegio Cumbres	6.168134	-75.572173	111	EEVVM	6.303782	-75.565338
53	Colegio Columbus School	6.154963	-75.542707	112	CORPAUL	6.190315	-75.580777
54	Colegio UPB	6.242372	-75.589586	113	Congregación Mariana	6.247870	-75.561090
55	Colegio San Ignacio	6.254936	-75.586636	114	EDATEL S.A E.S.P	6.242772	-75.572948
56	Colegio San José de la Salle	6.203547	-75.547071	115	PAPYSER LTDA	6.185035	-75.585616
57	Colegio Salazar y Herrera	6.248638	-75.606018	116	Línea comunicaciones S.A.S	6.196448	-75.590218
58	Estacion del Metro, San Antonio	6.247337	-75.569698	117	Tronex S.A	6.208816	-75.590771
59	Estación del Metro, Niquía	6.337844	-75.544421				

## ANEXO 3

Tabla 14: Resultados obtenidos por el método exacto para las rutas 1 y 2. Escenario 1

Ruta 1				Ruta 2			
Nodo	Nombre	Distancia parcial (m)	Peso (Kg)	Nodo	Nombre	Distancia parcial (m)	Peso (Kg)
1	Tronex S.A	0	0	1	Tronex S.A	0	0
28	Centro Comercial Monterrey	2800	48	116	Línea comunicaciones S.A.S	2600	72
102	Politecnico Jaime Isaza Cadavid (Poblado)	392	72	33	Club El Campestre	5845	48
27	San Fernando Plaza	1768	48	82	Vestimundo	53875	36
47	Colegio Mayor de Antioquia	13049	48	106	IPS Universitaria	48770	72
89	Cryogas	5847	36	25	C.C El Hueco	2422	48
7	Corantioquia	3786	72	5	SENA	2156	72
117	Tronex S.A	7000	0	15	Indeportes	4296	72
	<b>6</b>	<b>34642</b>	<b>324</b>	95	CC. Paseo La Playa	5780	72
				117	Tronex S.A	10100	0
					<b>8</b>	<b>135844</b>	<b>492</b>

Tabla 15: Resultados obtenidos por el método exacto para las rutas 3 y 4. Escenario 1

Ruta 3				Ruta 4			
Nodo	Nombre	Distancia parcial (m)	Peso (Kg)	Nodo	Nombre	Distancia parcial (m)	Peso (Kg)
1	Tronex S.A	0	0	1	Tronex S.A	0	0
108	Zoológico Santa fe	3400	72	14	Tránsito Departamental	2500	72
20	C.C Oviedo	3818	48	88	Corona	10375	36
97	CC. Unicentro	8229	72	59	Estación del Metro, Niquía	25713	48
113	Congregación Mariana	4299	72	38	ITM	10315	48
16	Terminal de transporte del norte	4726	48	10	ISAGEN	9792	72
76	Enka de Colombia	21404	36	109	Plaza Mayor	5029	72
4	EPM	37911	72	6	Área Metropolitana	1142	72
117	Tronex S.A	7600	0	117	Tronex S.A	6400	0
	<b>7</b>	<b>91387</b>	<b>420</b>		<b>7</b>	<b>71266</b>	<b>420</b>

Tabla 16: Resultados obtenidos por el método exacto para las rutas 5 y 6. Escenario 1

Ruta 5				Ruta 6			
Nodo	Nombre	Distancia parcial (m)	Peso (Kg)	Nodo	Nombre	Distancia parcial (m)	Peso (Kg)
1	Tronex S.A	0	0	1	Tronex S.A	0	0
64	Noel	1300	36	32	Club El Rodeo	1500	48
53	Colegio Colombus School	16034	48	69	FLA	2508	36
49	U. San Martín	19004	48	39	Escuela de Ingeniería de Antioquia	4552	48
44	Universidad Cooperativa	16974	48	101	Universidad EAFIT	4164	72
42	UPB	4390	48	26	C.C Aves maría – Sabaneta	8292	48
13	IDEA	2980	72	11	Asamblea Departamental	15665	72
91	Argos(El que queda por la regional)	5416	36	117	Tronex S.A	7100	0
2	Alcaldía de Medellín	6217	72		<b>6</b>	<b>43781</b>	<b>480</b>
12	Consejo de Medellín	2	72				
117	Tronex S.A	7000	0				
	<b>9</b>	<b>79317</b>	<b>480</b>				

