

**MODELO DE RUTEO DE CUADRILLAS DE SUSPENSIÓN Y RECONEXIÓN DE ENERGÍA EN
BOGOTÁ**

ALEJANDRO SALAMANDO RAMÍREZ

**UNIVERSIDAD DE LA SABANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
BOGOTÁ 2011**

**MODELO DE RUTEO DE CUADRILLAS DE SUSPENSIÓN Y RECONEXIÓN DE ENERGÍA EN
BOGOTÁ**

ALEJANDRO SALAMANDO RAMÍREZ

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN DISEÑO Y GESTIÓN
DE PROCESOS**

DIRECTORES:

JAIRO R MONTOYA TORRES,
Ingeniero Industrial, Ph.D.
ELYN LIZETH SOLANO CHARRIS
Ingeniera Industrial, M.Sc.

**UNIVERSIDAD DE LA SABANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
BOGOTÁ 2011**

A mi familia y especialmente a mi papá a quien debo todo.

RECONOCIMIENTOS

Ofrezco un especial agradecimiento a mis directores Jairo Montoya Torres y Elyn Lizeth Solano Charris por su apoyo y aportes en el transcurso de la revisión de este documento. De igual manera quiero agradecer a todo el equipo de la dirección y coordinación de la Maestría de Diseño y Gestión de la Universidad de la Sabana por los excelentes contenidos que aportaron en la realización y culminación del trabajo de investigación. Finalmente quiero agradecer a la Ingeniera Tulia Alvarado por su acompañamiento a lo largo de la realización de este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA	iii
RECONOCIMIENTO	iv
LISTA DE TABLAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMEN	8
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.1. Descripción de la situación	10
1.2. Formalización del Problema	13
1.3. Objetivos del trabajo de investigación.	16
2. REVISION DE LA LITERATURA	17
3. JUSTIFICACIÓN Y VALIDACION DEL MODELO PLANTEADO CON LAS NECESIDADES DE LA EMPRESA OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN	21
4. SOLUCION PLANTEADA	25
4.1. Procedimiento para clustering (agrupamiento)	26
4.2. Procedimiento para establecimiento de una ruta	28
4.2.1. Análisis de tiempo de desplazamiento por localidad	30
4.2.2. Análisis de tiempo de desplazamiento por pluviometría	33
4.2.3. Ventanas de tiempos	35
5. RESULTADOS	36
5.1 Descripción bases de datos.	36
5.2 Resultados computacionales	37
5.3 Comparativo índices de gestión modelo actual vs propuesta.	39
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41
BIBLIOGRAFÍA.	43

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Cantidad órdenes de trabajo generadas el 27 de octubre	10
Tabla 2. Ejemplo de construcción de código de ruta de cliente	12
Tabla 3. Resultados prueba Kruskal-Wallis Velocidad – Localidad	33
Tabla 4. Resultados prueba Kruskal-Wallis velocidad – precipitación diaria	34
Tabla 5: Tipos de suspensión y reconexión por ubicación del medidor	35
Tabla 6: Tiempos de suspensión	35
Tabla 7: Tiempos de reconexión	36
Tabla 8: Distribución de instancias seleccionadas para pruebas	37
Tabla 9: Tiempos procedimiento computacional	38
Tabla 10: Tiempo computacional en una agrupación de instancia n	39
Tabla 11: Comparativo tiempos de desplazamiento del enrutador vs real	40
Tabla 12: Comparativo productividad enrutador vs real	41

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Dispersión órdenes de trabajo en Bogotá	11
Figura 2: Distribución contratistas Bogotá	12
Figura 3: Comparativo de órdenes de suspensión generadas vs atendidas	13
Figura 4: Matriz de impactos de la problemática del proceso de SCR	24
Figura 5: Procedimiento de solución de dos fases	26
Figura 6: Ejemplo de clustering para zona sur 28	28
Figura 7: Probability plot de MINITAB – prueba de normalidad	31
Figura 8: Cantidad de clientes (Eje X) vs tiempo ejecución (Eje y)	39

RESUMEN

El problema de ruteo de vehículos es uno de los problemas combinatorios más estudiados en la literatura de investigación de operaciones cuyos orígenes se remontan al problema del agente viajero (TSP por sus siglas en inglés). La complejidad en la solución de este problema cobra vital relevancia dado que hoy en día no se trata solamente de resolver un problema *NP-Completo* sino también encontrar la caracterización apropiada para su aplicación en cada una de las particularidades de los problemas a solucionar. Es en este escenario donde el presente trabajo de investigación cobra especial importancia por el grado de complejidad y riqueza de situaciones que plantea para la comunidad científica.

En términos generales, la necesidad de la empresa prestadora de servicio de energía eléctrica, es disponer de una herramienta que facilite la generación diaria de las rutas para los dos proveedores que realizan las operaciones de suspensión, corte y reconexión (alrededor de 2,000 clientes por día). La frecuencia de esta actividad y lo masivo de la misma, hizo que se buscara una solución tanto eficiente en tiempo de resolución como acertada en la ruta generada. Por esta razón se propone un método de dos fases. La primera efectúa el proceso de clustering (agrupamiento) y la segunda genera la ruta. Para ambos casos se hizo uso de la combinación de algoritmos tradicionales encontrados en la literatura tales como: *sweep algorithm* y *k-media* para la primera fase, y algoritmo de proximidad y *Or-opt* para la segunda. En términos generales, el objetivo principal para generar la ruta a través de la aplicación del método de dos fases, es igual al del problema tradicional de VRP, encontrar economías en la ruta por tiempo de desplazamiento, lo cual se demuestra en esta investigación, a través de pruebas con información histórica, obteniendo una mejora en la productividad del 22,2%, con tiempos computacionales aceptables para las necesidades de la compañía.

ABSTRACT

The vehicle routing problem is one of the most studied combinatorial problems in operations research literature, dating back to the traveling salesman problem (TSP). The complexity in solving this problem gains vital importance due that today is not only relevant just solve a NP-Complete problem, but also find the appropriate characterization for its application in each one of the particularities of the problems to be solved. Is in this scenario where the present research is particularly important, because of the complexity and richness of situations that arise to the scientific community.

In general, the necessity of the company of electrical services, is to have a tool that facilitates the daily routing for both providers that perform suspend operation, cutting and reconnection (about 2,000 customers a day). The frequency of this activity and the massive of it, requires to find a solution that implied efficiency and accurate in routing. For this reason it proposes a two-phase approach. The first one makes the process of clustering (grouping) and the second one routing. In both cases we use the combination of traditional algorithms found in the literature, such as: sweep algorithm and k-means for the first phase, and proximity algorithm and Or-opt for the second phase. Overall, the main objective of routing through the implementation of two-phase approach is, like the traditional VRP problem, find savings in travel route by displacement time, which is proven in this research using tests with historical information, obtaining an increasing in productivity of 22,2% with acceptable computer time for the needs of the company.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la situación

Como empresa prestadora de servicios públicos, la compañía en la cual se hizo el presente trabajo de investigación, está en la obligación de realizar las actividades de suspensión y reconexión según la normativa regulatoria vigente emitida por la CREG - Comisión de Regulación de Energía y Gas (Colombia.Congreso, 1994). La naturaleza de dichas actividades, al ser realizada por una flota de vehículos homogéneos, guarda estrecha relación con el problema de ruteo de vehículos (VRP por sus siglas en inglés) planteado por primera vez por Dantzig y Ramser en 1959 para optimizar el proceso de distribución de gasolina en estaciones de servicio (Toth & Vigo, 2002).

El VRP es un problema combinatorio NP-difícil lo cual significa que su tiempo de solución sea *no determinista en tiempo polinomial* haciendo complejo encontrar una respuesta óptima (Güneri, 2007) en un tiempo computacional eficiente para instancias de gran tamaño. El caso de la compañía prestadora del servicio eléctrico no es ajeno a esta situación pues su operación debe atender diariamente alrededor de dos mil órdenes de trabajo entre suspensiones y reconexiones en Bogotá. La cantidad de visitas programadas con su respectiva dispersión en la ciudad se muestran en la tabla 1 y figura 1 respectivamente.

Tabla 1: Cantidad órdenes de trabajo generadas el 27 de octubre

Tipo	Cantidad de órdenes
Suspensiones	868
Reconexiones	748
Total	1616

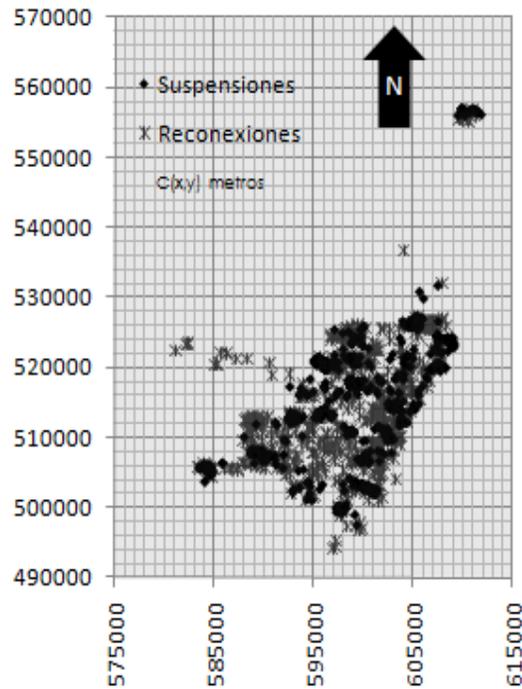


Figura 1 Dispersión órdenes de trabajo en Bogotá

Fuente: Base de ODT's Departamento de Suspensión Corte y Reconexión

Para realizar estas actividades, el departamento de Suspensión Corte y Reconexión cuenta con dos Contratistas locales. Uno trabaja en la zona/regional norte de Bogotá con 62 técnicos y el otro en la zona/regional sur con 56 técnicos distribuidos de la manera en que se muestra en la figura 2 (Ardila, 2009). Las características de las cuadrillas de ambos contratistas son similares, razón por la cual, para efectos del presente estudio, se asume que las características de estos vehículos y su velocidad media de desplazamiento son homogéneas.

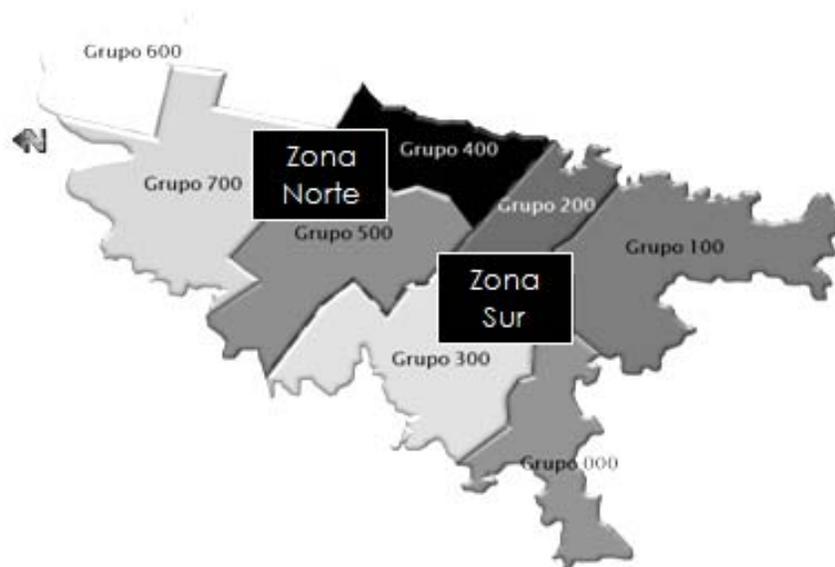


Figura 2: Distribución contratistas en Bogotá

Fuente: Presentación formación Departamento Suspensión, Corte y Reconexión

Cada una de las regionales está dividida en grupos, los cuales a su vez tiene 20 ciclos de facturación. Estos ciclos a su vez contienen manzanas que es la unidad de estratificación delimitada por vías, accidentes geográficos o áreas de distintas condiciones socioeconómicas (Alcaldía Mayor de Bogotá. Distrito Capital, 2007). Las manzanas en la empresa están tipificadas con códigos de 8 dígitos, dos como prefijo, 6 para identificar el barrio y dos para el código de manzana. Finalmente, al unificar todos los caracteres anteriores con el correlativo (consecutivo de ubicación del cliente en la manzana) del cliente, se obtiene la localización del mismo en Bogotá. En la tabla 2 se explica cómo se lee este código, el cual se incluye en todas las facturas de los clientes en el recuadro “Espacio Técnico” de la factura.

