

**PROPUESTA DE UN DISEÑO DE RUTAS CON VENTANAS DE TIEMPO SIN
RESTRICCIÓN DE CAPACIDAD PARA UNA EMPRESA DISTRIBUIDORA DE
PRODUCTOS ALIMENTICIOS EN EL MUNICIPIO DE PALMIRA**

ANYI YASMIN REYES GUERRERO



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PALMIRA
2015**

**PROPUESTA DE UN DISEÑO DE RUTAS CON VENTANAS DE TIEMPO SIN
RESTRICCIÓN DE CAPACIDAD PARA UNA EMPRESA DISTRIBUIDORA DE
PRODUCTOS ALIMENTICIOS EN EL MUNICIPIO DE PALMIRA**

ANYI YASMIN REYES GUERRERO

**Proyecto de Grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniera Industrial**

**Director:
JULIO CÉSAR LONDOÑO ORTEGA**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PALMIRA
2015**



ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

AUTOR:

ANYI YASMIN REYES GUERRERO

TÍTULO:

“PROPUESTA DE UN DISEÑO DE RUTA CON VENTANAS DE TIEMPO SIN RESTRICCIÓN DE CAPACIDAD PARA UNA EMPRESA DISTRIBUIDORA DE PRODUCTOS ALIMENTICIOS EN EL MUNICIPIO DE PALMIRA”.

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Palmira, Junio de 2015

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitir mi existencia en esta tierra y darme en cada respiro infinitas bendiciones.

A mi madre y padre quienes con su gran amor y esfuerzos me han edificado como una persona de bien, a ellos les debo todo lo que soy.

A Karoll Reyes y Anny Reyes por estar día y noche incondicionalmente para mí acompañándome en triunfos y derrotas, son el mejor regalo que me ha dado la vida.

A Gustavo A. Cano por acompañarme en los momentos donde sólo una voz de aliento en ausencia de la persona puede brindar fortaleza, amor y alegría.

A mi mentor Julio César Londoño por sembrar a su paso en cada vida la semilla de inspiración, por su incondicional apoyo, compromiso y transmitir del conocimiento.

A la Universidad del Valle y docentes por creer en el desarrollo del país formando profesionales con alto sentido de pertenencia.

A mis amigos quienes han presenciado cada etapa de este proyecto de vida y han permanecido como hermanos por elección, ustedes saben quiénes son.

A todas las personas que hicieron parte en esta etapa de mi vida.

Anyi Reyes Guerrero

CONTENIDO

pág.

INTRODUCCIÓN	1
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	2
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Pregunta de investigación	4
1.3. Justificación	4
2. OBJETIVOS	6
2.1. Objetivo General	6
2.2. Objetivos Específicos	6
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	7
4. MARCO TEÓRICO	12
4.1. El problema del agente viajero (TSP)	12
4.2. Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRPTW)	13
4.2.1. Formulación matemática del VRPTW	13
4.3. Heurísticas para el VRPTW	15
5. CASO DE ESTUDIO	21
6. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	24
6.1. Centro de Distribución	24
6.2. Clientes	25
6.3. Vehículo	25
7. PROCESO METODOLÓGICO	27
7.1. Cálculo de las distancias	27
7.2. Diseño y programación de la ruta mediante heurístico PFIH de Marius Solomon	33

7.3. Diseño y programación de ruta mediante el método exacto	37
7.4. Condiciones a variar del TSPTW	37
8. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	39
8.1. Resultados del agente viajero con ventanas de tiempo TSPTW	39
8.2. Comparación de los resultados con la situación actual del caso de estudio	48
8.3. Escenarios	49
8.4. Discusión de los resultados de los escenarios del caso de estudio (TSPTW)	54
9. CONCLUSIONES	65
BIBLIOGRAFÍA	69
ANEXOS	71

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Datos de clientes	22
Tabla 2. Fracción de la matriz de distancias	30
Tabla 3. Primera iteración del heurístico PFIH	36
Tabla 4. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW para 12 clientes de la jornada de la mañana.....	39
Tabla 5. Resultados del modelo exacto para el TSPTW para 12 clientes en la jornada de la mañana	40
Tabla 6. Resultados obtenidos del heurístico PFIH para el TSPTW de 12 clientes de la jornada de la mañana	42
Tabla 7. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW para 8 clientes de la jornada de la tarde.....	44
Tabla 8. Resultados del modelo exacto para el TSPTW para 8 clientes en la jornada de la tarde	44
Tabla 9. Resultados del PFIH para el TSPTW para 8 clientes en la jornada de la tarde.....	46
Tabla 10. Resumen de resultados del TSPTW.....	50
Tabla 11. Resumen de GAPS de distancia total recorrida y tiempo total en ruta del TSPTW	51
Tabla 12. Resumen de resultados del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h	51
Tabla 13. Resumen de GAPS de distancia total recorrida y tiempo total en ruta del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h	51
Tabla 14. Resumen de resultados del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h	52
Tabla 15. Resumen de GAPS de distancia total recorrida y tiempo total en ruta del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h	52

Tabla 16. Resumen de resultados del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo con los clientes.....53

Tabla 17. Resumen de GAPs de distancia total recorrida y tiempo total en ruta del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo con los clientes53

LISTA DE ILUSTRACIONES

pág.

Ilustración 1. Ejemplificación de una ventana de tiempo.....	16
---	----

LISTA DE ANEXOS

pág.

Anexo 1. Datos de posición de los clientes	71
Anexo 2. Fracción de la matriz de distancia convertida a minutos	72
Anexo 3. Segunda iteración del algoritmo heurístico PFIH	72
Anexo 4. Secuencia determinada por el método exacto y el PFIH del TSPTW para 15 clientes de la jornada de la mañana	73
Anexo 5. Resultados del modelo exacto para el TSPTW para 15 clientes en la jornada de la mañana	73
Anexo 6. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW para 15 clientes en la jornada de la mañana	74
Anexo 7. Secuencia del TSPTW determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 15 clientes de la jornada de la mañana	74
Anexo 8. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW para 9 clientes de la jornada de la tarde.....	75
Anexo 9. Resultados del modelo exacto para el TSPTW para 9 clientes en la jornada de la tarde	75
Anexo 10. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW para 9 clientes en la jornada de la tarde	75
Anexo 11. Secuencia del TSPTW determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 9 clientes de la jornada de la tarde	76
Anexo 12. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW para 19 clientes de la jornada de la mañana.....	76
Anexo 13. Resultados del modelo exacto para el TSPTW para 19 clientes en la jornada de la mañana	77
Anexo 14. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW para 19 clientes en la jornada de la mañana	77
Anexo 15. Secuencia del TSPTW determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 19 clientes de la jornada de la mañana	78

Anexo 16. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW para 11 clientes de la jornada de la tarde.....	78
Anexo 17. Resultados del modelo exacto para el TSPTW para 11 clientes en la jornada de la mañana	78
Anexo 18. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW para 11 clientes en la jornada de la mañana	79
Anexo 19. Secuencia del TSPTW determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 11 clientes de la jornada de la tarde	79
Anexo 20. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 12 clientes de la jornada de la mañana	80
Anexo 21. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 12 clientes en la jornada de la mañana.....	80
Anexo 22. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 12 clientes en la jornada de la mañana	80
Anexo 23. Secuencia del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 12 clientes de la jornada de la mañana	81
Anexo 24. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 8 clientes de la jornada de la tarde	81
Anexo 25. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 8 clientes en la jornada de la tarde	81
Anexo 26. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 8 clientes en la jornada de la tarde	82
Anexo27. Secuencia del TSPTW variando la velocidad a 27 Km/h del vehículo determinada por el modelo exacto (izq.) y el heurístico PFIH (a) para 8 clientes de la jornada de la tarde	82
Anexo 28. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 15 clientes de la jornada de la mañana	82
Anexo 29. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 15 clientes en la jornada de la mañana.....	83

Anexo 30. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 15 clientes en la jornada de la mañana	83
Anexo 31. Secuencia del TSPTW variando la velocidad a 27 Km/h del vehículo determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 15 clientes de la jornada de la mañana.	84
Anexo 32. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 9 clientes de la jornada de la tarde	84
Anexo 33. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 9 clientes en la jornada de la tarde	84
Anexo 34. Resultados obtenidos del heurístico PFIH para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 9 clientes de la jornada de la tarde.....	85
Anexo 35. Secuencia del TSPTW variando la velocidad a 27 Km/h del vehículo determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 9 clientes de la jornada de la tarde	85
Anexo 36. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 19 clientes de la jornada de la mañana	85
Anexo 37. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 19 clientes en la jornada de la mañana.....	86
Anexo 38. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 19 clientes en la jornada de la mañana.....	86
Anexo 39. Secuencia del TSPTW variando la velocidad a 27 Km/h del vehículo determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 19 clientes de la jornada de la mañana	87
Anexo 40. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 11 clientes de la jornada de la tarde	87
Anexo 41. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 11 clientes en la jornada de la tarde	87
Anexo 42. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 11 clientes en la jornada de la tarde	88

Anexo 43. Secuencia del TSPTW variando la velocidad a 27 Km/h del vehículo determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 11 clientes de la jornada de la tarde	88
Anexo 44. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 12 clientes de la jornada de la mañana	89
Anexo 45. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 12 clientes en la jornada de la mañana.....	89
Anexo 46. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 12 clientes en la jornada de la mañana	89
Anexo 47. Secuencia del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 12 clientes de la jornada de la mañana	90
Anexo 48. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 8 clientes de la jornada de la tarde	90
Anexo 49. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 8 clientes en la jornada de la tarde	90
Anexo 50. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 8 clientes en la jornada de la tarde.....	91
Anexo 51. Secuencia del TSPTW variando la velocidad a 20 Km/h del vehículo determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 8 clientes de la jornada de la tarde	91
Anexo 52. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 15 clientes de la jornada de la mañana	91
Anexo 53. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 15 clientes en la jornada de la mañana.....	92
Anexo 54. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 15 clientes en la jornada de la mañana	92
Anexo 55. Secuencia del TSPTW variando la velocidad a 20 Km/h del vehículo determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 15 clientes de la jornada de la mañana	93

Anexo 56. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 9 clientes de la jornada de la tarde	93
Anexo 57. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 9 clientes en la jornada de la tarde	93
Anexo 58. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 9 clientes en la jornada de la tarde.....	94
Anexo 59. Secuencia del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 9 clientes de la jornada de la tarde	94
Anexo 60. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 19 clientes de la jornada de la mañana	94
Anexo 61. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 19 clientes en la jornada de la mañana.....	95
Anexo 62. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 19 clientes en la jornada de la mañana	95
Anexo 63. Secuencia del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 19 clientes de la jornada de la mañana	96
Anexo 64. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 11 clientes de la jornada de la tarde	96
Anexo 65. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 11 clientes en la jornada de la tarde	96
Anexo 66. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 11 clientes en la jornada de la tarde.....	97
Anexo 67. Secuencia del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 11 clientes de la jornada de la tarde	97
Anexo 68. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 11 clientes de la jornada de la mañana	98

Anexo 69. Resultados del modelo exacto para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 11 clientes en la jornada de la mañana	98
Anexo 70. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 11 clientes en la jornada de la mañana	98
Anexo 71. Secuencia del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 11 clientes de la jornada de la mañana.....	99
Anexo 72. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 9 clientes de la jornada de la tarde.....	99
Anexo 73. Resultados del modelo exacto para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 9 clientes en la jornada de la tarde	99
Anexo 74. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 9 clientes en la jornada de la tarde	100
Anexo 75. Secuencia del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 9 clientes de la jornada de la tarde	100
Anexo 76. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 14 clientes de la jornada de la mañana	100
Anexo 77. Resultados del modelo exacto para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 14 clientes en la jornada de la mañana	101
Anexo 78. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 14 clientes en la jornada de la mañana	101
Anexo 79. Secuencia del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 14 clientes de la jornada de la mañana.....	102
Anexo 80. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 10 clientes de la jornada de la tarde	102
Anexo 81. Resultados del modelo exacto para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 10 clientes en la jornada de la tarde	102

Anexo 82. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 10 clientes en la jornada de la tarde	103
Anexo 83. Secuencia del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 10 clientes de la jornada de la tarde	103
Anexo 84. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 18 clientes de la jornada de la mañana	103
Anexo 85. Resultados del modelo exacto para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 18 clientes en la jornada de la mañana	104
Anexo 86. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 18 clientes en la jornada de la mañana	104
Anexo 87. Secuencia del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 18 clientes de la jornada de la mañana.....	105
Anexo 88. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 12 clientes de la jornada de la tarde.....	105
Anexo 89. Resultados del modelo exacto para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 12 clientes en la jornada de la tarde	105
Anexo 90. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 12 clientes en la jornada de la tarde	106
Anexo 91. Secuencia del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 12 clientes de la jornada de la tarde	106

RESUMEN

El siguiente proyecto de grado presenta un caso de estudio en el cual se aborda un problema de transporte con las características del Problema del Agente Viajero con Ventanas de Tiempo TSPTW (*Traveling Salesman Problem with Time Windows*, por sus siglas en inglés), en el sistema de distribución de una empresa productora, comercializadora y distribuidora de productos alimenticios del municipio de Palmira, con el objetivo de establecer el diseño y programación de la ruta en la cual el agente viajero debe visitar a cada uno de sus clientes, satisfaciendo las restricciones del sistema y minimizando distancias recorridas. Para lograr dicho fin, se implementa el método exacto para ruteo de vehículos y el heurístico PFIH (*Push Forward Insertion Heuristic*, por sus siglas en inglés) de Marius Solomon, con los cuales, se obtuvieron dos soluciones para una instancia de 20 clientes distribuidos por jornadas laborales, este problema, también fue resuelto para instancias mayores y variación en las condiciones de operación del sistema. Para comparar dichas soluciones, se estableció el GAP para cada jornada laboral y un GAP global de la jornada completa, en términos de la distancia total recorrida, y otro del tiempo total en ruta del agente, los cuales determinaron que la distancia es minimizada por el modelo exacto de ruteo y el tiempo en ruta a través del PFIH.

Palabras clave: sistema de distribución, ventana de tiempo, programación de rutas, heurístico PFIH, modelo exacto, GAP.

ABSTRACT

The next project grade presented a study case in which a transportation problem is approached with the characteristics of the Traveling Salesman Problem with Time Windows TSPTW the distribution system of a manufacturer, marketer and distributor of food products in the Palmira town, in order to establish the design and programming of the route in which the traveling salesman must visit each of its customers, satisfying the constraints system and minimizing distances. To achieve this purpose, an exact method for vehicle routing problem and the heuristic PFIH (Push Forward Insertion Heuristic) of Marius Solomon are implemented, of which two solutions were obtained for an instance of 20 clients distributed workdays, this problem was also solved for higher levels and variation in operating conditions of the system. To compare these solutions, the GAP for each work day and a global GAP whole day are established, in terms of total distance traveled, and another the total time in route agent, which determined that the distance is minimized by the accurate model of routing and time in route through PFIH.

Keywords: system distribution, time window, programming of the routes, heuristic PFIH, exact method, GAP.

INTRODUCCIÓN

El sistema de distribución hace parte de la cadena de abastecimiento de las organizaciones, que enmarcado desde el enfoque logístico, se transforma en un factor indispensable en la toma de decisiones. Como lo expresa Chopra, el diseño de una red de transporte afecta el desempeño de la cadena, ya que establece la infraestructura dentro sobre la cual se toman las decisiones operacionales, tácticas y estratégicas integrando todos los procesos, administración y optimización de los mismos¹, esta realidad, lo que está generando son sistemas con mayor complejidad que deben ser capaces de adaptarse rápida y eficazmente a las exigencias del mercado, y a su vez, propiciar el logro de una mayor productividad y eficiencia en las operaciones de la organización.