Tabla 17: Resultados obtenidos por el método exacto para las rutas 7. Escenario 1

<b>Ruta 7</b>			
<b>Nodo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Distancia parcial (m)</b>	<b>Peso (Kg)</b>
1	Tronex S.A	0	0
107	Colcafé	1800	72
100	Universidad Nacional (Facultad de minas)	15147	72
45	Tecnológico Pascual Bravo	2956	48
3	Parque Explora	3482	72
104	Edificio General Bancolombia	8142	72
24	C.C Mayorca	9978	48
112	CORPAUL	4877	72
94	Clinica Medellin S.A	11407	36
117	Tronex S.A	10400	0
	<b>8</b>	<b>68189</b>	<b>492</b>

## ANEXO 4

Resultados obtenidos con el modelo heurístico:

Instancia	Time	ruta	Metros	Kilos	Cant	Nodos
DatosTronex2_h.txt	61.57	1	113694	3360	8	64 28 102 101 112 65 14 107
		2	10436	480	8	72 67 104 6 13 2 103 32
		3	12430	480	7	12 11 105 114 109 90 108
		4	14576	468	9	69 116 98 93 20 73 27 10 17
		5	14593	468	8	61 97 4 7 8 99 42 54
		6	18992	492	11	86 84 22 85 30 58 80 89 96 29 25
		7	19105	492	9	66 95 87 19 5 51 55 15 23
			23562	480	9	

Figura 10. Resultados obtenidos para el escenario 1.

Instancia	Time	ruta	Metros	Kilos	Cant	Nodos
DatosTronex2_h.txt	53.1	1	101053	3356	7	64 28 102 101 65 14 107
		2	9170	478	7	72 67 104 6 13 103 32
		3	12046	478	7	116 112 98 93 73 27 10
		4	12794	478	6	2 12 105 109 90 108
		5	13271	456	9	86 85 30 58 80 89 96 29 25
		6	17630	498	7	17 61 4 11 114 39 115
		7	17443	490	7	97 7 51 8 55 42 54
			18699	478	7	

Figura 11. Resultados obtenidos para el escenario 2.

Resultados\_Tronex(por debajo): Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

Peso\_objetivo = 3000  
 capacidad\_camion = 500

Instancia	Time	ruta	Metros	Kilos	Cant	Nodos
DatosTronex2_h.txt	87.01		141632	3388		
		1	13358	486	9	67 13 2 12 11 105 109 90 108
		2	13794	476	10	28 102 20 27 101 112 65 14 107 64
		3	14500	490	11	72 104 6 114 103 85 30 80 89 96 32
		4	21378	488	10	116 61 97 4 7 51 8 55 42 54
		5	22153	492	12	17 10 84 22 44 113 94 95 29 25 58 66
		6	27011	476	10	99 19 5 37 3 45 38 43 100 23
		7	29438	480	12	33 93 73 56 46 9 21 98 39 70 115 69

Figura 12. Resultados obtenidos para el escenario 3

## BIBLIOGRAFÍA

- AYANOGLU, Cemal. A location-routing problem for the municipal solid waste management system, Turquía. 2007. Tesis de grado para optar al título de máster de ciencias en ingeniería industrial. School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University.
- ARANEDA, Raul. MORAGA, Reinaldo. La decisión de localización en la cadena de suministro. En: Revista Ingeniería Industrial. Año 4, Nro. 1 (Segundo semestre, 2005). Pp. 29-33.
- ARCHETTI, Claudia. HERTZ, Alain. SPERANZA, Maria. Metaheuristics for the team orienteering problem. En: Journal of Heuristics. Vol 13, Nro.1 (Diciembre, 2007). Pp. 49-73
- BALLOU, R. CHOWDHURY, M. MSVS: An extended computer model for transport mode selection.En: The Logistics and Transportation Review. Vol 16, Nro 4. (1980). Pp. 325–338.
- BÉRUBÉ, J.F., GENDREAU, M., POTVIN, J.Y. An exact e-constraint method for biobjective combinatorial optimization problems: Application to the traveling salesman problem with profits. En: European Journal of Operational Research.Vol 194 (2009). Pp.39–50.
- BUFFA, Elwood S.TAUBERT, William H. Sistemas de Producción e Inventario, Planeación y Control, Editorial Limusa, México, 1.978.
- BUTT, Steven. CAVALIER, Tom. A heuristic for the multiple tour maximum collection problem. En: Computers & Operations Research. Vol. 21, Nro. 1 (Enero,1994). Pp. 101-11).
- BUTT, S., RYAN, D. An optimal solution procedure for the multiple tour maximum collection problem using column generation. En: Computers and Operations Research Vol 26, 2009..Pp 427–441.
- CHAO, I-Ming. GOLDEN, Bruce. WASIL, Edward. The team orienteering problem. En: European Journal of Operational Research. Vol. 88, Nro.3 (Febrero, 1996).Pp 464-474.