Tabla 2: Ejemplo de construcción de código de ruta de cliente
Fuente: Capacitación proceso de facturación

Regional	Ciclo	Grupo	Manzana	Correlativo
3000	11	510	MS821229	2085

Actualmente el comportamiento entre las ordenes de trabajo generadas y las atendidas para el proceso de suspensión, el cual es uno de los más sensibles para la compañía pues implica cartera en riesgo, se ha venido comportando en promedio en un 92%, lo que implica alrededor de 5,000 clientes mensuales con deuda vencida que no se les suspendió; esto por capacidad de las cuadrillas de los contratos. En la figura 3 se muestra este comportamiento.

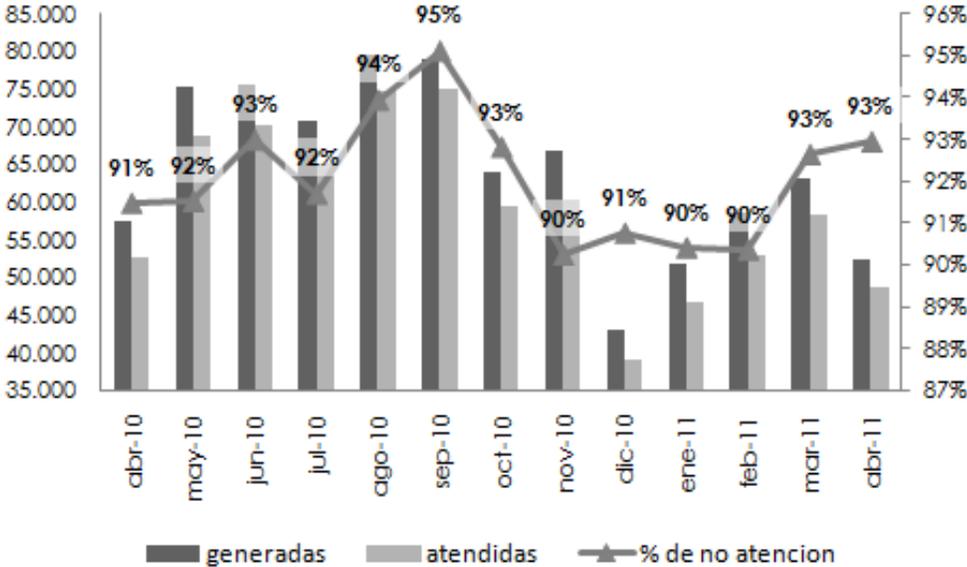


Figura 3: Comparativo órdenes de suspensión generadas vs atendidas

Fuente: Información de resultados Departamento Suspensión, Corte y Reconexión

1.2. Formalización del Problema

Dado lo anterior, la caracterización del problema para buscar su solución, será planteada como un problema clásico de ruteo estático de vehículos con un solo depósito y ventanas de tiempo (*Static Single Depot Vehicle Routing Problem with Time Window – SSDVRPTW*). Estas últimas se tomarán de manera determinista según los tiempos estándar establecidos por la compañía. La caracterización como modelo estático implica que la generación de la ruta se realizará de

manera *off line*, asumiendo que todos los clientes se conocen previamente a este procedimiento, y ningún otro es adicionado posterior a este procedimiento (Larsen, Madsen, & Solomon, 2008). Como primera medida, la flotilla de vehículos a utilizar se asume homogénea dado que todas las cuadrillas de ambos contratos constan de un operario movilizado en moto de 125 c.c. por especificaciones del contrato. Su capacidad es idéntica igualada a un número muy grande, es decir es ilimitada por lo cual no se incluye como restricción, adicionalmente no transportan mercancías. La decisión de afrontar el problema con único depósito, habiendo dos proveedores para la actividad de suspensión corte y reconexión, se debe a que la asignación de clientes a cada uno es limitada geográficamente por la localización del cliente. Por otro lado, los desplazamientos entre un cliente y otro, se hará en función del tiempo, el cual dependerá de la localidad donde se ubique el cliente. Para esto; se asumirán desplazamientos simétricos en una matriz cuadrada $n \times n$ (donde n es la cantidad de clientes asignados a cada cuadrilla) estimando la distancia Manhattan.

Como se mencionó anteriormente, formalmente el problema de generación de la ruta para la compañía prestadora de servicio eléctrico en Bogotá, se puede definir como un problema estático de de ruteo de vehículos con depósito único, flotilla homogénea y ventanas de tiempo (SSDVRPTW – *Static Vehicle routing problem with Time Window*). Este problema se puede plantear inicialmente como un grafo completo $G = (J, E)$ independiente para cada contratista (zona sur y norte de Bogotá), el cual, a través de la aplicación del método de solución de dos fases, se segmenta en sub grafos $G' = (J', E')$ a ser asignado a una única cuadrilla q tal que $q \in Q$ cuadrillas disponibles para trabajar en el día a ser programado. En cada sub grafo, $J' = \{0, 1, \dots, n\}$ es el conjunto de clientes (nodos) y E' es el conjunto de arcos. El nodo $j=0$ representa el centro de operaciones de cada contratistas y es igual en cada G' y; $j=1, \dots, n$ corresponden a los clientes con ordenes de trabado (ODT) para suspender o reconectar. Cada arco $(i, j) \in E'$ tiene asociado un tiempo de desplazamiento $t_{(i,j)}$ calculado como la relación entre la velocidad media de cada localidad de Bogotá φ_1 y la

distancia Manhattan entre el nodo i al j . La fórmula que describe esta relación se expresa de la siguiente manera:

$$t_{(i,j)} = \frac{|x_j - x_i| + |y_j - y_i|}{\varphi_1}$$

Para efectos del presente estudio, φ_1 se toma como parámetro de entrada para cada localidad de Bogotá y su valor se describe en el numeral 4.2.1. Es de resaltar que aunque este valor, dado el alcance del estudio, se tomó determinista, la información aportada por éste, constituye unos de los aportes fundamentales del presente trabajo investigativo, ya que en la literatura explorada ningún trabajo realizado en Bogotá alcanzaba el nivel de detalle por localidad. De la anterior ecuación entonces se deduce que cuando $j=i$ el tiempo es nulo. Adicionalmente se cuenta con una flota homogénea de Q vehículos con capacidad $C_k = \infty$ ilimitada. .

Es de resaltar, que aunque aspectos estocásticos como densidad del tráfico, y otros no controlables, pueden afectar el desempeño final del programa de rutas para el tomador de decisiones, dado el alcance del presente estudio, no se incluirá el efecto de éstas variables dejando su análisis para futuros estudios. Finalmente cabe mencionar, aunque en exploraciones iniciales se determinó que el clima afectaba la operación, poniendo a consideración incluir este efecto como impacto sobre el desplazamiento, este efecto no fue tal para el caso en investigación; demostrándose en la sección 4.2.1, a través de la prueba no paramétrica de *Kruskal – Wallis*, que la afectación sobre la velocidad es independiente del grado de precipitación.

Finalmente se destaca que la consecución y el procesamiento de información georeferenciada para la solución del presente problema es de vital importancia, pues como se plantea en el *sweep algorithm* (Laporte, 1992) la solución parte de la ubicación de nodos y depósitos en un plano euclidiano. Para la empresa objeto del estudio, las coordenadas de dicho plano serán utilizadas para el cálculo de la distancia bipolar más eficiente para medios urbanos; una vez con esta información, se construye la matriz de distancias requeridas para el algoritmo

(Ganesh & Narendran, 2007). Cabe mencionar que el tratamiento de las distancias en función del tiempo φ_1 se les dará un tratamiento determinista y no estocástico.

Así las cosas, éste trabajo de investigación se desarrollará a través del planteamiento de una solución de ruteo mediante un método aproximativo de dos fases: La primera dividirá la solución del problema segmentando el universo de nodos en agrupaciones (*clusters*) haciendo uso de información georeferenciada de los clientes. La segunda utilizará técnicas heurísticas para construir la ruta de cada agrupación. En esta segunda fase es donde se incorpora el parámetro de velocidad media de desplazamiento para cada una de las localidades de Bogotá, lo cual busca dar una herramienta más robusta al usuario.

1.3. Objetivos del trabajo de investigación

Para medir el alcance y cumplimiento del trabajo de investigación, se establece el siguiente objetivo general:

- Resolver el problema de ruteo de cuadrillas de suspensión y reconexión de una empresa prestadora del servicio de energía eléctrica en Bogotá, utilizando un modelo heurístico basado en una estrategia de segmentación por zonas, con el fin de mejorar la efectividad de la ejecución de órdenes de trabajo disminuyendo así el riesgo de pérdida de cartera.

Y a los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar el problema de ruteo de cuadrillas de de Suspensión Corte y Reconexión (SCR) en función de los elementos tratados en los modelos teóricos clásicos de VRP contrastados con las necesidades de la empresa.
- Proponer un modelo para mejorar el ruteo de las cuadrillas del departamento de Suspensión Corte y Reconexión (SCR) que permita realizar su programación estática (offline).

- Validar el modelo propuesto a través de una simulación basada en datos históricos de la empresa utilizando como variable de desempeño la cobertura de visitas a ser realizadas por las cuadrillas.

Finalmente, cabe mencionar que al tratarse de una solución técnica para la compañía, el tiempo de solución computacional es la variable de desempeño prioritaria para la toma de decisión dado que el procedimiento total debe quedar ejecutado antes de las 7 am de cualquier día de la semana.

2. REVISION DE LA LITERATURA

Para la solución de problemas de grandes instancias, se plantean procedimientos de simplificación. Uno de los primeros problemas de simplificación es el propuesto por Alfa Heragu y Chen (Gendreau, Laporte, & Jean-Yves, 1997), el cual aborda la solución creando una ruta gigante para luego segmentarla en sub rutas por agrupación (Bräysy, 2005). Otro método similar, e inverso al anterior, aborda el problema segmentando primero y generando la ruta después (Kubiak, 2004); (Montoya, Alfonso, & Correa, 2010). Los métodos de dos fases se desarrollan a través de la generación de sendos grupos (*clusters*) en el conjunto de vértices para luego efectuar un ruteo sobre cada grupo. Lo anterior facilita su adaptabilidad a múltiples casos de VRP sustentando esto su amplia difusión en software comerciales (Laporte & Semet, 2002). En este método de dos fases, la primera parte es el de agrupamiento (*clustering*) la cual hace uso de la proximidad de clientes (Ganesh & Narendran, 2007), su cercanía geográfica como política principal o en paralelo a la solución de ruteo. Esta estrategia es denominada en la literatura como *First cluster route second* (Desaulniers, Desrosiers, Erdmann, Solomon, Soumis, & Francoise, 2002). Esta técnica se prefiere en lugar de *First route second cluster*, ya que el tour gigante a construir podría ser muy costoso en tiempo computacional. Para JE Beasley (Beasley, 1983) la prueba computacional llegó a 100 clientes mientras que la propuesta computacional realizada por Solomon (1986) sólo fue plasmada en el papel (Bräysy, 2005). Ahora bien el algoritmo más generalizado en la literatura para realizar agrupaciones

(clustering), es el de k-medias. Planteado en 1967 por MacQueen, aún no se ha logrado derogar por métodos recientes. La meta de k-medias es lograr un mínimo en la suma cuadrada de los errores de todos los k clusters. La función objetivo es la siguiente (JAIN, 2008):

$$J(C) = \sum_{k=1}^K \sum_{x_i \in C_k} \|x_i - \mu_k\|^2$$

Donde $X=\{x_i\}, i = 1, \dots, n$ es el conjunto de nodos de d -dimensiones a ser agrupados en K subconjuntos, $C=\{c_k\}, k=1, \dots, K$, y μ_k es la media del cluster c_k . En la sección 4 se profundiza en el algoritmo y su aplicación en el caso.

