

**PROPUESTA DE DISEÑOS DE RUTAS CON VENTANAS DE TIEMPO EN UNA
EMPRESA DISTRIBUIDORA DE PRODUCTOS ALIMENTICIOS CON FLOTA DE
VEHÍCULOS HETEROGÉNEA**

Presentado por:

DIANA KATHERINE REYES PORTILLO

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

PALMIRA

2015

**PROPUESTA DE DISEÑOS DE RUTAS CON VENTANAS DE TIEMPO EN UNA
EMPRESA DISTRIBUIDORA DE PRODUCTOS ALIMENTICIOS
CON FLOTA DE VEHÍCULOS HETEROGÉNEA**

Presentado por:

DIANA KATHERINE REYES PORTILLO

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERÍA
INDUSTRIAL**

JULIO CÉSAR LONDOÑO ORTEGA

MSc. INGENIERÍA INDUSTRIAL

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA,

ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

PALMIRA

2015

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Palmira, Agosto de 2015

AGRADECIMIENTOS

A Dios antes que nada, por todas sus bendiciones y la oportunidad de hoy presentar este trabajo.

A mi director de Trabajo de Grado, Ingeniero Julio Londoño por todo el conocimiento adquirido, paciencia y comprensión.

A mis padres y hermana, por su apoyo incondicional a lo largo de este camino, por su esfuerzo y su comprensión en todo momento.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3 SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
2. OBJETIVOS.....	5
2.1 OBJETIVO GENERAL	5
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
3. JUSTIFICACIÓN	6
4. MARCO TEÓRICO.....	8
5. PROCESO METODOLÓGICO.....	13
5.1 I FASE DE CARACTERIZACIÓN:	13
5.1.1 Clientes.....	13
5.1.2 El Depósito.....	19
5.1.3 El Vehículo.....	18
5.1.4 Vías.	21
5.1.5 Caso de estudio.	23
5.1.5.1 Antecedentes.	24
5.1.5.2 Operaciones de transporte.	24
5.1.5.3 El problema de la empresa.....	25
5.2 II FASE FORMULACIÓN DEL ALGORITMO:	26
5.3 III FASE VALIDACIÓN DE RESULTADOS:.....	43
6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	44
6.1 PRIMERA RUTA	45
6.2 SEGUNDA RUTA.....	46
6.3 TERCER RUTA.....	47
7. CONCLUSIONES	50
BIBLIOGRAFÍA.....	52

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Demanda estimada de los clientes [Unidades/pedido]	15
Tabla 2. Horarios de atención de los clientes.....	18
Tabla 3. Coordenadas geográficas de los clientes.....	27
Tabla 4. Inserción Primer cliente con el PFIH	29
Tabla 5. Primer secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el $K=1$	31
Tabla 6. Primer secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el $K=2$	32
Tabla 7. Segunda secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el $K=1$	34
Tabla 8. Segunda secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el $K=2$	34
Tabla 9. Tercer secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el $K=2$	37
Tabla 10. Tercer secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el $K=1$	38
Tabla 11. Primer secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el $K=3$	41
Tabla 12. Tercer secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el $K=1$	41
Tabla 13. Resumen PFIH	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Factor Circuito	16
Figura 2. Corredores Infraestructura Vial	21
Figura 3. Estado Pavimento en corredores principales	22
Figura 4. Primer secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el K=1	30
Figura 5. Primer secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el K=2	32
Figura 6. Segunda secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el K=1	33
Figura 7. Segunda secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el K=2	35
Figura 8. Tercer secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el K=2	36
Figura 9. Tercer secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el K=1	39
Figura 10. Primera secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el K=3	40
Figura 11. Primer Ruta TW4	42
Figura 12. Primera Ruta	46
Figura 13. Segunda Ruta	47
Figura 14. Tercera Ruta	48

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Matriz de distancias.....	54
------------------------------------	----

INTRODUCCIÓN

Las decisiones sobre el diseño, planeación y operación de la cadena de suministro desempeñan un papel importante en el éxito o el fracaso de una compañía, cuyas decisiones se fundamentan en el estudio, análisis y evaluación para la determinación de dónde y cómo ubicar las instalaciones, la selección de modo de transporte, asignación de capacidad, qué mercados asignar, con el fin de agregar valor al producto final y satisfacer la demanda [1].

Dentro de las decisiones operacionales que afectan significativamente el desempeño de la cadena de suministro, el diseño de red, tiene gran relevancia puesto que un diseño eficaz permite a la organización dar una mayor capacidad de respuesta, minimizar costos de transportación, cuyo objetivo es común para todas las empresas sin importar el tamaño.

No todos los problemas de ruteo de vehículos siempre son los mismos, en muchos casos se evidencian características que proporcionan un interés especial para ser estudiados, entre ellos cabe mencionar restricciones de capacidad, tiempos de servicios, ventanas de tiempo, número de clientes y demás, cuyo análisis alberga en el contenido de este trabajo para una empresa distribuidora de alimentos.

Este trabajo de grado, presenta la propuesta para resolver en una empresa de la ciudad de Palmira el problema de diseñar y programar las rutas para la distribución de sus productos a sus clientes, cumpliendo las restricciones asociadas, como ventanas de tiempo, capacidad de los vehículos y demandas de los clientes.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con un sistema de transporte poco desarrollado, la amplitud del mercado se limita [2], sumado a ello, el ineficiente diseño de red, desencadena el incremento de los costos logísticos que se vuelven retos difíciles de superar para las pequeñas empresas, más aún, cuando esta lleva poco tiempo de ser creada.

La decisión sobre el diseño de red, está contemplada por varios factores que inciden directamente en la estructura y composición de la empresa; como por ejemplo los costos de transporte, inventario e instalación.

Los costos de transporte en empresas de menor tamaño, toman cierto grado de complejidad dado que estos costos representan entre un tercio y dos tercios de los costos totales logísticos [2], que a su vez dependen de factores como distancia, peso, urgencia de la entrega y modalidad de envío [3].

En particular, las pequeñas y medianas empresas PYMES podrían ser vulnerables en un mercado de costos y economía basada en la masa crítica y su desencadenante economía de escala, que les impiden un desempeño eficiente de la cadena de suministro; por ello, la aplicación de metodologías logísticas, acordes con su estructura organizacional puede proporcionar posibles soluciones que facilite el diseño de red para controlar y administrar sus operaciones sin importar el tamaño.

La vulnerabilidad de las PYMES se presenta en el aumento de sus costos, relacionados con el ineficiente diseño de rutas, ya que se podrían recorrer distancias muy largas distantes de la rutas óptimas, lo que ocasionaría mayores costos en el transporte, con el incumplimiento de los requerimientos de los clientes, términos de no llegar a tiempo, lo que puede generar demandas no servidas o viajes adicionales para satisfacer dichas demandas.

Los métodos matemáticos garantizan soluciones óptimas para los problemas de ruteo de vehículos, sin embargo, éstos sólo pueden resolver estos problemas en instancias pequeñas muy grandes y además, para su solución se requieren de avanzadas herramientas computacionales que resultan costosas para las PYMES. Por tal razón, es necesario que se realicen en las PYMES, métodos sencillos basados en heurísticos que resuelvan los problemas de distribución de productos, presentando soluciones factibles, cercanas al óptimo.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La empresa pretende ampliar la cobertura del mercado, buscando cubrir un total de 49 instituciones educativas, pero para ello considera necesario la incorporación de dos vehículos más, cuyas capacidades son diferentes, los vehículos tienen capacidad de distribuir 250 UBA¹, 150 UBA y 100 UBA, respectivamente.

Dada esta instancia, este problema, no se podría resolver con métodos matemáticos exactos convencionales, por lo que es necesario utilizar procedimientos heurísticos que permitan diseñar las rutas y elaborar la programación de éstas, cumpliendo los requerimientos del cliente.

Las técnicas para la solución a este tipo de problemas son algoritmos de construcción de rutas que se dividen en métodos secuenciales y paralelos, los métodos paralelos permiten la construcción de rutas simultáneamente, Marius Solomon con el estudio del algoritmo de Inserción Push Forward Insertion Heuristic (*PFIH*) [4], facilita la solución a problemas de este tipo.

Para dar solución al problema, se plantea la siguiente pregunta de investigación:
¿Cómo debería ser el diseño y programación de la ruta que le permita a la empresa, cumplir con las ventanas de tiempo establecidas por los clientes, mediante la aplicación del algoritmo Push Forward Insertion Heuristic?

¹ Unidad Básica de Almacenamiento.

1.3 SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

Para dar respuesta al anterior interrogante se propone el planteamiento de las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son las características de la empresa asociadas con el sistema de distribución de los alimentos?
- ¿Cómo se resuelve el algoritmo heurístico *PFIH* que permite diseñar las rutas del sistema de distribución de la empresa?
- ¿La solución hallada permite resolver realmente el problema bajo las restricciones del sistema de distribución de la empresa?

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar la programación de rutas para la distribución de productos alimenticios que permita realizar recorridos en la localización geográfica determinada, minimizando las distancias recorridas satisfaciendo las restricciones de ventanas de tiempo, considerando la capacidad de los vehículos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el caso de estudio y los elementos que interactúan en el proceso de distribución mediante la recolección de datos.
- Modelar el problema de distribución de la empresa objeto de estudio a través de métodos heurísticos que lo solucionen.
- Verificar que los resultados obtenidos del método heurístico resuelven el problema, cumpliendo con las restricciones de ventanas de tiempo establecidas por los clientes.

3. JUSTIFICACIÓN

La temática que aborda el presente trabajo, contempla problemas de ruteo, intrínsecos de la logística, este tipo de problemas abarcan gran participación dentro de la cadena de abastecimiento, dado que determinan el diseño de las rutas para el sistema de distribución a lo largo de la cadena. El *Vehicle Routing Problema with Time Windows* (VRPTW), es un problema computacional clásico de optimización combinatoria (NP-Hard), cuya característica radica en la complejidad polinomial de ser resuelto, puesto que a pesar de la formulación de múltiples algoritmos, no se conoce ningún algoritmo determinístico que genera una solución exacta en un tiempo polinomial a medida que el tamaño del problema aumenta, sin embargo las investigaciones realizadas a lo largo del tiempo han desarrollado ciertos algoritmos aproximados, técnicas heurísticas y metaheurísticas que aunque no aseguran una solución óptima global, proporcionan bondades en la solución con esfuerzos computacionales bajos en tiempo de cómputo razonables.

El VRP, puede presentarse en diversos escenarios de la vida real, dentro empresas de grande y menor tamaño, empresas de servicios, que evidencian fallas en su sistema de distribución. El VRP contempla variantes según sean las restricciones de operación que presente el caso, por ejemplo la capacidad, cantidad y tipo de vehículos que dispone una empresa, en donde generalmente no cuentan con vehículos de la misma capacidad (flota heterogénea), y más aún en las pequeñas empresas (PYMES), cuya flota de vehículos está muy limitada por el tamaño de la organización, para el presente trabajo se dispone de una flota de tres vehículos, que moviliza volúmenes de carga de aproximadamente 100 UBA, a cortas distancias dentro de la ciudad, bajo la determinación de seleccionar qué vehículo será asignado para cubrir la ruta correspondiente, adjunto a esta característica se agregan restricciones de ventanas tiempo, en donde cada cliente determina el período del día en el que puede ser visitado y en donde cada cliente tiene una demanda asociada, junto a estos también se estudian factores externos

que participan en la modelación del caso, como lo es, el estado de las vías de mayor tránsito de la ciudad, velocidades de los vehículos y otros.

Para el caso de problemas de ruteo reales, en donde se manejen instancias de gran tamaño, es indiscutiblemente necesario la utilización de métodos de solución alternos a métodos exactos, dado el alto nivel de complejidad, razón por la cual los algoritmos heurísticos y metaheurísticas son implementados, en donde por medio de iteraciones lógicas permiten conocer soluciones cercanas al óptimo. En la actualidad gracias a investigaciones realizadas en el tema, empresas *PYMES*, quienes en tiempos atrás, no podían dar solución a estos problemas por limitaciones económicas, hoy pueden acceder a estas herramientas heurísticas a través de una hoja de cálculo.

La elaboración de este trabajo tiene como propósito generar una solución de para la empresa a través de la aplicación de un algoritmo heurístico propuesto por Solomon (*Push Forward Heuristic Insertion*) que facilita el diseño y programación de rutas acorde y coherente a la estructura y condiciones de la empresa.

Por último, con la realización de este trabajo, se le permite al estudiante de Ingeniería Industrial realizar el planteamiento y construcción de problemas matemáticos con datos reales, quien está en la capacidad de proponer soluciones y análisis de ruteo con los resultados obtenidos.

4. MARCO TEÓRICO

El problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRPTW), es una extensión del CVRP (Problema de Ruteo de Vehículos con Capacidad), en el cual se imponen restricciones de capacidad y a cada cliente i se le asocia un intervalo de tiempo $[a_i, b_i]$, llamado Ventana de Tiempo, es decir, cada cliente debe ser atendido dentro de un horario fijado previamente, y el vehículo debe permanecer en la ubicación del cliente durante el servicio [5]. Los problemas de ruteo de esta categoría son considerados NP-Hard, y dada la complejidad computacional para ser resueltos, se han estudiado diferentes metodologías de investigación de operaciones que van desde la aplicación de métodos exactos, hasta enfoques heurísticos y metaheurísticos [6].

Los métodos exactos proporcionan una solución óptima al problema usando modelación matemática. En el año 1983 Desrosiers [7] y un grupo de investigadores presentan para problemas de ruteo con ventanas de tiempo un modelo matemático e introduce la restricción de No linealidad en donde se define el grafo $G = (V, A)$ siendo $V = \{0, \dots, n\}$, el conjunto de vértices y A es el conjunto de arcos. Los vértices $i = 1, \dots, n$ corresponden a los clientes, mientras que el vértice 0 corresponde al depósito, cada cliente i ($i=1, n$) se asocia con una demanda no negativa d_i para ser despachada y el depósito tiene una demanda ficticia $d_0 = 0$. Un conjunto de K vehículos idénticos, cada uno con la capacidad C . Para asegurar la factibilidad se asume que $d_i \leq C$ para cada $i = 1, \dots, n$. Así en el modelo se definen dos tipos de variables: *variables de flujo* X_{ij} ($(i, j) \in A, k \in K$, igual a 1 si el arco (i, j) se usa para el vehículo k , y 0 de lo contrario; y *las variables de tiempo* w_{ik} , $i \in V, k \in K$, especificando el inicio del servicio en el nodo i cuando es atendida por vehículo k .

Por tanto la formulación de la programación matemática para el VRPTW, se describe como un modelo de flujo de red de múltiples productos básicos con las restricciones de ventana de tiempo y de capacidad.

Pese a múltiples esfuerzos por alcanzar una solución óptima a través de métodos exactos para los problemas de ruteo (VRPTW), se ha tenido que acudir a *métodos heurísticos* que proporcionan soluciones cercanas a las óptimas para problemas reales. Estos enfoques han permitido el diseño de algoritmos de construcción de rutas, subdividido en métodos secuenciales y paralelos [4], de este modo Solomon en 1985, introduce el Heurístico de Inserción *Push Forward (PFIH)*, como un método para crear una configuración de la ruta inicial. Esta heurística se fundamenta en un conjunto de movimientos de inserción y cambios para desarrollar una solución inicial de manera sistemática hasta que un número de iteraciones predefinidas son asignadas o no se realizan mejoras. Esta heurística está dada por unos parámetros iniciales que se determinan a continuación

P_i = Ángulo de la coordenada polar del cliente i , $i = 1, 2, \dots, N$.