En este trabajo, se introduce un análisis al sistema de distribución de un caso de estudio, el cual, por sus características se considera como un Problema del Agente Viajero con Ventanas de Tiempo (*Traveling Salesman Problem with Time Windows, TSPTW*). Con la finalidad de encontrar una propuesta de mejora en el diseño y programación de la ruta, se hace uso de dos técnicas de ruteo como son el método exacto y el heurístico PFIH de Solomon, teniendo en cuenta las restricciones del sistema, éstas son, las *ventanas de tiempo*² asociadas a los clientes y un vehículo sin restricción de capacidad, para una instancia inicial de 20 clientes. Con la realización de esta propuesta se espera que la empresa tenga una herramienta valiosa que le permita tomar decisiones sobre el sistema de distribución actual de sus productos, y para materializar dicho fin, en el contenido del siguiente documento se encuentran descritas detalladamente las fases de la investigación.

¹ (Chopra, y otros, 2008 pág. 395)

² Una *ventana de tiempo* es el horario de atención establecido por el cliente para que el vehículo arribe a él a prestar el servicio (Olivera, 2004 pág. 8).

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Un sistema de distribución hace parte del conjunto de decisiones claves en la gestión logística, éste absorbe en promedio, un porcentaje más alto de los costos que cualquier otra actividad de la misma, ya que oscilan entre uno y dos tercios de los costos totales, una fracción muy significativa que ha llevado a las organizaciones a tomar la decisión de introducir técnicas de investigación operativa con el fin de lograr la optimización de las redes en su sistemas de transporte, las cuales se expresan en una variedad de formas para la selección del modo, el diseño de la ruta, la programación de los vehículos y la consolidación del envío (Ballou, 2004).

Particularmente, las empresas tratan de reducir los costos logísticos de la cadena de abastecimiento especialmente, uno de los más representativos: *el transporte*, el cual es entendido como el movimiento del producto de un lugar a otro en su recorrido desde el principio de la cadena de suministro hasta el cliente final, éste se considera como una pieza importante de la cadena ya que los productos rara vez son fabricados y consumidos en la misma ubicación (Chopra, y otros, 2008), debido a esto se despliega el problema de distribuir productos o servicios desde ciertos depósitos a sus usuarios finales. Dicha problemática está implícita en el Problema de Ruteo de Vehículos (*Vehicle Routing Problem, VRP*) que es una generalización del Problema del Agente Viajero (*TSP*); en donde dado un conjunto de clientes, depósitos dispersos geográficamente y flota de vehículos, el objetivo es determinar un conjunto de rutas de costo mínimo que comiencen y terminen en los depósitos, para que los vehículos visiten todos los clientes.

Por su parte, las características de los clientes, depósitos y vehículos, así como diferentes restricciones operativas sobre las rutas, dan lugar a diferentes variantes del problema, tales como, ruteo con restricción de ventanas de tiempo (VRPTW),

ruteo con retorno en sentido contrario a la ida o *Backhauls* (VRPB), ruteo con recolección y entrega de órdenes (VRPPD) (Toth, y otros, 2002). El VRP es un problema de optimización combinatoria y perteneciente en su mayoría a la clase NP – Hard³ (NP – difícil) debido a la complejidad algorítmica y procesos computacionales de gran envergadura, este hecho, indudablemente incentiva la motivación académica por ser resueltos, pero consecutivamente se llega a la conclusión que no es posible construir algoritmos que en tiempo polinomial resuelvan cualquier instancia del problema⁴, a menos que $P = NP$.

El caso de estudio hace énfasis al sistema de distribución de una empresa de productos alimenticios (snacks), la cual en función de satisfacer los requerimientos de sus clientes, ubicados geográficamente en el municipio de Palmira, debe cumplir con los horarios de atención (*ventanas de tiempo*) que ellos mismos han establecido. Lo anterior, se traduce como una problemática que está atravesando la empresa, ya que distribuir los productos bajo esta restricción es una tarea de gran complejidad, originando que en algunas ocasiones el requerimiento del cliente no se logre satisfacer, y se den afectaciones económicas considerables en términos de la pérdida de ventas, bajo nivel de satisfacción y pérdida de los clientes, circunstancias que ya se han presentado y generan gran preocupación a los empresarios pues queda en evidencia la dificultad de la operación logística para la distribución de los productos.

La empresa cuenta actualmente con un vehículo que no tiene restricción de capacidad (la demanda de los clientes no supera la capacidad instalada del vehículo), y un único transportador, el cual, con el fin de cumplir con sus tareas asignadas, deriva situaciones en donde debe exceder la velocidad de viaje para llegar donde el cliente a tiempo antes del cierre de la ventana de tiempo, y así,

³Tipo de problema para el que no se dispone de algoritmos eficientes, los cuales, son los que proporcionan la solución óptima a un problema en un tiempo o complejidad que depende polinómicamente del tamaño del problema (Robusté, y otros, 2005).

⁴*Ibíd.*, p. 4-9.

cumplir con la distribución planeada del día, esto genera riesgos en la movilización a través del perímetro urbano, especialmente en las zonas escolares.

De igual manera, la situación expuesta también se presenta para diferentes tipos de organizaciones en las cuales prima dentro de su gestión de operaciones logísticas, una notable ineficiencia en la planeación y administración de procesos y recursos, generando explícitamente en la distribución de productos un incumplimiento de los requerimientos de los clientes y restricciones del sistema, y a su vez, un desconocimiento del nivel productividad de la labor realizada por su fuerza laboral.

1.2. Pregunta de investigación

El problema planteado de la empresa del caso de estudio, expresado en los costos del sistema de distribución de sus productos a los clientes invita a formular la siguiente pregunta:

¿Cómo debería ser el diseño de la ruta que le permita a la empresa, minimizar los costos asociados a la distribución de sus productos alimenticios satisfaciendo las restricciones de ventanas de tiempo establecidas?

1.3. Justificación

La elaboración de este proyecto se justifica por la necesidad latente que tiene el sistema de distribución de la empresa del caso de estudio, el cual, debe tener respuesta oportuna al comportamiento del mercado a través del aprovechamiento de sus recursos existentes, una adecuada planeación y sobre todo, el cumplimiento de las ventanas de tiempo asociadas a cada cliente como restricción del sistema. Por tal razón, se hace uso de técnicas de ruteo para la solución del problema del agente viajero con ventanas de tiempo (TSPTW), las cuales se enfocan en el mejoramiento del sistema de rutas actual de la empresa del caso de

estudio, convirtiendo el entregable en un insumo que le permita a la empresa tomar decisiones tácticas, operativas y estratégicas, ya que la importancia del diseño de rutas no sólo se enmarca desde el contexto de minimización de costos, sino que alcanza la satisfacción de los clientes y el aumento de los mismos.

En el trabajo se propone una metodología en la cual se realiza el estudio e implementación de métodos de ruteo basados en algoritmos exactos y heurísticos, como una oportunidad de mejora al sistema de distribución actual de la empresa del caso de estudio, con el fin de optimizar y generar mayor valor agregado en sus operaciones logísticas. Es por esto, que se debe establecer la programación de la ruta diseñando una herramienta ofimática, debido a que la empresa del caso de estudio actualmente no posee la capacidad financiera para invertir en la adquisición de la licencia de un software para el control de sus operaciones logísticas. Además es una PYME que no sería capaz de hacer uso de herramientas de optimización basadas en Programación Lineal Binaria.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Establecer el diseño de la programación de rutas para la distribución de productos alimenticios que permita realizar recorridos minimizando las distancias satisfaciendo las restricciones de ventanas de tiempo sin restricciones de capacidad.

2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar el caso de estudio y los elementos que interactúan en el proceso de distribución mediante la recolección de información.
- Formular un modelo para la distribución de los productos que cumpla con las restricciones del sistema mediante la aplicación del TSPTW.
- Verificar que los resultados obtenidos del modelo mejoran el proceso mediante la comparación con el estado actual del caso de estudio.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La gestión logística tiene dos objetivos principales: el primero es mover los materiales dentro, a través y fuera de su propia organización tan eficientemente como sea posible, mientras que el segundo objetivo es contribuir a un flujo eficiente a través de toda la cadena de suministro; dentro de sus principales componentes se encuentra el transporte quien es el responsable del movimiento físico de materiales entre diferentes puntos de la cadena de suministro y sobre el cual se deben tomar decisiones tales como el modo de transporte, transporte propio, tasa de transporte y ruteo de vehículos⁵ (Sarhadi, y otros, 2010 pág. 2).

Los sistemas de transporte, distribución y servicio al cliente han sido objeto de investigación en el área de logística. En la actualidad la tendencia en optimizar los procesos y operaciones logísticas ha mostrado una considerable complejidad de los problemas a resolver que tienen como propósito principal el mejorar la capacidad de proporcionar a sus clientes el cumplimiento en tiempos de respuesta y de la satisfacción, especialmente para las empresas que poseen gran dificultad en sus sistemas de distribución a través de la cadena de abastecimiento.

Diversos problemas han enfrentado los sistemas de distribución y de transporte, este eje temático ha sido de tema de investigación desde el siglo XIX dado que el objetivo principal es lograr la eficiencia en cada eslabón de la cadena. El ruteo de vehículos ó VRP es uno de los problemas de transporte más complejos y de mayor investigación, involucra una serie de famosos problemas de redes como lo son el conocido problema del agente viajero ó TSP; los problemas del VRP pueden ser clasificados en dos grandes grupos los problemas con origen y destino diferentes y los problemas con el mismo origen y destino (Holguín, 2010 pág. 423).

⁵En el ruteo de vehículos se toman decisiones relacionadas con el tamaño y tipo de la flota de transporte, programación y cumplimiento de los horarios, medición del servicio y optimización de los recursos usados en esta actividad logística.

Con el ánimo de abordar el problema del ruteo de vehículos VRP, los autores G. B. Dantzig y J. H. Ramser (1959) inicialmente presentan la primera formulación de programación lineal para obtener una solución al problema de encontrar la ruta óptima de una flota de camiones de reparto de gasolina donde la demanda fuera satisfecha y se minimizara la distancia recorrida. Los autores plantean, que no hay aplicaciones prácticas del método hasta ese momento, sin embargo se hicieron pruebas. Después, surgen entornos en donde la complejidad de rutear por las variables y restricciones de los sistemas, conllevan a que diversos autores estudien las diferentes variantes del VRP.

En los últimos 20 años el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW) ha sido un área de investigación que ha atraído a muchas personas, se han publicado muchos artículos con heurísticas y meta heurísticas que buscan una solución a este problema. La matemática, la informática y la investigación de operaciones han sido un apoyo para tratar de resolver el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (El-Sherbeny, 2010).

El VRPTW (*Vehicle Routing Problem Time Windows*, por sus siglas en inglés) es una de las variantes del VRP que se ha estudiado desde el siglo XX, dada la dificultad de esta clase de problemas se consideró el diseño y análisis de algoritmos para el problema de ruteo y programación de vehículos con restricciones de ventanas de tiempo describiendo una variedad de heurísticas como la de *Push Forward* (empujar hacia adelante), *Savings* (ahorros), *Nearest-Neighbor* (vecino más cercano), *Insertion* (inserción), y *Time-Oriented Sweep* (barrido de tiempo orientado); a los cuales se les evaluó su desempeño computacional en función del tamaño de los datos, tipos de variables y la flexibilidad o rigidez de las ventanas de tiempo (Solomon, 1985); se encontraron heurísticas que tuvieron un buen desempeño en escenarios diferentes especialmente una heurística de tipo inserción que presentó resultados consistentes. Más adelante, M. Desrosiers, M. W. P. Savelsbergh y otros (1988) presentan la formulación de algoritmos basados en la construcción, mejora y

optimización iterativa para la solución del problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo, igualmente, en ese año, M. Solomon y M. Desrosiers presentaron avances significativos para diferentes clases de ruteo con ventanas de tiempo como: el problema del agente viajero múltiple, problema de la ruta más corta, el problema del árbol de expansión mínima, el problema de las recogidas y entregas, ruteo multiperíodo y el problema del borde, ofreciendo perspectivas sobre futuras investigaciones acerca del tema⁶.

Dentro de la revisión bibliográfica se encontró un artículo muy interesante en el cual se examina la investigación en las metaheurísticas para el Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRPTW). El VRPTW puede ser descrito como el problema de diseñar al menor costo, las rutas desde un depósito a un conjunto de clientes distribuidos geográficamente. Las rutas deben ser diseñadas es un camino en el cual cada punto es visitado únicamente una vez por exactamente un vehículo en un intervalo de tiempo dado; todas las rutas inician y terminan en el depósito, y la demanda total de todos los puntos en una ruta particular no debe exceder la capacidad del vehículo. Las Metaheurísticas son un procedimiento de solución general que explora el espacio de soluciones para identificar buenas soluciones (Gendreau, y otros, 2002).

Otro problema que se relaciona con el ruteo de vehículos es el TSPTW (*Travel Salesman Problem Time Windows*, por sus siglas en inglés); debido a su parecido planteamiento al del TSP se han adoptado las técnicas de solución de éste, es más la mayoría de las técnicas de solución de los problemas de rutas son básicamente algoritmos del TSP pero con la incorporación de algún paso previo o posterior. Resulta por tanto imprescindible para quien quiera estudiar los problemas de rutas, un conocimiento profundo de los algoritmos del TSP por tanto, dada la dificultad computacional que requiere, este problema tenemos dos tipos de algoritmos posibles: Algoritmos exactos (Ramificación y Acotamiento) y algoritmos heurísticos.

⁶ (Time Window Constrained Routing and Scheduling Problems)

M. Gendreau, J. Yves Potvin y J. Rousseau (1998), presentan un modelo de programación con restricción lógica para el Problema del Agente Viajero con ventanas de tiempo (TSPTW) en el cual se obtiene un algoritmo de optimización de ramificación y acotamiento exacto sin ningún supuesto restrictivo de las ventanas de tiempo. A diferencia de los enfoques de programación dinámica cuyo rendimiento depende en gran medida de qué tan discretos son los datos, este algoritmo no sufre de problemas de espacio - complejidad. El mecanismo impulsado por los datos en su núcleo explota más a fondo las reglas desarrolladas en la investigación de operaciones mediante el uso de ellos, no sólo a priori sino también dinámicamente durante la búsqueda. El famoso banco de pruebas de Solomon, es el algoritmo fundamental para lograr mejores soluciones para algunos de los problemas en conjunto RC2 y fortalece la presunción de optimización de las mejores soluciones a los problemas conocidos en conjunto C2.

Uno de los artículos encontrados muestra una generalización del heurístico de inserción para el problema del Agente Viajero con Ventanas de Tiempo (TSPTW) en el cual el objetivo es la minimización del tiempo de viaje. El algoritmo gradualmente construye una ruta por inserción de cada paso en el vértice en esta vecindad de la ruta actual, y ejecuta una reoptimización local. Este es hecho mientras se chequea la factibilidad de una parte de la ruta restante y devolverse algunas veces es necesario. Una vez una ruta factible ha sido determinada, un intento es hacer la mejora por aplicación de una fase de post-optimización basada en la remoción sucesiva y reinserción de todos los vértices. En el artículo se desarrolla un test piloto con 375 casos indican que el heurístico propuesto comparado con un método alternativo, muy frecuentemente produce soluciones óptimas u óptimos cercanos (Laporte, y otros, 1998).

Por otra parte, cuando el problema se enmarca desde el enfoque de optimización a través de la investigación de operaciones, F. Focacci, A. Lody y M. Milano (2002) proponen para el TSPTW encontrar la ruta de menor costo combinando algoritmos de propagación con restricciones desde el punto de vista de la

factibilidad mediante un algoritmo híbrido exacto, permitiendo demostrar amplios resultados computacionales y la sinergia entre las técnicas utilizadas para resolverlo.

Más tarde, Larsen et al. (2013) abordan el problema de TSPTW con dinamismo en el cual examinan el problema del agente viajero con ventanas de tiempo para varios grados de dinamismo. En contraste para el problema estático, donde el despachador puede adelantar el plan, en la versión dinámica, parte o todo de la información necesaria está disponible únicamente durante el día de operación. Se enfoca a minimizar la tardanza y examinar el impacto de este criterio elegido en la distancia viajada. El enfoque en tardanza es motivado por el problema mostrado por proveedores de servicios de correo nocturno. Se propone como un método de solución en tiempo real que requiere el vehículo, cuando hay tiempo ocioso, para esperar la ubicación del cliente actual hasta que el servicio puede ser otro cliente sin empezar antes de tiempo. En adición, se desarrollan diversas versiones de este método que puede reponerse el vehículo para una ubicación diferente desde la ruta actual del cliente basada en una información a priori en los requerimientos futuros. El resultado obtenido en ambos aleatoriamente generando datos en un caso real indicando que todas las políticas proveen capacidad de una reducción de la tardanza.