Una vez generado los *grupos*, se procede generar la ruta de cada agrupamiento, utilizando una variante del *Búsqueda de vecindario* (Gendreau, Potvin, Bräysy, Hasle, & Lokketangen, 2008), donde el cliente seleccionado del grupo de clientes es el mejor de la solución actual en lugar de hacer una selección al azar. Lo anterior se logra adicionando cada vez los clientes más cercanos al anterior hasta llegar al depósito (Bräysy, 2005). Dado que este procedimiento logra una solución local, se utiliza ésta como inicial (método constructivo), para luego hacer uso del paso de mejora 3-opt, una de las más usadas y conocidas heurísticas de mejoramiento (Dorigo & Gambardella, 1997). En general los procedimientos de mejoramiento pueden ser descritos en términos del mecanismo $\lambda - opt$ de Lin (1965). En este los λ límites son removidos y los λ segmentos se reconectan de todas las formas posibles (Laporte, Gendreau, Potvin, & Semet, 2000). Este procedimiento se detiene hasta que no se pueden lograr mejores mínimos locales, con un tiempo de ejecución de $O(n^\lambda)$. Muchas modificaciones se han realizado a este esquema, uno de ellos fue el propuesto por Or (1976) el cual plantea mover cadenas consecutivas de tres, dos y un nodo a una posición diferente, lo anterior correspondiendo a una forma restringida del 3-Opt (Laporte, Gendreau, Potvin, & Semet, 2000) . El tradicional uso de estos procedimientos en la solución de problemas de ruteo, se debe a que conforman el grupo de técnicas más importantes en la solución de problemas combinatorios (Toth & Vigo, 2002).

Una parte fundamental de la caracterización del VRP es definir la naturaleza de la flota de los vehículos las cuales pueden ser homogéneas, heterogéneas, capacitadas, ilimitadas etc. Desde sus orígenes cuando fue planteado por Dantzig y Ramser, el problema se abordaba como una flota homogénea cuya única restricción era la ventana para ejecutar el servicio a los clientes (Baldacci, Battarra, & Vigo, 2008). Este tipo particular de VRP asume unos costos fijos para todos los vehículos por igual donde (Gendreau, Laporte, & Jean-Yves, 1997) :

- Cada vértice del conjunto $V-1$ es servido exactamente una vez.
- Los vehículos empiezan y terminan en el depósito.
- Y todas las otras restricciones se cumplen (máxima distancia o tiempo de recorrido y capacidad).

En el VRP con flota idéntica de vehículos y un depósito central para satisfacer las necesidades de todos los clientes (Baldacci, Battarra, & Vigo, 2008), a cada cliente se le asigna un tiempo de servicio, en el cual, el vehículo debe permanecer donde el usuario, hasta que termine la atención. La formulación canónica del problema de ruteo con ventanas de tiempo se plantea de la siguiente manera (Cordeau, Desaulniers, Desrosiers, & Solomon, 2002):

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} X_{ijk}$$

Donde i y j corresponde a los clientes que pertenecen al conjunto de nodos V , donde el depósito se representa como el nodo 0 o $n+1$. c_{ij} Es el costo asociado con desplazarse del nodo i al j los cuales pertenecen al conjunto de arcos A , y X_{ijk} Adopta valores binarios $\{0,1\}$, 1 si el vehículo k hace esa ruta y 0 si no.

Sujeto a:

La asignación de un único vehículo k a realizar el arco i,j del conjunto de vértices alcanzables (*forward star of*) expresados como $\Delta + (i)$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in \Delta+(i)} X_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N$$

Haciendo que cada vehículos k que sale del despacho 0 al *forward star of* (con junto de vértices j alcanzables) realicen efectivamente un trayecto hasta j .

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

Cumpliendo la restricción que todo vehículo k deberá tener un trayecto asignado hacia i antes y después de haber estado en el cliente j

$$\sum_{i \in \Delta^-(j)} X_{ijk} - \sum_{i \in \Delta^+(j)} X_{ijk} = 0 \quad \forall k \in K, j \in N$$

Por otro lado deben todos los vehículos k regresar al depósito $n+1$

$$\sum_{j \in \Delta^-(n+1)} X_{i,n+1,k} = 1 \quad \forall k \in K$$

Adicionalmente se debe cumplir que la suma del momento de llegada del vehículo k al nodo i w_{ik} , con el tiempo de servicio s_i , y el tiempo de desplazamiento entre el arco i, j , t_{ij} , deberá ser inferior al momento de llegada al siguiente nodo j , w_{jk} .

$$X_{ij}(w_{ik} + s_i + t_{ij} - w_{jk}) \leq 0 \quad \forall k \in K, (i, j) \in A$$

Donde w_{jk} debe estar entre el momento más temprano de salida a_i y el momento más temprano de llegada b_i . Adicionalmente todos los w_{ik} deberán estar contenidos entre la hora mas temprana de salida y llegada al despacho E y L respectivamente.

$$a_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} X_{ijk} \leq w_{ik} \leq b_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} X_{ijk} \quad \forall k \in K, i \in N$$

$$E \leq w_{ik} \leq L \quad \forall k \in K, i \in (0, n+1)$$

Finalmente la sumatoria de la demanda d_i de cada cliente atendido, no deberá superar la capacidad C , que para efectos del caso en estudio es ilimitada.

$$\sum_{i \in N} d_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} X_{ijk} \leq C \quad \forall k \in K$$

Como se mencionó la variable X_{ijk} asume valores de 0 y 1

$$X_{ijk} \geq 0 \quad \forall k \in K, (i, j) \in A$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, (i, j) \in A$$

Un elemento fundamental en el VRP es la distancia que se incorpora en el modelo. Para esto, se debe, como primera medida, definir el ambiente en el cual se plantea el problema, pues mientras que, para ambientes abiertos se recomienda el uso de la distancia euclidiana, en ambientes urbanos lo más aconsejable es hacer uso de la distancia Manhattan. De igual manera cuando se trata de ambientes urbanos, un análisis previo del medio es necesario; se debe estudiar el tráfico de la ciudad, sus vías de acceso, su tamaño en densidad demográfica, restricciones municipales, estructura de los barrios, vías de los barrios y los sentidos de las calles etc. (Sanz & Moreno, 2009).

3. JUSTIFICACION Y VALIDACION DEL MODELO PLANTEADO CON LAS NECESIDADES DE LA EMPRESA OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN.

Como se ha venido planteando a lo largo del presente trabajo de investigación, la solución se buscará a través de la implementación de un método de dos fases, y esta solución obedecerá a las necesidades explícitas de la operación de la empresa prestadora del servicio eléctrico en Bogotá, razón por la cual, antes de diseñar el método de solución, se censaron previamente los elementos que debería contener dicha solución, toda vez que sea útil para la compañía. Para lograr esto, se hizo uso del método de evaluación multicriterio, empleando un panel de pseudo expertos, directos implicados en el proceso de suspensión corte y reconexión. La metodología multicriterio descrita a continuación (Mendoza, 1993) se realizó utilizando el instrumento relacionado en el anexo 1:

- Construcción del conjunto de alternativas: Un panel de pseudo expertos, construyó a partir de su experiencia la casuística que más impacta el proceso de suspensión, corte y reconexión. El panel fue constituido así:
 - Técnicos de cuadrillas: 9 (nueve) técnicos

- Coordinador de operación
 - Jefe Departamento de Suspensión Corte y Reconexión
- Definición familia de criterios: Se crean los índices de evaluación para las alternativas elementos según su impacto en cada una de ellas. Los indicadores definidos fueron impacto en la operación y frecuencia de ocurrencia en un lapso determinado.
- Definición modelo de agregación: Con las alternativas y los índices creados se plasma el cruce de información en una matriz de impacto.
- Decisión final: Jerarquización de los elementos relevantes que impactan al modelo según su resultado en los indicadores. Se toman aquellos con mayor impacto y ocurrencia para buscar su solución dentro del modelo planteado

Para iniciar el procedimiento se incluyeron el listado de alternativas que inicialmente se habían censado (Ardila, 2009) y se adicionaron aquellas que el panel determinó importante valorar.

- Cambio de contratistas en el 2009, los anteriores prestaban sus servicios desde el año 2004. Los funcionarios del contrato anterior tenían conocimiento de sus respectivas zonas de trabajo y esto hacía que la generación de las rutas para las órdenes de trabajo (ODT) fuera eficiente por el conocimiento del terreno. Con el nuevo contrato, se perdió esta experiencia lo cual impactó la programación diaria de las operaciones.
- Al no cumplirse con todas las ordenes de trabajo (ODT), todos los días queda en la bandeja de trabajo de los contratistas un rezago que debe ejecutarse posteriormente con una mayor dispersión de clientes generando menor efectividad de los contratistas en los trabajos masivos. Adicionalmente las ODT con incumplimiento tienen inherente un riesgo alto de cartera.
- Los tiempos de ejecución de los trabajos varían, pues depende de la ubicación del punto sobre el cual debe ejecutarse la ODT. No obstante lo anterior el departamento cuenta con unos estándares para cada tipo de actividad.

- La programación inicial con la cual parte la cuadrilla surte cambios de manera permanente debido a la inclusión durante la jornada de órdenes de reconexión prioritarias que hacen modificar el orden de ejecución, y por la exclusión de órdenes de suspensión por pagos realizados por los clientes. Actualmente la empresa objeto del estudio está adelantando un proyecto para generar las rutas de las cuadrillas de SCR cuando se presentan este tipo de atenciones, razón por la cual el proyecto se orientó offline.
- Como aspecto exógeno, se tiene la influencia de la época de lluvias en el transporte de Bogotá, la cual afecta principalmente la zona Noroccidental de la misma.
- Cantidad de clientes a suspender, reconectar y verificar impactando la productividad de las cuadrillas.
- Imposibilidad de acceder a predio de clientes cuando los medidores se encuentran internos o simplemente cuando la administración de un edificio impide el paso a la cuadrilla (especialmente suspensión).

Una vez con el listado de alternativas (problemas) que generan inconvenientes en el proceso de suspensión corte y reconexión, el panel procedió a evaluar de manera independiente cada una de ellas con dos indicadores definidos:

- Impacto: de 1 a 10 se evaluó el nivel que la causal impactaba el proceso siendo 1 un bajo impacto y 10 el de mayor impacto.
- Orden de importancia: Se priorizo cada una de las alternativas propuestas según su nivel de ocurrencia en el mes siendo la uno la de mayor frecuencia y la última la de menos.

Con esta información se incluyó el desempeño de cada indicador en un plano de coordenadas x e y siendo obteniendo el siguiente gráfico:

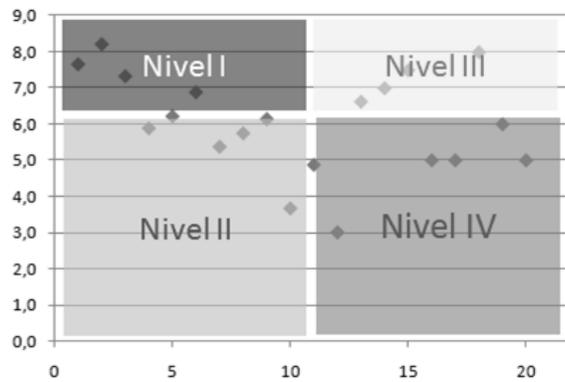


Figura 4: Matriz de impactos de la problemática del proceso de SCR

Fuente: Panel de seudoexpertos relacionados al proceso de SCR

Del anterior gráfico se concluye que los principales problemas a resolver se encuentran incluidos en el cuadrante del Nivel I (los ejes que conforman cada uno de los cuadrantes son las medias de los resultados) los cuales son:

- a. Establecimiento de una ruta para las órdenes de trabajo al principio de la jornada.
- b. Dispersión de los clientes a suspender/reconectar/verificar.
- c. Reconexiones insertadas durante el día.
- d. Cantidad de clientes a suspender/reconectar/verificar.
- e. Imposibilidad de acceder a predio de clientes.