R_k = Ruta del vehículo k , $k = 1, 2, \dots, K$.

O_k = Carga total para el vehículo k , $k = 1, 2, \dots, K$.

T_k = Tardanza total para el vehículo k , $k = 1, 2, \dots, K$.

D_k = Distancia total de viaje para el vehículo k , $k = 1, 2, \dots, K$.

W_k = Tiempo de viaje total para el vehículo k , $k = 1, 2, \dots, K$.

$C(R_k)$ = Costo de la ruta R_k basado en una función de costo.

$C(S)$ = Costo suma total de rutas individuales $C(R_k)$.

e_n = tiempo de llegada más temprana.

l_n = tiempo de llegada más tardía.

t_{ij} = tiempo de viaje

s_i = tiempo de servicio.

α = Factor de peso para la distancia total viajada por un vehículo.

β = Factor de peso para el tiempo de llegada tardía de un cliente.

γ = Factor de peso para la diferencia en ángulos de las coordenadas polares.

ϕ = Factor de peso para el tiempo de viaje total de un vehículo.

η = Factor de peso de penalización para un vehículo sobrecargado.

κ = Factor de peso para el tiempo total tardío en el recorrido del vehículo.

De este modo si se tiene una ruta $R_p = \{C_1, \dots, C_m\}$, donde C_1 es el primer cliente y C_m es el último cliente con su tiempo de llegada más temprana y más tardía definida como e_1, l_1 y e_m, l_m respectivamente. La factibilidad de insertar un cliente en la ruta R_p se comprueba mediante la inserción de un cliente entre todos los arcos en la ruta actual y se selecciona el que tenga el costo de viaje más bajo. En estos términos, para que el cliente C_i sea insertado entre C_o y C_1 , se debe validar la carga total, el tiempo de viaje y la cantidad de tiempo de llegada en el t_1 el cual es empujado hacia adelante, un cambio en éste podrían afectar el tiempo de llegada de todos los clientes sucesores de C_1 en la ruta actual. Así, la factibilidad de inserción para C_i , debe ser calculada para la validación secuencial de los valores de empujar hacia delante de todos los clientes sucesores C_j de C_i . El valor de empujar hacia delante para un cliente C_j es 0 si el tiempo propagado por el cliente predecesor de C_j , mediante la inserción de C_i en la ruta, no afecta la hora de llegada t_j . La validación secuencial de este proceso continúa hasta que el valor del empuje hacia adelante para un cliente es 0 o un cliente es empujado a llegar tarde. El *PFIH* inicia una nueva ruta por la selección de un cliente inicial y a continuación la inserción de los clientes en la ruta actual hasta que la capacidad del vehículo sea excedida o no sea factible insertar otro cliente en la ruta actual. La función de coste para la inserción de un cliente C_i como el primer nodo en una nueva ruta es la siguiente:

$$\text{Costo de Insertar } C_i \text{ como Primer Nodo} = -\alpha t_{0i} + \beta l_i + \gamma \left(\frac{|p_i - p_j|}{360} \right) t_{0i}$$

Ecuación 1. Costo de Inserción

Donde p_i es el ángulo polar del cliente y p_j es el ángulo polar del último cliente visitado en la última ruta formada, el ángulo de la coordenada polar con respecto al depósito en la Ecuación 1 es normalizada con respecto a la distancia y toda la

expresión con unidades comunes. Esta normalización permite la comparación de la distancia, el último plazo y el valor angular del cliente en términos de unidad común. Los valores de los tres criterios se obtienen empíricamente, correspondientes: $\alpha= 0.7$, $\beta= 0.2$, y $\gamma= 0.1$. [8]

Mediante la función de coste se selecciona el primer cliente para la ruta actual, lo que hace el heurístico es tomar de un conjunto de clientes no enrutados, el cliente j^* el cual es el que minimiza el costo total de la inserción entre las aristas $\{k^*, l^*\}^2$ en la ruta actual sin violar las restricciones de capacidad y tiempo; el cliente j^* se inserta en la posición con el costo más bajo entre $\{k^*, l^*\}^2$ en la ruta actual y el proceso de selección continúa hasta que se haya comprobado que ningún cliente espera para ser insertado, en esta fase se crea la nueva ruta y se repite el procedimiento de enrutar a todos los clientes pero con el mismo vehículo. Los pasos del *PFIH* se muestran a continuación:

PFIH-1: Comience con una ruta vacía partiendo del depósito Establecer $r = 1$.

PFIH-2: Si {los clientes han sido enrutados} entonces vaya al paso 8;

De lo contrario para todo el cliente j no enrutado: Calcular el costo de la inserción al primer nodo como en la Ecuación 1 y clasificarlos en orden ascendente de sus costos.

PFIH-3: Seleccione el primer cliente j^* , de la lista ordenada con el menor costo y factible en términos de tiempo y restricciones de capacidad.

PFIH-4: Anexar j^* a la ruta actual r y actualizar la carga de la ruta.

PFIH-5: Para todos los clientes no enrutados j^* Para toda la arista (k, l) en la ruta actual, calcular el costo de la inserción de cada uno de los clientes no enrutados entre k y l .

PFIH-6: Seleccione el cliente no enrutado j^* y el borde (k^*, l^*) que tenga el menor costo.

Si (inserción de cliente j^* entre k^* y l^* es factible en términos de las restricciones de tiempo y capacidad) entonces, inserte el cliente j^* entre k^* y l^* , actualice la carga de la ruta actual r y vaya al paso 5.

De lo contrario vaya al paso 7.

PFIH-7: Comienza una nueva ruta desde depósito

Establecer $r = r + 1$

Vaya al paso 2.

PFIH-8: Todos los clientes han sido enrutados. Resultados de salida.

Detener *PFIH*.

Para el año 2004, Olivera [9], sintetiza en su escrito los métodos que han sido desarrollados para la resolución de los problemas de ruteo de vehículos. Estos métodos incluyen tanto algoritmos exactos como heurísticas. Dentro de su trabajo se presenta un reconocimiento de algunas de las heurísticas que han sido más significativas a lo largo del tiempo en este tipo de problemas.

El algoritmo *PFIH*, será la herramienta de trabajo, para dar cumplimiento al objetivo general del presente trabajo, con el cual se espera obtener una solución que facilite a la empresa la programación y diseño de las rutas.

5. PROCESO METODOLÓGICO

5.1 I FASE DE CARACTERIZACIÓN:

La empresa objeto de estudio, es una pequeña empresa dedicada a la fabricación, comercialización y fabricación de productos alimenticios (snack), para los efectos de este trabajo, se recopila la información de la empresa y de su sistema de distribución, con el fin de conocer las características de los elementos que participan en los problemas de ruteo de vehículos.

Para empezar con el desarrollo de este objetivo se requiere en primer lugar, información de los clientes, quiénes son y la cantidad a abastecer, seguidamente su localización, sus tiempos de atención y demanda asociada. Así mismo, es necesario conocer la ubicación del centro de distribución, sus horarios de despacho y el almacenamiento del producto terminado. Por último, conocer el número de vehículos que compone la flota, su capacidad de carga y disponibilidad. Dentro de la recopilación de datos también se debe conocer el, sentido de las calles y las limitaciones de velocidades en zonas escolares. Por lo anterior mencionado, se detalla a continuación las características del sistema de distribución para el presente trabajo.

5.1.1 Clientes. Son el eje central para diseñar y programar las rutas de los vehículos. Para el caso de estudio, se cuentan con 49 clientes, pertenecientes al sector educativo (colegios, escuelas, universidades), de la ciudad de Palmira, distribuidos dentro del sector urbano, específicamente en las zonas norte, centro y sur. Cada uno de ellos, tienen asociado una demanda establecida, la cual debe ser satisfecha. En la Tabla 1, se muestran el valor promedio de su demanda diaria.

Con las direcciones urbanas de los clientes, se obtiene las coordenadas cartesianas de los 49 puntos en unidades de latitud y longitud, se realiza la conversión al sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM)

mediante la escala del mapa, en una hoja de cálculo, estas coordenadas fueron corregidas para ubicar el centro de distribución o depósito en coordenadas (0,0), en la Figura 1, se observa la ubicación del depósito con respecto a los clientes y de este modo ajustar los demás puntos, una vez obtenidas las coordenadas corregidas, se calcula la matriz de distancias (Anexo A) de todos los puntos de la red.

Figura 1. Ubicación clientes

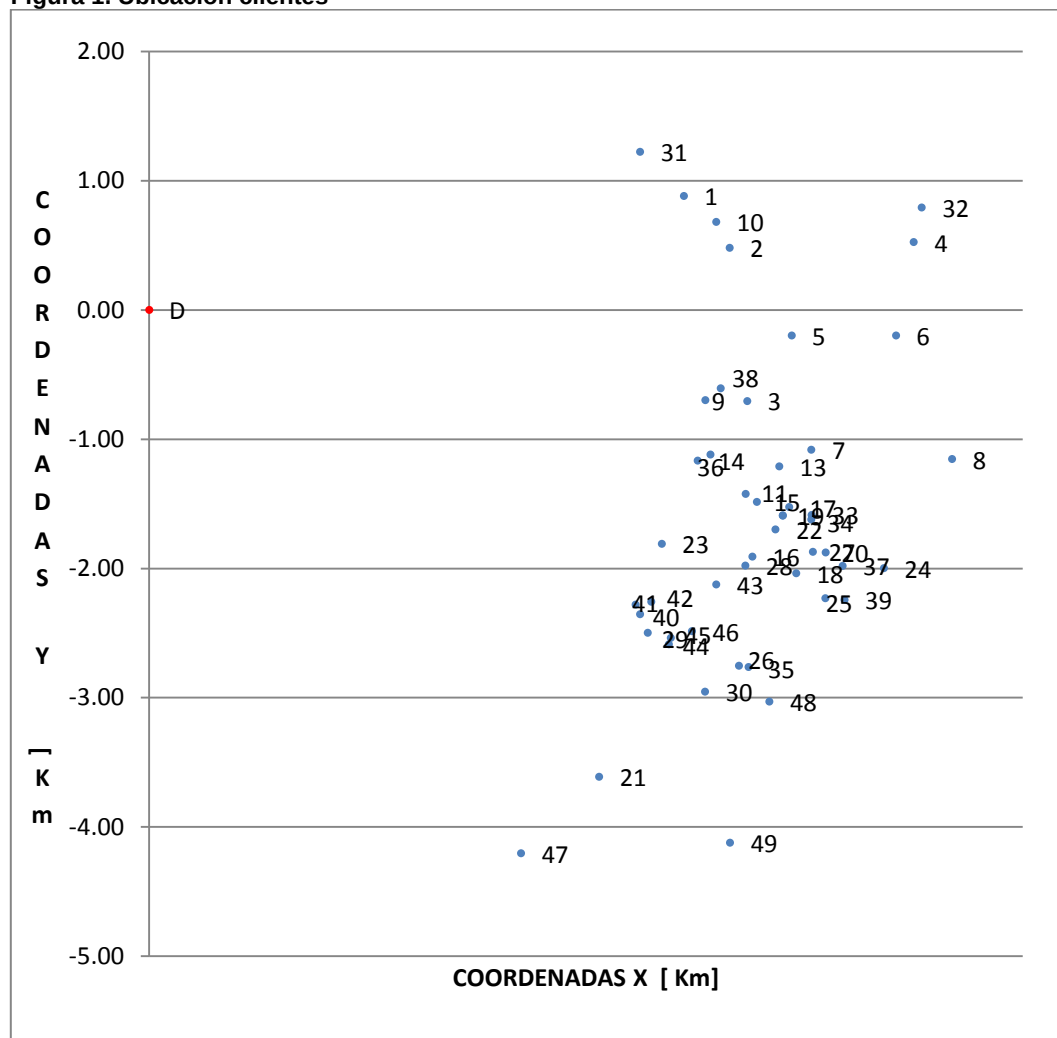


Tabla 1. Demanda diaria estimada de los clientes [Unidades/pedido]

CLIENTE	DEMANDA (paquetes)	CLIENTE	DEMANDA (paquetes)	CLIENTE	DEMANDA (paquetes)
1	18	18	8	35	14
2	11	19	4	36	13
3	9	20	6	37	13
4	8	21	6	38	11
5	15	22	10	39	9
6	7	23	8	40	10
7	13	24	11	41	10
8	12	25	10	42	7
9	13	26	6	43	5
10	12	27	9	44	9
11	5	28	7	45	14
12	17	29	9	46	16
13	6	30	7	47	14
14	17	31	8	48	9
15	9	32	12	49	7
16	14	33	13		
17	5	34	14		

Fuente: Datos suministrados por la empresa.

Para la elaboración de la matriz de distancia, se hace uso ecuación de Haversine (Ecuación 2), que permite obtener la distancia entre dos puntos geográficos, en función del radio de la tierra, con respecto a éste su valor es relativo a la latitud, pues al no ser la Tierra perfectamente redonda, el valor del radio ecuatorial es de 6378 km mientras que el polar es de 6357 km, pero para la toma de datos se trabaja con el radio equivolumen es de 6371 km.

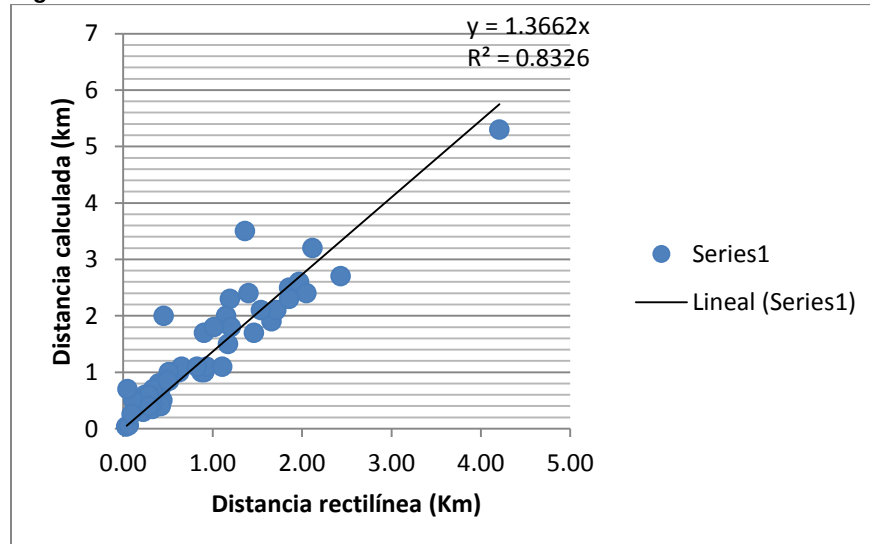
$$\begin{aligned}
 R &= \text{radio de la tierra} \\
 \Delta lat &= lat_2 - lat_1 \\
 \Delta long &= long_2 - long_1 \\
 a &= \sin^2\left(\frac{\Delta lat}{2}\right) + \cos(lat_1) * \cos(lat_2) * \sin^2\left(\frac{\Delta long}{2}\right) \\
 c &= 2 * \text{atan}^2(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) \\
 d &= Rc
 \end{aligned}$$

Ecuación 2. Ecuación Haversine.

Las distancias calculadas siempre subestimarán la distancia real entre dos puntos, puesto que los vehículos no viajan en línea recta. Debido a esto, las distancias calculadas se ajustan utilizando un factor de circuito o multiplicador [2], cuyo valor corresponde a 1.36 para la ciudad de Palmira, el cual se obtuvo de la regresión lineal de las distancias calculadas con la matriz de distancia y las reales con la toma de datos de acuerdo lo marcaba el tacómetro.