Como conclusión de la revisión bibliográfica realizada, la mejor forma de abordar el problema que se enfrenta en este trabajo de grado es abordando el problema mediante dos alternativas, la heurística PFIH de Solomon y el método de solución exacta, una vez hecho esto se podrán comparar a través del GAP y esto permitirá determinar qué tanto se aproxima la heurística a la respuesta del modelo exacto.

4. MARCO TEÓRICO

El problema de ruteo de vehículos VRP, surge como una generalización del problema del agente viajero (TSP) en donde una persona debe visitar un número de clientes y regresar al lugar de partida, cuya solución consiste en construir la ruta que minimice la distancia que tiene que recorrer el agente. Igualmente, el VRP supone un conjunto de nodos a ser visitados (clientes) y una flota de vehículos inicialmente ubicados en el nodo de inicio (depósito), el objetivo es asignar rutas a los vehículos (secuencialmente) que minimicen el costo total de transporte o recorrido.

Investigaciones sobre el VRP, han determinado diferentes variaciones que pretenden aproximarse cada vez más a las situaciones de casos reales, una de éstas, particularmente es desarrollada en el presente documento tratándose del VRPTW (*Vehicle Routing Problem with Time Windows*), que por las características del sistema se considera como un TSPTW (*Traveling Salesman Problem with Time Windows*), cabe mencionar que, el TSPTW es un caso especial del VRPTW en el cual $C \geq d(V)$ y $K=1$, éste presenta un agente viajero que debe cumplir con determinadas ventanas de tiempo dadas por los clientes y una capacidad ociosa.

Según Olivera, el área del VRP ha crecido considerablemente en la búsqueda de algoritmos que permitan resolver los problemas de manera eficiente, estos modelos y algoritmos deben su éxito, en buena parte, a la evolución de los sistemas informáticos, puesto que ha permitido disminuir los tiempos de ejecución de los mismos⁷.

4.1. El problema del agente viajero (TSP)

En el problema del agente viajero se dispone de un sólo vehículo que debe visitar todos los clientes en una sola ruta y a un costo mínimo, no hay demanda asociada

⁷ (Olivera, 2004)

a los clientes y tampoco hay restricciones temporales⁸. En otras palabras, este es un problema donde el punto de origen y destino es coincidente y se busca, dado un conjunto de puntos a visitar y el costo del viaje (o distancia) entre cada uno de los posibles pares, encontrar la mejor manera de visitar todas las ciudades y volver al punto de partida al mínimo el costo de viaje (o la distancia de viaje) empleando un único vehículo (Matai, 2010).

4.2. Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRPTW)⁹

Toth y Vigo en el 2002, presentan la formulación del modelo matemático del VRPTW, representado por una red $G = (V, A)$ con un conjunto V de vértices, un conjunto A de arcos y K un conjunto de vehículos. Se tiene $V = \{0, n+1\} \cup N$, $N = V \setminus \{0, n+1\}$ representa el conjunto de clientes, $A = (\{0\} \times N) \cup I \cup (N \times \{0\})$, donde $I \subset N \times N$, es el conjunto de arcos conectados con los clientes, $\{0\} \times N$ contiene los arcos de regreso al depósito. Para cada cliente $i \in N$, existe una demanda asociada $d_0 = d_{n+1}$, y una ventana de tiempo para cada cliente $[a_0, b_0] = [a_{n+1}, b_{n+1}] = [E, L]$, siendo E y L la salida más temprano y la salida más tardía del depósito respectivamente. Por otra parte los tiempos de servicio son definidos para estos dos nodos $s_0 = s_{n+1} = 0$. Existen soluciones viables sólo si $a_0 = E \leq \min_{i \in V \setminus \{0\}} b_i - t_{0i}$ y $b_{n+1} = L \geq \min_{i \in V \setminus \{0\}} a_i + s_i + t_{i0}$. El modelo asume dos tipos de variables: *variables de flujo* x_{ijk} $(i, j) \in A$, $k \in K$, igual a 1 si el arco (i, j) es usado por el vehículo k y 0 de lo contrario; y *variables de tiempo* w_{ik} , $i \in V$, $k \in K$, especificando que el inicio de un servicio en un nodo i cuando es servido por el vehículo k , cuyo objetivo es diseñar rutas a un costo mínimo en donde cada cliente es servido exactamente una vez, cada ruta se origina en un vértice 0 y finaliza en el vértice $n+1$.

4.2.1. Formulación matemática del VRPTW

El modelo se describe de la siguiente manera:

⁸Ibíd., p. 8.

⁹(Toth, y otros, 2002 págs. 158 - 159)

$$(\text{VRPTW}) \text{ mín } \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} C_{ij} X_{ijk} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in \Delta+(i)} X_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in \Delta+(0)} X_{ojk} = 1 \quad \forall k \in K, \quad (3)$$

$$\sum_{i \in \Delta-(j)} X_{ijk} - \sum_{i \in \Delta+(j)} X_{jik} = 0 \quad \forall k \in K, j \in N, \quad (4)$$

$$\sum_{i \in \Delta-(n+1)} X_{i,n+1,k} = 1 \quad \forall k \in K, \quad (5)$$

$$X_{ijk}(w_{ik} + s_i + t_{ij} - w_{jk}) \leq 0 \quad \forall k \in K, (i,j) \in A, \quad (6)$$

$$a_i \sum_{j \in \Delta+(i)} X_{ijk} \leq w_{ik} \leq b_i \sum_{j \in \Delta+(i)} X_{ijk} \quad \forall k \in K, i \in N, \quad (7)$$

$$E \leq w_{ik} \leq L \quad \forall k \in K, i \in \{0, n+1\}, \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N} d_i \sum_{j \in \Delta+(i)} X_{ijk} \leq C \quad \forall k \in K, \quad (9)$$

$$X_{ijk} \geq 0 \quad \forall k \in K, (i,j) \in A, \quad (10)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, (i,j) \in A. \quad (11)$$

La función objetivo (1), es una formulación lineal que expresa el costo total de la ruta, En la ecuación 2 se restringe la asignación de cada cliente servido exactamente por un vehículo en una ruta, las ecuaciones 3 al 5 caracterizan el flujo de la ruta tomada por el vehículo k , por su parte de las ecuaciones 6 a 8 y 9 garantizan la viabilidad de la programación con respecto a consideraciones de tiempo y capacidad, respectivamente. Se debe tener en cuenta que para un k dado, la restricción de la ecuación 7 obliga a $w_{ik} = 0$ cada vez que el cliente i no es visitado por vehículo k . Por último, las condiciones de la ecuación 11 imponen condiciones binarias en las variables de flujo.

Las condiciones binarias de la ecuación 11 permiten a la ecuación 6 ser linealizada así:

$$w_{ik} + s_i + t_{ij} - w_{jk} \leq (1 - X_{ijk})M_{ij} \quad \forall k \in K, (i,j) \in A. \quad (12)$$

Donde M_{ij} es una constante muy grande, además puede ser reemplazado por el $\max\{b_i + s_i + t_{ij} - a_j, 0\}$, $(i,j) \in A$, y (6) solo necesita aplicarse para arcos $(i,j) \in A$

tal que $M_{ij} > 0$; de lo contrario cuando $\max\{b_i + s_i + t_{ij} - a_i, 0\} = 0$, estas restricciones satisfacen para todos los valores de w_{ik}, w_{jk} y X_{ijk} .

4.3. Heurísticas para el VRPTW

Para abordar el problema del VRPTW, existen heurísticas que tratan de abordar su complejidad de optimización combinatoria (NP–Hard). Los algoritmos para resolver problemas de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo pueden dividirse en métodos secuenciales y paralelos. Los procedimientos paralelos son caracterizados por la construcción de un número de rutas simultáneamente y los procedimientos secuenciales construyen una ruta a la vez hasta que todos los clientes son programados¹⁰. Para esta investigación se toman los métodos secuenciales puesto que la característica única del agente viajero es realizar un recorrido desde un centro depósito (CD) hasta volver a su punto de partida.

En el resumen documental que realiza Zhu Qili (1999), plantea que los algoritmos de búsqueda local representan una gran fracción de todos los heurísticos aplicables al problema en estudio, manifiestan que iniciando desde una solución factible inicial, los procedimientos de búsqueda local usan construcción de rutas, mejoramiento de rutas o métodos que integran construcción y mejoramiento de rutas simultáneamente; en su investigación los autores presentan la primer heurística moderna experimentada donde la configuración de ruteo inicial se obtiene a través del Heurístico de Inserción - empujar hacia delante o PFIH (*Push Forward Insertion Heuristic*, por sus siglas en inglés) donde un conjunto de movimientos de inserción e intercambio son caracterizados en la solución inicial en una manera sistemática hasta predefinir el número de iteraciones que alcanzan o no una mejora.

El heurístico de inserción fue propuesto por Marius Solomon (1985), en el cual expone que el servicio de un cliente $i, i=1, \dots, n$, implica la recogida y/o entrega de

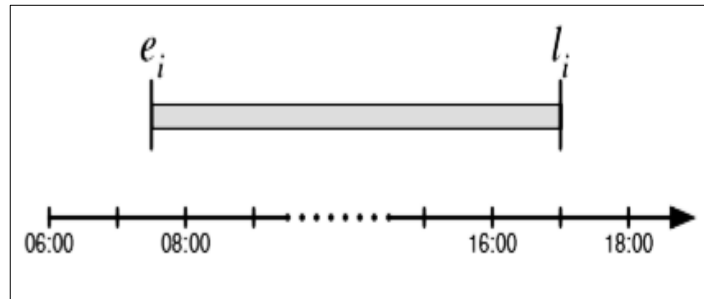
¹⁰ (Solomon, 1985)

bienes o servicios para S_i unidades de tiempo, el cual puede iniciar en un tiempo b_i dentro de una ventana de tiempo establecida por el cliente, una ventana de tiempo puede ser descrita como el periodo de tiempo durante el cual las entregas pueden ser realizadas a un cliente específico i (Joubert Johannes, 2006). Este lapso de tiempo se caracteriza porque existe:

- Hora de llegada más temprana permitida e_i , también conocido como tiempo de apertura.
- Última hora de llegada permitida l_i , también conocido como tiempo de cierre.
- Consideración de ventanas de tiempo suaves o duras.

En la Ilustración 1, se observa que el cliente i solicita entrega entre las 7:30 y 17:00 horas.

Ilustración 1. Ejemplificación de una ventana de tiempo



[Fuente: (Joubert Johannes, 2006)]

Cuando un vehículo llega demasiado pronto de un cliente i a otro cliente j , éste debe esperar para iniciar el servicio, es decir $b_j = \max \{e_j, b_i + s_i + t_{ij}\}$, donde t_{ij} es el tiempo de viaje entre los nodos i y j . Los costos de viaje del cliente i al cliente, están dado por $c_{ij} = \rho_1 d_{ij} + \rho_2 (b_j - b_i)$, $\rho_1 \geq 0$, $\rho_2 \geq 0$. Los vehículos salen del depósito, denotado por el nodo 0 y retornan en $n+1$ al terminar la ruta.

La importancia de la efectividad y eficiencia de esta heurística, es la forma en que las limitaciones de la ventana de tiempo se incorporan en el proceso de solución.

Para llevar a cabo el procedimiento, en primer lugar se examina las condiciones necesarias y suficientes para la viabilidad de insertar un cliente en la ruta, siendo u el cliente a insertar entre los clientes i_{p-1} , y i_p , $1 \leq p \leq m$ en una ruta parcialmente construida, $(i_0, i_1, i_2, \dots, i_m)$, $i_0 = i_m = 0$, para lo cual los tiempos de inicio de servicio b_i , para $0 \leq r \leq m$, son conocidos. Se parte bajo el supuesto que en un principio cada vehículo sale del depósito lo más temprano posible (e_0). Una vez creados los horarios completos de vehículos, se ajusta la hora de salida del depósito por separado para cada vehículo para eliminar cualquier tiempo de espera innecesaria. Siendo b_{ip}^{new} el nuevo tiempo, en el servicio a los clientes. Además de ello, el tiempo de espera w_{ir} en i_r , para $p \leq r \leq m$. Cuando se asume que la desigualdad triangular se mantiene tanto para las distancias y tiempos de viaje, esta inserción se define como *push forward* en la programación i_p :

$$PF_{IP} = b_{ip}^{new} - b_{ip} \geq 0 \quad (13)$$

Además,

$$PF_{ir+1} = \max\{0, PF_{ir} - w_{ir+1}\}, p \leq r \leq m - 1 \quad (14)$$

Si se tiene en cuenta desde un inicio asumir que cada vehículo deja el depósito en e_0 , se puede tomar ventaja de la máxima inserción posible hacia adelante. Si $PF_{IP} > 0$, algunos de los clientes i_r , $p \leq r \leq m$ podrían llegar a ser inviables. Por ello se debe examinar estos clientes de forma secuencial para viabilidad de tiempo hasta que se encuentre algún cliente, es decir i_r , con $r < m$, para el cual $PF_{ir} = 0$, o i_r es el tiempo infactible, o en el peor de los casos todos los clientes i_r , $p \leq r \leq m$ se examinan.

4.3.1. Push – Forward Insertion Heuristic (PFIH): Heurístico de Inserción - Empujar hacia delante.

El PFIH es un método para insertar secuencialmente clientes en una ruta, este heurístico fue introducido por Marius Solomon para crear la configuración inicial de

la ruta. 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 calculando la carga total, el tiempo de viaje y la cantidad de tiempo de llegada en el t_1 el cual es empujado hacia adelante, la inserción sólo se justifica si ninguna de las restricciones es violada.

Por lo tanto, la viabilidad de inserción para C_i necesita ser calculado por el control secuencial de los valores impulsados a futuro de todos los clientes del sucesor C_j de C_i . El valor de empuje hacia adelante de un cliente C_j es 0 si el tiempo de propagación por el cliente predecesor de C_j , por inserción de C_i dentro de la ruta, no afecta el tiempo de llegada t_j , 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 no sea factible para insertar un nuevo cliente que para el caso de estudio es la violación de la restricción de ventanas de tiempo.

La función de costo para la inserción de un cliente C_i como el primer nodo en una nueva ruta es la siguiente:

$$\text{Costo de Insertar } C_i \text{ como Primer Nodo} = -\alpha t_{0i} + \beta l_i + \gamma \left(\left(\frac{|p_i - p_j|}{360} \right) t_{0i} \right) \quad (15)$$

Donde,

- p_i : ángulo polar del cliente actual
- p_j : ángulo polar del último cliente visitado en la última ruta formada
- b_i : inicio del servicio en o ventana de tiempo inicial
- l_i : finalización del servicio o ventana de tiempo final

- 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.
- t_{ij} : distancia entre el nodo i y j , es decir, el tiempo esta medido en términos de la distancia.

Los clientes no enrutados con el costo más bajo son seleccionados como primer candidato a visitar. El ángulo de la coordenada polar con respecto al depósito en (14) es normalizada con respecto a la distancia y toda la expresión con unidades comunes.

Mediante la función de costo (15) 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 ventanas de tiempo; 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 con el mismo vehículo. El algoritmo del PFIH se describe a continuación:

PFIH-1: Inicie con una ruta vacía partiendo del depósito Establezca $r = 1$.

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

De lo contrario para todo cliente j no enrutado: Calcular el costo de la inserción al primer nodo como en (15) 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 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 del 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: Inicie 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.

En el algoritmo PFIH, se contempla el criterio de restricciones de tiempo y de capacidad, para ello el primer criterio se aplica para la formulación del modelo matemático del caso de estudio. Bajo el supuesto de que la demanda no excede la capacidad del vehículo, durante la formulación matemática se plantea una capacidad ociosa para la motocicleta, este criterio será evaluado en las instancias futuras.