De este listado, el presente proyecto de investigación impactará, directa o indirectamente a través de su solución, a los literales a, b y d. los literales c y e no forman parte del alcance del proyecto. Cabe resaltar que aunque se incluyeron en la problemática inicial, ni las ventanas de tiempo diferenciales por tipo de ODT, ni el impacto que el clima pueda tener en el proceso resultaron valoradas de alto impacto.

4. SOLUCION PLANTEADA

El algoritmo que se planteó apunta a segmentar primero y luego establecer la ruta, estrategia que se sustenta en la intuición donde es importante tener una buena segmentación de clientes en conjuntos y luego solucionar la ruta separadamente a través de un TSP (Problema del Agente Viajero) dentro de cada conjunto (Kubiak, 2004). Así las cosas la solución constará de los siguientes elementos:

- a. Agrupamiento (clustering): Del universo de clientes segmentado para ambos contratistas, se utilizará la herramienta estadística para agrupamiento k-medias; haciendo uso de un agrupamiento inicial el cual utiliza un algoritmo de barrido (*sweep algorithm*). Esta agrupación generara el grupo de ODT's que cada cuadrilla tendrá al inicio de la jornada (modo offline).
- b. Ruta de cuadrillas: Una vez que cada cuadrilla cuente con su respectivo conjunto de ODT's, se procederá a realizar las rutas combinando dos heurísticas: la primera para la construcción inicial de la ruta y la segunda para mejorarla. En la primera parte en lugar de generar aleatoriamente rutas, se utilizó una heurística de proximidad de vecino y la segunda utilizó la heurística 3-opt, una de las más usadas y conocidas heurísticas de mejoramiento (Dorigo & Gambardella, 1997)

En la figura 4 se muestra como se integran las dos fases del método jerárquico planteado.

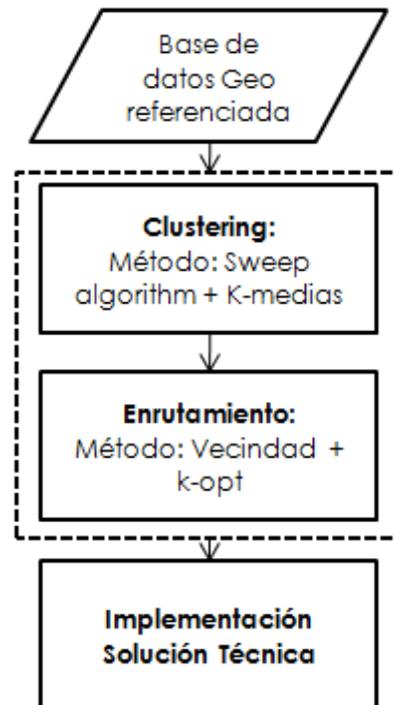


Figura 5: Procedimiento de Solución de dos fases

Fuente: El autor

4.1. Procedimiento para agrupamiento (clustering).

Como se mencionó anteriormente, el algoritmo seleccionado para esta fase es el de k-medias el cual empieza con una asignación inicial de grupo buscando reducir el error cuadrado. Esta primera parte del procedimiento es el paso más crítico debido a la falta de definición de un criterio como punto de partida en la mayoría de los casos. En términos generales los principales pasos de k-medias son (JAIN & DUBES, 1988):

- Paso 1: Generar una partición inicial.
- Paso 2: Generar una nueva partición para asignar cada patrón a su centro más cercano.
- Paso 3: Calcule nuevos centros.

Dado lo anterior, y teniendo en mente que con una mejor partición inicial se logrará una mejor partición final, la fase 1 de la solución propuesta para empresa objeto de la investigación, utilizará un algoritmo preliminar haciendo uso de la información geo referenciada existente, para así generar la segmentación inicial requerida en k-medias. Finalmente el resultado obtenido será un numero K de grupos cuya cantidad corresponde al número de cuadrillas Q disponibles para el día de trabajo: $K = Q$. Para toda instancia de cálculo Q es un parámetro conocido previo al inicio de la ejecución del procedimiento y es entregado por los contratistas de la zona norte y sur el día anterior. Actualmente en promedio, las cuadrillas disponibles diariamente para cada contratista son 62 y 56 respectivamente. Cabe mencionar que la capacidad contractual de las cuadrillas es de 70 ODT's diarias pero se programan cada una en promedio entre 35 y 40 ODT's diarias, esto con la finalidad de dar capacidad de reacción a las cuadrillas en el momento de insertarse un cliente nuevo durante la jornada de trabajo sea para suspender o reconectar.

Para esta partición inicial se hará uso de un *algoritmo de barrido* haciendo uso de coordenadas x e y existentes para cada cliente, las cuales se generan diariamente con las órdenes de trabajo para suspensión y reconexión. Adicionalmente con esta información se, caracteriza cada nodo del plano (depósito y clientes) en coordenadas polares (θ_i, ρ_i) necesarias para ejecutar el procedimiento de barrido, donde θ_i es el ángulo y ρ_i es la distancia Manhattan. Para dar inicio al procedimiento, se calculada el ángulo θ_{i^*} desde el punto central hasta un punto cualquiera i^* ; a partir de este punto $(0, i^*)$ se calculan los ángulos restantes. Para efectos del estudio, el punto central será el centro de operación del contratista (depósito).

Una vez calculados las coordenadas polares a cada cliente, se ordenan de manera creciente por el ángulo θ_i . Una vez con esta información, el procedimiento ejecutado es el siguiente (Montoya Torres, Alfonso Lizarazo, & Correa Villada, 2010):

- Paso 1: (Inicialización) Lea los datos de entrada.

- Paso 2: (Construcción de zonas): Comenzando por el cliente sin asignar con el menor ángulo, asignar sucesivamente mientras no se viole la restricción de asignación (70 clientes por cuadrilla).
- Paso 3: Repetir el paso 2 hasta asignar todos los clientes.

Una vez con la asignación inicial, se ejecuta el proceso de agrupamiento definitivo utilizando el algoritmo de k-medias utilizando la herramienta MINITAB. A continuación se muestra a manera de ejemplo la segmentación realizada para un día cualquiera para uno de los dos contratistas.

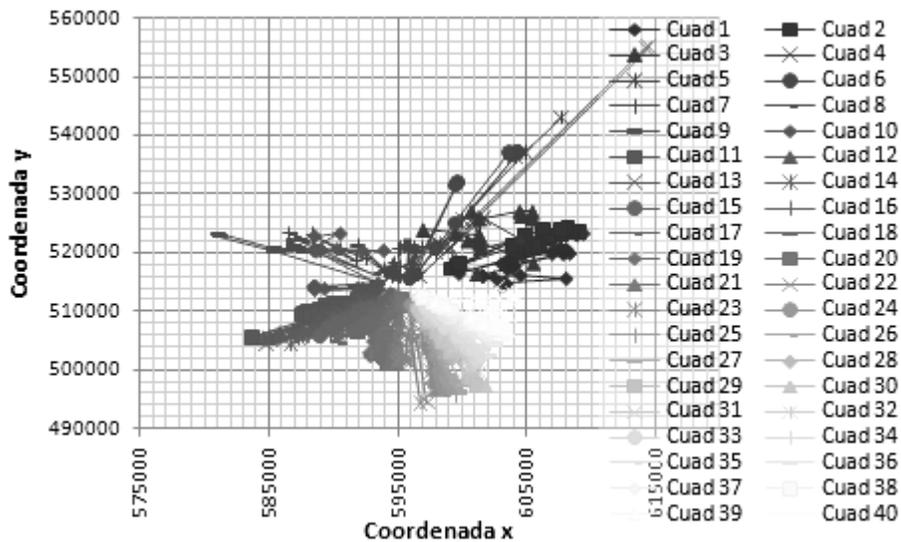


Figura 6: Ejemplo de clustering para zona sur 28

Fuente: Base de información Departamento SCR Noviembre 18 2010

4.2. Procedimiento para establecimiento de una ruta.

Esta sección se encuentra estructurada de la siguiente manera. En la primera parte se detalla el procedimiento de dos fases empleadas para establecer la ruta haciendo uso de un algoritmo de construcción y otro de mejoramiento. En la segunda parte de esta sección se detallan uno a uno los parámetros que se tuvieron en cuenta para la realización de las rutas como lo son las velocidades de desplazamiento por localidad y los tiempos de servicio. Más

adelante se demuestra porque estadísticamente el impacto de las lluvias sobre el desplazamiento no es relevante, como sí lo es la ubicación por localidad de la ciudad.

El algoritmo de generación de rutas, como se mencionó inicialmente, consta de dos partes, la primera de construcción utiliza una heurística de vecindad y la segunda una forma del 3-opt denominada Or-opt propuesta por Or (Laporte, Gendreau, Potvin, & Semet, 2000), el cual toma tres, dos o un nodo consecutivo y lo reubica en otra posición (Toth & Vigo, 2002). En resumen el pseudo-código para este procedimiento se describe a continuación:

Para cada grupo, sub grafos $G' = (J', E')$, haga

Algoritmo de construcción

- Paso 1: Seleccione el cliente que ocupe la posición 1 del grupo (cluster).
- Paso2: Calcule el tiempo de desplazamiento del cliente seleccionado al depósito: x_{0j} .
- Paso 3: Seleccione el cliente sin asignación a la ruta y con mínimo tiempo de desplazamiento de la matriz cuadrada $m \times m$: $\min x_{ij}$.
- Paso 4: Elimine el cliente seleccionado j de la matriz $m \times m$.
- Paso 5: Repita el paso 3 y 4 tantos clientes hallan en sub grafo G' (cluster), de tal forma que existirán J' soluciones factibles G'' para el grafo G' .
- Paso6: Calcule el tiempo de desplazamiento del cliente último cliente seleccionado al depósito: x_{j0} .
- Paso 7: Calcule la sumatoria del tiempo total de desplazamiento y ventanas de tiempo y almacene la ruta. Verificar que se cumpla la restricción $\sum_{vij}(t_{ij} + s_j) * X_{ij} \leq L - E$.
- Paso 8: seleccione la mejor solución (menor tiempo) en G'' .

Algoritmo de mejoramiento Or- opt (ejecución simultánea al algoritmo de construcción)

Para cada grupo de tres clientes consecutivos $\{j_n, j_{n+1}, j_{n+2}\} \in J'$.

- Paso 9: Tome la mejor solución en G'' . y ejecute simultáneamente el algoritmo.
- Paso 10: Seleccionar los tres primeros clientes y cambiar su posición hasta llegar al final.
- Paso 11: Calcule la sumatoria del tiempo total de desplazamiento y ventanas de tiempo y almacene la ruta. Verificar que se cumpla la restricción $\sum_{vij} (t_{ij} + s_j) * X_{ij} \leq L - E$.

Selección de mejor solución

- Paso 12: Seleccione la mejor solución generada entre el algoritmo de construcción y el de optimización.

Ahora bien, el procedimiento anterior consta de tres parámetros a saber: s_j , t_{ij} , L y E . L y E que serán siempre 7am y 6pm respectivamente; t_{ij} se calcula a partir de las coordenadas x e y de cada cliente extraídas del sistema de georeferenciación de la empresa y la velocidad media de desplazamiento de cada localidad descrita a continuación en el numeral 4.2.1; y finalmente las ventanas de tiempo se toman de los tiempos estándar de la compañía relacionados en el numeral 4.2.3.

4.2.1. Análisis de tiempo de desplazamiento por localidad.

Para el análisis de las velocidades calculadas en el periodo enero noviembre del 2010 para cada una de las localidades de Bogotá, se utilizó la herramienta no paramétrica *Kruskal-Wallis* dada la imposibilidad de utilizar la prueba ANOVA de un factor (Análisis de varianzas por sus iniciales en inglés) dado que no se cumplía con el supuesto de distribución normal en su población (Guisande, 2006)

Para corroborar este punto, previamente se corrió la prueba de normalidad en MINITAB para las velocidades medias del periodo enero - noviembre de 2010 para cada uno de los desplazamientos realizados por las cuadrillas entre cliente y cliente. El resultado de la prueba arrojó que el valor de p es inferior al α esperado de 0,05 descartando de esta manera que los datos se comportan según una distribución normal.