- CRUZ-RIVERA, Reynaldo. ERTEL, Jürgen. Propuesta de configuración de redes de recolección de autos al final de su vida útil en México. En: Revista Internacional de Contaminación Ambiental. Vol. 26, Nro. 2 (2010). Pp. 135-149.
- DE BRITO, Marisa P. DEKKER, Rommert. Reverse Logistics: a framework. Erasmus University Rotterdam. Econometric Institute Report EI 2002-38. Pg 19.
- DREZNER, Zvi. HAMACHER, Horst. Facility Location: Applications and Theory. Primera Edición: Berlin. Springer, 2001. Pp. 437. ISBN: 3-540-21345-7.
- GARCÍA, Laura. GÓMEZ, Marcela. Monografía: Sistema de recolección selectiva y gestión ambiental de residuos de pilas y/o acumuladores. Empresa Tronex S.A. Presentado a la dirección de licencias, permisos y trámites ambientales del Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial para dar cumplimiento a la Resolución 1297 de 2010. 2011.
- GIANNIKOS, Ioannis. A multiobjective programming model for locating treatment sites and routing hazardous wastes. En: European Journal of Operational Research. Vol 104, Nro. 2 (Enero, 1998). Pp.333-342.
- GOLDEN, Bruce., LEVY, Larry., VOHRA, Rakesh. The orienteering problem. Naval Research Logistics. Vol 34. 1987, pg 307–318.
- GONZÁLEZ, Francisco J. Introducción a la investigación de operaciones. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México. 1999.
- GONZÁLEZ, Teresa. Modelos matemáticos discretos en las ciencias de la naturaleza. Ediciones Días de Santos. Madrid. 2003.
- GOTTINGER. Hans. A computational model for solid waste management with application. En: European Journal of Operational Research. Vol. 35, Nro. 3 (Junio, 1988). Pp. 350-364
- GUTIN, Gregory. PUNNEN, Abraham. Chapter 1: The Traveling Salesman Problem: Applications, Formulations and Variations. En: Combinatorial Optimization. The Traveling Salesman Problem and Its Variations. Kluwer Academic Publishers. Países Bajos. ISBN 1-4020-0664-0.

- HAMNDY, Taha. Operations Research: An introduction. 7ª Edición. Pearson Education, Inc. México. 2004.
- HALL, Randolph. RACER, Michael. Transportation with common carrier and private fleets: System assignment and shipment frequency optimization. En: IIE Transactions, Vol 27. (Mayo, 1995). Pg 217–225.
- HILLIER, Frederick S. LIEBERMAN, Geral J. Introducción a la Investigación de Operaciones. 6ª Edición. McGraw Hill Interamericana de Editores. México. 1997.
- KE, Liangjun. ARCHETTI, Claudia. FENG, Zuren. Ants can solve the team orienteering problem. En: Computers & Industrial Engineering. Vol 54. (Octubre, 2007). Pg 648-665
- KROON, Leo. VRIJENS, Gaby. Returnable containers: an example of reverse logistics. En: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management. Vol. 25, Nro 2 (Enero, 1995). pp.56 – 68
- KUMAR, Sameer, PUTNAM, Valora. Cradle to cradle: Reverse logistics strategies and opportunities across three industry sectors. En: International Journals of production economics. Vol. 115, Nro. 2 (Octubre, 2008). Pp. 305-315
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – MAVDT.2010. Resolución 1297 del 8 de julio de 2010. Publicada en el Diario Oficial N° 47.769 del 13 de Julio de 2010.
- MUTHA, Akshay. POKHAREL, Shaligram. Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules. En: Computers& Industrial Engineering. Vol. 56, Nro. 1 (Febrero, 2009). Pp. 334–346
- ORTEGA, Miguel. Tipología de flujos en la Logística Inversa. En: Congreso de Ingeniería de Organización. (5:2004: Valladolid). Memorias del V Congreso de Ingeniería de Organización. Valladolid. 2004. Pg 10.
- POLAT, Esra. A location and routing-with-profit problem in glass recycling. Turquía. 2008. Tesis de grado para optar al título de máster de ciencias en

ingeniería industrial. School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University.