5. CASO DE ESTUDIO

Considere una empresa productora y distribuidora de productos alimenticios (snacks) al sector educativo y tiendas del municipio de Palmira, que busca mejorar las operaciones del sistema de distribución actual con un buen nivel de satisfacción de los clientes. En la actualidad, la empresa cuenta con un (1) vehículo automotor y un (1) agente de reparto para visitar y satisfacer la demanda de los veinte (20) clientes ubicados en diferentes puntos geográficos del municipio.

Se desea determinar el diseño y la programación de la ruta que minimice la distancia total recorrida. La información disponible se presenta en los numerales siguientes:

1. Cada cliente ha dispuesto un horario de atención o *ventana de tiempo* para recibir los pedidos (Ver tabla 1).
2. Los 20 clientes se encuentran distribuidos en jornadas laborales, donde 12 y 8 clientes corresponden a la jornada de la mañana y tarde respectivamente. Esta situación se presenta debido a una interrupción entre las 12:00 a.m. y 2:00 p.m. en la cual el agente viajero dispone este intervalo de tiempo para almorzar.
3. El tiempo de servicio para cada cliente tiene una duración de diez (10) minutos.
4. La capacidad del vehículo es ilimitada debido a que la cantidad de productos demandada por los clientes no excede la capacidad instalada del vehículo.
5. La secuencia en la que el agente repartidor realiza el recorrido para los 12 clientes de la jornada de la mañana es: CD – 7 – 6 – 3 – 1 – 2 – 5 – 8 – 4 – 18 – 20 – 9 – 19 – CD, la cual tienen una distancia total de 20.51 Km; por otra parte, en el caso de los 8 clientes de la jornada de la tarde, la secuencia viene dada por: CD – 11 – 15 – 10 – 16 – 17 – 14 – 12 – 13 – CD, y la distancia total

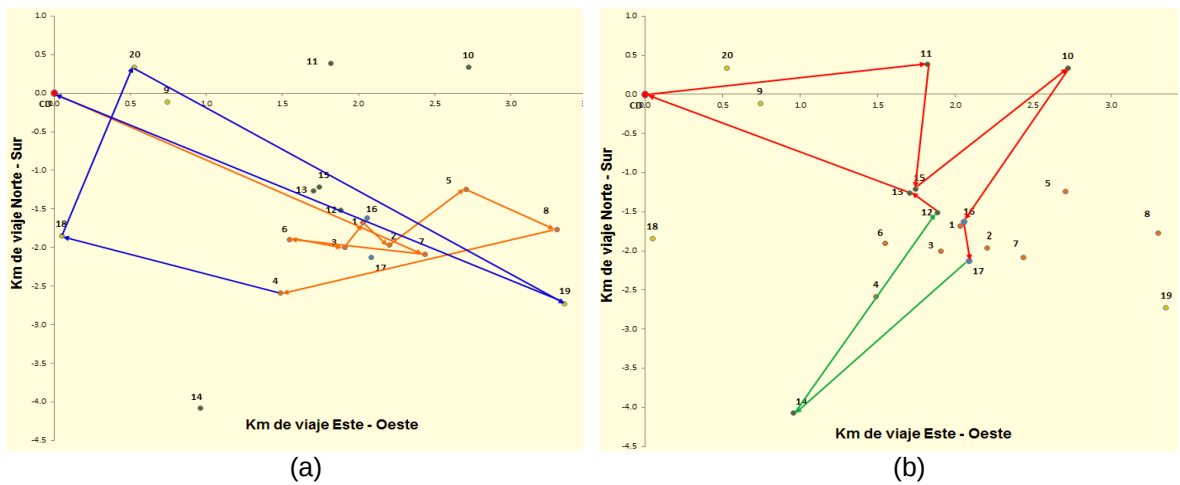
recorrida es de 16.36 Km (Ver gráfico 1). El cambio de color en las secuencias indica el cambio de la ventana de tiempo entre cada nodo.

Tabla 1. Datos de clientes

NOD O	CLIENTE	X (Km)	Y (Km)	VENTANA DE TIEMPO INICIAL (Hora)	VENTANA DE TIEMPO FINAL (Hora)	VENTANA DE TIEMPO INICIAL (Minutos)	VENTANA DE TIEMPO FINAL (Minutos)
0	CENTRO DEPÓSITO (CD)	353.89	392.32	06:50 a.m.	07:00 p.m.	410	1140
1	CLIENTE 1	355.92	390.64	07:00 a.m.	09:15 a.m.	420	555
2	CLIENTE 2	356.09	390.36	07:00 a.m.	09:15 a.m.	420	555
3	CLIENTE 3	355.80	390.32	07:00 a.m.	09:15 a.m.	420	555
4	CLIENTE 4	355.38	389.73	07:00 a.m.	09:15 a.m.	420	555
5	CLIENTE 5	356.60	391.08	07:00 a.m.	09:15 a.m.	420	555
6	CLIENTE 6	355.44	390.42	07:00 a.m.	09:15 a.m.	420	555
7	CLIENTE 7	356.33	390.23	07:00 a.m.	09:15 a.m.	420	555
8	CLIENTE 8	357.19	390.55	07:00 a.m.	09:15 a.m.	420	555
9	CLIENTE 9	354.64	392.21	10:00 a.m.	12:00 m.	600	720
10	CLIENTE 10	356.61	392.66	02:00 p.m.	04:00 p.m.	840	960
11	CLIENTE 11	355.71	392.71	02:00 p.m.	04:00 p.m.	840	960
12	CLIENTE 12	355.77	390.81	02:00 p.m.	04:00 p.m.	840	960
13	CLIENTE 13	355.60	391.06	02:00 p.m.	04:00 p.m.	840	960
14	CLIENTE 14	354.85	388.25	02:00 p.m.	04:00 p.m.	840	960
15	CLIENTE 15	355.63	391.11	02:00 p.m.	04:00 p.m.	840	960
16	CLIENTE 16	355.95	390.71	04:00 p.m.	07:00 p.m.	960	1140
17	CLIENTE 17	355.97	390.19	04:00 p.m.	07:00 p.m.	960	1140
18	CLIENTE 18	353.94	390.48	10:00 a.m.	12:00 m.	600	720
19	CLIENTE 19	357.25	389.60	10:00 a.m.	12:00 m.	600	720
20	CLIENTE 20	354.42	392.66	10:00 a.m.	12:00 m.	600	720

[Fuente: Autor]

Gráfico 1. Secuencia recorrida por el agente repartidor en la jornada de la mañana (a) y en la jornada de la tarde (b).



[Fuente: Autor]

Ante lo anteriormente mencionado, se cuestionaría lo siguiente: ¿cuál es el factor de circuito de la municipalidad para calcular distancias reales?, ¿cómo sería una ruta básica con un método exacto y el heurístico PFIH?, ¿qué pasaría si se incorporaran más clientes para despachar los productos o si alguno de ellos cambiara la ventana de tiempo? y ¿en qué favorecería negociar las ventanas de tiempo con los clientes?.

6. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

La información detallada del sistema de distribución fue suministrada por la empresa del caso de estudio del capítulo 5, la cual, realiza desde el CD los despachos de sus productos en un horario de atención establecido por los clientes mediante un agente de reparto. Inicialmente, se hace una recopilación de datos, estos son organizados y tabulados como información de entrada para los métodos de solución propuestos. De esta manera, los elementos que interactúan en el sistema se puntualizan en este apartado.

6.1. Centro de Distribución

En la actualidad, el depósito (CD) de producto terminado se encuentra ubicado en la comuna uno¹¹ del municipio de Palmira, en el departamento del Valle del Cauca, en el cual se realizan las principales operaciones del sistema de distribución de la empresa, en primer lugar, se carga el producto al vehículo de acuerdo a los pedidos de los clientes, se detalla en el rutero¹² el recorrido y finalmente, se entrega al agente distribuidor la ruta establecida en función de los horarios de atención de los clientes. La importancia de un CD está determinada por una adecuada planeación del flujo de materiales, en donde están involucrados los procesos de almacenamiento y despacho de la mercancía a los clientes en el tiempo oportuno.

Las operaciones del CD inician a las 6:50 a.m. con el alistamiento del producto, el cual es embalado y cargado en el vehículo para su posterior distribución, esta actividad se realiza en un intervalo de tiempo de 10 minutos, una vez realizado este paso, se hace la entrega de la programación de la ruta al agente viajero, el

¹¹ Comunas en Colombia se refiere a una unidad administrativa de una ciudad media o principal del país que agrupa sectores o barrios determinados.

¹² La empresa define rutero como el libro donde se establecen las prioridades de despacho del producto terminado con el criterio de ventanas de tiempo, para entregar al agente repartidor la programación de la ruta a seguir en cada jornada laboral.

cual inicia su recorrido a las 7:00 a.m. para cubrir los clientes asignados de tipo prioritario en términos de ventana de tiempo. El CD cierra a las 7 p.m.

6.2. Clientes

Como ya se presentó en el caso de estudio, los clientes establecen a sus proveedores horarios de atención o teóricamente denominados ventanas de tiempo. En particular, la empresa distribuye actualmente a un conjunto de veinte (20) clientes, los cuales corresponden a colegios, instituciones educativas, universidades y tiendas de barrio, ubicados geográficamente en diferentes zonas del municipio, éstos están distribuidos en 12 y 8 clientes a atender en la jornada de la mañana y tarde respectivamente. El detalle de las ventanas de tiempo y ubicación de los clientes se presenta en la tabla 1 del capítulo 5, así mismo la ubicación de cada uno con respecto al CD se muestra en el Gráfico 1.

El recorrido inicia partiendo del CD a las 7:00 a.m., visitando cada cliente perteneciente a la jornada de la mañana hasta las 12:00 m., aquí inicia una interrupción de la jornada laboral debido a que el agente repartidor destina este lapso de tiempo de dos (2) horas para el almuerzo, después, inicia el segundo recorrido para los clientes de la jornada de la tarde desde el CD a partir de las 2:00 p.m. hasta las 7:00 p.m. horario en el cual se cierra la ventana de tiempo del CD, es importante mencionar que el CD tiene jornada continua.

6.3. Vehículo

El vehículo de transporte de la empresa es una motocicleta *C-100 Honda* con un cilindraje de 110 centímetros cúbicos, la cual, tiene instalado en la parte posterior un furgón donde se carga el producto para cada recorrido. El transportador se desplaza en el vehículo a una velocidad de 30 km/h (Ministerio de Transporte, 2010), dado a que esta, es la que actualmente se encuentra regulada para el tránsito vehicular dentro del perímetro urbano, especialmente cuando se trata de

zonas escolares. El horario de uso del vehículo durante toda la jornada laboral es de las 7:00 a.m. a 12 m. y de 2:00 p.m. hasta las 7:00 p.m.

7. PROCESO METODOLÓGICO

En este capítulo se propone una metodología para el ruteo de vehículos con ventanas de tiempo sin restricción de capacidad, la cual, tiene como finalidad presentar una herramienta sofisticada, que le permita a la empresa del caso de estudio realizar el diseño y programación de las rutas por jornadas laborales, administrando de manera eficiente sus recursos actuales. La metodología que se presenta a continuación, se encuentra fundamentada en la aplicación de un algoritmo exacto para ruteo de vehículos, presentado inicialmente por Desrochers, Savelbergh y otros autores (1988), más tarde desarrollado por Toth y Vigo (2002), por otra parte, se implementa el algoritmo heurístico PFIH de Marius Solomon (1985). Estos métodos permiten determinar unos resultados que al final son comparados, y así, generar un impacto positivo en el sistema de distribución de la empresa como se expresa en los capítulos siguientes.

7.1. Cálculo de las distancias

7.1.1. Cálculo de la posición de los nodos

Cuando se han identificado los clientes y sus respectivas ubicaciones se tiene como primer paso calcular las distancias a las cuales se encuentran del centro de distribución (CD), en otras palabras, reorganizar los datos de la posición geográfica en función de la ubicación cartesiana del CD; para ello se hace necesario el uso de la herramienta ofimática Excel®¹³ y del software Google Earth™ (Keyhole Inc. , 2005) para el cálculo y el procesamiento de los datos.

Para iniciar se realiza la estructuración de una tabla donde se insertan los datos preliminares en la hoja electrónica de Excel®, cada columna de la tabla se denomina de la siguiente manera: nodo, cliente, ubicación¹⁴, latitud y logitud¹⁵,

¹³Aplicación de Microsoft Office® para hojas de cálculo

¹⁴ La ubicación está dada por la dirección en la cual se encuentran dentro de la municipalidad y que por motivos de confidencialidad de la empresa proveedora de los datos no se muestran.

coordenadas cartesianas¹⁶ (X,Y) en unidad de Kilómetros (Km), obtenidas mediante la aplicación de la proyección geodésica (sistema UTM¹⁷) suministradas por la herramienta de Google Earth™, posterior a ello, éstas coordenadas son centradas en el plano cartesiano; se toma como referencia el punto $(X_0, Y_0) = (0,0)$, correspondiente al CD o nodo origen (0) y se resta así mismo para generar el punto de origen, es decir la operación $X_0 = X_{CD} - X_{CD}$ para el eje X, después, se realiza la operación equivalente para $Y_0 = Y_{CD} - Y_{CD}$ para el eje Y. Los datos generados después de estos cálculos se presentan en el anexo 1.

7.1.1.2. Matriz de distancias

Después de la identificación y localización de los clientes de la empresa del caso de estudio, se elabora la matriz de distancias, ésta da una aproximación real de la ubicación de cada cliente con referencia al CD o entre los mismos. Particularmente, en las diferentes técnicas y herramientas que permiten elaborar mapeo para la proyección de un globo sobre el plano, se pueden generar errores computacionales que varían dependiendo del método de proyección y del lugar donde se calculan las distancias sobre el mapa; una técnica confiable es utilizar coordenadas de latitud - longitud y la Ecuación de Haversine (Ballou, 2004).

La Ecuación de Haversine, considera dos puntos de una esfera (de radio R) con latitudes ϕ_1 y ϕ_2 , cuya separación latitudinal $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ y separación $\Delta\lambda$ longitud, donde los ángulos están en radianes, la distancia d entre los dos puntos está relacionada con su ubicación¹⁸ mediante (16).

$$\text{Haversine} \left(\frac{d}{R} \right) = \text{haversine} (\Delta\phi) + \cos(\phi_1) * \cos(\phi_2) \text{haversine}(\Delta\lambda) \quad (16)$$

¹⁵ Google Earth™ con las ubicaciones insertadas permite calcular la posición longitudinal y latitudinal en los formatos de grados y números decimales para cada localización de los clientes. La medición de coordenadas, también fue realizada por GPS.

¹⁶ También llamadas coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*) que comparadas con la herramienta presentada en Excel® por http://www.elgps.com/documentos/utm/coordenadas_utm.html, coinciden los datos calculados en la herramienta diseñada en la hoja electrónica de los autores.

¹⁷ (Universidad de Valladolid).

¹⁸ (Amaya Jaramillo, 2010)

Donde la función Haversine es:

$$\text{Haversine}(\theta) = \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) = \left(\frac{1 - \cos(\theta)}{2}\right) \quad (17)$$

Según Díaz (2012) cuando se realiza el despeje de la distancia de la ecuación 16 se obtiene una nueva ecuación que muestra algunos problemas para ciertos hemisferios, para solucionarlo en este trabajo se presenta la fórmula directa de la distancia de Haversine:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (18)$$

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 \quad (19)$$

$$A = \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right) \quad (20)$$

$$C = 2 \cdot \text{atan2}(\sqrt{A}, \sqrt{1-A}) \quad (21)$$

$$d = R \cdot C \quad (22)$$

Donde,

- d: distancia entre los dos (2) puntos
- R: radio de la esfera
- φ : latitud
- λ : longitud
- $\Delta\varphi$: diferencia de latitud
- $\Delta\lambda$: diferencia de longitud
- $\Delta\sigma$: ángulo central de la esfera

El radio R que se utiliza para los cálculos es el radio medio de la Tierra, que es aproximadamente¹⁹ 6371,01 Km. Para aplicar la ecuación 16, se toman los datos que se muestran en el anexo 1, y se calculan los datos de latitud y longitud en grados (°) decimales, éstos se calcularon de igual manera, a través del software

¹⁹Ibíd., p. 32.

de soporte mencionado para comparar la solidez de los datos, es importante aclarar, que en el estudio de la Ecuación de Haversine se hace necesario que las posiciones latitudinales y longitudinales se conviertan a radianes²⁰.