A continuación se muestra la relación de estas distancias para el cálculo del factor de circuito.

Figura 2. Factor Circuito



Fuente: Elaboración propia.

La matriz de distancia generada (Anexo A), se interrelacionan los m puntos de la red, generando una matriz 50×50 , en donde el nodo 0 corresponde al depósito. Los valores de la matriz fueron amplificados por el factor de circuito de la ciudad, para obtener una distancia real. Es decir, la distancia real entre dos puntos (13-21), se calcula mediante la Ecuación 2, y se registra en la matriz de distancia, tal como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned}
 d &= Rc \\
 d &= 6371 * (2 * \text{atan}^2 \\
 &* ((\sqrt{\sin^2\left(\frac{0,0617 - 0,0613}{2}\right) + \cos(0,0613) * \cos(0,0617) * \sin^2\left(\frac{-1,3316 - (-1,3318)}{2}\right)}, \\
 &\sqrt{1 - \sin^2\left(\frac{0,0617 - 0,0613}{2}\right) + \cos(0,0613) * \cos(0,0617) * \sin^2\left(\frac{-1,3316 - (-1,3318)}{2}\right)}) \\
 &= 2,520
 \end{aligned}$$

El último valor, es amplificado por el factor de circuito 1.36 para una distancia real de 3,427.

Otro atributo característico de los clientes, y a tener en cuenta, es la restricción operativa que convierte al problema del clásico VRP en un VRPTW, son las *ventanas de tiempo*, en donde el cliente tiene la libertad de escoger el periodo de atención, el cual debe ser despachado por uno o varios vehículos, según corresponda. Para este problema, los clientes tienen un manejo en el horario de manera particular, dado que son clientes que aprovechan los recesos entre las clases para abastecer y satisfacer la demanda de sus estudiantes, cada institución educativa es visitada una sola vez y no presenta restricción en cuanto al vehículo que lo atiende. Para el caso, se identifican cuatro ventanas de tiempo, tres de ellas en horarios de la mañana, y uno en la tarde, en la

Tabla 2 se muestran los clientes y las ventanas de tiempo asociadas a estos.

Tabla 2. Horarios de atención de los clientes

NODO	CLIENTE	VENTANA DE TIEMPO INICIAL (Hora)	VENTANA DE TIEMPO FINAL (Hora)	NODO	CLIENTE	VENTANA DE TIEMPO INICIAL (Hora)	VENTANA DE TIEMPO FINAL (Hora)
1	C. Educativo 1	7:00 a. m.	9:30 a.m.	26	C. Educativo 26	7:00 a. m.	9:30 a.m.
2	C. Educativo 2	11:00 a. m.	12:30 a. m.	27	C. Educativo 27	2:00 p.m.	3:30 p.m.
3	C. Educativo 3	9:00 a.m.	10:30 a. m.	28	C. Educativo 28	7:00 a. m.	9:30 a.m.
4	C. Educativo 4	9:00 a.m.	10:30 a. m.	29	C. Educativo 29	7:00 a. m.	9:30 a.m.
5	C. Educativo 5	9:00 a.m.	10:30 a. m.	30	C. Educativo 30	2:00 p.m.	3:30 p.m.
6	C. Educativo 6	9:00 a.m.	10:30 a. m.	31	C. Educativo 31	9:00 a.m.	10:30 a.m.
7	C. Educativo 7	7:00 a. m.	9:30 a.m.	32	C. Educativo 32	2:00 p.m.	3:30 p.m.
8	C. Educativo 8	9:00 a.m.	10:30 a. m.	33	C. Educativo 33	2:00 p.m.	3:30 p.m.
9	C. Educativo 9	9:00 a.m.	10:30 a. m.	34	C. Educativo 34	7:00 a. m.	9:30 a.m.
10	C. Educativo 10	7:00 a. m.	9:30 a.m.	35	C. Educativo 35	7:00 a. m.	9:30 a.m.
11	C. Educativo 11	11:00 a. m.	12:30 a. m.	36	C. Educativo 36	11:00 a. m.	12:30 a. m.
12	C. Educativo 12	7:00 a. m.	9:30 a.m.	37	C. Educativo 37	7:00 a. m.	9:30 a.m.
13	C. Educativo 13	11:00 a. m.	12:30 a. m.	38	C. Educativo 38	7:00 a. m.	9:30 a.m.
14	C. Educativo 14	11:00 a. m.	12:30 a. m.	39	C. Educativo 39	2:00 p.m.	3:30 p.m.
15	C. Educativo 15	11:00 a. m.	12:30 a. m.	40	C. Educativo 40	7:00 a. m.	9:30 a.m.
16	C. Educativo 16	9:00 a.m.	10:30 a. m.	41	C. Educativo 41	2:00 p.m.	3:30 p.m.
17	C. Educativo 17	11:00 a. m.	12:30 a. m.	42	C. Educativo 42	7:00 a. m.	9:30 a.m.
18	C. Educativo 18	11:00 a. m.	12:30 a. m.	43	C. Educativo 43	11:00 a. m.	12:30 a. m.
19	C. Educativo 19	7:00 a. m.	9:30 a.m.	44	C. Educativo 44	2:00 p.m.	3:30 p.m.
20	C. Educativo 20	7:00 a. m.	9:30 a.m.	45	C. Educativo 45	2:00 p.m.	3:30 p.m.
21	C. Educativo 21	7:00 a. m.	9:30 a.m.	46	C. Educativo 46	7:00 a. m.	9:30 a.m.
22	C. Educativo 22	9:00 a.m.	10:30 a.m.	47	C. Educativo 47	9:00 a.m.	10:30 a. m.
23	C. Educativo 23	7:00 a. m.	9:30 a.m.	48	C. Educativo 48	2:00 p.m.	3:30 p.m.
24	C. Educativo 24	7:00 a. m.	9:30 a.m.	49	C. Educativo 49	2:00 p.m.	3:30 p.m.
25	C. Educativo 25	2:00 p.m.	3:30 p.m.				

Fuente: Datos generados por la empresa.

5.1.2 El Depósito. El depósito o centro de distribución (CD), es el lugar donde se realiza el despacho de los vehículos, por lo general las rutas salen y llegan desde este punto, puede existir uno o varios depósitos en la ruta, para este caso, se tienen un único depósito, el cual no tiene ninguna restricción que afecte la programación de las rutas.

Su horario de atención y despacho de los vehículos inicia a las 6:55 a.m., al igual que los clientes, tiene su respectiva hora de descanso al medio día y termina su jornada a las 4:00 p.m. El depósito de la empresa, es una bodega pequeña con dimensiones aproximadas de 4 metros x 4 metros, que tiene una capacidad para almacenar hasta 600 UBA, de producto terminado, cuyo embalaje corresponde a canastas plásticas de 38cm x 58 cm x 24 cm, por su parte en cada canasta hay capacidad para 20 paquetes. Los productos comercializados son pasabocas (platanitos, maduros, papas fritas), de consumo masivo entre la población estudiantil, su presentación corresponde a un paquete plástico con medidas de 19cm x 8cm. Estas unidades tienen un peso neto por unidad de aproximadamente 25 gramos. La localización del centro de distribución, está ubicado al noroeste de la ciudad, sin embargo para efectos de aplicación del algoritmo, el CD maneja coordenadas cartesianas corregidas, dando así el punto de origen (0,0) de toda la red.

5.1.3 El Vehículo. Dentro de los problemas de ruteo de vehículos, pueden existir uno o más vehículos, cuando los vehículos cuentan con los mismos atributos, se hace referencia a una flota homogénea, y cuando difieren, se habla de una flota heterogénea. [9]

La flota de vehículos de la empresa, clasifica dentro de la heterogénea, dado que está compuesta por tres vehículos de diferentes capacidades, el vehículo de mayor carga puede transportar hasta 200 UBA, seguido de 150 UBA, y por último el de 100 UBA.

Para el transporte de este tipo de productos, las empresas deben regularse conforme a la resolución 2674 de 2013, en donde clasifica al producto como alimento de menor riesgo en salud pública (Art 3), sumo a ello los estatutos de tránsito para circular en las calles de la ciudad de Palmira, está dada por la Ley 769 de 2002 que reglamenta la velocidad en sectores educativos y residenciales será hasta 30 kilómetros por hora.²

La flota de vehículos de la empresa, corresponde a motocarros, cuya definición se entiende por vehículo automotor de tres ruedas con estabilidad propia con componentes mecánicos de motocicleta, para el transporte de personas o mercancías con capacidad útil hasta 770 kilogramos.

Otra característica relevante para la flota de vehículos, está asociado con sus costos de funcionamiento, los costos fijos relacionan la utilización de éstos, y los costos variables se relacionan a las distancias recorridas. Dentro de los costos se tienen:

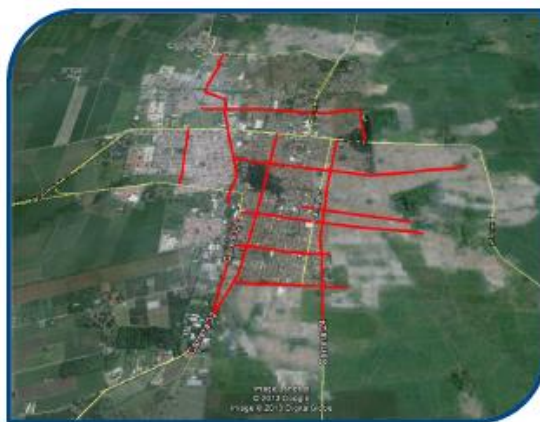
- **Costos Variables:** son aquellos que se generan por la movilización del vehículo. Están dentro de estos costos, los combustibles, el mantenimiento y reparaciones, las llantas, los peajes, los lubricantes, el lavado y engrase y los imprevistos.
- **Costos Fijos:** son aquellos en los que incurre el propietario del vehículo independientemente de si está en operación o no. Están dentro de estos costos, los salarios y prestaciones básicas (tripulación), los seguros, el parqueadero, los impuestos y la recuperación de capital [10].

² [22]

5.1.4 Vías. Para realizar una buena programación de las rutas, se debe tener en cuenta, factores como, topografía, red vial básica urbana y señalización, en cuanto a la topografía de Palmira, está comprendida por una zona plana ubicada al occidente, que corresponde al Valle del Río Cauca con la cota 1.200 msnm aproximadamente, con cerca de 54.421,25 hectáreas de topografía plana [11]. Por otra parte, la red vial define diecisiete (17) corredores viales principales, sobre los cuales se registraron las diferentes condiciones de la vía en cuanto a: trazado, longitud, sección transversal (andenes, separadores, calzadas), estado del pavimento, estado de la señalización [12]. Los principales corredores a caracterizar se observan en la Figura 3.

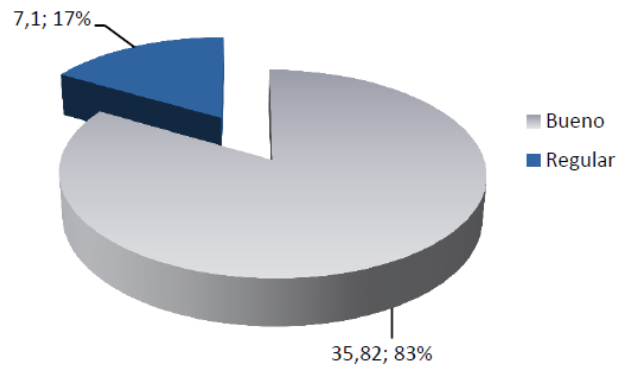
El 50% de las vías inventariadas contienen en su sección separador central, cuyo promedio es de 0,9 metros de ancho, generando un alto riesgo en las intersecciones para las maniobras de cruces peatonales y dificultad para generar los giros a izquierda debidamente protegidos sin interferir la corriente principal. En la Figura 4, se ilustra el estado de pavimento para el tránsito en los corredores principales, y de este modo determinar por cuáles calles se puede realizar la programación de la ruta. Una vez conocido el estado de los corredores, se estudian cuál de éstos son los de mayor tránsito para los clientes seleccionados en el caso de estudio.

Figura 3. Corredores Infraestructura Vial



Fuente: Informe de diagnóstico de movilidad para la ciudad de Palmira

Figura 4. Estado Pavimento en corredores principales



Fuente: Informe de diagnóstico de movilidad para La ciudad de Palmira

a. Carrera 28 ³

Es la ruta de entrada y salida obligada de Palmira, es la vía principal de acceso hacia el centro de Palmira, desde la parte norte. Tiene una gran variabilidad a lo largo de su eje, para acceder a las demás calles de la ciudad. Recorre zonas residenciales, comerciales, institucionales y de servicios.

b. Carrera 32

Es una vía que prácticamente atraviesa la ciudad, la vía consta una calzada con 2 carriles, uno en cada sentido y una longitud de 750m. El uso de suelo es industrial, institucional y de servicios.

c. Carrera 33^a Carrera 35

Constituyen en un corredor de paso para muchos vehículos, en especial vehículos de carga, en el área de influencia se presenta zona industrial, de servicios, institucional y residencial.

³ [12]

d. Calle 42

La calle 42 una de las vías principales de la ciudad de Palmira, hace parte de la malla vial nacional. Posee un tramo particular entre la carrera 1 y 9, un poco deteriorado el cual consta de una calzada con 2 carriles, con una longitud de 430m.

e. Calle 31

Entre la carrera 1 y la carrera 13 su condición es de doble sentido con 2 carriles por sentido sin separador central. La zona aferente al tramo es de tipo institucional, tiene una longitud de 728 m de longitud.

Una vez identificados los elementos que participan en la caracterización del problema, se realiza el caso de estudio, con los datos reales de la empresa.

5.1.5 Caso de estudio. El caso de estudio se realiza en una empresa distribuidora de pasabocas (snack) a instituciones educativas de la ciudad de Palmira, dando cubrimiento a 49 clientes de la región, bajo unas restricciones de tiempo (*Time Windows*). Las operaciones de distribución inician a las 7:00 a.m. y finalizan a las 4:00 p.m., con un receso de 45 minutos al medio día para que los trabajadores puedan almorzar y descansar. Actualmente la empresa cuenta con tres vehículos cada uno de ellos con capacidades diferentes, que distribuyen al norte, centro y sur de la ciudad.

5.1.5.1 Antecedentes. La empresa ha desarrollado una eficiente gestión comercial, que le ha permitido ampliar su participación en el mercado. Como resultado de lo anterior, se ha evidenciado en ocasiones quejas y reclamos de los clientes por demoras en los tiempos de entrega de los productos, y esto se debe a que son los conductores quienes diseñan la ruta a realizar para atender a los clientes.

Por su parte, la distribuidora está dispuesta a evaluar y estudiar un diseño de sistema de ruta que le garantice cumplir con las ventanas de tiempo asociada a los clientes, controlar la programación de trabajo de los conductores y definir la secuencia y programación de la ruta, de tal manera que satisfaga a los clientes y a su vez se disminuyan los costos de transporte.

5.1.5.2 Operaciones de transporte. Los vehículos son cargados totalmente hasta llenar la capacidad de los mismos, y de este modo poder operar durante la jornada diaria. Los vehículos cuentan con capacidades 250,150 y 100 UBA, respectivamente, son cargados la noche anterior.