- PONCE-CUETO, Eva. GONZALEZ, José Ángel. CARRASCO-GALLEGO, Ruth. Reverse logistics for used portable batteries in Spain: an analytical proposal for collecting batteries. En: EnvironmentalScience. Vol. 3. Parte 6 (2011). Pp. 593-604
- PRAWDA, Juan. Métodos y modelos de investigación de operaciones I: modelos determinísticos. Editorial Limusa. Vol 1.2004.México.
- PROYECTO REVLOG: RevLog, the European Working group on Reverse Logistics [En línea]: <http://www.fbk.eur.nl/OZ/REVLOG/> : (1998)
- REVELLE, C., COHON, J., SHOBRY, D. Simultaneous siting and routing in the disposal of hazardous wastes. En: Transportation Science, 1991. Vol. 25. Nro. 2 (1991). Pp. 138-145
- ROMANO, Denise. MOURA, Andréa. SOARES, Jorge. Brazilian policy on battery disposal and its practical effects on battery recycling. En: Journal of Power Sources. Vol. 137, Nro. 1 (Octubre, 2008) pp. 134–139.
- ROGULSKI, Z. A. CZERWINSKI, A. Used batteries collection and recycling in Poland. En: Journal of Power Sources. Vol. 159, Nro. 1(Septiembre, 2006). Pp. 454–458
- SCHULTMANN, Frank. ZUMKELLER, Moritz. RENTZ, Otto. Modeling reverse logistic tasks within closed-loop supply chains: An example from the automotive industry. En: European Journal of Operational Research. Vol. 171, Nro. 3 (Junio, 2006). Pp. 1033–1050
- SCHULTMANN, Frank. ENGELS, Bernd. RENTZ, Otto. Closed-Loop Supply Chains for Spent Batteries. En: Interfaces. Vol. 33, No. 6(Noviembre, 2003). Pp. 57–71.
- SECRETARÍA DE TRANSPORTES Y TRÁNSITO DE MEDELLÍN. Sistema inteligente de Movilidad. Sitio Web Medellín Portal de ciudad. Consultado el 14 de abril de 2012. En: <http://www.saberderecho.com/2007/02/cmo-citar-una-pgina-web-y-como-probar.html>.

- SHIH, Li-Hsing . Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan. En: Resources, Conservation and Recycling. Vol. 32(2001). Pp. 55-72.
- SINGER, Marcos. DONOSO, Patricio. Scheller-wolf, Alan. Una introducción a la teoría de colas aplicada a la gestión de servicios. En: ABANTE. Vol. 11 (2008). Pp 22-24.
- SOUFFRIAUX, Wouter. OUDHEUSDEN, Dirk Van. VANSTEENWEGEN, Pieter. The orienteering problem: A survey. En: European Journal of Operational Research. Vol, 209, Nro. 1(Febrero, 2011). Pp. 1-10
- TANG, Hao. MILLER-HOOKS, Elise. A tabu search heuristic for the team orienteering problem. En: Computers and Operations Research. Vol. 32. Nro. 6 (Junio, 2005). Pp. 1379–1407.
- The Council of Logistics Management. [En Línea]:<http://www.clm1.org/mission.html> (1998)
- TIBBEN-LEMBKE, Ronald. ROGERS, Dale. Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices. Reverse Logistics Executive Council. (1998). Pp. 283
- TRICOIRE, F.ROMAUCH, M.DOERNER, K.HARTL, R. Heuristics for the multi-period Orienteering problem with multiple time windows. En computers and Operations Research. Vol37, Nro 2 (2010). Pp. 351-367.
- VANSTEENWEGEN, P., SOUFFRIAUX, W., VAN OUDHEUSDEN, D. A detailed analysis of two metaheuristics for the team orienteering problem. En: Engineering Stochastic Local Search, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 5752. Springer, Berlin (2009), pp. 110–114.
- WINSTON, Wayne L. Operation Research: Application and Algorithms. (4ª Edición). Brooks Cole. 2004.
- ZOROA, P. Aplicaciones de la Teoría de Juegos. En: JournalTrabajos de Estadística y de Investigación Operativa. Vol 9. (1958). Pp 21-42.