Luego de detallar la primera etapa de construcción de la matriz de distancias, se procede a calcularla haciendo uso de la Ecuación de Haversine despejada como se muestra en las ecuaciones 18-22, las cuales, permiten el cálculo de la distancia entre cada nodo. Este proceso se realiza sucesivamente hasta completar la matriz de distancias. En la tabla 2 se puede apreciar una fracción de la matriz de distancias calculada:

Tabla 2. Fracción de la matriz de distancias [Km]

Nodo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	2.58	2.90	2.70	2.92	2.95	2.39	3.16	3.72	0.75	2.75
1	2.58	0	0.34	0.34	1.06	0.81	0.53	0.58	1.28	2.02	2.14
2	2.90	0.34	0	0.30	0.95	0.89	0.66	0.26	1.11	2.35	2.38
3	2.70	0.34	0.30	0	0.73	1.10	0.38	0.54	1.41	2.20	2.48
4	2.92	1.06	0.95	0.73	0	1.82	0.70	1.07	1.98	2.58	3.19
5	2.95	0.81	0.89	1.10	1.82	0	1.34	0.89	0.81	2.26	1.59
6	2.39	0.53	0.66	0.38	0.70	1.34	0	0.47	0.86	1.81	2.32
7	3.16	0.58	0.26	0.54	1.07	0.89	0.47	0	0.52	2.13	2.44
8	3.72	1.28	1.11	1.41	1.98	0.81	0.86	0.52	0	2.08	2.16
9	0.75	2.02	2.35	2.20	2.58	2.26	1.81	2.13	2.08	0	1.08
10	2.75	2.14	2.38	2.48	3.19	1.59	2.32	2.44	2.16	1.08	0

[Fuente: Autor]

Hay un aspecto importante en este punto de la investigación, y es la característica de simetría de la matriz anterior; esto, se puede expresar como información que requiere moldearse con mayor firmeza, pues cuando se ha demostrado que en ciertas ocasiones no es lo mismo para el agente viajero desplazarse de un nodo A a un nodo B y devolverse, en términos de la distancia recorrida, debido a la configuración de la red de calles o rasgos geográficas que hacen que la hipótesis de simetría, tenga algo de incertidumbre y se puedan usar los datos de manera errada. Para dar solución a este hecho, se calcula el factor de correlación o de

²⁰ Para la conversión de los datos a radianes se hace uso de la fórmula de Excel® equivalente a =RADIANES(ángulo), en la cuál es ángulo es la posición latitudinal o longitudinal en la celda correspondiente.

circuito que permite una mejor aproximación de los datos hallados. Dicho de otro modo, las distancias calculadas pueden llegar a subestimar la distancia real entre los dos puntos, dado que el agente viajero no viaja en línea recta en un plano, éste, se desplaza a través de una red de calles y carreteras que conforman las vías de la municipalidad, y por ende, para dar tratamiento a esta característica y ajustar las distancias calculadas, se halla el factor de circuito del municipio de Palmira. Por tanto, los datos de las posiciones latitudinales y longitudinales, como ya se mencionó anteriormente, son obtenidos con la asistencia del software²¹ Google Earth™, permitiendo calcular las distancias rectilíneas en función del CD; por otra parte, para las distancias reales se hizo uso del software Google Maps™, que determinó resultados que permiten una aproximación a la condición real de la configuración vial de la municipalidad, y las distancias de recorrido en un día normal de trabajo del agente viajero.

Para la obtención del factor de circuito o de correlación²², se hace uso de la regresión lineal entre las distancias rectilíneas y las distancias calculadas, el valor obtenido para el municipio de Palmira es de 1,12. En el gráfico 2, se ilustra la tendencia de los datos, de los cuales, la pendiente de la ecuación de la línea recta es el factor de circuito o de correlación obtenido para la municipalidad donde opera el agente viajero.

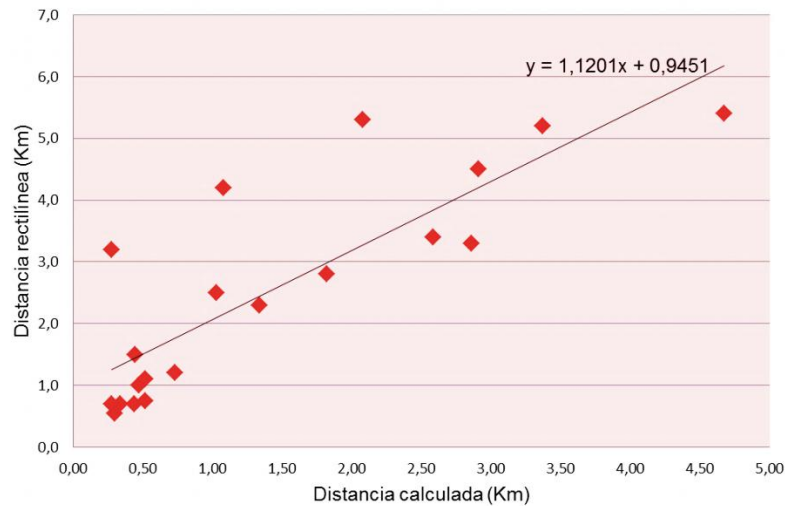
Después de hallar el factor de circuito, éste se debe multiplicar por la matriz de distancias calculada, para obtener las distancias reales en unidades de Kilómetros (Km), posteriormente, se genera una nueva matriz en unidades de minutos, con el fin de que pueda ser usada en la función de costo del heurístico utilizado, la cual, se presenta más abajo. La matriz ampliada, permite el cálculo de la matriz de costos con unidades métricas de [km] que multiplicada por un costo de operación

²¹ Tanto Google Earth™ y Google Maps™ contienen la aplicación de GPS (*Global Positioning System* por sus siglas en inglés).

²² También conocido como factor de conversión, el valor se obtiene calculando la pendiente de la Ec. de la línea de tendencia de los datos entre las distancias reales versus las distancias rectilíneas.

[\$/km], determina los costos de transporte (bajo el supuesto de que el consumo de combustible tiene un comportamiento lineal).

Gráfico 2. Factor de Circuito del municipio de Palmira



[Fuente: Autor]

El procedimiento para realizar la conversión de los datos de la matriz distancias reales a minutos es el siguiente:

- i. Se toma el valor de la velocidad de la moto a la que viaja el agente que en este caso una velocidad promedio 30 Km/h y se convierten a Km/min dado que los datos de tiempo serán tratados en minutos durante la implementación de los métodos de ruteo.
- ii. Seguidamente, se aplica la fórmula del movimiento uniforme rectilíneo que equivale a:

$$Tiempo = \frac{Distancia}{Velocidad} \text{ ó } T = \frac{X}{V} \quad (23)$$

Donde, X es la distancia recorrida y V es la velocidad de viaje; con esta información se procede a dividir los valores de la matriz de distancias reales en la velocidad que está en Km/min para obtener los resultados en unidades de minutos

únicamente. Finalmente, la matriz de distancias ha sido convertida a minutos para ser usada durante el desarrollo de las técnicas de solución para el TSPTW.

7.2. Diseño y programación de la ruta mediante heurístico PFIH de Marius Solomon

Para resolver el problema del TSPTW para $n=20$ clientes, se hace uso del algoritmo heurístico PFIH, propuesto por Marius Solomon (1985), el cual, consiste en insertar clientes en nuevas rutas inicializándose con una función de costo (ecuación 15) para la inserción de un cliente C_i como el primer nodo en una nueva ruta como se mencionó en el capítulo 4 numeral 4.3, esta es:

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

El t_{0i} hace parte de los datos de la matriz de distancia convertida en unidades de tiempo²³ y que es usada en el desarrollo del algoritmo. El ángulo de la coordenada polar con respecto al depósito, es normalizado con respecto a las distancias centradas para el uso unidades comunes y ratificar la coherencia de los datos obtenidos en la aplicación del algoritmo heurístico. Para inicializar el PFIH, es importante conocer las ventanas de tiempo asociadas a cada cliente, en la hoja de cálculo se han organizado estos datos ubicando el inicio y el final de cada ventana de tiempo en unidades de minutos. En este punto, también se deben conocer los ángulos polares de cada nodo, el procedimiento es tomar como datos de referencia las coordenadas (X,Y) centradas y obtener este ángulo mediante la función de Excel® equivalente a $\text{ángulo polar} = \text{ATAN2}(X,Y)$ para cada cliente.

Por otra parte, el criterio de selección para diseñar la ruta, como se mencionó anteriormente, se realiza mediante función de costo (ecuación 15), para la cual, se establecen tres factores de peso para las variantes de distancia total recorrida por un vehículo ($\alpha=0.7$), factor de peso para el tiempo de llegada tardía de un cliente ($\beta=0.2$), factor de peso para la diferencia en ángulos de las coordenadas polares

²³ Las unidades de tiempo para la aplicación de las técnicas de ruteo serán en minutos.

($\gamma=0.1$), estos son valores definidos empíricamente (Zhu Qili, 1999)²⁴, una vez conocidos los factores de peso y la matriz de distancias calculada en minutos (Ver anexo 2), se inicia la iteración²⁵ en donde se escoge el primer cliente para la ruta actual, y seguido a ello se van asignando de menor a mayor costo, se realizan las iteraciones a que haya lugar, hasta que se asigne el último cliente, los resultados determinados por este algoritmo cumplen con las restricciones de ventanas de tiempo establecidas y establecen la secuencia que el agente viajero debe seguir.

De este modo, se calcula el costo de inserción para todos los clientes no enrutados, eligiendo de ellos el cliente que minimiza el costo total de la inserción²⁶ y que el agente repartidor cumpla a su vez, la ventana de tiempo; entonces, siguiendo el algoritmo, cuando se ha seleccionado el primer cliente j^* (cliente 8) para la primera iteración que ha sido enrutado puesto que tiene el menor costo de inserción y es factible en términos del cumplimiento a las ventanas de tiempo. Los costos de inserción calculados, se organizan en orden ascendente, para elegir el cliente candidato a enrutarse y que minimiza el costo de la ruta; o en este caso, se hizo uso de una fórmula de la hoja electrónica que busca y elige el mínimo valor resaltado.

Cuando se ha identificado el cliente a insertar en la ruta actual, es necesario el cálculo de otros ítems, como la hora de llegada y salida, y además, validar el cumplimiento de la ventana de tiempo. Para calcular la hora de llegada del agente viajero al cliente i se usa:

Inicio de servicio para el cliente i =

$$\{ \text{Tiempo de finalización del servicio del cliente } i - 1 + \text{Tiempo en ruta del nodo } i \text{ a } j \} \quad (24)$$

En términos de la notación del PFIH sería:

²⁴ Págs. 32-34

²⁵ Los pasos del PFIH o heurístico de inserción se pueden consultar en el capítulo 4 numeral 4.3.

²⁶ Para elegir el cliente se hace uso de la ecuación = MIN(rango de datos) en la hoja electrónica.

$$b_i = s_{i-1} + t_{ij} \quad (25)$$

Como se requiere el tiempo que el agente viajero recorre la ruta se calcula haciendo uso de la ecuación 23 para cada nodo, en el caso del cliente 8 se expresa como sigue:

$$Tiempo(t_{ij}) = \frac{5.57 (Km)}{0.75 \left(\frac{Km}{min}\right)} = 7.42 min$$

Ahora, para calcular la hora de llegada al nodo del cliente 8 elegido como primer cliente a insertarse en la ruta después de salir del CD, se usa la ecuación 25:

$$b_i = \{410 min + 8.33 min\}$$

$$b_i = \{418.33 min\}$$

Este resultado muestra que el agente viajero no cumple la ventana de tiempo, como ocurre para algunos casos, por tanto, él debe realizar una espera de 1.67 minutos, para iniciar el servicio s_i al momento que la ventana de tiempo más temprana de inicio (e_0), esta es de 420 minutos. Por otra parte, se requiere calcular también la hora de salida del agente, la cual, viene determinada por la hora de llegada más el tiempo de servicio s_i , es decir:

Hora de salida del nodo i =

$$Tiempo de inicio del servicio del nodo i + Tiempo de servicio para el nodo i \quad (26)$$

O en términos de notación PFIH:

$$b_{i-1} = \{b_i + s_i\} \quad (27)$$

Donde b_i es el tiempo de inicio del servicio para el cliente i y s_i es el tiempo de servicio para el cliente i, por ejemplo para el cliente 8 se calcula de la siguiente manera:

$$Hora de salida = 420 min + 10 min$$

$$Hora de salida = 430 min$$

En la primera iteración, se observa que el primer cliente a enrutar le corresponde al número 8, sus ventanas de tiempo tanto b_o (e_o , l_o) son cumplidas, y en este proceso, se aprecia un tiempo improductivo que consta de la espera realizada antes de la apertura de la ventana de tiempo del cliente, esto indica que cabe la posibilidad de enrutar un nuevo cliente que tenga una ventana de tiempo similar y esta pueda ser satisfecha. El resumen de la iteración 1 es la que se muestra a continuación en la tabla 3.

Tabla 3. Primera iteración del heurístico PFIH

ITERACIÓN 1		
Cliente	Costo Inserción C8	Validación
1	106.95	Hora de salida
2	106.45	420.00
3	106.76	
4	106.42	
5	106.38	
6	107.26	0.50
7	106.05	Distancia de depósito al cliente 8 (km)
8	105.17	
9	142.83	
10	187.68	4.16
11	189.06	Tiempo en ruta mínimo
12	188.29	8.33
13	188.78	Hora llegada
14	185.54	418.33
15	188.75	Cumple ventana
16	223.98	SI
17	223.42	Capacidad
18	141.23	Se cumple por suposición
19	137.30	Tiempo de servicio (min)
20	142.93	10

Primer cliente que minimiza el costo total de la inserción en la ruta actual

	INICIAL (eo) (min)	FINAL (lo)(min)
Ventana de tiempo	420	555
Intervalo Si	418	420
Tiempo ocioso*	1.67	135.00

Mínimo	105.17
--------	--------

[Fuente: Autor]

Luego de insertar el primer cliente, y validar que este cumple con las ventanas de tiempo, se procede a calcular nuevamente el costo de insertar un nuevo cliente en la ruta actual, según el paso 5 del PFIH. Después de obtener los costos, se selecciona nuevamente el cliente que tiene el menor costo para ser insertado en la ruta, para el cual, se debe realizar la validación del cumplimiento de las ventanas

de tiempo establecidas para ese nodo. La iteración 2 puede ser observada en el anexo 3), el cual, muestra todos los datos del segundo cliente enrutado. Este procedimiento, se realiza hasta que los 20 clientes son asignados cumpliendo con la restricción asociada.

7.3. Diseño y programación de ruta mediante el método exacto

Se hace uso de la formulación del modelo matemático, presentada en el capítulo 4 numeral 4.2.1, la cual es implementada mediante el lenguaje de programación AMPL (por sus siglas en inglés, A Modeling Language for Mathematical Programming), utilizando la plataforma de uso libre disponible en internet, NEOS SERVER²⁷ MINTO. Este programa está dirigido a la resolución de modelos de optimización, fundamentalmente modelos de Programación Lineal, Programación Entera, Programación Entera Mixta y Programación No Lineal (Universidad de Valladolid, 2012). En AMPL se procede a crear primero tres ficheros, conteniendo en el primero, el modelo, en el segundo, los datos del problema y en el tercero, los comandos que se van a ejecutar, estos archivos son introducidos en el servidor y resueltos en un tiempo computacional que depende del tamaño y la complejidad del problema.