Los transportistas se desplazan a una velocidad promedio de 30 km/h [13] dentro del perímetro urbano, atendiendo la demanda de norte, centro y sur de la ciudad. El vehículo asignado, inicia recorrido a las 6:53 a.m., para llegar a tiempo, dado que, deben tener en cuenta tanto la velocidad permitida como el estado de las vías.

La empresa ha identificado cuatro ventanas de tiempo que manejan los clientes. La primera ventana de tiempo a cubrir tiene duración de 7:00 a.m. a 9:30 a.m., la segunda ventana comprende desde las 9:00 a.m. hasta 10:30 a.m. la tercera ventana de 11:00 a.m. a 12:30 m., la cuarta ventana de tiempo inicia a las 2:00 p.m. hasta 3:30 p.m. Los transportistas tienen 45 minutos de descanso para su hora de almuerzo.

5.1.5.3 El problema de la empresa. La distribuidora es una empresa familiar, que ha desempeñado operaciones en el mercado durante más de un año, los respectivos transportistas atiende a todos los clientes dentro de las ventanas de tiempo establecidas, pero al cumplir con el objetivo se derivan situaciones en las que el transportador excede la velocidad de viaje para alcanzar a cumplir con las ventanas, por otra parte, la empresa no cuenta con un sistema de costeo que le permita conocer el valor de las operaciones de distribución, pues ha evidenciado que para cumplir ciertas ventanas de tiempo no controla la velocidad de viaje y por ende el consumo de combustible se incrementa en algunos períodos. Lo anterior, disminuye la posibilidad de vincular más clientes en la red y lograr abastecerlos en sus horarios de atención predeterminados se vuelve imposible, ya que el transportista excedería la capacidad de clientes a visitar en la ruta e irrespetaría los horarios de atención.

En el comportamiento normal de las operaciones de la empresa, el día pico o crítico es el lunes, pues debe abastecer a las escuelas, universidades y tiendas con los productos, cumpliendo con las ventanas de tiempo que ellos han establecido.

El depósito se encuentra ubicado en las coordenadas geográficas, longitud y latitud (3.54767,-76.31543), respectivamente, el tiempo de servicio promedio es de diez minutos (para entrega), con cada cliente, en la Tabla 4, se muestra las coordenadas geográficas de los clientes.

El sistema de vías de la ciudad presenta una particularidad, pues carece de sistemas de retornos accesibles cercanos, por tanto esta característica tiene un gran impacto en el tiempo y en la distancia que debe recorrer el transportador, lo que desencadena un mayor tiempo de recorrido y consumo de combustible. Con respecto al costo de la operación (costo variable), éste equivale \$ 1.110 /km,

correspondiente al valor del combustible, y costos fijos mensuales equivalentes a \$ 683.033⁴.

Tabla 3. Costos asociados

COSTOS VARIABLES		COSTOS FIJOS	
Peajes		Soat	\$ 33.683
Combustible (\$/km)	\$ 56.95	Revisión Tecnomecánica	\$ 5.000
Llantas (\$/km)	\$ 9.33	Salario	\$ 644.350
Lubricantes (\$/km)	\$ 9.90		
Filtros (\$/km)	\$ 13.67		
Mantenimiento	\$ 20		
Servicios de estación			
Imprevistos	\$ 1.000		
TOTAL (\$/km)	\$ 1.110	TOTAL (\$/mes)	\$ 683.033

Ante lo anterior mencionado, se cuestionaría ¿cuál debería ser el diseño que le permita a la organización optimizar sus recursos tiempo y dinero, al mismo tiempo que cumplir y respetar las ventanas de tiempo de todos sus clientes?.

5.2 II FASE FORMULACIÓN DEL ALGORITMO:

Una vez realizado el análisis de la información de la empresa y todos los elementos que componen su sistema de distribución, se procede a la formulación del algoritmo para la distribución de los productos que cumpla con las restricciones de capacidad y ventanas de tiempo.

El algoritmo *PFIH*, propuesto por Solomon [4], se desarrolla para el caso de estudio, teniendo en cuenta restricciones operativas tales como, horarios de atención, distancia entre clientes, velocidad máxima permitida, capacidad de los vehículos, demandas establecidas.

⁴ Sujeto a valores año 2015

Tabla 4. Coordenadas geográficas de los clientes.

CLIENTE	LATITUD(° decimales)	LONGITUD (° decimales)		CLIENTE	LATITUD (° decimales)	LONGITUD (° decimales)
<i>C. Educativo 1</i>	3.55566	-76.30073		<i>C. Educativo 26</i>	3.52279	-76.29870
<i>C. Educativo 2</i>	3.55203	-76.29908		<i>C. Educativo 27</i>	3.53076	-76.29605
<i>C. Educativo 3</i>	3.54131	-76.29843		<i>C. Educativo 28</i>	3.52979	-76.29848
<i>C. Educativo 4</i>	3.55244	-76.29244		<i>C. Educativo 29</i>	3.52507	-76.30199
<i>C. Educativo 5</i>	3.54589	-76.29684		<i>C. Educativo 30</i>	3.52097	-76.29992
<i>C. Educativo 6</i>	3.54590	-76.29307		<i>C. Educativo 31</i>	3.55874	-76.30232
<i>C. Educativo 7</i>	3.53790	-76.29611		<i>C. Educativo 32</i>	3.55487	-76.29216
<i>C. Educativo 8</i>	3.53725	-76.29103		<i>C. Educativo 33</i>	3.53334	-76.29610
<i>C. Educativo 9</i>	3.54160	-76.30046		<i>C. Educativo 34</i>	3.53301	-76.29611
<i>C. Educativo 10</i>	3.55384	-76.29956		<i>C. Educativo 35</i>	3.52269	-76.29836
<i>C. Educativo 11</i>	3.53480	-76.29847		<i>C. Educativo 36</i>	3.53755	-76.29975
<i>C. Educativo 12</i>	3.53327	-76.29713		<i>C. Educativo 37</i>	3.52976	-76.29498
<i>C. Educativo 13</i>	3.53672	-76.29727		<i>C. Educativo 38</i>	3.54220	-76.29933
<i>C. Educativo 14</i>	3.53713	-76.30021		<i>C. Educativo 39</i>	3.52744	-76.29490
<i>C. Educativo 15</i>	3.53424	-76.29807		<i>C. Educativo 40</i>	3.52637	-76.30227
<i>C. Educativo 16</i>	3.53045	-76.29823		<i>C. Educativo 41</i>	3.52740	-76.30243
<i>C. Educativo 17</i>	3.53389	-76.29691		<i>C. Educativo 42</i>	3.52723	-76.30187
<i>C. Educativo 18</i>	3.52926	-76.29665		<i>C. Educativo 43</i>	3.52847	-76.29953
<i>C. Educativo 19</i>	3.53330	-76.29714		<i>C. Educativo 44</i>	3.52428	-76.30123
<i>C. Educativo 20</i>	3.53071	-76.29558		<i>C. Educativo 45</i>	3.52473	-76.30117
<i>C. Educativo 21</i>	3.51500	-76.30373		<i>C. Educativo 46</i>	3.52519	-76.30041
<i>C. Educativo 22</i>	3.53233	-76.29740		<i>C. Educativo 47</i>	3.50963	-76.30654
<i>C. Educativo 23</i>	3.53132	-76.30150		<i>C. Educativo 48</i>	3.52027	-76.29760
<i>C. Educativo 24</i>	3.52962	-76.29348		<i>C. Educativo 49</i>	3.51038	-76.29900
<i>C. Educativo 25</i>	3.52752	-76.29559				

Fuente: Elaboración propia.

La toma de los datos para la formulación de las restricciones fue ajustada a la caracterización del problema, lo cual permite observar y analizar el desempeño del algoritmo para el caso, y la flexibilidad de alcanzar una solución aceptable en el diseño de las rutas.

Para la construcción secuencial de las rutas, se efectúan iteraciones para cada ventana de tiempo del problema, donde el propósito de cada iteración es insertar un nuevo cliente a la ruta considerando su factibilidad. La factibilidad de insertar

un cliente en la ruta R_p se comprueba mediante la inserción de un cliente entre todos los arcos en la ruta actual y se selecciona el que tenga el costo de viaje más bajo. De acuerdo a lo mencionado, para la configuración inicial se tiene presente la restricción de capacidad del vehículo y las ventanas de tiempos de los clientes. A continuación se detalla las iteraciones realizadas.

a. Iteración 1: Inserción del primer cliente en ruta 1.

Para insertar el primer cliente a la primer ruta, se establece como criterio de selección, el costo más bajo entre los 49 clientes del problema, dado por la Ecuación 1.

$$\text{Costo de Insertar } C_i \text{ como Primer Nudo} = -\alpha t_{0i} + \beta l_i + \gamma \left(\frac{|p_i - p_j|}{360} \right) t_{0i}$$

Ecuación 1

En donde el parámetro α es el factor de peso para la distancia total viajada por un vehículo, el parámetro β es el factor de peso para el tiempo de llegada tardía de un cliente y γ es el factor de peso para la diferencia en ángulos de las coordenadas polares, el valor de los parámetros corresponden a $(\alpha) = 0.7$, $(\beta) = 0.2$, $(\gamma) = 0.1$. De este modo, se sustituye en la Ecuación 1, los valores correspondientes de cada cliente a enrutar, y se selecciona el de menor costo.

$$Ci = -(0,7 * 4,63) + (0,2 * 570) + 0,10 \left(\frac{(-1,11) - (-1,23)}{360} \right) 360 * 4,63 = 110,76.$$

Para la primera iteración se determina que el cliente a enrutar en la configuración inicial de la primera ruta, corresponde al cliente 21, como se muestra en la Tabla 5.

Al ser el cliente 21 el que presenta menor costo, éste se inserta a la ruta como primer nodo a visitar, una vez sea asignado a la ruta actual, se elimina de la lista de los posibles clientes a visitar y se continúa el proceso de selección, hasta que no haya más clientes para ser insertados, siempre y cuando no se violen las

restricciones de capacidad del vehículo y de tiempo. Una vez enrutados todos los clientes de la primera ventana, se continúa con la creación de una nueva ruta para atender la próxima ventana de tiempo.

La primera ruta diseñada, atiende la ventana de tiempo de 7:00 a.m. - 9:30 a.m., y como resultado logra insertar en su red 13 clientes, excluyendo a seis de ellos, ya que no se da cumplimiento a la restricción de ventana de tiempo. Por este motivo, se debe dar inicio a una segunda ruta que logre cumplir y satisfacer la demanda de los clientes no enrutados para este grupo. Esta nueva ruta se programa haciendo uso de un segundo vehículo.

El desarrollo del algoritmo permite visualizar la programación y secuencia que realiza el primer vehículo en la primera ventana de tiempo, tal como se muestra en la Figura 5.

Tabla 5. Inserción Primer cliente con el PFIH

Cliente	X	Y	TW		Ci
			e_0	l_0	
1	2.14	0.88	7:00 a. m.	8:30 a.m.	112.44
2	2.33	0.48	3:30 p.m.	6:00 p.m.	148.42
3	2.4	-0.71	9:00 a.m.	10:30 a.m.	124.31
.					
20	2.71	-1.88	7:00 a. m.	9:30 a.m.	111.56
21	1.80	-3.61	7:00 a. m.	9:30 a.m.	110.76
.					
36	2.25	-1.12	3:30 p.m.	6:00 p.m.	148.26
37	2.78	-1.98	0.2916667	8:30 a.m.	111.46
.					
48	2.49	-3.03	2:00 p.m.	3:30 p.m.	182.95
49	2.33	-4.13	2:00 p.m.	3:30 p.m.	182.20

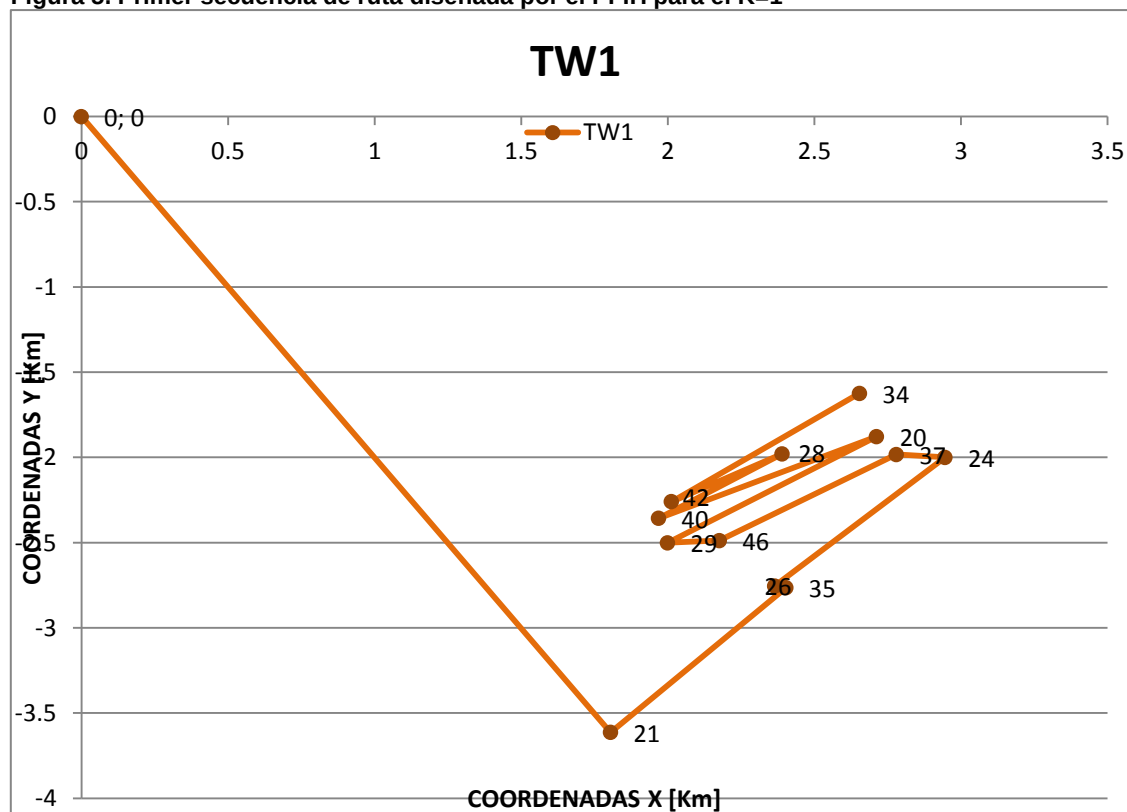
Fuente: Elaboración propia.

La ruta diseñada inicia en el nodo $n=0$ (depósito), y la inserción de los clientes conforme a los criterios del PFIH, dan como resultado la primera ruta en donde

muestra el comportamiento bajo un patrón de zigzag⁵, dado que toma el punto más alejado del depósito e inicia a enrutar los clientes más cercanos de la zona central, también logra insertar un cliente de la zona sur. La primera ventana de tiempo tiene duración de dos horas y media, razón por la cual no se lograron enrutar a los 19 clientes con el mismo vehículo, a pesar de que el vehículo, cuenta con la capacidad para abastecerlos a todos.

Los clientes enrutados, sus distancias recorridas, tiempos de inicio y finalización de ventanas de tiempo, se resumen en la Tabla 6. Este primer vehículo k_i , $i = 1$, tiene asociado una distancia recorrida de 14,85 kilómetros y un costos variable de \$1110 por cada kilómetro recorrido. Una vez realizadas las primeras 13 iteraciones, se procede a asignar los clientes de la primera ventana de tiempo que no pudieron ser programados a una nueva ruta.

Figura 5. Primer secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el K=1



Fuente: Elaboración propia

⁵Línea que en su desarrollo forma ángulos alternativos, entrantes y salientes.

