



Implementación de un Problema de Ruteo Vehicular con Ventanas de Tiempo (VRPTW) en una empresa de venta de agroquímicos, sucursal Milagro

Cristofer David Morán Villa ⁽¹⁾, Jorge Javier Núñez Ginez ⁽²⁾, M. Sc. Fabricio Echeverría ⁽³⁾

Instituto de Ciencias Matemáticas (ICM) ^{(1) (2) (3)}

Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)

Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral

Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador

crldmora@espol.edu.ec ⁽¹⁾, jjnunez@espol.edu.ec ⁽²⁾, pechever@espol.edu.ec ⁽³⁾

Resumen

Hoy en día las empresas de bienes y/o servicios abordan problemas dentro de su cadena logística, existiendo la importancia de implementar sistemas que ayuden a la mejora continua de esta gestión y permita a las empresas ser más competitivas satisfaciendo las necesidades de sus clientes. Por esta razón la presente investigación ha sido desarrollada para optimizar los tiempos de distribución de productos de una empresa de venta de agroquímicos. Esta empresa tiene el firme deseo de mejorar su gestión logística. Para poder cumplir con este objetivo, se plantea un conjunto de rutas entre una serie de clientes y/o destinos, de las cuales deberá ser elegida la mejor; es decir, la que permita realizar la distribución de los productos agroquímicos en el menor tiempo posible y a su vez minimizar sus costos de distribución. A este tipo de problema se lo conoce como el Problema de Ruteo Vehicular con Ventanas de Tiempo (VRPTW por sus siglas en inglés).

Palabras Claves: Optimizar, Distribución, Ruteo Vehicular, Logística.

Abstract

Now days, companies of services and goods take part of the problems inside their logistic chain, existing the importance of implementing systems, in order to help the continuous improvement of this management, and to allow to this companies the capability of being more competitive, by satisfying the needs of their customers. For this reason, the present investigation, has been developed to improve and optimized the distribution times of a company dedicated to the agrochemicals sales. This company has the strong wish of improving their logistic management. In order to get to this goal, we propose a set of routes between the several customers and destinies, from which the best rout must be chosen; namely, the rout that allowed the company to make their products distributions in the least time possible, and at the same time, minimize their distribution costs. These kinds of problems have been known by the Vehicle Routing Problem with Time Windows. (VRPTW)

Keywords: Optimize, Distribution, Vehicular Routing, Logistic.

1. Introducción

En este proyecto se han aplicado las distintas técnicas utilizadas de la investigación de operaciones para poder determinar la solución a un problema de planificación de rutas de una empresa dedicada a la venta de agroquímicos. Las técnicas aplicadas permiten determinar a qué cliente vamos a visitar, el cual va a estar relacionado a una ruta para cada sector establecido por el programa.

Este problema que hemos abordado ha sido considerado en dos etapas para su resolución; la primera, fijar el centro de distribución como nodo principal y la segunda, implementar el ruteo vehicular para cada sector previamente establecido, asociando una ventana horaria que deberá respetar cada vehículo para el sector y ruta asignada; teniendo en cuenta el tiempo de salida del camión de su centro de distribución, capacidad, distancias, horas de inactividad y hora de llegada.

2. Descripción del Problema

La empresa de Agroquímicos maneja dos tipos de transporte, el transporte primario que consiste en el envío de agroquímicos desde el centro de distribución ubicado en la ciudad de Guayaquil a cada una de las sucursales; y el transporte secundario, que es nuestro motivo de estudio, el cual radica en la entrega de los productos desde la sucursal de Milagro hasta los clientes finales 35 en total, tal como se detalla en la figura 1 que representa el flujo de distribución antes descrito.

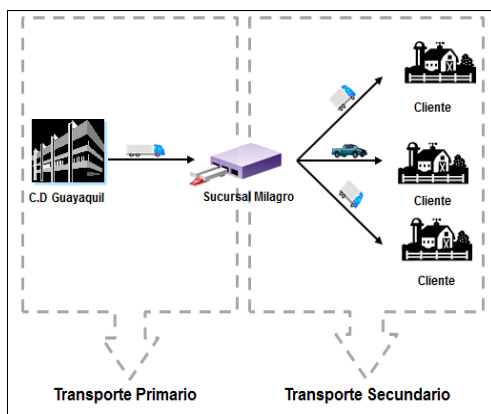


Figura 1. Flujo de Distribución

En el presente trabajo se desarrollará una aplicación que permita a la empresa efectuar adecuadamente la planificación de sus rutas; es decir, que no se realice de manera empírica como

actualmente lo hace. Para esto, se implementará un ruteo vehicular acorde a la situación actual de la empresa considerando factores tales como: demanda, capacidad de vehículos, ubicación geográfica y tiempos de servicio de sus clientes.