7.4. Condiciones a variar del TSPTW

7.4.1. Inclusión de nuevos clientes

Una vez se ha resuelto el problema del TSPTW para 20 clientes, se propone desarrollar ambos métodos de solución para una instancia de 24 clientes, la cual se compone de 15 y 9 clientes pertenecientes a la jornada de la mañana y de la tarde respectivamente, posteriormente, se desarrolla el problema a una instancia mayor, esta es de 30 clientes, donde las jornadas se encuentran divididas en 19 y 11 clientes correspondientes a la mañana y la tarde respectivamente.

²⁷ Esta plataforma posee variados solvers que se utilizan de acuerdo con especificaciones y variantes del modelo, los solvers implementados por el NEOS utilizan para la solución de problemas el lenguaje AMPL y trabajan sobre los paquetes de optimización CPLEX y MINOS.

7.4.2. Variación de la velocidad del vehículo

En esta situación, se realiza una variación de la velocidad de viaje del vehículo en el cual el agente realiza el recorrido de distribución de productos, con una velocidad de viaje de 30 Km/h (reglamentaria) la cual se disminuye a 27Km/h y posteriormente a 20 Km/h, manejando el supuesto de un aumento del tráfico en la municipalidad y que las condiciones de movilidad son más complejas; la velocidad de viaje es un factor determinante e influyente en el sistema de distribución de la empresa caso de estudio.

7.4.3. Negociación de ventanas de tiempo

Este escenario plantea la negociación de ventanas de tiempo, desarrollada a través de la variación de las condiciones de dos clientes, el primero, es el cliente 8 para el cual se utiliza el supuesto de que éste permite una expansión de la ventana de tiempo final, concediendo atender al agente repartidor a las 10:30 a.m. *[555 minutos]*, cuando generalmente lo recibe a las 9:15 a.m. *[630 minutos]*; el segundo, es el cliente 18, el cual pertenece al grupo de la jornada de la mañana quien después de concretar la negociación asigna su horario de atención en horas de la tarde, trasladando su horario de servicio para que el agente arribe entre las 4:00 y 7:00 p.m. *[960,1140 minutos]*.

8. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de la solución al problema original planteado en el caso de estudio, para ello, se implementó el modelo exacto²⁸ de ruteo de vehículos sin restricción de capacidad y se comparó con el resultado obtenido al utilizar el heurístico de Inserción PFIH de Solomon, el problema fue resuelto para una instancia inicial de 20 clientes distribuidos por jornadas laborales. Los resultados obtenidos a través de los métodos utilizados fueron comparados y se determinó el GAP²⁹ que hay entre ellos. De igual manera, estos procesos fueron realizados para diferentes escenarios como instancias futuras con una inclusión de 24 y 30 clientes, variación de la velocidad del vehículo, inicialmente a 27 Km/h y posteriormente a 20 Km/h, y por último, se plantea una negociación de ventanas de tiempo con el cliente.

8.1. Resultados del agente viajero con ventanas de tiempo TSPTW

8.1.1. Resultados del TSPTW para la instancia con 20 clientes

A continuación se presentan los resultados obtenidos al resolver el problema del caso de estudio mediante el método exacto y el heurístico PFIH. Las secuencias establecidas por cada uno de los métodos para los 12 clientes de la jornada de la mañana se presentan en la tabla 4. El programa de visitas se presenta en la tabla 5 y 6, para el método exacto y el PFIH respectivamente.

Tabla 4. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW para 12 clientes de la jornada de la mañana

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA															
MODELO EXACTO	1	CD	6	4	3	2	1	5	8	7	19	9	20	18	CD		
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	8	7	5	4	2	3	1	6	19	18	9	20	CD		

[Fuente: Autor]

²⁸ Los tiempos de computación generados variaron entre 0.8 y 1.45 segundos dependiendo de cada instancia.

²⁹ Brecha de optimalidad que hay entre la solución del modelo exacto y el algoritmo heurístico (Glover, y otros).

El tiempo en ruta se obtuvo a partir de las distancias que hay entre cada una de las locaciones del sistema (depósito y clientes) según la secuencia determinada por cada una de las técnicas de solución dividido entre la velocidad del vehículo (30 Km/h). El tiempo de llegada a cada lugar se calcula a partir del tiempo de salida del agente desde el cliente inmediatamente anterior en la secuencia más el tiempo en ruta, más el tiempo de espera que cada modelo establece en la solución. Por ejemplo, para el tiempo de llegada al cliente 1 en el modelo exacto en la tabla 5 se obtiene como sigue:

Tiempo de salida del agente del cliente 2: 463.8 minutos

Tiempo en ruta desde el cliente 2 hasta el cliente 1: 0.75 minutos

Tiempo en espera para el servicio: 55.65 minutos

Tiempo de llegada al cliente 1: $463.8 + 0.75 + 55.65 = 520.2$ minutos

Tabla 5. Resultados del modelo exacto para el TSPTW para 12 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	414.65	410	1140	0
CLIENTE 6	2.67	5.35	420	10	430.00	420	555	0
CLIENTE 4	0.78	1.56	431.6	10	441.60	420	555	0
CLIENTE 3	0.82	1.63	443.2	10	453.20	420	555	0
CLIENTE 2	0.33	0.66	453.8	10	463.80	420	555	0
CLIENTE 1	0.38	0.75	520.2	10	530.20	420	555	55.65
CLIENTE 5	0.91	1.81	532	10	542.00	420	555	0
CLIENTE 8	0.91	1.81	543.8	10	553.80	420	555	0
CLIENTE 7	0.58	1.16	555	10	565.00	420	555	0
CLIENTE 19	0.87	1.75	600	10	610.00	600	720	33.25
CLIENTE 9	3.24	6.48	616.5	10	626.50	600	720	0
CLIENTE 20	0.55	1.10	627.6	10	637.60	600	720	0
CLIENTE 18	0.75	1.51	639.1	10	649.10	600	720	0
DEPÓSITO	1.98	3.96	653.0	0	653.00	410	1140	0
TOTAL	14.76	29.53	TIEMPO DE HOLGURA		67.00	TIEMPO IMPRODUCTIVO		88.90

[Fuente: Autor]

De forma similar, para el cliente 18 del método PFIH de la tabla 6 el tiempo de llegada se calcula como sigue:

Tiempo de salida del agente del cliente 19: 524.68 minutos

Tiempo en ruta desde el cliente 19 hasta el cliente 18: 10.47 minutos

Tiempo en espera para el servicio: 85.32 minutos

Tiempo de llegada al cliente 18: $524.68 + 10.47 + 85.32 = 620.47$ minutos

Una situación que debe analizarse es la relacionada con los tiempos improductivos que se generan en cada uno de los modelos, en particular, se debe calcular el porcentaje de tiempo por cada jornada en la que el agente viajero está en espera. Por ejemplo, en la ruta de la jornada de la mañana para el método exacto, el tiempo en espera es de 88.9 minutos, lo que representa un 29.11% del tiempo total de la jornada. Para el método PFIH el tiempo en espera es de 86.99 minutos y su porcentaje de representación es del 28.06%, que en esta instancia, en particular, realmente la diferencia entre ellos no es significativa.

Así mismo, el tiempo de holgura originado en cada método de solución es calculado por la diferencia entre el tiempo de la interrupción del almuerzo (en el caso de los clientes de la jornada de la mañana) o el cierre de la ventana de tiempo del CD (para el caso de los clientes de la jornada de la tarde), menos la llegada del agente viajero al CD cuando termina la secuencia de la jornada laboral. Éste determinó para el método exacto un equivalente a 67 minutos que representan el 21.94% de la jornada laboral completa, y en el PFIH, corresponde a 62.98 minutos, representando un 20.32% de la jornada laboral completa. La diferencia de holguras determinadas por ambos métodos no es significativa, pero, analizando cada una de ellas se observa que ambas equivalen a más de una hora de la jornada laboral, en la cual el agente viajero se puede aprovechar para labores productivas.

Las secuencias que se obtuvieron en cada uno de los métodos de solución se graficaron para observar su patrón en el espacio geográfico. En el gráfico 3 se presentan las rutas determinadas por ambos métodos, para 12 clientes de la jornada de la mañana; en el primer caso (a), el agente realiza las visitas teniendo

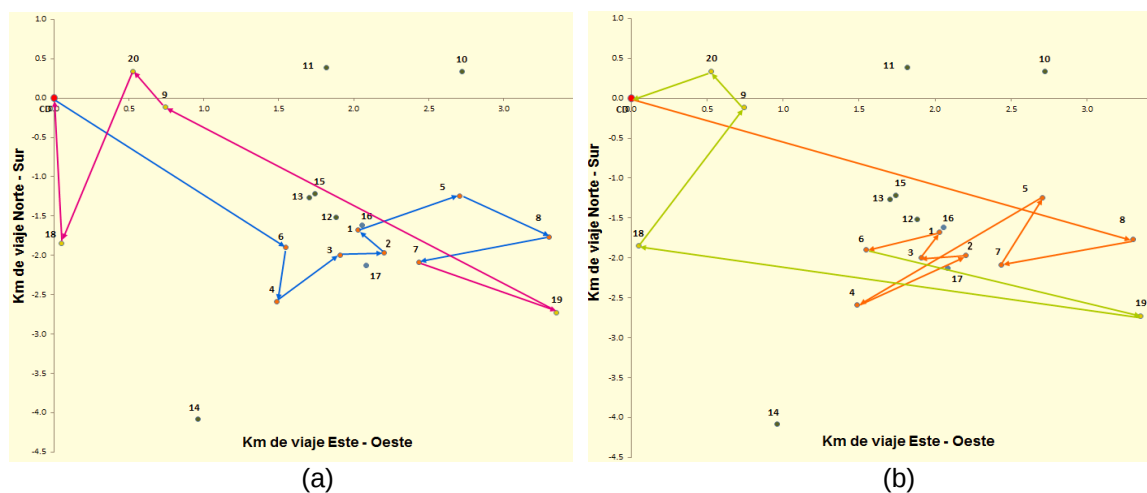
en cuenta las ventanas de tiempo más tempranas y buscando el cliente más cercano, así que realiza el recorrido bordeando el grupo de clientes. En el segundo caso (b), el agente realiza un recorrido en forma de zigzag, es decir, con mayor número de ángulos al realizar sus arribos a cada nodo. Para diferenciar las ventanas de tiempo se presentan las rutas con diferente color como se han presentado en la tabla 4.

Tabla 6. Resultados obtenidos del heurístico PFIH para el TSPTW de 12 clientes de la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a.]	[b.]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	410.00	410	1140	0
CLIENTE 8	4.16	8.33	418.33	10	428.33	420	420	0
CLIENTE 7	0.58	1.16	431.16	10	441.16	420	555	1.67
CLIENTE 5	0.998	2.00	443.15	10	453.15	420	555	0
CLIENTE 4	2.04	4.08	457.23	10	467.23	420	555	0
CLIENTE 2	1.063	2.13	469.36	10	479.36	420	555	0
CLIENTE 3	0.331	0.66	480.02	10	490.02	420	555	0
CLIENTE 1	0.38	0.76	490.78	10	500.78	420	555	0
CLIENTE 6	0.60	1.19	501.97	10	511.97	420	555	0
CLIENTE 19	1.35	2.71	514.68	10	524.68	600	720	0
CLIENTE 18	5.24	10.47	620.47	10	630.47	600	720	85.32
CLIENTE 9	1.96	3.93	634.40	10	644.40	600	600	0
CLIENTE 20	0.55	1.10	645.49	10	655.49	600	720	0
DEPÓSITO	0.76	1.53	657.02	0	657.02	410	1140	0
TOTAL	20.017	40.03	TIEMPO DE HOLGURA		62.98	TIEMPO IMPRODUCTIVO		86.99

[Fuente: Autor]

Gráfico 3. Secuencia del TSPTW determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 12 clientes de la jornada de la mañana



[Fuente: Autor]

8.1.2. Cálculo del GAP para el modelo exacto y el heurístico PFIH para 12 clientes de la jornada mañana en la instancia de 20 clientes:

A partir de los resultados presentados en la tabla 5 y 9 se calculan los valores del GAP para esta instancia, en términos de distancia y tiempo en ruta:

- GAP en distancia recorrida:

$$\frac{\text{Distancia total recorrida del PFIH} - \text{Distancia total recorrida del modelo exacto}}{\text{Distancia total recorrida del modelo exacto}} * 100\% \quad (28)$$

$$GAP_{\text{Dist, total recorrida}} = \frac{20.017 - 14.764}{14.764} * 100\% = 35.58\%$$

- GAP del tiempo de recorrido del agente desde que sale del CD hasta que regresa:

$$\frac{\text{Tiempo total en ruta del PFIH} - \text{Tiempo total en ruta del modelo exacto}}{\text{Tiempo total en ruta del modelo exacto}} * 100\% \quad (29)$$

Donde,

$$\text{Tiempo total en ruta del PFIH} = \text{Hr de llegada del agente al CD} - \text{Hr de salida del agente del CD} \quad (30)$$

$$\text{Tiempo total en ruta del PFIH} = 657.02 - 410.00 = 247.02 \text{ minutos}$$

$$\begin{aligned} &\text{Tiempo total en ruta del modelo exacto} \\ &= \text{Hr de llegada del agente al CD} - \text{Hr de salida del agente del CD} \end{aligned} \quad (31)$$

$$\text{Tiempo total en ruta del modelo exacto} = 653.0 - 414.65 = 238.35 \text{ minutos}$$

Entonces,

$$GAP_{\text{tiempo total en ruta del agente}} = \frac{247.02 - 238.35}{238.35} * 100\% = 3.64\%$$

El GAP en distancia recorrida para los 12 clientes de la jornada mañana equivale a 35.58%, lo que significa que el recorrido determinado por el PFIH es mayor en 5.25 Km frente al obtenido a través del modelo exacto. Por otra parte, el GAP del tiempo de recorrido del agente desde que parte hasta que arriba al CD, muestra que el tiempo en ruta total determinado por el PFIH utilizado para el recorrido es 8.67 minutos mayor frente al calculado mediante el método exacto.

Para los 8 clientes de la jornada de la tarde de la instancia de 20 clientes las secuencias establecidas por ambos métodos se presentan en la tabla 7.

Tabla 7. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW para 8 clientes de la jornada de la tarde

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA										
MODELO EXACTO	1	CD	11	10	15	13	12	14	17	16	CD	
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	14	10	12	15	13	11	17	16	CD	

[Fuente: Autor]

Así mismo, el programa de visitas para este grupo de clientes se presenta en la tabla 8 y 9, para el método exacto y el PFIH respectivamente.

Tabla 8. Resultados del modelo exacto para el TSPTW para 8 clientes en la jornada de la tarde

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a.]	[b.]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	835.79	410	1140	0
CLIENTE 11	2.10	4.21	840.00	10	850.00	840	960	0
CLIENTE 10	0.50	1.00	851.0	10	861.00	840	1140	0
CLIENTE 15	1.826	3.65	864.6	10	874.60	840	1140	0
CLIENTE 13	0.06	0.12	874.8	10	884.80	840	960	0
CLIENTE 12	0.310	0.62	885.4	10	895.40	840	960	0
CLIENTE 14	2.929	5.86	960.0	10	970.00	840	960	58.74
CLIENTE 17	2.28	4.56	974.6	10	984.60	840	960	0
CLIENTE 16	0.58	1.15	985.7	10	995.70	840	960	0
DEPÓSITO	2.87	5.74	1001.4	10	1011.40	410	1140	0
TOTAL	13.45	26.90	TIEMPO DE HOLGURA		138.60	TIEMPO IMPRODUCTIVO		58.74

[Fuente: Autor]

En cuanto al tiempo improductivo del agente viajero, generado por el método exacto correspondiente al 19.31% del tiempo total de la jornada, muestra la espera realizada de 58.74 minutos al arribar el cliente *14* como se muestra en la tabla 8, situación contraria se presenta en los resultados del PFIH de la tabla 9 debido a que no se perciben tiempos de espera durante la secuencia.

De otro modo, la situación anterior ocurre para el tiempo de holgura determinado por cada método, en el caso del método exacto, éste es del 45.56% del total de la jornada laboral que representa 138.60 minutos y en el PFIH, el 59.75% representa los 179.25 minutos de tiempo de holgura, siendo 40.65 minutos mayor que la holgura determinada por el método exacto.