Tabla 6. Primer secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el K=1

Nodo Inicio	Nodo llegada	HI (min)	HF (min)	Tiempo servicio (min)	Distancia Recorrida (min)	Tiempo Ruta (min)	Vehículo
0	21	423	433	10	5.25	10.49	1
21	35	436	446	10	1.42	2.83	1
35	26	446	456	10	0.05	0.11	1
26	24	459	469	10	1.30	2.60	1
24	37	469	479	10	0.23	0.45	1
37	46	482	492	10	1.07	2.14	1
46	29	492	502	10	0.24	0.48	1
29	20	505	515	10	1.29	2.58	1
20	40	517	527	10	1.20	2.41	1
40	28	529	539	10	0.77	1.54	1
28	42	540	550	10	0.64	1.28	1
42	34	552	562	10	1.23	2.46	1
34	12	563	573	10	0.16	0.32	1
	Tiempo total	160	2.66	TOTAL	14.85	30	

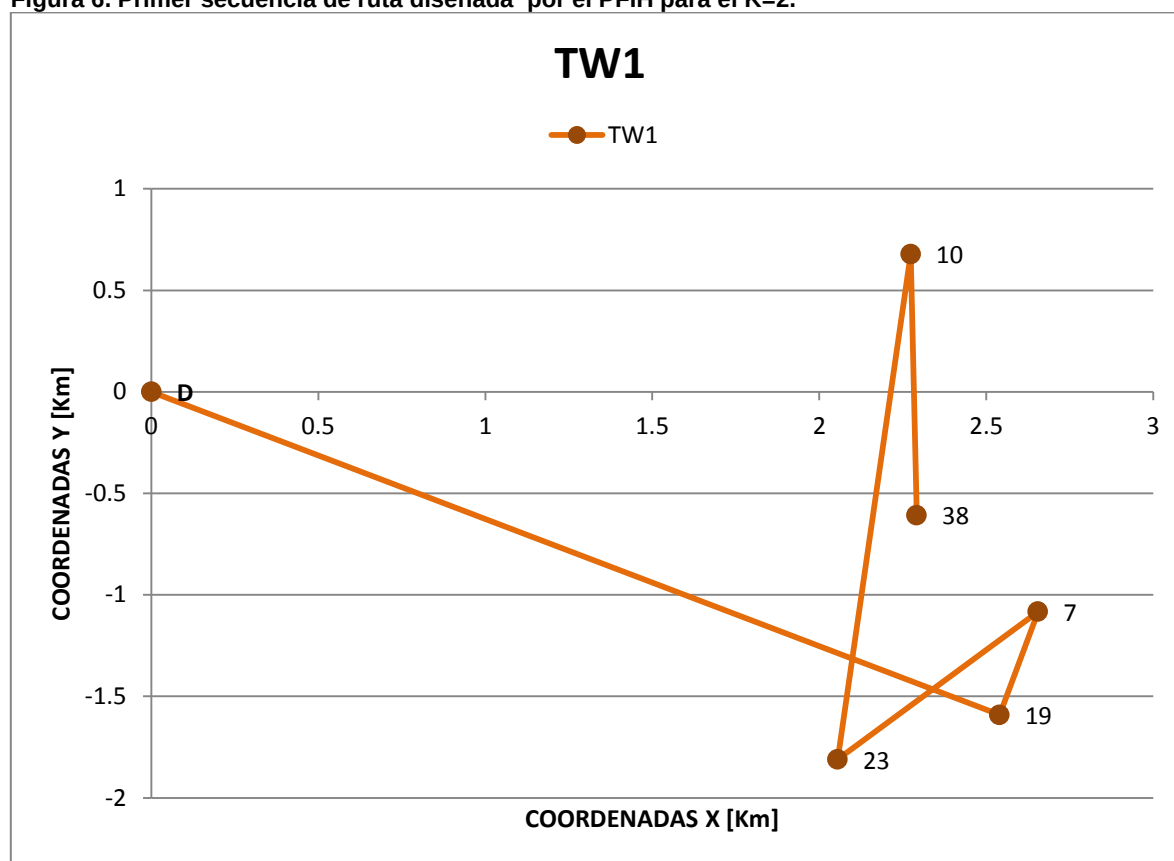
Fuente: Elaboración propia.

b. Iteración 14: Inserción del primer cliente en ruta 2.

A partir de los resultados de la primera ruta, en dónde quedaron seis clientes de la primer ventana sin ser asignados, se inicia nuevamente el algoritmo para el vehículo $k_i = 2$. Para ello, se asigna el vehículo de 150 UBA de capacidad, que inicia operación a las 6:53 a.m., para alcanzar llegar a tiempo a su primer cliente en ruta; el resultado que muestra el algoritmo para esta inserción se aprecia en la Figura 6.

En la Figura 6, el vehículo inicia también desde el nodo 0 (depósito), y realiza un recorrido en donde se desplaza hacia el punto más lejano del grupo, y empieza a devolverse para cubrir los clientes que se encuentran más cercanos. La distancia total recorrida para esta ruta es de 12,72 kilómetros y un tiempo estimado en ruta de 1 hora y 28 minutos, así como lo resume la Tabla 7.

Figura 6. Primer secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el K=2.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Primer secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el K=2

Nodo Inicio	Nodo Llegada	HI (min)	HF (min)	Tiempo servicio (min)	Distancia Recorrida (min)	Tiempo Ruta (min)	Vehículo
0	19	422	432	10	3.51	7.03	2
19	7	433	443	10	0.71	1.43	2
7	23	446	456	10	1.29	2.57	2
23	10	463	473	10	3.42	6.84	2
10	38	476	486	10	1.76	3.52	2
38	1	490	500	10	2.03	4.06	
Tiempo total		87	1.46	TOTAL	12.72	25	

Fuente: Elaboración propia

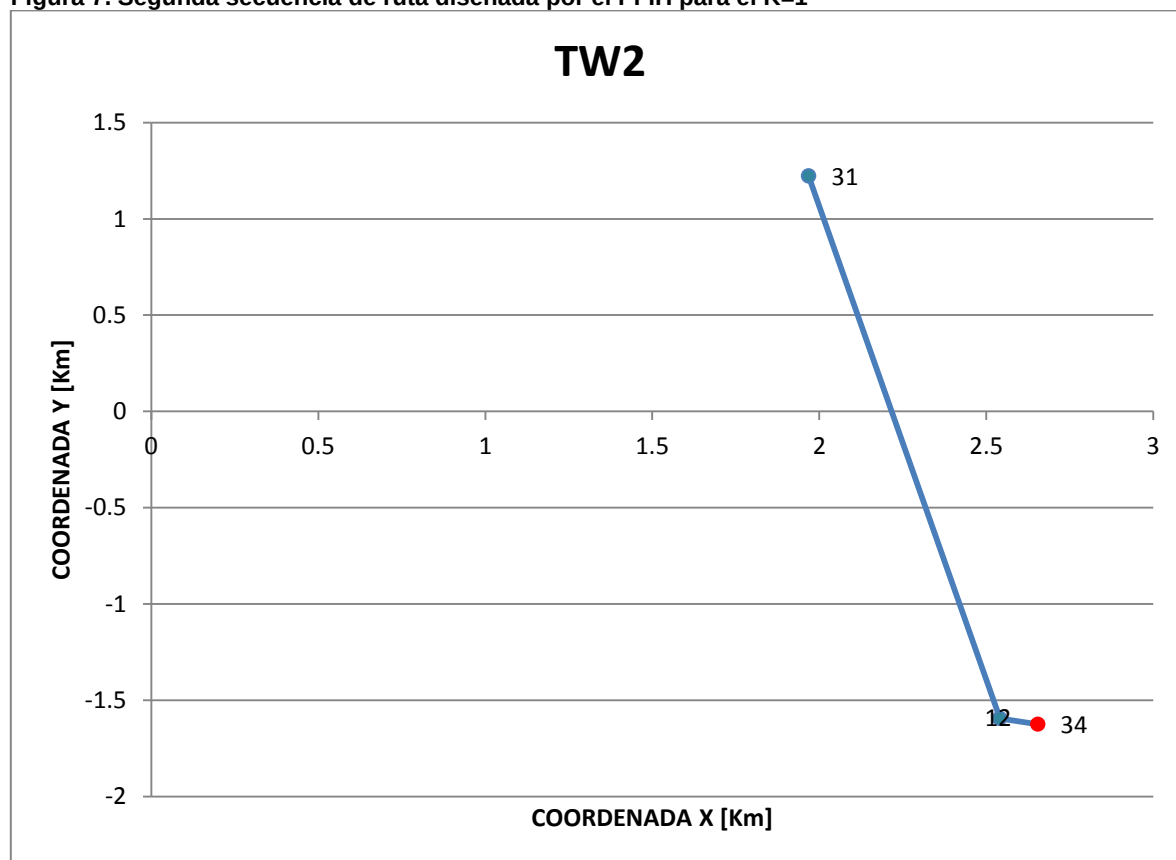
c. Iteración 28: Inserción de clientes de TW2 en la primera ruta.

Por las configuraciones generadas en la primera ventana de tiempo, se bifurcan dos rutas que deben seguir insertando clientes. Por su parte la primera ruta que es atendida por el vehículo de 250 UBA, tiene capacidad de carga disponible

(106), después de habersele programado los primeros 13 clientes de la primera ventana, lo cual le puede permitir continuar atendiendo a los clientes de la segunda ventana y proseguir con su ruta hasta que se llene su capacidad. Los clientes a enrutar corresponden al cliente 31 y 9, quienes están ubicados en la zona centro y zona norte respectivamente.

En la Figura 7, se observa un desplazamiento lineal entre las zonas centro a norte, el horario de atención de estos dos clientes, le permite al transportista de la primera ruta dar continuidad de recorrido de primera a segunda ventana, siendo el punto rojo el ultimo cliente enrutado de la ventana anterior, no se presentan tiempos de espera entre ellas, por otra parte se registra una distancia recorrida de 6,54 km en 33 minutos. Los datos de esta inserción se detallan en la Tabla 8.

Figura 7. Segunda secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el K=1



Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Segunda secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el K=1

Vehículo	1	TW2					
Nodo Inicio	Nodo Llegada	HI (min)	HF (min)	Tiempo servicio (min)	Distancia Recorrida (Km)	Tiempo Ruta (min)	Vehículo
12	31	581	591	10	3.93	8	1
31	9	596	606	10	2.61	5	1
	Tiempo total	193		TOTAL	6.54	13	
		3.21	Horas				

Fuente: Elaboración propia

d. Iteración 20: Inserción de clientes de TW2 en la segunda ruta

Los clientes de la segunda ventana de tiempo no pueden ser atendidos por un mismo vehículo, porque se violaría la restricción de tiempo, sin embargo para poder abastecerlos, el algoritmo arroja un resultado, que muestra que el vehículo dos continúa con la inserción de clientes a su red actual ($k_i, i= 2$), sin embargo debe esperar para poder cumplir y respetar la ventana de tiempo 24 minutos, una vez realizada la espera esta ruta, suma ocho clientes más en su ruta actual, aun contando con disponibilidad para seguir abasteciendo. La síntesis de esta iteración se aprecia en la Tabla 9.

Tabla 9. Segunda secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el K=2

Vehículo	2	TW2					
Nodo Inicio	Nodo Llegada	HI (min)	HF (min)	Tiempo servicio (min)	Distancia Recorrida (min)	Tiempo Ruta (min)	Vehículo
1	47	540	550	10	6.96	13.91	2
47	8	560	570	10	4.79	9.58	2
8	16	573	583	10	1.50	2.99	2
16	22	583	593	10	0.31	0.62	2
22	4	589	599	10	3.13	6.26	2
4	6	601	611	10	0.99	1.99	2
6	5	613	623	10	0.57	1.14	
5	3	624	634	10	0.73	1.47	
	Tiempo total	221	3.68	TOTAL	18.98	38	

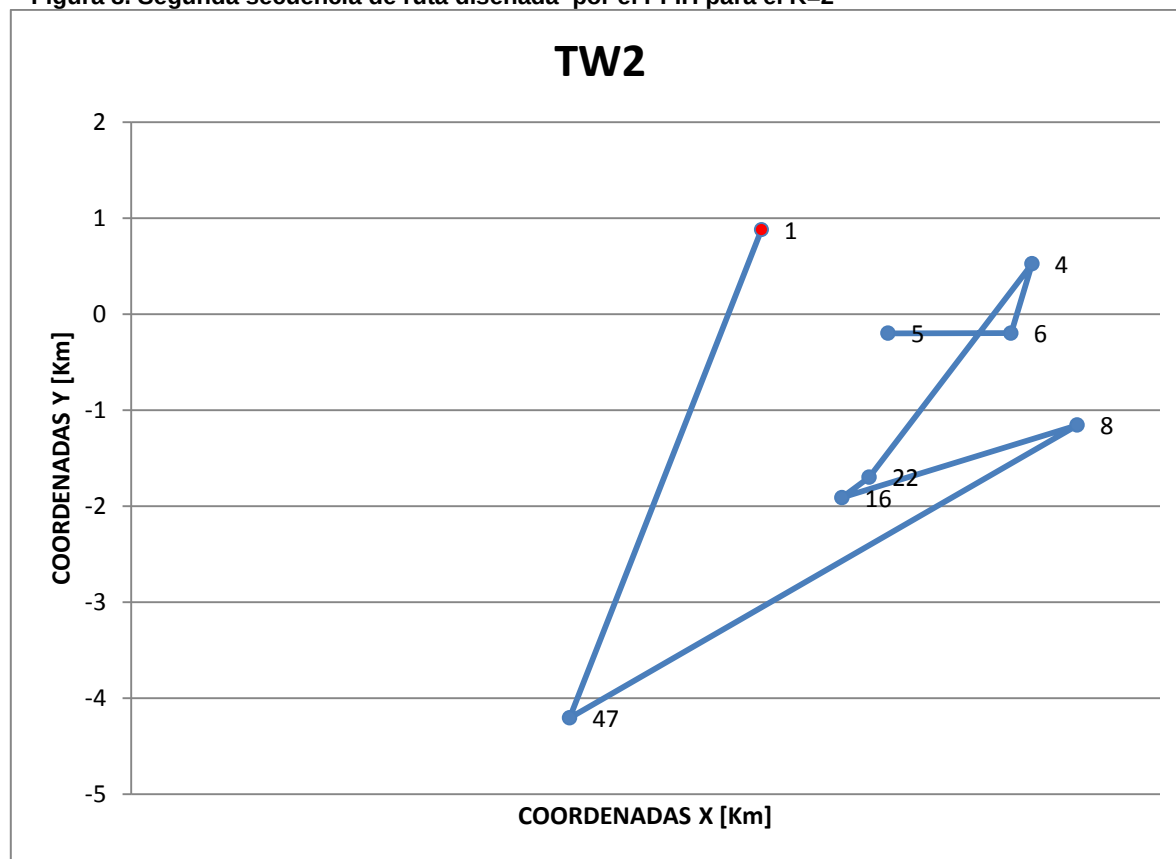
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 8, se nota un comportamiento similar al de las rutas anteriores, el punto en rojo es el último cliente insertado de la ruta anterior, y éste continúa con la inserción de clientes a la ruta, sin embargo debe esperar 26 minutos para que se inicie la ventana de tiempo (9:00 a.m. -10:30 a.m.) y poder realizar la inserción con en la ruta.

e. Iteración 30: Inserción de clientes de TW3 en la segunda ruta.