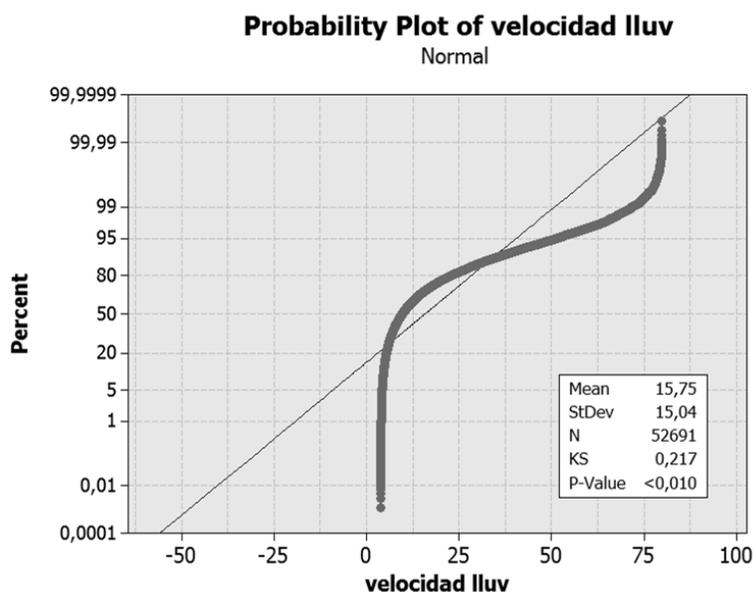


Figura 7: Probability Plot de MINITAB- prueba de normalidad
Fuente: Base de información Departamento SCR Enero -Noviembre 2010

El procedimiento Kuskal-Wallis, al igual que el ANOVA, analiza el efecto de un clasificador sobre una variable de respuesta (Jimenez, 1995). Los procedimientos no paramétricos como éste se utilizan cuando las observaciones son anómalas afectando la media de los datos razón por la cual se utiliza el valor de las medianas. Es en este sentido que la prueba cobra mayor relevancia, dado que puede ser utilizado en una población ordinaria sin ser normal. El supuesto utilizado por el procedimiento es que existen k grupos independientes y la selección de los datos dentro de cada grupo fue realizada de manera aleatoria.

Las hipótesis nula y alternativa pueden plantearse de la siguiente manera (Bajpai, 2010):

h_0 : Las diferentes k poblaciones son idénticas

h_1 : Al menos una de las poblaciones k es diferente

El estadístico K de *Kruskal-Wallis* se computa de la siguiente manera:

$$K = \frac{12}{n(n+1)} \left(\sum_{j=1}^J \frac{T_j^2}{n_j} \right) - 3(n+1)$$

Finalmente, la regla de decisión rechaza h_0 : cuando el valor calculado del estadístico $K > X^2$ en $k-1$ grados de libertad y nivel α de significancia.

Con lo anterior, para el caso de compañía objeto del estudio, se ejecutó el procedimiento tomando como agrupaciones k las localidades, como métricas, las velocidades medias de enero noviembre de 2010; y el nivel de significancia se asumió 0,05. Para efectuar el cálculo de la prueba, se utilizó la función incorporado en MINITAB para *Kruskal-Wallis* con 47 mil datos arrojando los siguientes resultados:

Tabla 3: Resultados prueba Kruskal-Wallis Velocidad – Localidad
Fuente: Base ODT's SCR

Kruskal-Wallis Test: vel loc versus localidad				
Kruskal-Wallis Test on vel loc				
localidad	N	Median	Ave Rank	z
ANTONIO NARIÑO	551	8,157	21166	-4,39
BARRIOS UNIDOS	1317	9,857	23984,9	0,74
BOSA	2645	9,182	23115,3	-2,3
CHAPINERO	2089	9,247	23491,8	-0,74
CIUDAD BOLIVAR	3507	9,527	24021,7	1,4
ENGATIVA	4805	9,879	24111,1	2,15
FONTIBON	2379	10,17	24866,9	4,23
KENNEDY	5281	9,169	23056,5	-3,68
LA CANDELARIA	141	9,002	22455,7	-1,09
MÁRTIRES	920	8,911	22467,4	-2,78
PUENTE ARANDA	1690	8,835	22664,7	-3,2
RAFAEL URIBE URIBE	2098	8,924	22839,7	-2,98
SAN CRISTÓBAL	2886	9,53	23823,1	0,46
SANTAFE	1130	8,506	21678,2	-5,05
SUBA	7107	9,896	24385,6	4,52
TEUSAQUILLO	1701	9,937	24324,2	1,89
TUNJUELITO	1004	9,544	23734,9	0,06
USAQUEN	4260	9,574	23736,4	0,13
USME	1907	9,96	24560,3	2,77
Overall	47418		23709,5	

H = 140,37 DF = 18 P = 0,000

H = 140,37 DF = 18 P = 0,000 (adjusted for ties)

4.2.2. Análisis de tiempo de desplazamiento por pluviometría.

Uno de los aportes fundamentales del presente estudio es analizar e incorporar en el modelo el impacto del clima en la velocidad de desplazamiento de Bogotá para efectuar la labor de suspensión y reconexión a través de cuadrillas homogéneas motorizadas. Lo anterior debido a que en el levantamiento de información inicial para la elaboración del anteproyecto, parte de la problemática planteada por el equipo del Departamento de Suspensión Corte y Reconexión de la empresa objeto del estudio, planteó que uno de los puntos críticos en el proceso, era el retraso causado por efectos climáticos. Con el fin de corroborar esta percepción, la variable pluviometrías se incluyó en el

análisis multicriterio descrito en el numeral 3, en el cual, el panel de pseudo expertos descartó que fuera relevante para el proceso. No obstante lo anterior, se confrontó esta valoración cualitativa de manera cuantitativa con las cifras de precipitaciones diarias del año 2010 suministradas por un departamento interno de la compañía, y compararlas con las velocidades calculadas en el numeral 4.2.1; para esto, se seleccionaron de manera aleatoria 52 mil desplazamientos. Los resultados de la prueba no paramétrica calculada en MINITAB se muestran en la tabla 4:

Tabla 4: Resultados prueba Kruskal-Wallis Velocidad – precipitación diaria
Fuente: Base ODT's SCR y Pluviometría Bogotá registrada en la empresa

Kruskal-Wallis Test: velocidad versus precipitación mm				
Kruskal-Wallis Test on velocidad				
precipitación diaria	N	Median	Ave Rank	Z
Entre 12,7 y 24,4 mm día	10149	9,656	26401,7	0,41
Entre 24,4 y 36,1 mm día	10386	9,74	26327,2	-0,14
Entre 36,1 y 47,8 mm día	6647	9,755	26505,3	0,91
Entre 47,8 y 59,5 mm día	2836	9,711	26282,9	-0,23
Entre 59,5 y 71,2 mm día	2373	9,605	26263,4	-0,27
Entre 71,2 y 82,9 mm día	1442	9,457	26410,9	0,16
Más de 82,9 mm día	3539	9,952	26716,3	1,5
Menos de 12,7 mm día	15319	9,573	26185,6	-1,55
Overall	52691		26346	

H = 4,83 DF = 7 P = 0,681

H = 4,83 DF = 7 P = 0,681 (adjusted for ties)

La conclusión de este análisis cuantitativo es que para efectos del presente trabajo de investigación, los efectos de las precipitaciones no impactan la velocidad media de la ciudad y por ende es irrelevante incluirla como parámetro de entrada.

4.2.3. Ventanas de tiempo.

Para efectos del desarrollo de este trabajo de investigación, las ventanas de tiempo se tomarán como parámetro de manera determinista correspondiéndose a los valores que puede tomar s_i en las ecuaciones relacionadas en el numeral 2. Los estudios de tiempos relacionados para cada tipología de suspensión y reconexión se relacionan en las tablas 5, 6 y 7.

Tabla 5: Tipos de suspensión y reconexión por ubicación del medidor
Fuente: Departamento de Suspensión Corte y Reconexión

Tiempos de Actividades de Reconexión y Suspensión	
Tipos por ubicación del punto de trabajo	
0	Desplazamiento de la cuadrilla sin efectividad
1	Desconexión en Poste
2	Desconexión en Medidor
3	Desconexión en Pin de corte
4	Retiro de Acometida
5	Retiro de Parcial y Pin de Corte
6	Suspensión en Caja de Barrajes
7	Retiro de Cañuelas

Tabla 6: Tiempos de suspensión
Fuente: Departamento de Suspensión Corte y Reconexión

Tiempos Actividades de Suspensión		
Descripción actividad	Tipos	Tiempo min
Operación Pendiente/operación no efectuada	0	0:01
	1	0:15
Suspensión por :	2	0:11
- Alteración de Equipo de Medición	3	0:08
- Por reconexión no autorizada	7	0:15
	8	0:15
Dirección errada Efectiva	1	0:15

Tabla 7: Tiempos de reconexión

Fuente: Departamento de Suspensión Corte y Reconexión

Tiempos Actividades de Reconexión		
Descripción actividad	Tipos	Tiempo min
Operación Pendiente/operación no efectuada	0	0:01
	1	0:15
	2	0:11
Reinstalación del servicio	3	0:08
	7	0:15
	8	0:15
	1	0:08
Reconexión del servicio	2	0:11
	3	0:05
	7	0:08
	8	0:10

5. RESULTADOS

Esta sección está estructurada de la siguiente manera: En primera instancia se presenta la estructura detallada de las bases de datos utilizadas, posteriormente se muestran tanto los resultados computacionales del procedimiento con sus respectivos índices de desempeño, como los resultados del indicador de productividad del proceso tomando en comparación datos reales de la operación con los generados por el modelo.

5.1. Descripción bases de datos.

La base de datos usada para generar las pruebas se extrajo de la fuente histórica de operaciones de enero a diciembre de 2010 tanto para suspensiones como reconexiones. Para generar las primeras pruebas se seleccionaron aleatoriamente cinco días del total de la base. Con esta información se calculó la varianza para determinar el número de corridas. La base utilizada tiene los siguientes campos:

- Abscisa X
- Ordenada y
- Localidad
- Cuadrilla asignada al cliente

La anterior información se completa cruzando la localidad con su velocidad media. En el anexo 2 se muestra un ejemplo de la estructura utilizada.

En total se hicieron 12 corridas de diferentes instancias cada una y correspondientes a diferentes días del año. La distribución de los días seleccionados se muestra en la tabla 8.

Tabla 8: Distribución de instancias seleccionadas para pruebas
Fuente: Base histórica de ODT's SCR

Cto Corrida	Fecha	Instancia (Clientes)
1	03/03/2010	1195,0
2	01/06/2010	697,0
3	11/06/2010	984,0
4	19/04/2010	1078
5	19/07/2010	694,0
6	06/08/2010	774,0
7	25/08/2010	774,0
8	15/10/2010	915,0
9	22/11/2010	2397,0
10	04/01/2010	1472,0
11	14/10/2010	948,00
12	26/01/2010	1381,0

5.2. Resultados computacionales.

Las corridas computacionales de las macros hechas en *Visual Basic for Applications* para Excel, fueron realizadas en un equipo con procesador Intel Pentium Dual de 2.20 GHz, 3,24 GB de RAM. La agrupación (*clustering*) realizada para la heurística k-medias, fue realizada en un equipo con procesador AMD TurionX2 Dual Core; memoria Ram de 2,75 GB.

Para iniciar el proceso experimental se seleccionaron 5 días aleatorios del año 2010 con el fin de determinar el tamaño de corridas necesarias calculando la varianza sobre el tiempo de diferencia (mejora) entre el tiempo de desplazamiento total generado por el modelo y la real de las cuadrillas. La ecuación estadística utilizada, con un $z=1,96$ y un e de 2% fue la siguiente:

$$n_{z=1,96} = \frac{z^2 * e^2}{\sigma^2}$$

Con una varianza en las primeras cinco corridas de 0,123%, el total de muestras a realizar aplicando la anterior ecuación fue de 11,78, por lo anterior se hicieron en total 12 corridas. Los resultados computaciones se incluyen en la tabla 9.