La mejora en la planificación de carga, permitirá a la empresa disminuir los costos asociados a la operación de distribución que actualmente se manejan de manera inapropiada; así mismo, al optimizar la distancia total recorrida de la red de distribución repercutirá directamente en los tiempos de entrega, lo cual permitirá visitar mayor cantidad de clientes mejorando el servicio brindado y por tanto ser más competitivos en el mercado.

2.1 Objetivos

Los objetivos que se desean alcanzar mediante la elaboración de este proyecto son:

1. Disminuir los tiempos de entrega y distancias recorridas, por parte de la empresa hacia los consumidores.
2. Maximizar el nivel de servicio a los clientes, optimizando la utilización de los recursos.
3. Buscar la aplicación del objetivo general de la logística: maximización de nivel del servicio y minimización de costos.
4. Elaborar rutas de acuerdo al orden de los pedidos por parte de los consumidores.
5. Balancear rutas, para el tiempo de viaje y carga del vehículo.
6. Minimizar la penalización asociada con un servicio parcial de los clientes.

3. Fundamentos Teóricos

Para cumplir con los objetivos del problema de ruteo vehicular con ventanas de tiempo (VRPTW), se implementó la heurística del vecino más cercano, con un algoritmo de mejora, conocido como Recocido Simulado (Simulated Annealing, S.A.).

3.1. Definición Matemática del VRPTW

El problema del Ruteo Vehicular con Ventanas de Tiempo (VRPTW), está definido matemáticamente de la siguiente manera [1]:

Datos de entrada:

Un grafo dirigido $D = (U \cup V, A)$ con:

- $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ (depósito)
- $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ (clientes)



Los nodos en U representan los depósitos con capacidades k_1, k_2, \dots, k_m (número de vehículos).

Para elaborar nuestros proyectos, se trabajó con un depósito (u_1), que es la sucursal ubicada en la ciudad de Milagro.

- Cada depósito $u \in U$ contiene una flota homogénea de vehículos, cuyos costos (tiempos) de desplazamiento están dados por un vector $c^u \in \mathfrak{R}^{V \times V}$.
- Los nodos en V representan clientes y tienen asociados tiempos de servicio $\delta_v, \forall v \in V$.
- Asociado a cada cliente $v \in V$ está además una ventana de tiempo $[a_v, b_v]$ en la cual la visita a v debe empezar.

Formalización:

Costos de desplazamiento modificados:

$$\tilde{c}_{w\bar{w}}^u = \begin{cases} c_{w\bar{w}}^u + \delta_{\bar{w}}; & \text{si } \bar{w} \in V \\ c_{w\bar{w}}^u; & \text{caso contrario} \end{cases}$$

Compatibilidad entre nodos cliente: (v, \bar{v}) , es un par ordenado de clientes compatibles, si algún vehículo puede visitar \bar{v} inmediatamente después de v , es decir, si:

$$\exists u \in U: a_v + \tilde{c}_{w\bar{w}}^u \leq b_{\bar{v}}$$

Arcos:

Tres tipos de arcos:

$$A_s = \{(u, v) : u \in U, v \in V\} \quad (\text{salida})$$

$$A_r = \{(u, v) : u \in U, v \in V\} \quad (\text{retorno})$$

$$A_c = \{(v, \bar{v}) : v, \bar{v} \in V, (v, \bar{v}) \text{ es compatible}\} \quad (\text{conexión})$$

Rutas:

Una ruta r es un circuito cerrado dirigido que contiene exactamente un nodo de $u \in U$:

$$r = (u, \bar{v}_1, \bar{v}_2, \dots, \bar{v}_k, u)$$

$$\text{Con } \bar{v}_1, \bar{v}_2, \dots, \bar{v}_k \in V$$

Rutas factibles:

Una ruta es factible si cada nodo cliente es visitado dentro de su ventana de tiempo:

$$a_{\bar{v}_j} \leq \tilde{c}_{u\bar{v}_1}^u + \sum_{s=1}^{j-1} \tilde{c}_{\bar{v}_s\bar{v}_{s+1}}^u \leq b_{\bar{v}_j}, \forall j = 1, \dots, k.$$

Costo de rutas:

El costo $c(r)$ (o duración) de r está dado por:

$$c(r) = \tilde{c}_{u\bar{v}_1}^u + \sum_{s=1}^{k-1} \tilde{c}_{\bar{v}_s\bar{v}_{s+1}}^u + \tilde{c}_{\bar{v}_k u}^u$$

Problema:

Encontrar un conjunto de rutas factibles tal que:

- Cada cliente sea atendido por una sola ruta dentro de su ventana de tiempo.
- El costo acumulado de las rutas sea mínimo.