Al iniciar la tercera ventana de tiempo, las dos rutas siguen añadiendo clientes a sus rutas actuales, puesto que aún cuenta con capacidad de carga para hacerlo. Sin embargo, para enrutar al próximo cliente y de acuerdo al algoritmo, el vehículo más ocionado para seguir enrutando es el vehículo uno dado que por el factor de distancia, se encuentra más cercano al próximo cliente a insertar desde su

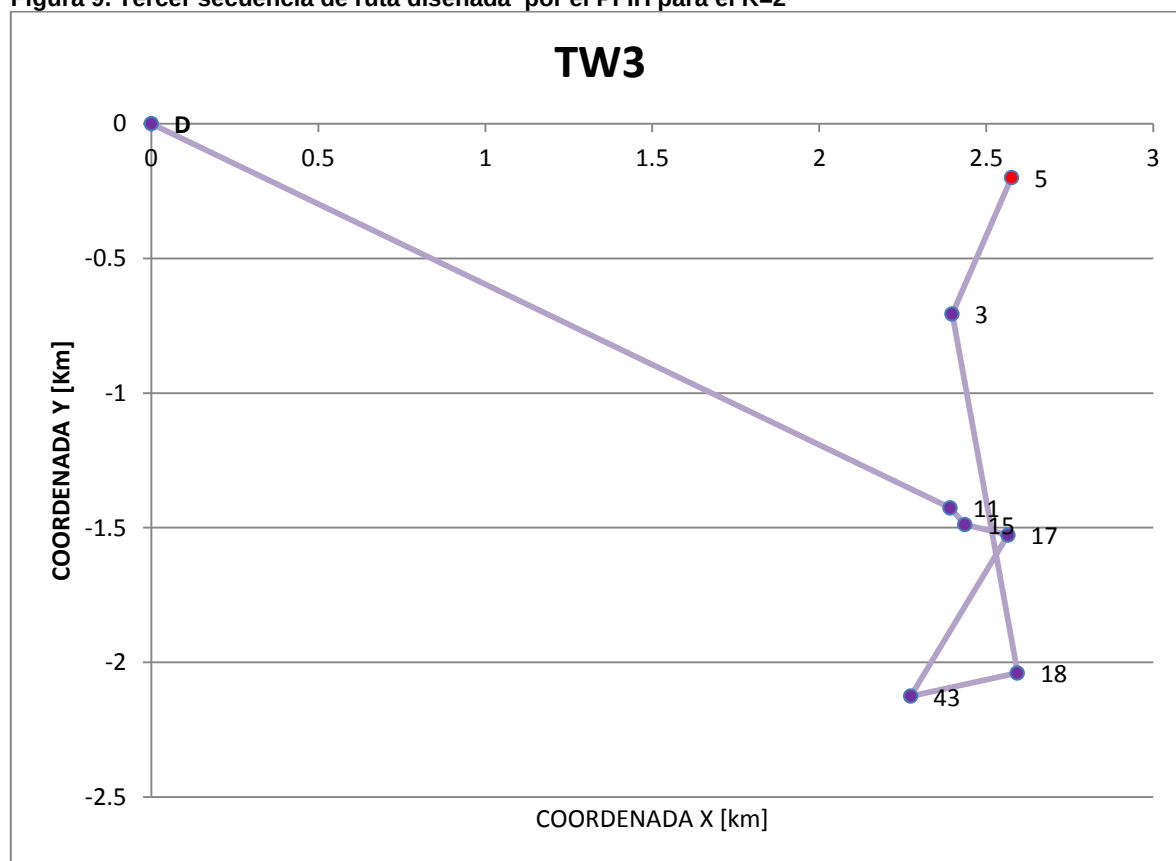
Figura 8. Segunda secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el K=2



Fuente: Elaboración propia

Última inserción, y por tiempo, el próximo a enrutar es el cliente 18, ya que desde el nodo 3-18= 1,84 km, mientras que desde el cliente 9-18 hay 1,95 km. No obstante, el vehículo debe hacer una espera de 26 minutos para poder iniciar tiempo de servicio. En la Figura 9, se muestra el recorrido que realiza esta ruta. Para esta ruta, el vehículo, hace un recorrido de aproximadamente 3,59 kilómetros, y su duración de recorrido es de 67,18 minutos, cabe destacar que el vehículo quedó con capacidad de carga, pero por restricciones de tiempo no puede seguir enrutando. Una vez finalizada la asignación de los clientes y su respectiva ventana de tiempo, el transportista regresa al depósito, con 7 UBA, cumpliendo con la demanda de seis clientes.

Figura 9. Tercer secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el K=2



Fuente: Elaboración propia

El punto en rojo, representa el ultimo cliente insertado de la ventana anterior, y seguidamente empieza a insertar bajo un patrón lineal, se evidencia también un cruce entre la red, pueda darse, porque el algoritmo toma el punto más lejano para luego devolverse, en la Tabla 10, se muestra el resultado de la secuencia de esta inserción.

f. Iteración 36: Inserción de clientes de TW3 en la primera ruta.

Los clientes de la tercera ventana de tiempo, no logran ser abastecidos por el vehículo dos, ya que no cumple con la ventana de tiempo, por tanto dentro de esta ventana quedan tres clientes por fuera, los cuales son asignados para que los atienda el primer vehículo (250 UBA).

Tabla 10. Tercer secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el K=2

Vehículo	2	TW3					
Nodo Inicio	Nodo Llegada	HI (min)	HF (min)	Tiempo servicio (min)	Distancia Recorrida (min)	Tiempo Ruta (min)	Vehículo
3	18	660	670	10	1.84	3.68	2
18	43	671	681	10	0.45	0.90	2
43	17	682	692	10	0.67	1.34	2
17	15	693	703	10	0.18	0.37	2
15	11	703	713	10	0.10	0.21	2
11	13	713	723	10	0.34	0.69	2
	Tiempo total	310	5.17	TOTAL	3.59	7.18	

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, para el logro de esta inserción, el transportista debe esperar 26 minutos para que pueda ser atendido por el siguiente cliente a enrutar. En la Figura 10, se muestra el diseño que propone el algoritmo para esta ruta, siguiendo una escala, por último regresa al depósito finalizando la última inserción con 65 UBA.

Esta ruta, recorre aproximadamente 2,97 kilómetros en 36 minutos para la inclusión de los tres clientes, el resultado obtenido por el algoritmo para esta configuración de ruta se recopila en la Tabla 11.

g. Iteración 39: Inserción del primer cliente en la tercera ruta.

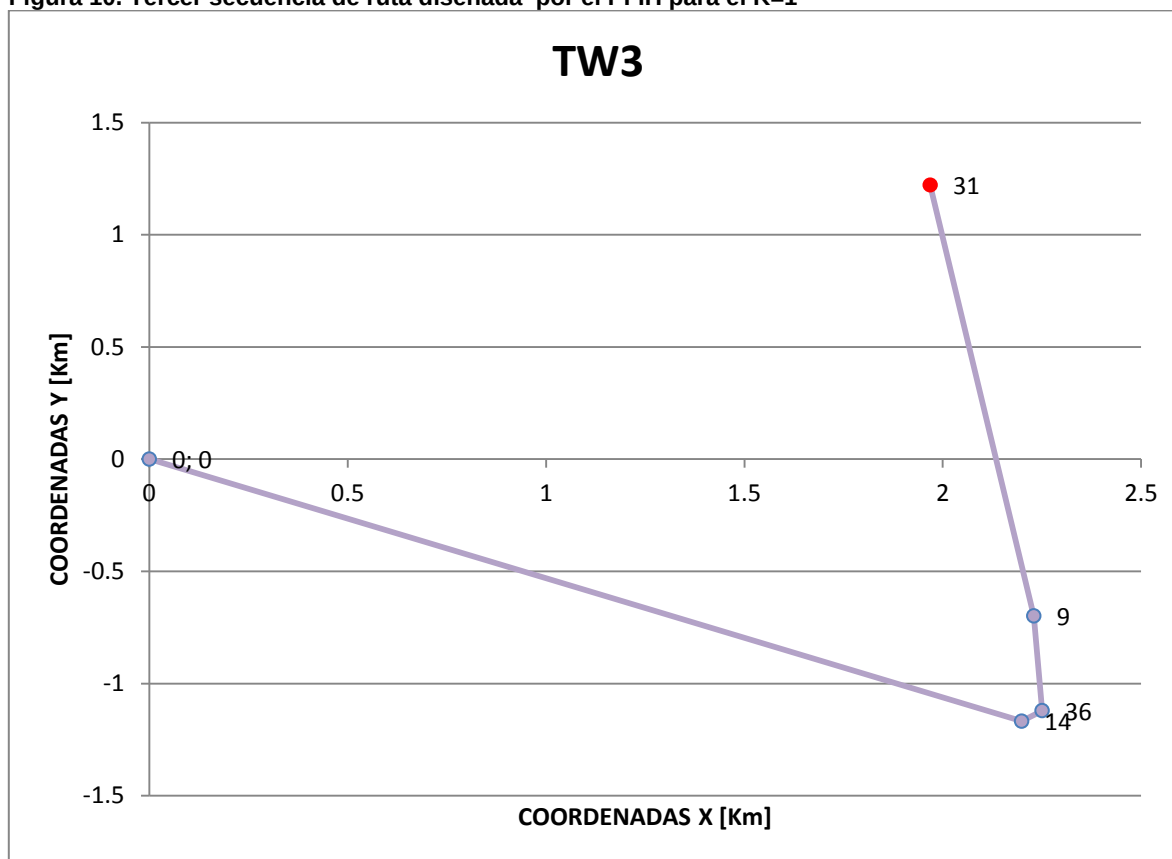
La cuarta ventana de tiempo, está determinada por el horario de la tarde, se dispone de un tercer vehículo que tiene como responsabilidad abastecer a tiempo a los clientes pertenecientes de esta ventana, determinada para la atención de 11 clientes.

Tabla 11. Tercer secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el K=1

Vehículo	1	TW3					
Nodo Inicio	Nodo llegada	HI (min)	HF (min)	Tiempo servicio (min)	Distancia Recorrida (Km)	Tiempo Ruta (min)	Vehículo
9	36	660	670	10	0.62	1.24	1
36	14	670	680	10	0.09	0.19	1
14	2	685	695	10	2.26	4.52	1
							1
	Tiempo total	282		TOTAL	2.97	6	
		4.69	Horas				

Fuente: Elaboración propia

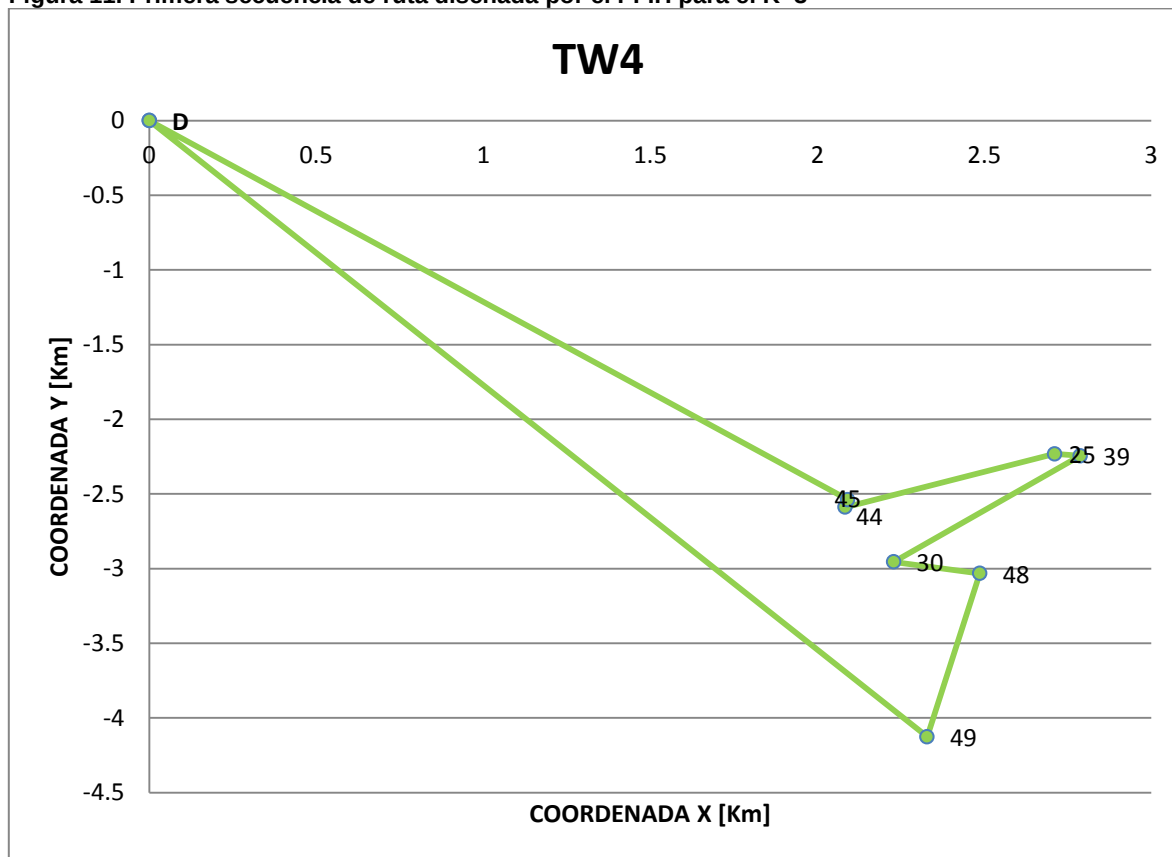
Figura 10. Tercer secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el K=1



Fuente: Elaboración propia

El algoritmo muestra como resultado, que se inicie operaciones de reparto con el tercer vehículo, el cual tiene una capacidad de carga inferior, a los otros dos primeros vehículos (100 UBA), éste vehículo inicia a las 2:00 p.m., y siguiendo el algoritmo enruta al cliente con menor costo de inserción, siendo el cliente 49 el primero en la ruta, así sucesivamente, se repite el algoritmo hasta enrutarlos todos. El tercer vehículo, logra en su ruta añadir ocho clientes, dejando de atender a tres clientes, dado que la ventana de tiempo es muy corta y por tiempo, no logra atenderlos a todos satisfactoriamente. En la Figura 11, se observa la configuración para esta ruta, en donde ilustra que inicia y finaliza en el depósito.

Figura 11. Primera secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el K=3



Fuente: Elaboración propia

El ruteo de los clientes, permite visualizar que en primer lugar enruta al cliente más alejado (49) y continua con los que se encuentran más cercanos. A pesar de que el vehículo cuenta con capacidad de carga, no puede continuar el enrutamiento por la restricción de ventana de tiempo. La distancia a recorrer son 8,5 kilómetros, en una hora y treinta y siete minutos. Los resultados obtenidos se sintetizan en la Tabla 12.

h. Iteración 47: Inserción clientes en la primera ruta para TW4.

Para poder dar cumplimiento a todos los clientes de la cuarta ventana de tiempo, es necesaria la incorporación de una nueva ruta, para cubrir a los tres clientes faltantes que no lograron ser atendidos por el vehículo tres.