Tabla 9: Tiempos procedimiento computacional
Fuente: El autor

indicadores del procedimiento computacional					
First cluster-Second route					
Clientes Programados	Rutas generadas Q de cuadrillas	Clientes por cluster promedio	Tiempo máquina (minutos)		Total minutos
			Clusterización Sweep + K-medias	Enrutamiento Vecindad + Or-opt	
1195	34	35,15	00:00:31	00:09:45	00:10:16
697	17	41,0	00:00:34	00:09:39	00:10:13
984	28	35,1	00:00:32	00:14:32	00:15:04
1078	27	39,9	00:00:31	00:09:45	00:10:16
694	29	23,9	00:00:33	00:08:01	00:08:34
774	20	38,7	00:00:31	00:12:40	00:13:11
747	19	39,3	00:00:29	00:10:04	00:10:33
915	27	33,9	00:00:38	00:10:45	00:11:23
2397	100	24,0	00:00:32	00:16:59	00:17:31
1472	42	35,0	00:00:28	00:12:33	00:13:01
948	25	37,9	00:00:33	00:12:28	00:13:01
1381	36	38,4	00:00:32	00:11:37	00:12:09

De los anteriores resultados se concluye que el tiempo medio de ejecución total de ambos procedimientos es de 13,1 minutos $\pm 1,4$ (con intervalo de confianza de 95%) lo cual satisface la necesidad de la solución técnica requerida por la compañía, en donde el lapso disponible para realizar esta operación es de 5am a 7am.

Cabe mencionar que los tiempos de máquina para la generación de las rutas dependen directamente del tamaño de cada uno de los grupos (*clusters*), el cual se comporta de manera exponencial. En la tabla 10 y figura 6 se muestra este comportamiento para diferente tipo de instancias por grupo individual.

Tabla 10: Tiempo computacional en una agrupación de instancia n
Fuente: El autor

Clientes en un cluster	Tiempo de Ejecución Segundos	
	Total	Por cliente
70	0:01:45	0:00:02
60	0:01:27	0:00:01
50	0:00:55	0:00:01
40	0:00:34	0:00:01
30	0:00:21	0:00:01
20	0:00:10	0:00:01
10	0:00:04	0:00:00
5	0:00:02	0:00:00

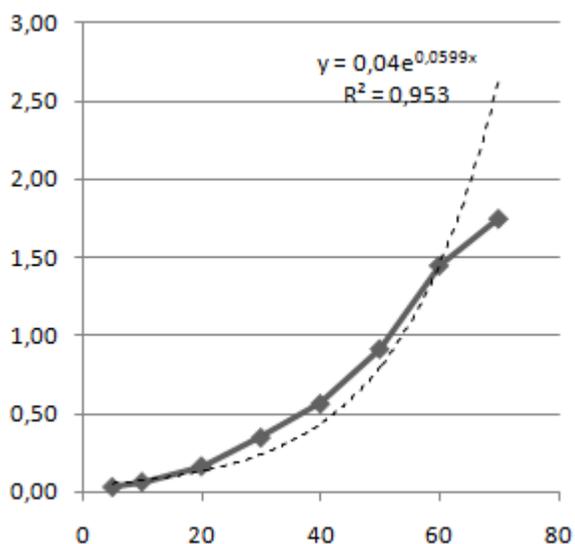


Figura 8: Cantidad de clientes (Eje X) vs tiempo ejecución (Eje Y)
Fuente: El autor

5.3. Comparativo índices de gestión modelo actual vs propuesta.

Dado que las ventanas de tiempo se toman como un parámetro de entrada al modelo y que estas no obedecen a una promesa de servicio, teniendo

la libertad de ubicar a cualquier cliente dentro del grafo sin prelación, El principal indicador de la efectividad del procedimiento propuesto es la economía en tiempo de desplazamiento. Para medir esta, se realizaron pruebas con 12 días seleccionados aleatoriamente y comparando los tiempos reales con los generados por el modelo. Los resultados se incluyen en la tabla 11.

Tabla 11: Comparativo tiempos de desplazamiento del procedimiento propuesto vs real
Fuente: El autor

Análisis de tiempos de desplazamiento					
Clientes Programados	Tiempos Enrutador horas		Tiempos Reales horas		%disminucion tiempo t_{ij}
	Total $\sum t_{ij}$	Prom cuadrilla $1/Q\sum(t_{ij}+s_j)$	Total $\sum t_{ij}$	Prom cuadrilla $1/Q\sum(t_{ij}+s_j)$	$\frac{\sum t_{ij}(real)}{\sum t_{ij}(real)-1}$
1195	89,17	8,75	105,8	9,24	18,7%
697	40,47	9,36	46,2	9,70	14,3%
984	74,0	8,71	82,0	9,00	10,9%
1078	59,5	9,01	67,7	9,31	13,7%
694	51,8	6,06	61,7	6,40	19,2%
774	67,4	9,86	79,4	10,46	17,8%
747	38,2	8,92	46,1	9,34	20,7%
915	105,9	9,80	140,2	11,07	32,5%
2397	394,0	8,08	545,8	9,60	38,5%
1472	106,41	8,73	112,8	8,89	6,0%
948	73,2	9,31	106,8	10,65	45,9%
1381	106,1	9,68	106,2	9,68	0,1%

De este análisis cuantitativo se concluye que el procedimiento de agrupamiento (*clustering*) y generación de ruta en promedio proporcionan una disminución en los tiempos de desplazamiento del 22,2%. Esta disminución en el tiempo de desplazamiento impacta directamente en la productividad de las cuadrillas, teniendo la posibilidad de mejorar su capacidad de atender ODT's adicionales. En la tabla 12 se resumen los resultados.

Tabla 12: Comparativo productividad procedimiento propuesto vs real
Fuente: El autor

Análisis de productividad de cuadrillas						
n-Clientes	Q - cuadrillas	Tiempo por cliente $1/n\sum(t_{ij}+s_j)$		Clientes por jornada 8 horas x Q		Productividad Enrut/Real
		Enrutador	Real	Enrutador	Real	
1195	34	0,25	0,26	1093	1035	105,6%
697	17	0,23	0,24	596	575	103,6%
984	28	0,25	0,26	904	875	103,3%
1078	27	0,23	0,23	957	926	103,4%
694	29	0,25	0,27	917	868	105,6%
774	20	0,25	0,27	628	592	106,1%
747	19	0,23	0,24	670	640	104,7%
915	27	0,29	0,33	747	661	113,0%
2397	100	0,34	0,40	2372	1997	118,8%
1472	42	0,25	0,25	1348	1325	101,7%
948	25	0,25	0,28	815	712	114,4%
1381	36	0,25	0,25	1142	1141	100,0%

De este resumen cuantitativo se concluye que la ruta generada por el modelo está en la capacidad de atender más clientes por jornada, otorgándole de esta manera una productividad superior del 8,6%. No obstante lo anterior es importante comparar este valor con un piloto real en campo dado que esta productividad puede verse alterada por el conocimiento de las vías de las cuadrillas, sentido de las vías, barreras físicas entre otras. En el anexo 3 se muestra un ejemplo de datos de salida arrojados posterior a la generación de la ruta. En el anexo 4 se muestra el instructivo de operación del modelo propuesto.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- El problema de generación de rutas para vehículos (VRP) es uno de las áreas más estudiadas en investigación de operaciones; es razonable entonces decir que el uso de los métodos clásicos aquí implementados para solucionar el problema de la empresa están ampliamente sustentadas y justificadas en la literatura encontrada.

- En el modelo propuesto, utilizando una estrategia de dos fases, se logra, a través de pruebas computacionales con datos históricos, una mejora en la productividad de las cuadrillas del 8,6%. Esto significa que en un día de operación con 2,000 clientes, se podrían atender 2,171.
- La mejora en la productividad hallada, se traduce en una cantidad mayor de clientes a ser atendidos, lo cual significaría un incremento en la capacidad instalada pudiendo atender más ordenes de trabajo disminuyéndose así el riesgo de pérdida de cartera.
- Las heurísticas incluidas en el modelo cumplen las expectativas para la empresa, pues no sólo llevará a una mejora en la productividad de las cuadrillas, sino también el procedimiento se lograría dentro de los plazos requeridos por ella. En promedio 13,1 minutos.
- El tiempo computacional del procedimiento desarrollado se obtiene bajo las condiciones simuladas con los históricos de la empresa, si estos varían, especialmente la cantidad de clientes por grupo (cluster) el resultado en tiempos del procedimiento también, ya que estos crecen exponencialmente de la forma ae^{bx} , donde a y b son constantes y x la cantidad de clientes por grupo.
- No obstante el factor climático es una variable que afecta el desplazamiento en la ciudad de Bogotá, dadas las condiciones particulares del caso en investigación, esta no impacta la velocidad de desplazamiento de las cuadrillas.
- No obstante no ser materia del alcance del presente estudio, las variaciones en las velocidades de desplazamiento por rango horario, para futuras investigaciones es recomendable incluir esta y otras variables estocásticas que robustezcan el modelo. Como parte del análisis de entrada realizado se determinó que en hora pico la velocidad mínima es 25% menos que la máxima.
- A pesar de haber alcanzado bajo experimentaciones computacionales una mejora en la productividad de las cuadrillas consecuencia de un menor tiempo de desplazamiento, se recomienda contrastar el presente modelo con pilotos y pruebas de campo dada la complejidad de la malla vial de la ciudad de Bogotá, barreras físicas, sentido de las vías y flujo vehicular.

- Finalmente, cabe resaltar que el esquema de suspensión y reconexión de servicios públicos tiene un alto impacto social en la comunidad, en los cuales se ven involucrados los procesos internos de los clientes y los procesos de la compañía. Es entonces recomendable para futuras investigaciones incorporar en estos modelos técnicos, variables sociales como capacidad y cultura de pago de las personas, y como estos se interrelacionan con procesos tales como facturación y cobro de cartera.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía Mayor de Bogotá. Distrito Capital. (30 de Junio de 2007). Decreto 200 de 2004: Por el cual se adopta la tercera actualización de la estratificación urbana de Bogotá para los inmuebles residenciales de la ciudad. Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Ardila, C. (2 de septiembre de 2009). Descripción del proceso de Suspensión Corte y Reconexión. (A. Salamando, Entrevistador)
- Bajpai, N. (2010). *Business Statics*. New Delhi: Dorling Kindersley Pvt. Ltd.
- Baldacci, R., Battarra, M., & Vigo, D. (2008). Routing a Heterogeneous Fleet of Vehicles. En B. Golden, S. Raghavan, & E. Wasil, *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges* (págs. 3-27). New York: Springer.
- Beasley, J. (1983). Route first cluster second Methods for Vehicle Problem. *Omega The Int* , 403-408.
- Bräysy, O. (2005). Vehicle Routing Problem with time windows, Part I: Route construction and Local search algorithms. *Transportation science* .
- Colombia.Congreso. (1994). Ley 142 de 1994. *Por la cual se reglamenta los servicios públicos de acueducto, alcantarillado, aseo, energía eléctrica, distribución de gas combustible, telefonía fija pública básica conmutada y la telefonía local móvil en el sector rural* . Bogotá: El Congreso; 1994.
- Cordeau, J. F., Desaulniers, G., Desrosiers, J., & Solomon, M. (2002). VRP with time windows. En P. Toth, & D. Vigo, *The Vehicle Routing Problem* (pág. 157). Philadelphia: SIAM.
- Cruz T, E. A., Hernan, R. J., & Daniel, M. V. (2007). Un Problema Logístico de Ruteo de Vehículos y una solución con Solver de Excel: Un caso de Estudio. *Scientia Et Technica* , 13 (37), 369-372.
- Desaulniers, G., Desrosiers, J., Erdmann, A., Solomon, M., Soumis, & Françoise. (2002). VRP with Pick Up and Delivery. En P. Toth, & D. Vigo, *The Vehicle Routing Problem* (págs. 225-242). Philadelphia: SIAM.
- Dorigo, M., & Gambardella, L. M. (1997). Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation Vol 1 No 1* , 53-65.