Variables de decisión:

$$X_{w\bar{w}}^u = \begin{cases} 1; & \text{si } (w, \bar{w}) \text{ es usado en alguna ruta de } u \in U \\ 0; & \text{caso contrario} \end{cases}$$

Tiempos de visita:

$$\forall v \in V: T_v \in \mathfrak{R}; \text{ Tiempo en que el cliente } v \text{ es visitado.}$$

3.2. Modelo Matemático del VRPTW

Función Objetivo:

$$\min \sum_{u \in U} \sum_{(w, \bar{w}) \in A} \tilde{c}_{w\bar{w}}^u X_{w\bar{w}}^u \quad (1)$$

Restricciones:

$$\sum_{u \in U} \sum_{(v, w) \in A} X_{vw}^u = 1; \quad \forall v \in V \quad (2)$$

$$\sum_{(v, w) \in A} X_{vw}^u = \sum_{(w, v) \in A} X_{wv}^u; \quad \forall v \in V, \forall u \in U \quad (3)$$

$$\sum_{v, \bar{v} \in W} X_{v\bar{v}}^u \leq |W| - 1; \quad \forall W \subseteq V, \forall u \in U \quad (4)$$

$$\sum_{(u, v) \in A} X_{uv}^u + \sum_{(v, u) \in A} X_{vu}^u \leq 0; \quad \forall u, \bar{u} \in U, u \neq \bar{u} \quad (5)$$

$$\sum_{(u, v) \in A} X_{uv}^u \leq \kappa_u; \quad \forall u \in U \quad (6)$$

$$a_v \leq T_v \leq b_v; \quad \forall v \in V \quad (7)$$

$$X_{v\bar{v}}^u (T_v + \tilde{c}_{v\bar{v}}^u - T_{\bar{v}}) \leq 0; \quad \forall (v, \bar{v}) \in A_c, \forall u \in U \quad (8)$$

$$X_{uv}^u (\tilde{c}_{uv}^u - T_v) \leq 0; \quad \forall (u, v) \in A_s, \forall u \in U \quad (9)$$

$$X_{w\bar{w}}^u \in \{0, 1\}; \quad \forall (w, \bar{w}) \in V, \forall u \in U$$

$$T_v \in \mathfrak{R}; \quad \forall v \in V$$

Donde:

- (1) Función objetivo, Minimizar la distancia total recorrida, corresponde a la suma de los costos de los arcos utilizados.
- (2) Asegura que todo cliente que haya realizado el pedido deberá ser visitado.
- (3) Restricción de equilibrio, indica que la ruta debe llegar y abandonar una sola vez cada cliente.
- (4) Restricción de eliminación de sub-tours, elimina un ciclo cuando se tiene el número de arcos menor al número de vértices que existe.
- (5) Esta restricción evita que el depósito sea considerado como un cliente y no sea visitado inmediatamente.
- (6) Restricción de capacidad, indica la ruta establecida no deberá ser mayor a la



- capacidad del número de vehículos del depósito.
- (7) Restricción de ventana horaria, asegura que se cumpla el tiempo de servicio de cada cliente entre el intervalo de tiempo establecido.
 - (8) y (9) Estas restricciones, influyen para que se cumpla los tiempos de recepción de los clientes dentro de las ventanas horarias establecidas, respetando el orden de las mismas.

3.4. Complejidad Computacional del VRPTW

Los problemas de optimización de rutas y scheduling son de gran complejidad si miramos el recurso tiempo de ejecución. Podemos definir un algoritmo como un procedimiento paso a paso para resolver un problema. Uno de los objetivos cuando se diseña un algoritmo es el de encontrar el método más eficiente, midiéndose dicha eficiencia en tiempo de ejecución. Este tiempo depende del tamaño de la entrada del problema, por tanto el coste de un problema, en términos de tiempo de ejecución, se mide mediante una función que relaciona el tamaño de la entrada con el tiempo. Así los problemas de optimización de rutas de vehículos se pueden clasificar dentro de los denominados NP-duros, los cuales podríamos definirlos a grandes rasgos diciendo que el esfuerzo computacional requerido para resolverlos aumenta exponencialmente con el tamaño de la entrada. Como el VRPTW engloba diferentes problemas de optimización conocidos que son NP-duros, podemos decir que el VRPTW es NP-duro en sentido fuerte [2].