Para todos los casos, el tiempo improductivo y de holgura, muestran el tiempo que el agente viajero puede ser destinado a cumplir con diferentes o iguales labores de distribución.

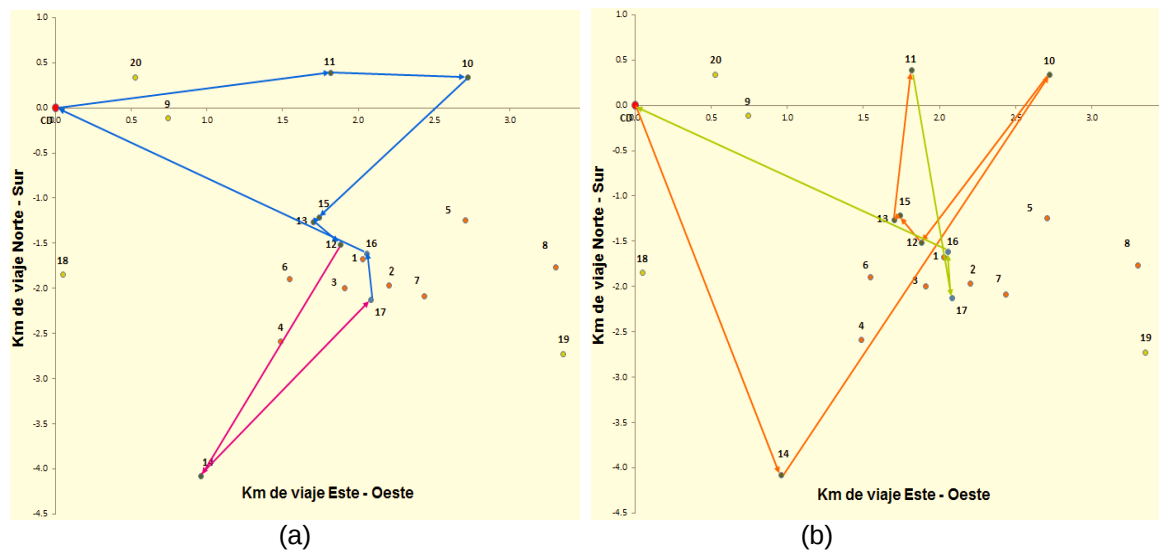
Las secuencias determinadas a través de ambos métodos para los clientes de la jornada de la tarde, se muestran en el gráfico 4, en las cuales se observa que, en la ruta del modelo exacto (a) el agente repartidor realiza un recorrido bordeando los clientes por sectores minimizando la distancia recorrida y a su vez, cumpliendo cada ventana de tiempo asociada al nodo; por ejemplo, visita los clientes *12*, *14* y *17*, los cuales tienen la misma ventana de tiempo asociada en el espacio geográfico inferior de (a) concluyendo el recorrido con los demás nodos y cumpliendo con la restricción de horarios de atención de cada cliente. Por otra parte, en la ruta determinada por el heurístico PFIH (b) se observa que en el arribo a cada nodo el agente realiza un mayor número ángulos, lo que implica el incremento de la distancia total recorrida en la secuencia.

Tabla 9. Resultados del PFIH para el TSPTW para 8 clientes en la jornada de la tarde

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						$[a_i]$	$[b_i]$	
DEPÓSITO	0	0	0	0	840	410	1140	0
CLIENTE 14	4.62	9.23	849.23	10	859.23	840	960	0
CLIENTE 10	5.07	10.13	869.36	10	879.36	840	960	0
CLIENTE 12	2.138	4.28	883.64	10	893.64	840	960	0
CLIENTE 15	0.35	0.70	894.34	10	904.34	840	960	0
CLIENTE 13	0.059	0.12	904.46	10	914.46	840	960	0
CLIENTE 11	1.856	3.71	918.17	10	928.17	840	960	0
CLIENTE 17	2.84	5.68	933.85	10	943.85	840	1140	0
CLIENTE 16	0.58	1.15	945.01	10	955.01	840	1140	0
DEPÓSITO	2.87	5.74	960.75	10	970.75	410	1140	0
TOTAL	20.38	40.75	TIEMPO DE HOLGURA		179.25	TIEMPO IMPRODUCTIVO		0.00

[Fuente: Autor]

Gráfico 4. Secuencia del TSPTW determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 8 clientes de la jornada de la tarde



[Fuente: Autor]

8.1.3. Cálculo del GAP para el modelo exacto y el heurístico PFIH para 8 clientes de la jornada mañana en la instancia de 20 clientes:

Así como se realizaron los cálculos del GAP en términos de distancia y tiempo en ruta para el grupo de clientes de la jornada de la mañana, a partir de los resultados presentados en la tabla 8 y 12 se calculan estos valores para esta instancia:

- GAP en distancia recorrida:

$$GAP_{Dist, total\ recorrida} = \frac{20.376 - 13.452}{13.452} * 100\% = 51.47\%$$

- GAP del tiempo de recorrido del agente desde que sale del CD hasta que regresa:

$$\frac{Tiempo\ total\ en\ ruta\ del\ PFIH - Tiempo\ total\ en\ ruta\ del\ modelo\ exacto}{Tiempo\ total\ en\ ruta\ del\ modelo\ exacto} * 100\%$$

$$GAP_{tiempo\ total\ en\ ruta\ del\ agente} = \frac{120.75 - 165.61}{165.61} * 100\% = -27.09\%$$

Particularmente, la distancia total recorrida determinada por ambos métodos muestra como en el patrón de la secuencia de desplazamiento del agente viajero presentado en el gráfico 4, la distancia total de recorrido calculada mediante el PFIH es 6.92 Km mayor en comparación con la establecida a través del método exacto. Esta diferencia entre soluciones se encuentra representada mediante el GAP de distancia total recorrida con un valor del 51.47%, porcentaje que representa la secuencia, en términos de kilómetros recorridos, cuánto es mejor cuando se determina por el método exacto frente a la obtenida por medio del PFIH.

El GAP del recorrido del agente desde que sale del CD hasta que regresa al mismo, obtiene un valor del -27.09%, lo que significa, es que el tiempo en ruta total determinado por el PFIH para la jornada de la tarde es menor, con una diferencia de 44.85 minutos, en comparación con el método exacto. En esta situación, el tiempo en ruta está ligado a las esperas o tiempos improductivos debido a que como el método exacto está minimizando las distancias recorridas, aumenta el tiempo improductivo del agente viajero en algunas ocasiones, y para este caso en particular, el PFIH no presentó tiempos de espera.

8.2. Comparación de los resultados con la situación actual del caso de estudio.

A partir de los resultados obtenidos de la secuenciación determinada por el método exacto y el heurístico PFIH, se encontró para las operaciones de distribución de la empresa del caso de estudio, que el método de ruteo que presenta un mejor desempeño en la programación de la ruta es el modelo exacto, en términos de la distancia total recorrida, el cual en la solución presenta un ahorro total de 6.24 Km y 2.91 Km o un mejoramiento del 42.27% y 21.63% para la jornada de la mañana y tarde respectivamente, en comparación con la situación actual, adicional a ello, se presenta para los clientes de la jornada de la mañana un menor tiempo en ruta. Así mismo, los valores relativos de los mejoramientos determinados por el heurístico PFIH fueron del 4.91% y el -19.72% para la jornada de la mañana y tarde respectivamente, indicando que hubo una mejora para la primera jornada y un aumento de la distancia total recorrida de la jornada tarde frente a la situación actual.

Por otra parte, se encontró que el heurístico PFIH determinó menores tiempos improductivos para ambas jornadas, especialmente para la tarde que tiene una instancia más pequeña con respecto a la de la jornada de la mañana y no presentó tiempos de espera, por ende generó una ruta donde el tiempo total en ruta fue mucho menor con respecto al obtenido mediante el método exacto para la jornada de la tarde, esta situación conlleva a llegar más temprano al CD y presentar un tiempo de holgura significativo con respecto a la duración del total de la jornada.

En este punto de la investigación, donde se encontraron los resultados por ambos métodos de ruteo, se puede decir que, al desarrollar esta herramienta sofisticada para la organización se convierte en un insumo de entrada para ser adaptado en la estrategia de distribución que adquiera la empresa dentro de sus objetivos

logísticos, allí se debe considerar que la decisión se puede tomar ya sea en términos del ahorro en distancias recorridas o en el tiempo en ruta, en este caso particular, se buscó minimizar las distancias totales de recorrido por jornada laboral.

Con referencia a la información suministrada en el caso de estudio, se observa que esta metodología de ruteo permite obtener un mayor control de las operaciones de distribución del agente viajero e información precisa en condiciones normales del sistema en cuanto a los tiempos de holgura, improductivos, de arribo y salida de cada nodo y llegadas al depósito. Este entregable permite a la empresa mejorar significativamente en cuanto a su estructura de procesos logísticos y derivar información importante para tomar decisiones en conjunto con otras variables como lo son los sistemas de costeo y el aumento del número de clientes, ya que ambos métodos lo permiten.

Por lo anterior, se establece que la metodología apropiada para el diseño y programación de la ruta es el método exacto para el caso particular, el cual minimiza las distancias totales recorridas del agente repartidor.

8.3. Escenarios

Después de determinar los resultados mediante los métodos propuestos para el problema planteado de la empresa del caso de estudio, éste es desarrollado también para instancias mayores de 24 y 30 clientes como se ha descrito anteriormente. Así mismo, con el objetivo de analizar el comportamiento de ambos métodos, se cambian otras dos condiciones independientes una de la otra como lo son variación en la velocidad del vehículo a *27Km/h* y *20 Km/h*, y negociación de ventanas de tiempo con los clientes.

8.3.1. Instancias futuras para el TSPTW

La tabla 10, presenta un resumen de los resultados determinados por ambos métodos del TSPTW para 20, 24 y 30 clientes, y en la tabla 11 se relaciona el resumen de GAPs de distancias totales recorridas y tiempos totales en ruta por jornadas laborales (mañana y tarde) y jornadas completas (día).

8.3.2. TSPTW variando la velocidad del vehículo

8.3.2.1. TSPTW con velocidad a 27 Km/h

En la tabla 12 se presenta el resumen de los resultados del TSPTW con una disminución en la velocidad de viaje del vehículo a 27Km/h (Ver del anexo 20 al 43), también, el GAP de distancia total recorrida y tiempo total en ruta se muestra en el tabla 13, para las instancias de 20, 24 y 30 clientes.

Tabla 10. Resumen de resultados del TSPTW

TSPTW												
NÚMERO DE CLIENTES		JORNADA LABORAL	MODELO EXACTO					HEURÍSTICO DE INSERCIÓN PPH				
			DIST. TOTAL RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	TIEMPO DE HOLGURA [min]	RETRASO [min]	TIEMPO IMPRODUCTIVO [min]	DIST. TOTAL RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	TIEMPO DE HOLGURA [min]	RETRASO [min]	TIEMPO IMPRODUCTIVO [min]
20	12	MAÑANA	14.76	29.53	67.00	0.00	88.90	20.02	40.03	62.98	0.00	86.99
	8	TARDE	13.45	26.90	138.60	0.00	58.74	20.38	40.75	179.25	0.00	0.00
	Σ TOTAL JORNADA		28.22	56.43	205.60	0.00	147.64	40.39	80.79	242.23	0.00	86.99
24	15	MAÑANA	15.97	44.08	133.88	(11.70)	133.88	24.92	45.05	51.00	0.00	59.77
	9	TARDE	12.54	31.00	187.14	0.00	48.58	22.27	31.82	178.18	0.00	0.00
	Σ TOTAL JORNADA		28.52	75.09	321.02	(11.70)	182.46	47.18	76.87	229.19	0.00	59.77
30	19	MAÑANA	19.61	54.52	0.00	(11.70)	86.08	39.04	78.09	37.37	0.00	4.54
	11	TARDE	17.79	33.80	138.6	0.00	0.00	23.84	47.67	142.33	0.00	0.00
	Σ TOTAL JORNADA		37.40	88.32	138.60	(11.70)	86.08	62.88	125.76	179.70	0.00	4.54

[Fuente: Autor]

Tabla 11. Resumen de GAP's de distancia total recorrida y tiempo total en ruta del TSPTW

TSPTW				
NÚMERO DE CLIENTES		JORNADA LABORAL	GAP DE DISTANCIA RECORRIDA [%]	GAP DE TIEMPO EN RUTA [%]
20	12	MAÑANA	35.58%	3.64%
	8	TARDE	51.47%	-27.09%
	GAP GLOBAL [%]		30.15%	-8.96%
24	15	MAÑANA	55.99%	18.01%
	9	TARDE	77.53%	-25.60%
	GAP GLOBAL [%]		39.57%	-20.60%
30	19	MAÑANA	99.10%	-13.69%
	11	TARDE	34.02%	9.65%
	GAP GLOBAL [%]		40.53%	-6.39%

[Fuente: Autor]

Tabla 12. Resumen de resultados del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h

TSPTW VARIANDO LA VELOCIDAD DEL VEHÍCULO A 27 KM/H												
NÚMERO DE CLIENTES		JORNADA LABORAL	MODELO EXACTO					HEURÍSTICO DE INSERCIÓN PRH				
			DIST. TOTAL RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	TIEMPO DE HOLGURA [min]	RETRASO [min]	TIEMPO IMPRODUCTIVO [min]	DIST. TOTAL RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	TIEMPO DE HOLGURA [min]	RETRASO [min]	TIEMPO IMPRODUCTIVO [min]
20	12	MAÑANA	14.76	32.81	65.50	0.00	87.62	20.02	44.48	145.52	0.00	84.43
	8	TARDE	13.45	29.89	152.30	0.00	42.39	20.38	45.28	174.72	0.00	0.00
Σ TOTAL JORNADA			28.22	62.70	217.80	0.00	130.02	40.39	89.76	320.24	0.00	84.43
24	15	MAÑANA	15.97	35.49	46.90	0.00	72.29	29.80	65.55	48.89	0.00	45.56
	9	TARDE	12.54	27.87	137.30	0.00	44.87	22.27	49.49	160.51	0.00	0.00
Σ TOTAL JORNADA			28.52	63.37	184.20	0.00	117.16	52.07	115.03	209.41	0.00	45.56
30	19	MAÑANA	20.58	45.74	0.00	(12.69)	77.53	36.99	82.21	33.86	0.00	3.93
	11	TARDE	16.92	37.61	137.3	0.00	17.59	23.84	52.97	137.03	0.00	0.00
Σ TOTAL JORNADA			37.51	83.35	137.30	(12.69)	95.12	60.83	135.18	170.89	0.00	3.93

[Fuente: Autor]

Tabla 13. Resumen de GAPs de distancia total recorrida y tiempo total en ruta del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h

TSPTW con velocidad a 27 Km/h				
NÚMERO DE CLIENTES		JORNADA LABORAL	GAP DE DISTANCIA RECORRIDA [%]	GAP DE TIEMPO EN RUTA [%]
20	12	MAÑANA	35.58%	3.52%
	8	TARDE	51.47%	-17.78%
	GAP GLOBAL [%]		30.15%	-4.74%
24	15	MAÑANA	86.56%	1.02%
	9	TARDE	77.53%	-14.27%
	GAP GLOBAL [%]		45.23%	-4.88%
30	19	MAÑANA	79.73%	-12.98%
	11	TARDE	40.83%	-1.35%
	GAP GLOBAL [%]		38.34%	-9.00%

[Fuente: Autor]

8.3.2.2. TSPTW con velocidad a 20 Km/h

Este escenario el TSPTW es desarrollado mediante ambos métodos realizando una disminución de la velocidad del vehículo a 20 Km/h para las instancias de 20, 24 y 30 clientes; el resumen de resultados y los GAPs se presentan en la tabla 14 y 15 respectivamente (Ver del anexo 44 al 67).