- Ganesh, K., & Narendran, T. (2007). Cloves: A cluster and search heuristic to solve vehicle routing problem with delivery and pick up. *European Journal of Operational Research* , 699-717.
- Gendreau, M., Laporte, G. P., & Jean-Yves. (1997). Vehicle Routing: Modern Heuristics. En E. Aarts, & J. Lenstra, *Local Search in combinatorial Optimization* (págs. 311-336). Montreal - Canadá: John Wiley & Sons Ltd.
- Gendreau, M., Potvin, J.-Y., Bräysy, O., Hasle, G., & Lokketangen. (2008). Metaheuristics for the Vehicle routing problem and its extensions: A Categorized Bibliography. En B. Golden, S. Raghavan, & E. Wasil, *The vehicle routing problem: Latest advances and new challenges* (págs. 143-169). New York: Springer.
- González, C. G. (2006). *Tratamiento de datos*. Madrid - España: Ediciones Diaz de Santos.
- Guisande, C. (2006). *Tratamiento de Datos*. España: Diaz de Santos.
- Güneri, A. (Enero de 2007). Physical distribution activities and vehicle routing problems in logistics management: a cas study. *ProQuest Science Journals* , 123.
- JAIN, A. K. (2008). Data Clustering: 50 years beyond k-means . *18th International Conference on Pattern Recognition*. Tampa FL.
- JAIN, A. K., & DUBES, R. C. (1988). *Algorithms for clustering data*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall Inc.
- Jimenez, C. M. (1995). *Curso general de Statgraphics II. Procedimientos, Métodos estadísticos, Aplicaciones y Ejercicios resueltos*. Comillas: Universidad Pontifica de Comillas.
- Kubiak, M. (2004). Sistematic Construction of Recombination Operators for the Vehicle Routing Problem. *Fundation of Computing and Desicion Sciences* , 29 (3).
- Laporte, G. (1992). The Vehicle Routing Problem: An Overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research* , 345-358.
- Laporte, G., & Semet, F. (2002). Classical Heuristics for the Capacitated VRP. En h. P. Tot, & D. Vigo, *The Vehicle Routing Problem* (págs. 109-128). Philadelphia: SIAM.

- Laporte, G., Gendreau, M., Potvin, J.-Y., & Semet, F. (2000). Classical and Modern heuristics for the vehicle routing problem. *International Transactions in Operational Research* , 285-300.
- Larsen, A., & Madsen, O. S. (2008). Recent Development in Dynamic Vehicle Routing Systems. En B. Golden, S. Raghavan, & E. Wasil, *The vehicle Routing Problem: Latest advances and New Challenges* (págs. 199-218). New York: Springer.
- Larsen, A., Madsen, O., & Solomon, M. (2008). Recent Developments in Dynamic Vehicle Routing Systems. En B. Golden, S. Raghavan, & E. Wasil, *The Vehicle Routing Problem: Latest advances and new challenges* (págs. 205-242). New York: Springer.
- Mendoza, A. (1993). Evaluación Multicriterio de proyectos de Ciencia y Tecnología. En E. Martínez, *Estrategias, Planificación y Gestión de Ciencia y Tecnología* (págs. 363-376). Caracas-Venezuela: Nueva Sociedad.
- Montoya Torres, J., Alfonso Lizarazo, E. H., & Correa Villada, J. S. (2010). Resolución de un problema real de distribución de combustible empleando heurísticas clásicas. *Revista Internacional de Investigación de Operaciones RIIO* , 8.
- Montoya, J., Alfonso, E., & Correa, J. (2010). Resolución de un problema real de distribución de combustibles empleando heurísticas clásicas. *Revista Internacional de Investigación de Operaciones* (1), 49-56.
- Sanz, G., & Moreno, R. (2009). Metodología para la definición de un sistema logístico que trate de lograr una distribución urbana de mercancías eficiente. *XII Congreso de Ingeniería de Organización*. Burgos.
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The Vehicle Routing Problem*. Philadelphia: SIAM.

Anexo 1

Instrumento aplicado en el Ejercicio Multicriterio

Clasificar de mayor a menor los siguientes atributos que mas impactan la operación de Suspensión Corte y reconexión siendo el 1 el más importante y el 15 el menos. Cabe mencionar que los items de 14 a 18 NO son obligatorios

Item	Posición	
1	Enrutamiento de las ordenes de trabajo al principio de la jornada	
2	Priorización de clientes con deuda más alta	
3	Dispersion de los clientes a suspender/reconectar/verificar	
4	Reconexiones insertadas durante el dia	
5	Clima (lluvias)	
6	Tráfico en horas pico	
7	Desconocimiento de la zona (barrio, calles, carreras)	
8	rezago en días anteriores de las ODT	
9	Cantidad de clientes a suspender/reconectar/verificar	
10	Duracion unitaria de la operación (suspender/reconectar/verificar)	
11	Desempeño de las motocicletas	
12	Imposibilidad de acceder a predio de clientes	
13	Horario en que se realiza la operación	
14	Otra. Cual?:	
15	Otra. Cual?:	
16	Otra. Cual?:	
17	Otra. Cual?:	
18	Otra. Cual?:	

Ahora bien, los anteriores items califiquelos de 1 a 10 siendo 10 los items que impactan más veces la operación y 1 los que impactan menos veces.

Item	Calificación	
1	Enrutamiento de las ordenes de trabajo al principio de la jornada	
2	Priorización de clientes con deuda más alta	
3	Dispersion de los clientes a suspender/reconectar/verificar	
4	Reconexiones insertadas durante el dia	
5	Clima (lluvias)	
6	Tráfico en horas pico	
7	Desconocimiento de la zona (barrio, calles, carreras)	
8	rezago en días anteriores de las ODT	
9	Cantidad de clientes a suspender/reconectar/verificar	
10	Duracion unitaria de la operación (suspender/reconectar/verificar)	
11	Desempeño de las motocicletas	
12	Imposibilidad de acceder a predio de clientes	
13	Horario en que se realiza la operación	
14	Otra. Cual?:	
15	Otra. Cual?:	
16	Otra. Cual?:	
17	Otra. Cual?:	
18	Otra. Cual?:	

Anexo 2
Ejemplo de Estructura de base de datos

X	Y	LOCALIDAD	JSTER - TECNI	DIST KM	VELOCIDAD
602904,41	510530,543	TEUSAQUILLA	ID000143	10,6855047	15,8535637
602870,311	510509,293	TEUSAQUILLA	ID000143	0,05534854	15,8535637
603404,768	510408,848	SANTAFE	ID000151	0,63490261	14,7855231
603404,768	510408,848	SANTAFE	ID000151	0	14,7855231
603545,298	510742,313	SANTAFE	ID000151	0,47399569	14,7855231
603655,689	510636,731	SANTAFE	ID000151	0,21597186	14,7855231
603655,689	510636,731	SANTAFE	ID000151	0	14,7855231
603649,29	510583,842	SANTAFE	ID000151	0,05928801	14,7855231
603561,744	510471,455	SANTAFE	ID000151	0,19993325	14,7855231
603530,879	510383,823	SANTAFE	ID000151	0,11849636	14,7855231
603519,805	510373,145	SANTAFE	ID000151	0,02175199	14,7855231
603361,246	510868,544	SANTAFE	ID000173	0,6539585	14,7855231
603361,246	510868,544	SANTAFE	ID000173	0	14,7855231
603292,113	511065,284	CHAPINERO	ID000173	0,26587311	15,4620752
602978,325	510577,873	TEUSAQUILLA	ID000242	0,80119814	15,8535637
603828,233	512054,923	CHAPINERO	ID000151	2,32695677	15,4620752
603846,901	512147,644	CHAPINERO	ID000151	0,11138971	15,4620752
603846,901	512147,644	CHAPINERO	ID000151	0	15,4620752
604307,72	512677,196	CHAPINERO	ID000151	0,99037122	15,4620752
603985,778	512414,05	CHAPINERO	ID000151	0,58508893	15,4620752
603885,739	512285,996	CHAPINERO	ID000151	0,22809252	15,4620752
603904,227	512293,494	CHAPINERO	ID000151	0,02598566	15,4620752
603904,227	512293,494	CHAPINERO	ID000151	0	15,4620752
604038,642	512086,456	CHAPINERO	ID000151	0,34145337	15,4620752
603986,512	512181,157	CHAPINERO	ID000151	0,14683095	15,4620752
603958,352	512172,769	CHAPINERO	ID000151	0,03654785	15,4620752
603976,963	512067,73	CHAPINERO	ID000151	0,12364949	15,4620752
603976,963	512067,73	CHAPINERO	ID000151	0	15,4620752
603940,475	512098,144	CHAPINERO	ID000151	10,1539694	15,4620752
603965,081	511959,502	CHAPINERO	ID000151	0,16324738	15,4620752
603832,917	511986,597	CHAPINERO	ID000151	0,15925887	15,4620752
603982,372	511832,018	CHAPINERO	ID000151	0,30403446	15,4620752
603889,986	511810,003	CHAPINERO	ID000151	0,11440194	15,4620752
603982,463	511905,823	CHAPINERO	ID000151	0,18829763	15,4620752
604000,159	511918,9	CHAPINERO	ID000151	0,03077292	15,4620752