4. Algoritmo de mejoramiento Recocido Simulado (Simulated Annealing).

Simulated Annealing (SA) o recocido simulado es un algoritmo de búsqueda meta-heurística para problemas de optimización global; el objetivo general de este tipo de algoritmos es encontrar una buena aproximación al valor óptimo de una función en un espacio de búsqueda grande. A este valor óptimo se lo denomina "óptimo global".

El nombre e inspiración viene del proceso de recocido del acero y cerámicas, una técnica que consiste en calentar y luego enfriar lentamente el material para variar sus propiedades físicas. El calor causa que los átomos aumenten su energía y que puedan así desplazarse de sus posiciones iniciales (un mínimo local de energía); el enfriamiento lento les da mayores probabilidades de recrystalizar en

configuraciones con menor energía que la inicial (mínimo global).

El método fue descrito independientemente por Scott Kirkpatrick, C. Daniel Gelatt y Mario P. Vecchi en 1983 y por Vlado Cerný en 1985. El método es una adaptación del algoritmo Metrópolis-Hastings, un método de Montecarlo utilizado para generar muestras de estados de un sistema termodinámico [3].

4.1 Iteración básica

En cada iteración, el método de recocido simulado evalúa algunos vecinos del estado actual s y probabilísticamente decide entre efectuar una transición a un nuevo estado s' o quedarse en el estado s . En el ejemplo de recocido de metales descrito arriba, el estado s se podría definir en función de la posición de todos los átomos del material en el momento actual; el desplazamiento de un átomo se consideraría como un estado vecino del primero en este ejemplo. Típicamente la comparación entre estados vecinos se repite hasta que se encuentre un estado óptimo que minimice la energía del sistema o hasta que se cumpla cierto tiempo computacional u otras condiciones [3].

4.2 Vecindario de un estado

El vecindario de un estado s está compuesto por todos los estados a los que se pueda llegar a partir de s mediante un cambio en la conformación del sistema. Los estados vecinos son generados mediante métodos de Montecarlo.

El método de evaluación de estados vecinos es fundamental para encontrar una solución óptima global al problema dado. Los algoritmos heurísticos, basados en buscar siempre un estado vecino mejor (con energía más baja) que el actual se detienen en el momento que encuentran un mínimo local de energía.

El problema con este método es que no puede asegurar que la solución encontrada sea un óptimo global, pues el espacio de búsqueda explorado no abarca todas las posibles variaciones del sistema [3].

4.3 Probabilidad de Transición

La probabilidad de hacer la transición al nuevo estado s es una función $P(\delta E, T)$ de la diferencia de energía $\delta E = E(s') - E(s)$ entre los dos estados, y de la variable T , llamada temperatura por analogía con el concepto físico de temperatura.

Si δE es negativo, es decir, la transición disminuye la energía, el movimiento es aceptado con



probabilidad $P = 1$. En importante remarcar que la condición de que el sistema siempre pase a un sistema de menor energía cuando se encuentra una no es en absoluto necesaria para el éxito del método. Cuando δE es positivo la probabilidad de transición P es siempre distinta de cero; es decir, el sistema puede pasar a un estado de mayor energía (peor solución) que el estado actual. Esta propiedad impide que el sistema se quede atrapado en un óptimo local.

A medida que la temperatura tiende al mínimo, la probabilidad de transición a un estado de mayor energía tiende a cero asintóticamente. Cuando T llega a cero, el algoritmo solo aceptará cambios a estados con menor energía. Debido a esta propiedad, la temperatura juega un papel muy importante en el control de la evolución del sistema. A temperaturas altas, el sistema tenderá a saltos de energía grandes entre los estados, mientras que a temperaturas más bajas, los cambios en energía serán menores.

Así, en cada iteración el algoritmo tiende a encontrar estados con menor energía total. Hay muchas maneras de disminuir la temperatura, siendo la más usual la exponencial, donde T disminuye por un factor $\alpha < 1$ en cada paso [3].