Tabla 12. Primer secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el K=3

Nodo Inicio	Nodo llegada	HI (min)	HF (min)	Tiempo servicio (min)	Distancia Recorrida (km)	Tiempo Ruta (min)	Vehículo
0	49	840	850	10	4,53	9	3
49	48	852	862	10	1,11	2	3
48	30	863	873	10	0,27	1	3
30	39	875	885	10	0,91	1,82	3
39	25	885	895	10	0,08	0,16	3
25	44	896	906	10	0,72	1,44	3
44	45	906	916	10	0,05	0,10	3
45	27	918	928	10	0,88	1,76	3
					8,5	17	

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto el vehículo de mayor capacidad, que atendió la primera ventana, al finalizar su recorrido en horas de la mañana, queda con existencias para satisfacer a los tres clientes restantes de la ruta. En la Figura 12, se observa el recorrido que se obtiene del algoritmo, el cual obedece al mismo criterio de las anteriores rutas, puntos más alejados e inserción de los más cercanos.

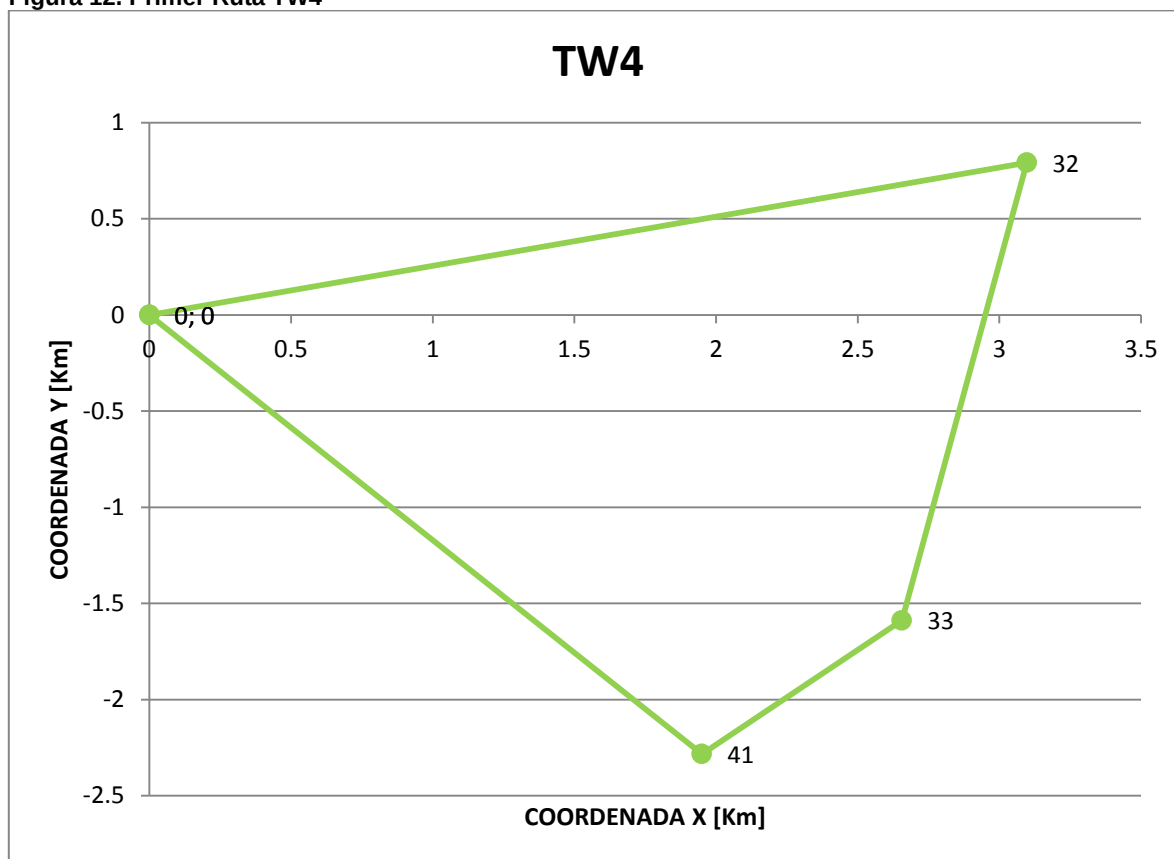
En la Tabla 13, se muestra la distancia recorrida y el tiempo empleado por el primer vehículo para abastecer a los clientes faltantes de la cuarta ventana de tiempo.

Tabla 13. Tercer secuencia de ruta diseñada por el PFIH para el K=1

Nodo Inicio	Nodo llegada	HI	HF	Tiempo servicio	Distancia Recorrida	Tiempo Ruta	Vehículo
0	32	840	850	10	3,68	7,36	1
32	33	859	869	10	4,43	8,87	1
33	41	871	881	10	1,19	1,19	1
41	0	881	889	0	3,64	7	1
					12,95	25	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Primer Ruta TW4



Fuente: Elaboración propia.

5.3 III FASE VALIDACIÓN DE RESULTADOS:

Los resultados obtenidos del algoritmo, proporcionan una inserción y programación de la ruta afín con la estructura de la empresa, por ende resuelven el problema que presentaba.

De acuerdo a los requerimientos del problema, se manejaron cuatro ventanas de tiempo y una flota heterogénea, el algoritmo permitió diseñar la programación de las rutas dando como resultado la inserción satisfactoria de 49 clientes, sin embargo para cumplir con las restricciones operativas impuestas por los clientes, se dieron varias consideraciones que permitieron a la solución ser flexible para satisfacer con ello.

Tabla 14. Resumen PFIH

Primer Vehículo				Segundo Vehículo				Tercer Vehículo			
	Tiempo servicio [min]	Distancia Recorrida [Km]	Tiempo Ruta [min]		Tiempo servicio [min]	Distancia Recorrida [Km]	Tiempo Ruta [min]		Tiempo servicio [min]	Distancia Recorrida [Km]	Tiempo Ruta [min]
TW1	130	14.85	30	TW1	60	12.72	25	TW4	80	8.50	17
TW2	20	6.54	13	TW2	80	18.98	38				
TW3	30	2.97	6	TW3	60	3.59	7				
TW4	30	9.31	17								
TOTAL	210	33.67	66	TOTAL	200	35.29	70	TOTAL	80	8.50	17

6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos, proporcionan una solución al problema que inicialmente presentaba la empresa con respecto a la programación de las rutas. Para ello, la recopilación de los datos facilitó elaborar una caracterización de los elementos que componen el sistema de distribución y evaluar cómo éstos afectan en la solución del problema.

Dentro de la elaboración de la caracterización, se obtienen resultados, como la matriz de distancia, que relaciona entre todos los nodos de la matriz, la distancia de un punto n a otro. También se obtiene el factor de circuito para la ciudad de Palmira correspondiente a 1.36, que comparado con el factor de la ciudad de Cali 1.23 [14], difieren en 0.13 unidades, y esto se puede dar por la topografía de ambas ciudades, especialmente la de Palmira que presenta una forma longitudinal. El factor de circuito facilitó a la matriz de distancia, adaptarla a valores reales.

Así mismo, dentro de los hallazgos dentro de esta primera fase, se evidencia que los centros educativos (escuelas, colegios, universidades), se concentran entre las carreras 26 y 31 de la ciudad. Siendo la carrera 31 la que alberga el mayor número de escuelas. Por lo que refiere a los horarios de atención, se identifica que la ventana de tiempo en donde se agrupa mayor número de clientes es el horario matutino comprendido entre las 7:00 a.m. y las 9:30 a.m., esto obedece a que las escuelas aprovechan abastecer las tiendas escolares antes del descanso de los estudiantes. Así mismo cabe destacar que los hallazgos fueron dados bajo el supuesto que es el problema es simétrico. Por otra parte, se da a conocer que la velocidad promedio para transitar por vías escolares se encuentra reglamentada por normatividad nacional.

La problemática que presentaba la empresa se logra resolver mediante la aplicación del algoritmo *PFIH*, dando como resultado la programación de tres rutas utilizando los vehículos actuales, todos los clientes lograron ser asignados a una

ruta, en donde se da cumplimiento a la ventana establecida por los mismos, en ocasiones, el transportista llegó muy temprano al cliente y por ende tuvo que realizar espera. En cuanto a la capacidad de los vehículos, el que tuvo mayor rendimiento fue el vehículo de capacidad de carga 150 UBA y logró cubrir la primera y segunda ventana de tiempo. Las rutas establecidas se aprecian a continuación:

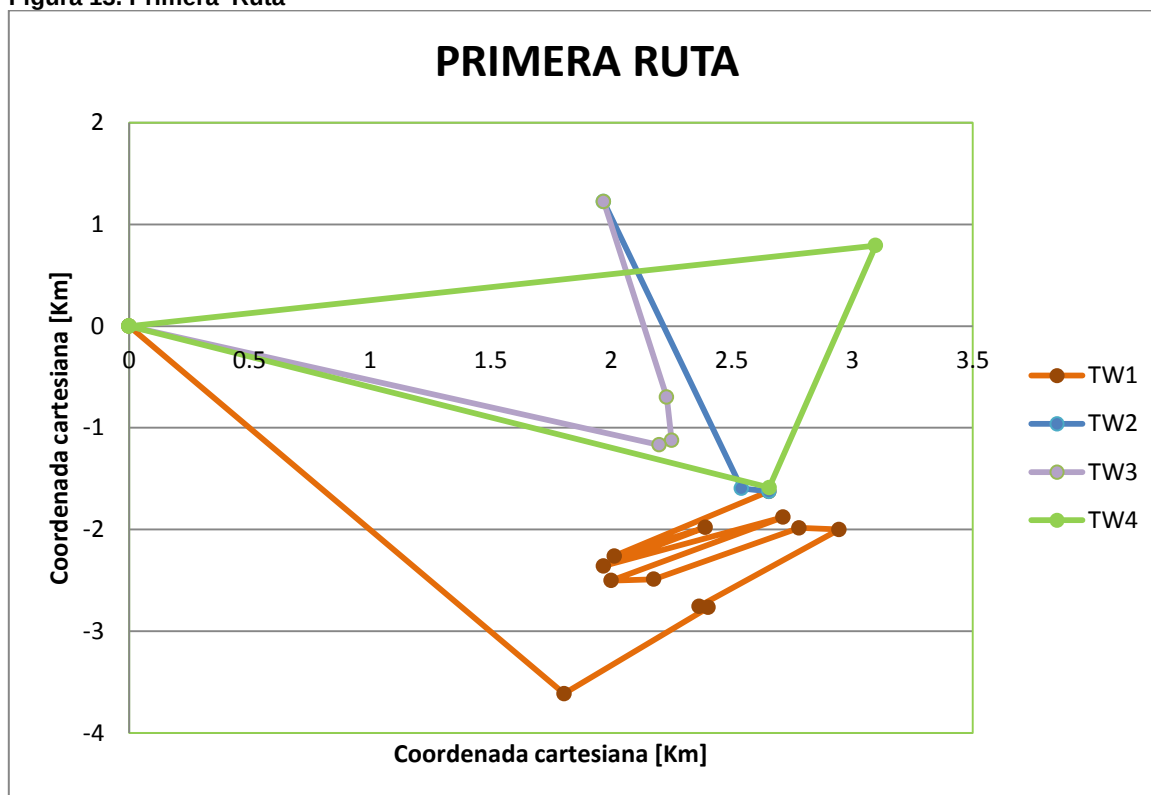
6.1 PRIMERA RUTA

La primera ruta se realiza con el vehículo de mayor capacidad de carga (200 UBA), se obtiene como resultado una programación de 21 clientes, que se encuentran en las cuatro ventanas de tiempo.

Para esta ruta, se realiza un desplazamiento de 33,67 kilómetros y su tiempo de recorrido es de 7 horas con 56 minutos, durante su jornada de trabajo hubo tiempo ocioso de 54 minutos que representa el 11,53% de su rendimiento, en cuanto a la capacidad de carga del vehículo se aprovecha el 99,6%, dejando como resultado la atención del 42,85% del total de los clientes. En la Figura 13 , se muestra el recorrido que realiza el primer vehículo.

El diagrama de recorrido para esta ruta, tiene como criterio buscar el punto más distante de la red para dar la configuración inicial de la ruta, seguidamente asigna los más cercanos con patrón en forma de zigzag, dado que va al ángulo más abierto y durante su recorrido se cierra, esto sucede hasta enrutar el ultimo cliente que cumpla la ventana de tiempo correspondiente.

Figura 13. Primera Ruta



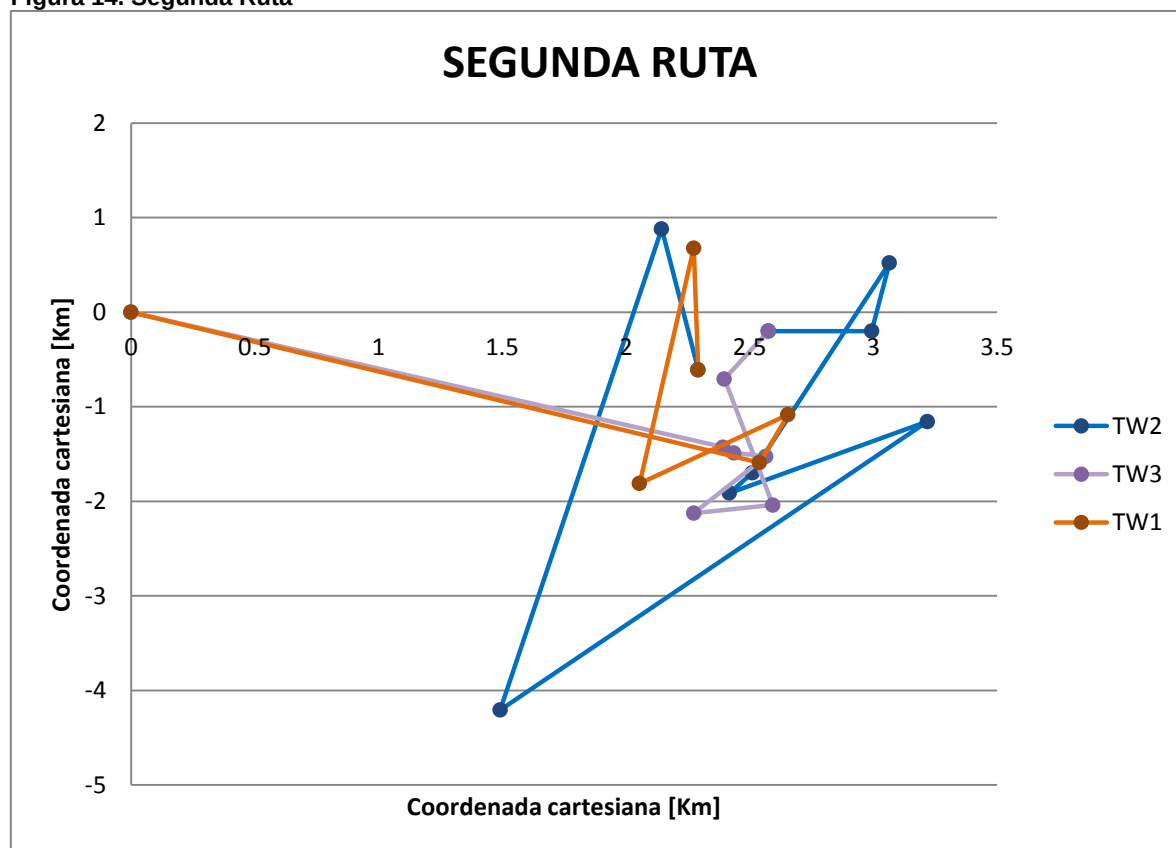
Fuente: Elaboración propia

6.2 SEGUNDA RUTA

La segunda ruta generada, es atendida por el vehículo cuya capacidad de carga es de 150 UBA, cubre una ruta de 20 clientes, en el horario de la mañana. La distancia que recorre es de 35 kilómetros aproximadamente y el tiempo utilizado es 5 horas con 10 minutos. Éste vehículo presenta un tiempo ocioso de 52 minutos, dado que en ocasiones llega muy temprano a prestar el servicio y la ventana del cliente no ha dado apertura, éste representa un 11.11% del tiempo total productivo. En cuanto a la utilización de su capacidad de carga se aprovecha al 95.33% logrando así atender un 40,81% del total de los clientes. En la Figura 14, se muestra el comportamiento de la ruta, al igual que en la anterior ruta, este algoritmo localiza el punto más lejano y posteriormente se devuelve a los que se encuentran en mayor concentración dentro de la zona, también se aprecia que

entre las rutas hay cruces, pero se justifican por el cumplimiento de la ventana de tiempo.