Anexo 3

Ejemplo de rutas generadas posterior al procedimiento propuesto

t _{ij}	Instancia (clientes)	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
1	59,5	1,48242104	1,52577	1,62890338	1,62890338	2,20799443	2,20799443	1,50494184	1,50494184	1,49987414	1,49987414	1,50494184	1,50494184	1,49987414	1,49987414
2	1078,0	602025,318	603552,162	604382,725	604382,725	600600,743	600600,743	600137,212	600137,212	601524,146	601524,146	600137,212	600137,212	601524,146	601524,146
3		602091,188	616545,049	603552,162	603552,162	604382,725	604382,725	600600,743	600600,743	600137,212	600137,212	601524,146	601524,146	600137,212	600137,212
4		602075,274	517035,479	603544,798	603544,798	512195,394	512195,394	604474,773	604474,773	515076,428	515076,428	600154,231	600154,231	517374,18	517374,18
5		602115,431	517067,083	603503,8	603503,8	512203,682	512203,682	604642,922	604642,922	515113,39	515113,39	600154,231	600154,231	517374,18	517374,18
6		602173,643	517061,104	603608,819	603608,819	512164,76	512164,76	604541,309	604541,309	515464,999	515464,999	600171,654	600171,654	517559,203	517559,203
7		602169,515	517156,444	603646,42	603646,42	512055,003	512055,003	604704,247	604704,247	515595,542	515595,542	600264,874	600264,874	517540,737	517540,737
8		602272,132	517207,745	603617,585	603617,585	511888,407	511888,407	604752,641	604752,641	515677,006	515677,006	600382,443	600382,443	517777,859	517777,859
9		602253,796	517111,561	603612,645	603612,645	511889,166	511889,166	605100,921	605100,921	515212,534	515212,534	600065,159	600065,159	517882,678	517882,678
10		602303,749	517097,136	603583,076	603583,076	511852,534	511852,534	605264,997	605264,997	515090,495	515090,495	600561,633	600561,633	517492,006	517492,006
11		602355,597	517058,224	603725,11	603725,11	511822,04	511822,04	605316,868	605316,868	515041,595	515041,595	600614,036	600614,036	517521,15	517521,15
12		602369,155	516942,828	603750,021	603750,021	511879,338	511879,338	605373,966	605373,966	515056,502	515056,502	600605,147	600605,147	517555,603	517555,603
13		602391,609	516897,247	603823,516	603823,516	512210,676	512210,676	605157,397	605157,397	514915,85	514915,85	600563,994	600563,994	517675,012	517675,012
14		602514,425	517382,008	603799,694	603799,694	512242,355	512242,355	605150,363	605150,363	514719,74	514719,74	600565,804	600565,804	517661,182	517661,182
15		602641,54	517335,508	603826,707	603826,707	512307,451	512307,451	605156,972	605156,972	514717,471	514717,471	600604,091	600604,091	517714,681	517714,681
16		602641,54	517335,508	603827,639	603827,639	512329,887	512329,887	605134,144	605134,144	514655,143	514655,143	600573,582	600573,582	517824,078	517824,078
17		602573,001	517504,214	603884,634	603884,634	512347,223	512347,223	605156,862	605156,862	514995,248	514995,248	600791,346	600791,346	517276,738	517276,738
18		602548,197	517703,403	603833,271	603833,271	512411,5	512411,5	605208,051	605208,051	514661,702	514661,702	600773,633	600773,633	517489,334	517489,334
19		602225,733	517535,137	603771,856	603771,856	512390,784	512390,784	605401,589	605401,589	514707,413	514707,413	600896,646	600896,646	517493,936	517493,936
20		602219,147	517359,733	603733,167	603733,167	512425,447	512425,447	605222,589	605222,589	514360,163	514360,163	600672,705	600672,705	517210,663	517210,663
21		602075,016	517488,517	603676,1	603676,1	512457,893	512457,893	605242,774	605242,774	514268,442	514268,442	600658,019	600658,019	517117,282	517117,282
22		601953,375	517434,648	603815,493	603815,493	512504,771	512504,771	605143,519	605143,519	514432,059	514432,059	600788,818	600788,818	517357,353	517357,353
23				603815,493	512504,771	605027,188	605027,188	600594,87	600594,87	52073,662	52073,662	600463,145	600463,145	516992,258	516992,258
24				603879,003	512518,388	605004,189	605004,189	514504,354	514504,354	600594,487	600594,487	600526,894	600526,894	516715,914	516715,914
25				603897,218	512502,682	604756,546	604756,546	514394,407	514394,407	600059,487	600059,487	600571,735	600571,735	516559,136	516559,136
26				603959,794	512551,922	604703,752	604703,752	514471,101	514471,101	600059,487	600059,487	600683,688	600683,688	516572,093	516572,093
27				604051,984	512623,927			600259,943	600259,943	523971,517	523971,517	600736,594	600736,594	516661,883	516661,883
28				604117,893	512765,578			600469,816	600469,816	523971,517	523971,517	600736,594	600736,594	516661,883	516661,883
29				604090,17	512805,37			600190,793	600190,793	523815,419	523815,419	600229,845	600229,845	516552,327	516552,327
30				604043,829	512863,578			599778,089	599778,089	523959,64	523959,64	600279,551	600279,551	516337,671	516337,671
31				604008,561	512856,939			599635,015	599635,015	523975,416	523975,416	600252,711	600252,711	517487,967	517487,967
32				603998,287	512884,174			599647,812	599647,812	524053,909	524053,909	600308,098	600308,098	517585,297	517585,297
33				604164,944	512891,482			599751,974	599751,974	524198,431	524198,431	599837,343	599837,343	517375,93	517375,93
34				603890,39	512969,537			599705,863	599705,863	524051,761	524051,761	600287,612	600287,612	517518,184	517518,184
35				603866,37	512966,257			599396,562	599396,562	523951,841	523951,841	599962,177	599962,177	517163,963	517163,963
36				603812,335	512948,751			599560,341	599560,341	523627,777	523627,777	599899,674	599899,674	517131,099	517131,099
37				603762,645	512870,897			599902,65	599902,65	516560,504	516560,504	600809,281	600809,281	516618,274	516618,274
38				603710,301	512879,705			599633,489	599633,489	517091,737	517091,737				

Anexo 4

Instructivo modelo propuesto de dos fases

Fase 1: Archivo xlsx: CLUSTERING

Pantalla 1 (DATOS DE ENTRADA): Sólo diligenciar y/o manipular los campos descritos a continuación, los demás campos (*DIST X*, *DIST Y*, *r* y θ) se encuentran formulados y no deberán ser manipulados.

1. **Ubicación Depósito:** Dependiendo del contratista, se debe geo referenciar con sus respectivas coordenadas X y Y
2. **X y Y:** Coordenadas de geo referencia incluidas previamente a cada cliente en la base de ODT's antes de su generación.



Clustering - Sweep Algorithm

UBICACIÓN DEPÓSITO
595605,022 513916,66

x	y	DIST X	DIST Y	r	θ
595541,151	521304,32	63,8706876	-7387,66026	7387,93636	-1,56215095 -89,5046565
595498,817	521280,425	106,204848	-7363,76512	7364,53096	-1,5563747 -89,1737016
595503,822	521253,41	101,199618	-7336,75062	7337,44854	-1,55700368 -89,2097396
595579,123	521199,461	25,8985676	-7282,8016	7282,84765	-1,56724021 -89,7962498
595503,022	521195,202	101,999468	-7278,54247	7279,25714	-1,55678352 -89,1971255
595618,646	521144,942	-13,6237624	-7228,2827	7228,29554	-1,57268111 -90,1079901
595606,936	521144,423	-1,91466235	-7227,7628	7227,76306	-1,57106123 -90,0151779
595602,665	521140,883	2,35668765	-7224,22353	7224,22392	-1,57047011 -89,981309
595341,94	521126,606	263,082038	-7209,94643	7214,74461	-1,53432374 -87,9102749
595610,985	521111,439	-5,96337235	-7194,77952	7194,78200	-1,57162517 -90,0474894
595472,348	521101,131	132,674008	-7184,47162	7185,69655	-1,55233165 -88,9420521
595472,348	521101,131	132,674008	-7184,47162	7185,69655	-1,55233165 -88,9420521
595472,348	521101,131	132,674008	-7184,47162	7185,69655	-1,55233165 -88,9420521

Pantalla 2 (CLUSTER): Sólo diligenciar y/o manipular los campos descritos a continuación. Todos los campos de esta hoja se generan automáticamente por lo cual no se deben manipular.



Clustering - Sweep Algorithm

EJECUTAR		Datos de salida			
X	Y	Cto cliente	X	Y	cluster
595541,151	521304,32	1	600483,768	513973,182	1
595498,817	521280,425	2	601299,859	514017,803	1
595503,822	521253,41	3	601283,475	514039,849	1
595579,123	521199,461	4	601622,997	514103,816	1
595503,022	521195,202	5	601875,064	514116,583	1
595618,646	521144,942	6	602185,125	514151,594	1
595606,936	521144,423	7	600639,779	514171,082	1
595602,665	521140,883	8	600880,108	514185,604	1
595341,94	521126,606	9	600880,108	514185,604	1
595610,985	521111,439	10	600996,255	514232,539	1
595472,348	521101,131	11	600771,177	514251,256	1
595472,348	521101,131	12	601218,951	514394,307	1
595472,348	521101,131	13	601118,987	514457,874	1
595607,167	521065,289	14	598618,195	516907,195	1

Una vez generado el cluster, se carga esta segmentación inicial para k-medias junto con las coordenadas x-y de salida

1. **Botón "Ejecutar"**: Una vez cargada la base en la hoja *BASE DE DATOS*, el usuario deberá ubicarse en la hoja *CLUSTER* y presionar este botón. Automáticamente se generan los cluster asignados a cada grupo de cliente. Los datos de información de salida (Cto Cliente, x, y y cluster) se deben copiar a manera de valores y pegarlos en la pantalla 1 del archivo de enrutamiento.

Nota importante: Si el usuario dispone de un paquete estadístico como SPSS o Minitab, puede utilizar la función de cluster k-medias (k-means en inglés) para cargar esta información y mejorar los cluster generados.

Fase 2: Archivo xlsx: MASIVA HEURISTICA RUTEO PROXIMIDAD K-OPT

Pantalla 1: Sólo diligenciar y/o manipular los campos descritos a continuación, los demás campos se encuentran formulados y no deberán ser manipulados.

ORDEN DE CLIENTE	LOCALIDAD	X	Y
3	1	CHAPINERO	598765,9029 521101,1014
3	2	CHAPINERO	599088,6205 521002,3315
3	3	CHAPINERO	600325,5384 525532,2094
3	4	CHAPINERO	599885,1938 522798,9158
3	5	CHAPINERO	600054,1182 523649,1527
3	6	CHAPINERO	599977,2174 523962,7189
3	7		
3	8		
3	9		
3	10		
3	11		

LLAVE	CLUSTER	ONSE CLIENTE	X	Y	LOCALIDAD
1-1	1	1	604090,17	512805,37	CHAPINERO
1-2	1	2	603459,677	511958,927	CHAPINERO
1-3	1	3	603503,8	512203,682	CHAPINERO
1-4	1	4	603503,8	512203,682	CHAPINERO
1-5	1	5	603586,036	512221,689	CHAPINERO
2-1	2	1	597963,492	521086,074	CHAPINERO
2-2	2	2	598546,192	521310,809	CHAPINERO
2-3	2	3	599713,276	525759,793	CHAPINERO
2-4	2	4	598602,85	521579,534	CHAPINERO
3-1	3	1	598765,903	521101,101	CHAPINERO
3-2	3	2	599088,621	521002,331	CHAPINERO

2. **Cargue de base:** Pegar valores en los campos *CLUSTER*, *CONSE CLIENTE*, *X*, *Y* y *LOCALIDAD*. Cada uno de estos campos se refiere a:

- **CLUSTER:** Es el número consecutivo de la cuadrilla a la cual se le asigna el grupo de clientes. Este número no puede ser superior a la cantidad de cuadrillas disponibles para realizar las ODT's.
- **CONSE CLIENTE:** Es el consecutivo de cliente asignado a la cuadrilla. En este campo, para cada cuadrilla inicia en 1 sin consecutivos repetidos. Mínimo deben haber dos clientes asignados por cuadrilla y no superior a 70.
- **X e Y:** Coordenadas de geo referencia incluidas previamente a cada cliente en la base de ODT's antes de su generación.
- **LOCALIDAD:** Es la localidad de Bogotá en la cual se encuentra el cliente ubicado. Esta información debe ser incluida previamente en la base de ODT's.

3. **Botón "Ir a Rutas"**: Ubica al usuario en la hoja de rutas generadas (Pantalla 2) por el aplicativo. Es importante utilizar esta función para verificar si la hoja se encuentra limpia para iniciar un nuevo proceso, y así ahorrar tiempos en la generación de las rutas. Nuevas.
4. **Botón "Empezar"**: Una vez cargada la información del paso 1, se oprime este botón para iniciar la generación de ruta, El tiempo estimado es de 13 a 15 minutos para 2000 clientes.

Pantalla 2: diligenciar y/o manipular los campos descritos a continuación, los demás campos se encuentran formulados y no deberán ser manipulados.

Orden de ruta por	Cluster 1		Cluster 2		Cluster 3		Cluster 4		Cluster 5		Cluster 6	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
5,803	1,37881628	1,37881628	2,2477475	2,2477475	2,17656512	2,17656512						
1	603586,036	512221,689	598602,85	521579,534	598765,903	521101,101						
2	603503,8	512203,682	598546,192	521310,809	599088,621	521002,331						
3	603503,8	512203,682	597963,492	521086,074	599885,194	522798,916						
4	603459,677	511958,927	599713,276	525759,793	600054,118	523649,153						
5	604090,17	512805,37			599977,217	523962,719						
6					600325,538	525532,209						
7												
8												
9												
10												
11												

1. **Botón "Cargar base"**: Ubica al usuario en la pantalla 1.
2. **Botón "Borrar rutas"**: Permite al usuario verificar previamente las rutas generadas antes de iniciar el nuevo proceso ya que este sobre escribe los resultados borrando la información previa. No obstante lo anterior es importante el uso de esta función para limpiar la pantalla antes de iniciar el nuevo proceso.
3. **Rutas generadas**: Cada ruta se especifica por cluster, los cuales van de 1 hasta 100. Cada cluster tiene las coordenadas X y Y de cada cliente para facilitar su ubicación en la base de ODT's. El dato tij indica el

tiempo aproximado de desplazamiento total de las cuadrillas para atender todas las ODT's.