4.4 Protocolo de recocido

Como el nombre del algoritmo sugiere, la variación de la temperatura durante la computación es una característica distintiva de este método. El algoritmo comienza con un valor de T muy alto, que va decreciendo en cada iteración siguiendo un cierto protocolo de recocido, que puede ser diferente para cada problema, pero que siempre debe terminar con $T = 0$. Así el sistema será libre inicialmente de explorar una gran porción del espacio de búsqueda, ignorando pequeñas variaciones de la energía entre los estados vecinos evaluados, para más tarde centrarse en regiones con estados de baja energía y, al final, cambiar solo a estados con energía menor que la inicial, hasta alcanzar un mínimo.

La probabilidad de que el algoritmo acabe encontrando el mínimo global para un problema dado se aproxima a 1 a medida que el protocolo de recocido se extiende [3].

5. Diseño del Recocido Simulado para el VRPTW

Nuestro programa principal se basa en la naturaleza del Recocido Simulado y está constituido por los siguientes pasos:

- Importar los datos desde archivos externos.
- Crear una matriz de distancias.
- Crear la solución inicial del problema usando el algoritmo Vecino mas cercano y llamarla solución actual.
- Crear una solución vecina a la solución actual intercambiando la posición de dos nodos cualesquiera en una misma ruta cualquiera de la solución actual.
- Recalcular las ventanas de tiempo con las fórmulas anteriores.
- Calcular el valor de la función objetivo.
- Si la nueva solución es mejor que la solución actual, aceptarla inmediatamente; caso contrario, generar un número aleatorio uniformemente distribuido entre 0 y 1, si este número aleatorio es menor o igual a la probabilidad de Boltzman aceptar la nueva solución, caso contrario rechazarla y continuar con la siguiente iteración. Entendiendo como probabilidad de Boltzman a $e^{-\Delta/T}$; donde:
 $\Delta = costo(x) - costo(y)$
 $T = Temperatura$; Parámetro de calibración.
- Graficar la ruta más optima encontrada.

A continuación se presenta el pseudocódigo de lo antes descrito:

Inicio

Importar (datos)

Distancia = CrearMatrizDistancias (Datos)

SolIni = CrearRutasIniciales (Datos, Dist)

CostIni = CostoTotalRuteo (Datos, Dist, SolIni)

Para i = 1 hasta todos los clientes

SolNew = GenerarVecino(SolIni)

CostNew = CostoTotalRuteo(Datos, Dist, SolNew)

Si CostNew es menor que CostIni

SolIni = SolNew; CostIni = CostNew

caso contrario

NumAleatorio = NumAleatorio {0,1}

ProBoltzman = Calcula Probabilidad de Boltzman

Si NumAleatorio es menor igual a ProBoltzman

SolIni = SolNew; CostIni = CostNew

Fin Si

Fin Si

Fin Para

Mostrar Recorrido de Costo Minimo

Graficar Recorrido de Costo Minimo (SolIni)

Fin

6. Desarrollo y Análisis del Problema

Para el desarrollo del problema, hemos considerado que la frecuencia de recepción de pedidos de los clientes sea diariamente; es decir, cada día se atiende a un subconjunto del total de clientes, esto se debe a que la demanda de la empresa es aleatoria. Por consiguiente, siempre se reciben pedidos de máximo siete clientes por ruta y esto genera realizar de tres a cuatro rutas diarias, asegurando un excelente servicio al cliente como política de la empresa.

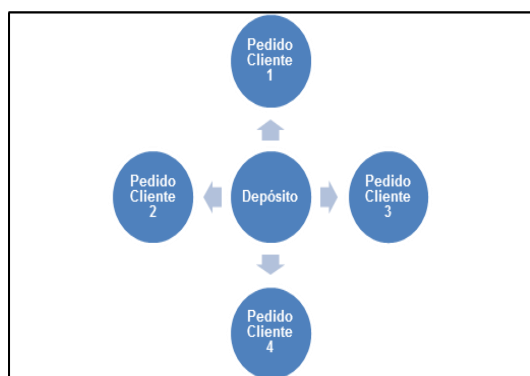


Figura 2. Función de Distribución

6.1 Tablas de Información

En la tabla 1 que se muestra a continuación, se encuentra el detalle de los parámetros utilizados para el desarrollo de nuestro proyecto; es decir la información que alimenta nuestra programación, contando con los siguientes datos:

- Clientes, a los cuales se les ha asignado un número; donde el depósito esta denominado como cliente 1 teniendo un total 36 clientes, que por motivos de confidencialidad no se menciona los nombres.
- X y Y, corresponde a las coordenadas X y Y de cada cliente que se obtuvieron para calcular las distancias entre ellos.
- T_i y T_f , corresponde a las ventanas de tiempo de los clientes.
- Tser, Los tiempos de servicio es el mismo para todos los clientes, teniendo en cuenta una holgura para cualquier tipo de imprevisto, ya que los clientes suelen estar ocupados, pero no significa, que no se le pueda realizar la entrega.