Figura 14. Segunda Ruta

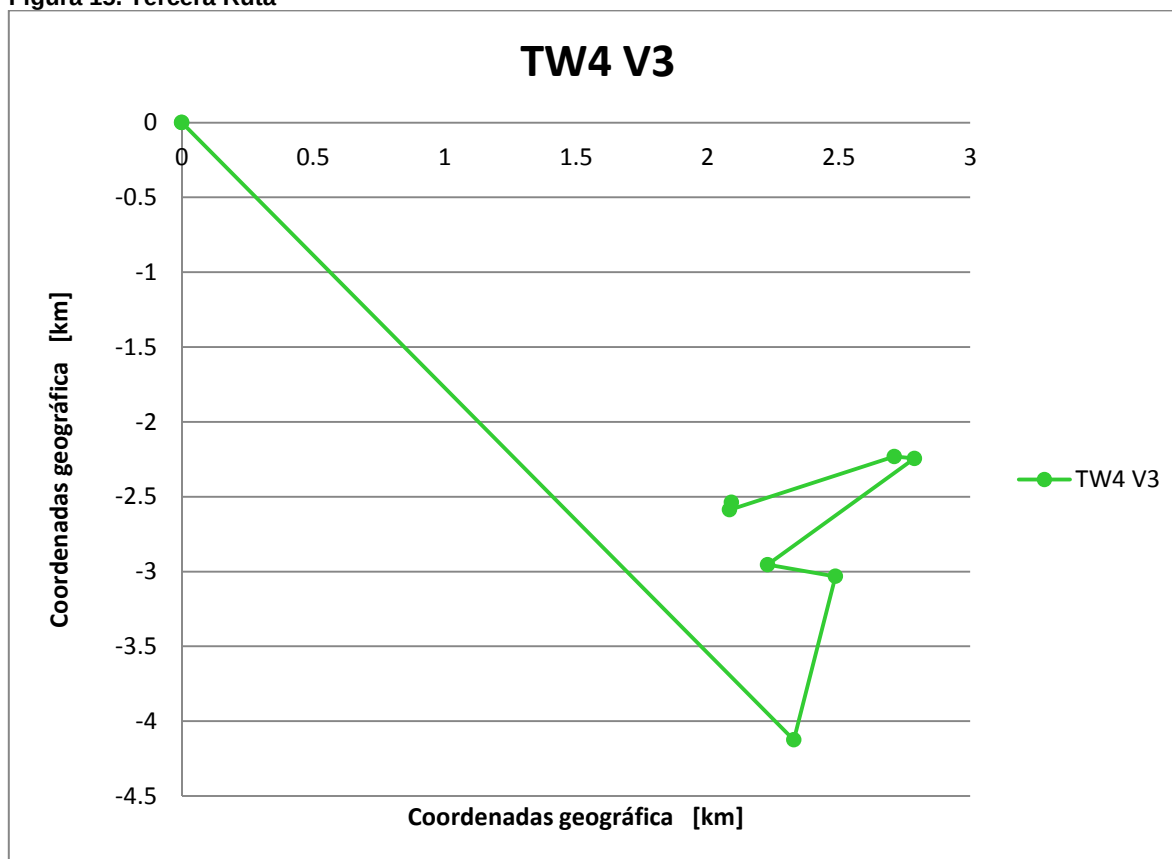


Fuente: Elaboración propia

6.3 TERCERA RUTA

Un tercer vehículo (100 UBA) atiende la tercera ruta, su horario de atención es la cuarta ventana de tiempo. Éste enruta a ocho clientes en el lapso de 1 hora y 28 minutos, recorriendo 9 kilómetros aproximadamente. Este vehículo solo aprovecha el 67% de su capacidad de carga, y no presenta tiempo ocioso durante su recorrido. Dentro de esta ruta se atiende un 16,32%, del total de los clientes.

Figura 15. Tercera Ruta



Fuente: Elaboración propia

Al igual que las dos rutas anteriores, el patrón del recorrido corresponde al ángulo más lejano e ir cerrando la ruta. La cuarta ventana de tiempo es la más corta de las otras restantes, razón por la cual, para lograr abastecer a todos los clientes, es necesario la intervención de un auxiliar de ruta (vehículo), para enrutar los clientes faltantes, ante la situación de ser necesario un vehículo extra, y en relación que el vehículo que cubre la primer ruta queda con mercancía, puede generar ciertas molestias para la directrices de la empresa, dado que no es conveniente que los vehículos queden cargados, seguidos de un receso, por temas de confiabilidad y seguridad de la mercancía.

Por último, cabe señalar que el algoritmo *PFIH*, es un algoritmo sencillo, práctico que dio solución a la problemática de una PYME, mediante el uso de hojas de cálculo, lo cual resulta ser asequible de implementar en cualquier empresa que

sufren esta problemática, sin importar su tamaño. Los resultados obtenidos son una implementación de la técnica para controlar la programación de las rutas y buscar oportunidades de mejoras que le permitan hacer eficiente su sistema de distribución; ante el caso de estudio se logró evidenciar que la programación arrojada por el algoritmo *PFIH*, proporciona una solución aceptable, logrando dar cumplimiento a todas las restricciones operativas impuestas.

7. CONCLUSIONES

Los modelos de transporte, son aplicables en problemas reales para empresas de gran y menor tamaño, en todas se generan ciertos inconvenientes que entorpecen el buen funcionamiento de su sistema de distribución, y es que en muchas, especialmente en las microempresas, se operan sin tener en cuenta técnicas que le permitan optimizar sus recursos y planear estratégicamente las operaciones de la logística especialmente la de despacho, como aplica para este caso de estudio.

La problemática que presentaba el caso de estudio, se enmarcó en un típico problema de ruteo de vehículo con ventanas de tiempo, para dar una solución a esto, se propuso llevar la metodología teórica al caso práctico, en donde se tenían 49 clientes, a los cuales se les debía determinar la ruta que le permitiera cumplir con las ventanas de tiempo y a su vez minimizara la distancia recorrida. Los datos fueron recolectados y se realizó la respectiva modelación del algoritmo propuesto para trabajar la problemática.

Para la programación de las rutas iniciales se planteó la modelación con el algoritmo de Inserción Push Forward (*PFIH*), generando como solución tres rutas que abastecen a los 49 clientes, recorriendo 81 kilómetros para toda la red, manejando cuatro ventanas de tiempo. Por el número de clientes que compone la red, no se pudo establecer una solución mediante la modelación de programación entera mixta, y fue necesaria la aplicación de técnicas heurísticas.

La programación de las rutas que genero el algoritmo, le permite a la empresa conocer el tiempo empleado para abastecer a todos los clientes de la red bajo el cumplimiento de restricciones, sin embargo dentro de esta programación el tiempo de espera es muy alto para el transportista, en especial porque en una microempresa no se puede permitir lapsos tan amplios entre ventana y ventana, ya que se ven generados en altos costos para la empresa, al detectar los tiempos ociosos entre ventana y ventana, se convierte en una oportunidad de mejora,

puesto que de esta manera se pueden identificar, controlar y establecer nuevas soluciones. Una recomendación ante la situación sería conveniente coordinar las actividades logísticas y comerciales para la incorporación de nuevos clientes y diseños de horarios de atención, para poder hacer buena utilización de los vehículos y de este modo, reducir esos tiempos de espera, especialmente en aquellas ventanas de tiempo en donde hay menor número de clientes.

El algoritmo presentado fue ajustado a los factores de peso encontrados en la literatura, cuyo impacto se vio reflejado en el diseño de la rutas, para trabajos futuros se puede realizar un análisis de sensibilidad de cómo estos factores afectan el diseño y programación de rutas.

Por otra parte, otra opción de solución es reestablecer en conjunto con los clientes sus tiempos de servicio, así se establece flexibilidad al momento de iterar el algoritmo nuevamente.

Por último, con la elaboración de este trabajo se logra dar solución a un problema de ruteo en una empresa, que pese de tener todos los elementos de una red de distribución, carecía de una programación; dicha programación se obtuvo como resultado de la implementación de una heurística que a través de herramientas sencillas como los son las hojas de cálculo facilitan la solución a problemas reales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Chopra, S. Peter y Meindl, «Administración de la cadena de suministro: Estrategia, Planeación y Operación,» Tercera Edición ed., México, Pearson Education, 2008, p. 8.
- [2] R. H. Ballou, Logística: Administración de la Cadena de Abastecimiento, Pearson Education, 2004, p. 165.
- [3] M. Mauleón, LOGÍSTICA Y COSTOS, Madrid: Ed.Díaz De Santos, 2006, p. 4.
- [4] M. Solomon, ALGORITHMS FOR THE VEHICLE ROUTING AND SCHEDULING PROBLEMS WITH TIME WINDOW CONSTRAINTS, 1985.
- [5] P. Toth y D. Vigo, Vehicle Routing Problem, SIAM, 2002, p. 1.
- [6] J. Cordeau, G. Desaulniers, J. Desrosiers y S. F. Solomon M, «The VRP with Time Windows,» nº G-99-13, 1999.
- [7] J. Desrosiers, F. Soumis y M. Desrochers, ROUTIN WITH TIME WINDOWS BY COLUMN GENERATION, G-83-15, 1983.
- [8] K. Zhu Qili, «Heuristic Method For Vehicle Routing Problem with the Time Windows,» Department of Electrical Engineering, 1999.
- [9] A. Olivera, «Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehiculos,» Montevideo, Uruguay, 2004.
- [10] Ministerio de Transporte, «MINTRANSPORTE,» República de Colombia - Ministerio de Transporte , 2011. [En línea]. Available: <http://bit.ly/1BAVhkB>. [Último acceso: Junio 2015].
- [11] Corporacion Autonoma Reginonal Valle del Cauca; Universidad Nacional, «INFORME FINAL PERFIL AMBIENTAL URBANO,» Palmira, 2008.
- [12] TRANSCONSULT, «FORMULACIÓN Y ADOPCIÓN DEL PLAN DE MOVILIDAD PARA EL MUNICIPIO DE PALMIRA,» Palmira, 2013.
- [13] Ministro de Transporte, «LEY 1239 DE 2008,» de *Artículo 106. Límites de velocidad en vías urbanas y carreteras municipales*, Bogotá D.C, Diario Oficial , 2005.
- [14] E. SAAVEDRA F y H. VARGAS P, «DISEÑO DE RUTAS PARA EL TRANSPORTE DE DOCUMENTOS POR EL ÁREA DE MENSAJERÍA DE UNA EMPRESA DE SERVICIOS,» Santiago de Cali, 2013.

- [15] J. H. Ramser y G. B. Dantzing, «The Truck Dispatching Problem,» *Management Science*, vol. 6, pp. 80-91, Octubre 1959.
- [16] R. Matai, «Traveling salesman problem: an overview of applications, formulations, and solution approaches,» 2010.
- [17] J.-F. Cordeau, G. Laporte, M. W. Savelsbergh y D. Vigo, *Handbooks in Operations Research and Management Science: Transportation*, vol. 14, The Netherlands, 2007.
- [18] F. Robusté y F. Robusté Anton, *Logística del Transporte*, Catalunya, Universitat Politècnica de Catalunya: Ediciones UPC, 2005, p. 16.
- [19] M. Solomon y J. Desrosiers, *Time Window Constrained Routing and Scheduling Problems*, 1988.
- [20] F. Focacci, A. Lodi, Milano y Michela, *A Hybrid Exact Algorithm for the TSPTW*, 2002.
- [21] V. Campos, Escritor, *Problemas de Rutas*. [Performance]. Universidad de Valencia.
- [22] Código Nacional de Tránsito Terrestre y se dictan otras disposiciones, *LEY 769 DE 2002*, Bogotá, 2002.

ANEXO A

	MATRIZ DE DISTANCIAS (KM)																
Nodo	0	1	2	3	4	5 ..	14	15	16	17	18 ..	26	27	28 ..	47	48	49
0	0	2,526	2,554	2,741	3,544	2,820	2,796	3,316	3,677	3,487	3,974	4,532	3,886	3,722	5,907	4,941	6,161
1	2,526	0	0,598	2,179	1,332	1,577	2,779	3,237	3,799	3,315	4,006	4,939	3,799	3,893	6,957	5,327	6,795
2	2,554	0,598	0	1,624	1,004	0,988	2,259	2,695	3,266	2,763	3,463	4,423	3,248	3,364	6,509	4,808	6,298
3	2,741	2,179	1,624	0	1,910	0,733	0,687	1,071	1,642	1,146	1,842	2,802	1,635	1,742	4,944	3,184	4,678
4	3,544	1,332	1,004	1,910	0	1,191	2,594	2,880	3,438	2,885	3,562	4,582	3,322	3,543	6,814	4,926	6,436
5 . .	2,820	1,577	0,988	0,733	1,191	0	1,419	1,772	2,345	1,815	2,516	3,506	2,291	2,447	5,676	3,876	5,380
14	2,796	2,779	2,259	0,687	2,594	1,419	0	0,545	1,054	0,700	1,307	2,182	1,151	1,140	4,267	2,580	4,050
15	3,316	3,237	2,695	1,071	2,880	1,772	0,545	0	0,573	0,183	0,783	1,734	0,608	0,675	3,934	2,113	3,610
16	3,677	3,799	3,266	1,642	3,438	2,345	1,054	0,573	0	0,556	0,299	1,161	0,333	0,106	3,389	1,542	3,037
17	3,487	3,315	2,763	1,146	2,885	1,815	0,700	0,183	0,556	0	0,701	1,700	0,490	0,663	3,945	2,061	3,569
18 . .	3,974	4,006	3,463	1,842	3,562	2,516	1,307	0,783	0,299	0,701	0	1,026	0,245	0,288	3,322	1,366	2,876
26	4,532	4,939	4,423	2,802	4,582	3,506	2,182	1,734	1,161	1,700	1,026	0	1,271	1,060	2,314	0,415	1,876
27	3,886	3,799	3,248	1,635	3,322	2,291	1,151	0,608	0,333	0,490	0,245	1,271	0	0,396	3,566	1,604	3,114
28 . .	3,722	3,893	3,364	1,742	3,543	2,447	1,140	0,675	0,106	0,663	0,288	1,060	0,396	0	3,282	1,446	2,937
47	5,907	6,957	6,509	4,944	6,814	5,676	4,267	3,934	3,389	3,945	3,322	2,314	3,566	3,282	0	2,100	1,144
48	4,941	5,327	4,808	3,184	4,926	3,876	2,580	2,113	1,542	2,061	1,366	0,415	1,604	1,446	2,100	0	1,511
49	6,161	6,795	6,298	4,678	6,436	5,380	4,050	3,610	3,037	3,569	2,876	1,876	3,114	2,937	1,144	1,511	0

Anexo 1. Matriz de distancias