Cliente	X	Y	T_i	T_f	Tser
1	0	0	0	300	0
2	-4380	-6018	912	1212	45
3	-803	-2002	825	1125	45
4	-3034	-7082	65	365	45
5	-4915	-10580	727	1027	45
6	18219	-7745	15	315	45
7	-4378	-9207	621	921	45
8	27317	-30667	170	470	45
9	-14377	-18909	255	555	45
10	-14965	-19703	534	834	45
11	2480	-13136	357	657	45
12	15594	-20838	448	748	45
13	15497	-21159	652	952	45
14	38552	-18799	30	330	45
15	21965	-21153	567	867	45
16	24134	-23570	384	684	45
17	27079	-23869	475	775	45
18	32823	-20454	99	399	45
19	30694	-22101	179	479	45
20	46917	-17980	278	578	45
21	27582	-31270	10	310	45
22	27936	-31369	914	1214	45
23	28264	-31210	812	1112	45
24	28721	-31397	732	1032	45
25	28713	-31881	65	365	45
26	12113	3741	169	469	45
27	17129	-2729	357	657	45
28	14759	-3593	448	748	45
29	4106	-1678	652	952	45
30	40098	3236	30	330	45
31	38220	-1123	567	867	45
32	33658	-545	384	684	45
33	44191	-5236	475	775	45
34	31873	-22795	99	399	45
35	32918	-11606	914	1214	45
36	32263	-22813	812	1112	45

Tabla 1. Tabla de Distancias de Clientes

7. Resolución del Problema

Las distancias actuales recorridas por el camión de la empresa, son confidenciales. Pero se conoce que actualmente una de las políticas de la empresa es entregar al cliente que pide primero, siendo en este caso el primer destino a visitar y así sucesivamente, sin considerar que estos se encuentren muy alejados el uno del otro, generándose subciclos y a su vez alargando el recorrido, esto sucede porque cuentan con un sistema de ruteo que solo lo hace el chofer de dicho vehículo a su propia conveniencia.

Mediante un comando de programación, se conectó la base de datos de los clientes a nuestro programa, enlazando la información de entrada para que este genere la solución. Esto se lo hace con la finalidad de optimizar tiempo y facilitar la ejecución, ya que si se realiza algún cambio en la base de datos de Access, esta automáticamente se actualiza, generando la nueva solución en el programa.

Ahora se muestra la Figura 3 que representara el recorrido de la empresa realizado de manera empírica; es decir se simula una posible instancia de recorrido

que no considera ninguna restricción asociada a los clientes; como ventanas de tiempo, distancias, etc.; sino las políticas antes mencionados, todo esto con el fin de realizar una comparación con el algoritmo de mejora realizado en este proyecto.

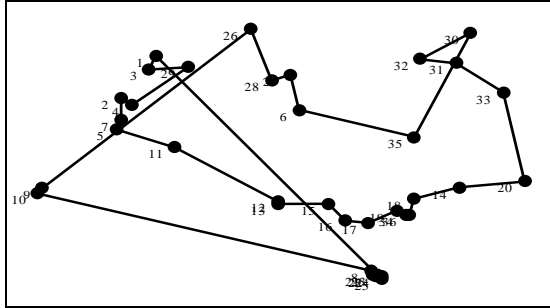


Figura 3. Ruteo Empírico

La distancia total recorrida de esta ruta es: 555.2659 km.

Una vez obtenido el resultado del recorrido empírico, se procedió a aplicar el algoritmo de mejora programado para este problema en particular.

A continuación se detalla cada una de las rutas generadas de nuestro programa para de esta manera ver el comportamiento y la disminución de la distancia recorrida y así evaluar la calidad de los resultados que éste genera:

Este algoritmo genera 4 rutas óptimas, las detallamos a continuación:

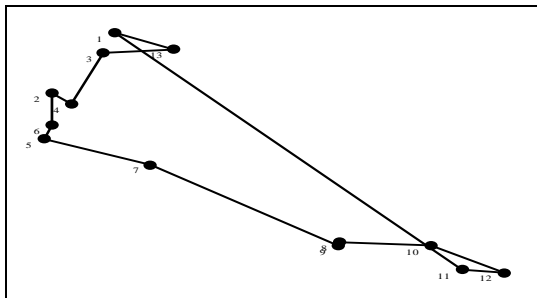


Figura 4. Ruta 1

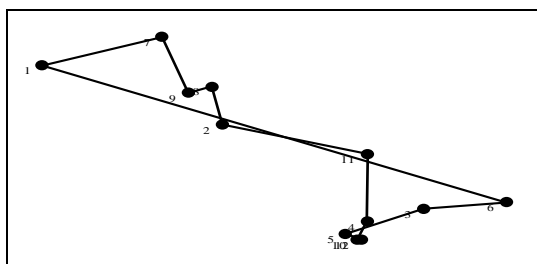


Figura 5. Ruta 2

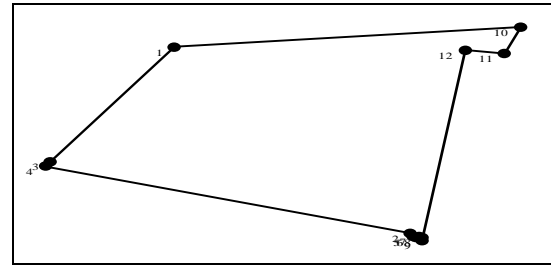


Figura 6. Ruta 3

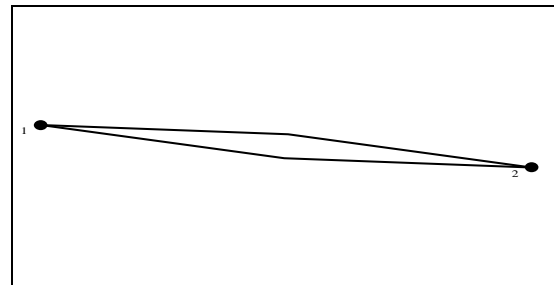


Figura 7. Ruta 4

Una vez generadas cada una de las rutas, el programa procede a unir las mismas, detallando el recorrido total que el chofer de la empresa deberá respetar siguiendo los parámetros establecidos en la solución final del programa que se muestra a continuación en la Figura 8.

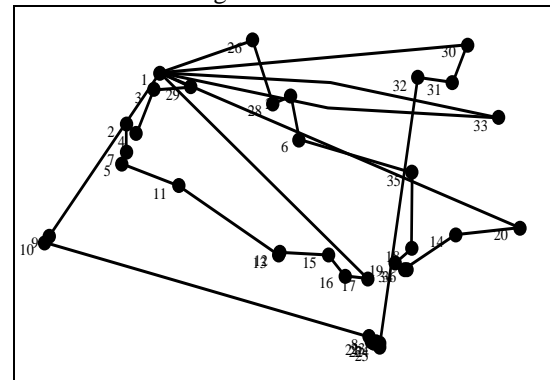


Figura 8. Ruteo con el Algoritmo de recocido Simulado

La distancia total recorrida en las nuevas rutas es: 320.7908 km

Como se puede observar, existe un significativo ahorro de distancia recorrida en comparación con la instancia empírica generada, logrando una reducción del 42% de la distancia total recorrida correspondiente a 234.4751km menos, impactando directamente al tiempo total de recorrido y a su vez a los costos de combustible, entre otros.



7.1 Informe de Resultados

Cada una de estas rutas, está asociada con un Scheduling, que es el que establece los tiempos de llegada, tiempos de salida y tiempos de servicio, que son los tiempos que el camión deberá asumir para atender a cada uno de los clientes establecidos en las rutas.

Las tablas de scheduling las detallamos a continuación:

Cliente	Tiempo Llegada	Tiempo de Servicio	Tiempo de Salida
1	0	0	0
29	5784	45	5829
3	11062	45	11107
4	18418	45	18463
2	20873	45	20918
7	24109	45	24154
5	26064	45	26109
11	36060	45	36105
13	57145	45	57190
12	57608	45	57653
15	64339	45	64384
16	68970	45	69015
17	72259	45	72304
1	123252	0	123252

Tabla 2. Scheduling Ruta 1

Cliente	Tiempo Llegada	Tiempo de Servicio	Tiempo de Salida
1	0	0	0
26	15854	45	15899
28	25879	45	25924
27	29158	45	29203
6	35309	45	35354
35	53914	45	53959
18	62902	45	62947
19	66723	45	66768
36	69049	45	69094
34	69502	45	69547
14	80222	45	80267
20	89451	45	89496
1	154393	0	154393

Tabla 3. Scheduling Ruta 2

Cliente	Tiempo Llegada	Tiempo de Servicio	Tiempo de Salida
1	0	0	0
9	33286	45	33331
10	34713	45	34758
8	88004	45	88049
21	88917	45	88962
22	89415	45	89460
23	89947	45	89992
25	91112	45	91157
24	91649	45	91694
32	127483	45	127528
31	132668	45	132713
30	138950	45	138995
1	182329	0	182329

Tabla 4. Scheduling Ruta 3

Cliente	Tiempo Llegada	Tiempo de Servicio	Tiempo de Salida
1	0	0	0
33	49427	45	49472
1	98899	0	98899

Tabla 5. Scheduling Ruta 4

9. Conclusiones y Recomendaciones

Gracias a los modelos matemáticos e informáticos utilizados en este proyecto, se pueden concluir lo siguiente:

Dado el ineficiente sistema con el que la empresa trabaja actualmente, podemos concluir que al implementar un VRPTW, y la modelización presentada, existe una mejora promedio del 42% en el kilometraje recorrido lo cual también impacta de manera directa en el costo del flete y otros costos asociados, los mismos que se derivan en costos de combustible, mantenimiento, etc.

Como la distancia recorrida no es la misma todos los días, se pueden generar ahorros superiores diariamente, lo cual generara un ahorro significativo al final del mes. Existiendo además, la posibilidad de minimizar la cantidad de personal (choferes) dado que existe una mejor administración en las rutas de las flotas de vehículos con las que actualmente trabaja la empresa. Sin embargo, este factor siempre va a depender de la demanda y el índice de rotación de los productos, entre otras variables que se deberían evaluar dentro de su gestión de inventarios.

Así mismo, el ahorro en kilometraje, podría ayudar a atender a un cliente mas, ya que se reduce el tiempo de la entrega de los pedidos, y se podría cubrir algún requerimiento de emergencia por parte del cliente, ya que en los negocios de los cultivos, siempre se debe



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

"Impulsando la Sociedad del Conocimiento"



de tratar de que nuestros clientes se sientan protegidos y respaldados por nuestros servicios, desde el punto de vista de la empresa.

Además, con los resultados obtenidos podemos concluir que este tipo de herramientas matemáticas, y de programación que combinan Metaheurísticas con algoritmos de mejora, son de gran ayuda para la correcta planificación de carga de las empresas, quienes buscan satisfacer a un alto nivel las necesidades de sus clientes, para crecer más en el mercado y por consiguiente ser más competitivos. Por otro lado, no se puede negar que en nuestro medio existen muchos empresarios que se niegan a optar por este tipo de herramientas, esto sucede en la mayoría de los casos al desconocimiento de las mismas o por costumbre; es decir, por tener varios años manejando su negocio de manera empírica creyendo ser una buena alternativa para el mismo, lo cual los lleva a cometer muchos errores ocultos, sin saber que pueden mejorar y optimizar sus procesos, ya que este tipo de métodos son más efectivos, según lo demostrado para este caso en particular.

Para futuras investigaciones que se encuentren en este ámbito damos las siguientes recomendaciones:

- Utilizar herramientas como Visual Basic, para crear ventanas de ingreso de datos, conectadas a programas de optimización para generar rutas de manera más rápida.
- Implementar capacitaciones, acerca de temas de optimización, Metaheurísticas, heurísticas, etc.
- Fomentar la promoción de las carreras dedicadas al estudio de estos procedimientos, abriendo las opciones de los empresarios ecuatorianos.
- Implementar algoritmos de mejora más eficaces, de manera que los resultados sean mejores, permitiendo el uso de la información por parte de los altos mandos de las empresas.
- Aceptar el uso de las herramientas informáticas y matemáticas en la optimización de los procesos operativos de las empresas.

10. Agradecimientos

Deseamos utilizar este espacio, para agradecer rotundamente a todas las personas que lograron la realización de este artículo, ya que sin su influencia nunca hubiera sido posible, así como también a nuestra familia, quienes con el amor incondicional nos motivan para seguir adelante en todos nuestros proyectos tanto profesionales como espirituales.

11. Referencias

- [1] Msc. Erwin Delgado, *Modelos Avanzados en Transporte*, Instituto de Ciencias Matemáticas, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2009.
- [2] Grosso de la Vega, R. *Cálculo de Rutas de Vehículos de Reparto en una Ciudad con Ventanas Temporales de Acceso*, Abril 2010.
- [3] Wikipedia, "Algoritmo de Recocido Simulado", www.wikipedia.org.