Tabla 14. Resumen de resultados del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h

TSPTW VARIANDO LA VELOCIDAD DEL VEHÍCULO A 20 KM/H												
NÚMERO DE CLIENTES		JORNADA LABORAL	MODELO EXACTO					HEURÍSTICO DE INSERCIÓN PRH				
			DIST. TOTAL RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	TIEMPO DE HOLGURA [min]	RETRASO [min]	TIEMPO IMPRODUCTIVO [min]	DIST. TOTAL RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	TIEMPO DE HOLGURA [min]	RETRASO [min]	TIEMPO IMPRODUCTIVO [min]
20	12	MAÑANA	14.76	44.29	60.40	0.00	83.25	23.29	69.87	120.13	0.00	0.00
	8	TARDE	13.45	40.35	149.60	0.00	36.26	20.38	61.13	158.87	0.00	0.00
Σ TOTAL JORNADA			28.21	84.64	210.00	0.00	119.52	43.67	131.00	279.00	0.00	0.00
24	15	MAÑANA	15.97	47.92	29.30	0.00	44.83	28.51	73.04	40.60	0.00	33.87
	9	TARDE	12.54	37.63	132.78	0.00	43.01	22.27	66.81	143.19	0.00	0.00
Σ TOTAL JORNADA			28.52	85.55	162.08	0.00	87.84	50.78	139.85	183.80	0.00	33.87
30	19	MAÑANA	23.22	69.67	0.00	(12.50)	60.64	35.25	105.76	22.43	0.00	1.81
	11	TARDE	16.92	50.77	0.0	0.00	142.66	21.67	65.52	134.48	0.00	0.00
Σ TOTAL JORNADA			40.15	120.44	0.00	(12.50)	203.29	56.92	171.28	156.91	0.00	1.81

[Fuente: Autor]

Tabla 15. Resumen de GAPs de distancia total recorrida y tiempo total en ruta del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h

TSPTW con velocidad a 20 Km/h				
NÚMERO DE CLIENTES		JORNADA LABORAL	GAP DE DISTANCIA RECORRIDA [%]	GAP DE TIEMPO EN RUTA [%]
20	12	MAÑANA	57.75%	-23.32%
	8	TARDE	51.49%	-6.17%
GAP GLOBAL [%]			35.39%	-16.84%
24	15	MAÑANA	78.50%	11.00%
	9	TARDE	77.53%	-11.27%
GAP GLOBAL [%]			43.84%	-11.26%
30	19	MAÑANA	51.81%	-9.80%
	11	TARDE	28.01%	-45.45%
GAP GLOBAL [%]			29.47%	-27.18%

[Fuente: Autor]

8.3.3. TSPTW con negociación de ventanas de tiempo

El resumen de resultados del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo es presentado en la tabla 16 y los GAPs obtenidos en la tabla 17, para instancias de 20, 24 y 30 clientes:

Tabla 16. Resumen de resultados del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo con los clientes

TSPTW CON NEGOCIACIÓN DE VENTANAS DE TIEMPO												
NÚMERO DE CLIENTES		JORNADA LABORAL	MODELO EXACTO					HEURÍSTICO DE INSERCIÓN PRH				
			DIST. TOTAL RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	TIEMPO DE HOLGURA [min]	RETRASO [min]	TIEMPO IMPRODUCTIVO [min]	DIST. TOTAL RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	TIEMPO DE HOLGURA [min]	RETRASO [min]	TIEMPO IMPRODUCTIVO [min]
20	11	MAÑANA	12.40	24.81	52.70	0.00	0.00	15.51	31.03	80.89	0.00	88.08
	9	TARDE	13.68	27.36	143.00	0.00	0.00	20.61	41.21	168.79	0.00	0.00
Σ TOTAL JORNADA			26.09	52.17	195.70	0.00	0.00	36.12	72.24	249.68	0.00	88.08
24	14	MAÑANA	15.63	31.26	41.50	0.00	89.48	22.30	44.60	68.08	0.00	57.32
	10	TARDE	14.55	29.10	0.00	0.00	180.15	22.38	29.84	181.50	0.00	2.80
Σ TOTAL JORNADA			30.18	60.36	41.50	0.00	269.63	44.68	74.43	249.58	0.00	60.13
30	18	MAÑANA	21.12	42.25	45.40	0.00	33.48	31.74	63.48	61.98	0.00	4.54
	12	TARDE	17.15	34.31	0.0	0.00	148.72	24.07	48.13	131.87	0.00	0.00
Σ TOTAL JORNADA			38.28	76.56	45.40	0.00	182.20	55.81	111.61	193.85	0.00	4.54

[Fuente: Autor]

Tabla 17. Resumen de GAPs de distancia total recorrida y tiempo total en ruta del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo con los clientes

TSPTW con negociación de ventanas de tiempo				
NÚMERO DE CLIENTES		JORNADA LABORAL	GAP DE DISTANCIA RECORRIDA [%]	GAP DE TIEMPO EN RUTA [%]
20	11	MAÑANA	25.06%	-9.32%
	9	TARDE	50.61%	-18.61%
GAP GLOBAL [%]			27.78%	-12.94%
24	14	MAÑANA	42.69%	-7.91%
	10	TARDE	53.80%	-61.68%
GAP GLOBAL [%]			32.45%	-36.98%
30	18	MAÑANA	50.27%	-4.16%
	12	TARDE	40.29%	-44.38%
GAP GLOBAL [%]			31.41%	-25.83%

[Fuente: Autor]

8.4. Discusión de los resultados de los escenarios del caso de estudio (TSPTW)

En este apartado, se presenta la discusión acerca de los resultados obtenidos para las diferentes instancias propuestas, en particular se analiza el comportamiento del GAP para la distancia total recorrida en cada ruta y para el tiempo total en ruta.

En el primer escenario, donde se aumentó el número de clientes a 24, el método exacto frente al PFIH, presentó un GAP de distancia de 55.99% para los 15 clientes que pertenecen a la jornada de la mañana y de 77.53% para los 9 clientes de la jornada tarde (Ver tabla 11); las diferencias entre los dos métodos son verdaderamente significativas en términos de distancia recorrida. Para el segundo escenario, con 30 clientes, los valores del GAP de distancias aumenta al 99.10% en la jornada de la mañana, pero, en la jornada de la tarde presenta una disminución del GAP a un valor de 34.02%. Estos resultados, muestran que aunque por los dos métodos se satisfacen las necesidades de los clientes, el PFIH presenta un menor desempeño en términos de las distancias recorridas.

En relación al tiempo improductivo del agente viajero generado durante la jornada laboral, el método exacto determinó para la instancia de 24 clientes en la jornada de la mañana, un valor de 42.38% y, para la jornada de la tarde fue del 16.07%, después; el segundo escenario fue resuelto para una instancia de 30 clientes, donde los 19 de la jornada de la mañana el tiempo improductivo alcanzado fue de 27.25%, y para los 9 clientes de la jornada de la tarde, éste adquirió el valor de 0% (Ver tabla 10). En este mismo sentido, el heurístico PFIH determinó en el escenario donde la instancia tiene 24 clientes, un tiempo improductivo de 19.28% para los 15 clientes en la jornada de la mañana, y, para los 9 clientes de la jornada de la tarde no se presentó tal tiempo; luego para la instancia de 30 clientes, el tiempo improductivo alcanzado para los 19 clientes de la jornada de la mañana fue de 1.46%, y para 11 clientes de la jornada tarde éste no se generó. Lo anterior demuestra que el tiempo productivo disminuye a medida que aumenta la instancia

del problema dado que hay más clientes programados para atender, sin embargo, se observa que para instancias pequeñas como lo son los clientes correspondientes a la jornada de la tarde, no se presenta éste tiempo. Comparando ambos métodos se evidencia que el PFIH determina los tiempos de espera o improductivos menores frente al método exacto.

En términos del tiempo de holgura, el método exacto no generó tiempo de holgura para la jornada de la mañana de los escenarios de 24 y 30 clientes, mientras que para los clientes de la jornada de la tarde de éstas instancias, la holgura alcanzada fue del 45.84% y 49.08% respectivamente. Por otra parte, el heurístico PFIH, determinó para el escenario de 24 clientes una holgura del 16.45% para los 15 clientes pertenecientes a la jornada de la mañana y un 59.39% para los clientes de la jornada tarde; en el escenario donde la instancia alcanza los 30 clientes, la jornada mañana presentó una holgura de 12.06%, y la jornada de la tarde obtuvo un valor de 47.44%. Estos valores indican que a medida que aumenta el número de clientes, la holgura decrece hasta alcanzar un valor de cero, este cambio es más notable para las instancias grandes ya que al observar los valores alcanzados de holgura en el recorrido de los clientes de la jornada tarde, éstos fueron mucho mayores en comparación con las instancias de la jornada mañana. Los valores de holgura más bajos, fueron determinados por el método exacto, esta situación refleja la influencia del tiempo improductivo encontrado, debido a que al ser mayor cuando se calcula por este método, holgura alcanza valores pequeños en comparación con el heurístico PFIH.

Particularmente, el tiempo en ruta que utiliza el agente viajero para realizar su recorrido, está afectado por las esperas generadas durante el recorrido al momento de arribar ciertos clientes. Al medirse el desempeño de ambos métodos a través del GAP, se encuentra para cada instancia de 20, 24 y 30 clientes un valor de GAP global de tiempo total en ruta de -8.96%, -20.60% y -6.39% respectivamente, indicando que el heurístico PFIH es quien tiene los menores tiempos en ruta en comparación con los calculados mediante el método exacto.

En este orden de ideas, los GAPs de tiempo total en ruta de la jornada mañana de las instancias de 12, 15 y 19 clientes presenta unos porcentajes de 3.64%, 18.01% y -13.69% respectivamente, los cuales crecen a medida que la cantidad de clientes va aumentando; a excepción de la última instancia, donde el tiempo en ruta determinado por el heurístico PFIH fue menor frente al método exacto debido a que se presentaron menores tiempos improductivos. Por otra parte, para los 8, 9 y 11 clientes de la jornada de la tarde, los GAPs de tiempo total en ruta obtenidos fueron de -27.09%, -25.60% y 9.65% mostrando que a medida que se incrementa el número de clientes el GAP presenta una tendencia creciente, por ejemplo, se tiene al aumentar instancia en un cliente (de 8 a 9) el crecimiento es moderado en 1.49 puntos porcentuales, en cambio, cuando se aumenta la instancia en dos clientes (de 9 a 12) éste creció significativamente en 35.25 puntos porcentuales. Esta información muestra que el GAP del tiempo en ruta presenta un comportamiento creciente hasta la instancia de 15 clientes, de ahí cuando esta llega a 19 clientes, el GAP decrece considerablemente mostrando al heurístico PFIH como el método que presenta menores tiempos en ruta, y de acuerdo al análisis anterior, menor tiempo de espera y mayor tiempo de holgura.

En el escenario donde se realiza la variación de la velocidad del vehículo a 27 Km/h, se observa que los GAPs alcanzados en términos de la distancia total recorrida para las instancias de 20, 24 y 30 clientes fueron de 30.15%, 45.23% y 38.34% respectivamente, éstos muestran un crecimiento, como se observa en la tabla 13, hasta cuando la instancia alcanza los 24 clientes y de ahí decrece en 6.89 puntos porcentuales cuando la instancia llega a 30 clientes. En particular, estos valores están influenciados por cada jornada laboral; para las instancias de 12, 15 y 19 clientes de la jornada de la mañana los GAPs de distancia total recorrida obtenidos fueron de 35.58%, 86.56% y 79.73%, por otra parte, las instancias de 8, 9 y 11 clientes pertenecientes a la jornada de la tarde obtuvieron unos GAPs de distancia total recorrida de 51.47%, 77.53% y 40.83%. Al parecer, el comportamiento del GAP global extraído a la particularidad, cuando es

analizado por jornadas laborales, presenta la tendencia ya mencionada, en la cual, cuando los clientes alcanzan una instancia de 24, éste porcentaje incrementa, después, cuando la instancia aumenta a 30 clientes, el GAP presenta un decrecimiento gradual. Lo anterior indica, que así ambos métodos estén cumpliendo con las condiciones del sistema, el método exacto es quien presenta un mejor desempeño en lo que respecta a minimización del total de la distancia recorrida. Al comparar esta solución con el TSPTW original resuelto para estas instancias, se evidencia que el GAP de la distancia total recorrida de la instancia de 24 clientes en la jornada de la mañana, al disminuir la velocidad a 27 Km/h, aumentó en 30.57 puntos porcentuales, situación contraria ocurre para la instancia de 30 clientes, en donde la jornada de la mañana éste porcentaje disminuye en 19.37% y para la jornada de la tarde éste disminuye en 6.81%, es decir que al reducir la velocidad y alcanzar la instancia de 30 clientes, el GAP de distancia total recorrida presenta un mejor desempeño frente a la solución del TSPTW para esta cantidad de clientes.

Con respecto a los tiempos improductivos generados (Ver tabla 12), en la instancia de 20 clientes, para los 12 clientes de la jornada de la mañana el tiempo improductivo determinado por el método exacto fue de 28.64% y para los 8 clientes de la jornada tarde éste fue del 13.91%. Así mismo, en la instancia de 24 clientes el tiempo improductivo generado mediante éste mismo método alcanzó por jornada el 23.67% y 14.96%, y, para la instancia de 30 clientes de 24.43% y 5.82% para la jornada de la mañana y de la tarde respectivamente. Por otra parte el heurístico PFIH, determinó para las instancias de 20, 24 y 30 clientes, en la jornada de la mañana un tiempo improductivo de 27.24%, 14.70% y 1.27% respectivamente, y para la jornada de la tarde no se presentaron tales tiempos. Estos tiempos improductivos calculados por ambos métodos, fueron menores en comparación con la solución del TSPTW del problema original con este número de instancias, debido a la disminución de la velocidad del vehículo, sin embargo, se

ratifica nuevamente que el heurístico PFIH es el método que presenta menores tiempos improductivos en comparación con el método exacto.

Después que el agente viajero realiza el recorrido llega temprano al CD, en la mayoría de casos generando tiempo de holgura. Al disminuir la velocidad a 27 Km/h, el tiempo de holgura obtenido mediante el método exacto para las instancias de 20, 24 y 30 clientes, fue de 21.41%, 15.36% y 0% para la jornada de la mañana, y, 49.99%, 45.77% y 45.39% para la jornada de la tarde respectivamente. De igual manera, el heurístico PFIH determinó los siguientes tiempos de holguras en porcentaje para las instancias de 20, 24 y 30 clientes, donde la jornada de la mañana de cada una de ellas presentó un 19.70%, 15.77% y 10.92% y la tarde de 58.24%, 53.50% y 45.68% respectivamente, estos valores obtenidos por ambos métodos disminuyeron frente a la solución del TSPTW original para estas instancias, exceptuando el tiempo improductivo calculado mediante el método exacto para los 15 clientes de la jornada de la mañana de la instancia de 24 clientes, debido a que aumentó en 15.36% puntos porcentuales.

El GAP del tiempo total en ruta del agente viajero cuando la velocidad del vehículo es disminuida, muestra para los clientes de la jornada mañana una tendencia decreciente (Ver tabla 13), por ejemplo, para las instancias de donde la jornada de la mañana comprende 12, 15 y 19 clientes, los GAPs obtenidos fueron 3.52%, 1.02% y -12.98% respectivamente, y para las instancias de la jornada de la tarde, los 8, 9 y 11 clientes, ambos métodos determinaron unos GAPs de -17.78%, -14.27% y -1.35% respectivamente. El resultado de las instancias de clientes correspondientes a la jornada de la mañana, muestra que a medida que aumenta el conjunto de clientes a visitar, el GAP de tiempo total en ruta disminuye considerablemente en cada incremento nodal, mientras que los GAPs calculados para los clientes de la jornada de la tarde presentan la situación contraria. Esta situación planteada, se refleja en el GAP global de tiempo en ruta para cada instancia, en donde para 20, 24 y 30 clientes, éstos valores fueron de -4.74%, -4.88% y 9.00% respectivamente, presentando de esta forma una tendencia

decreciente (hasta 24 clientes), validando el planteamiento determinado para los clientes de la jornada de la mañana. Adicionalmente, se evidencia que al disminuir la velocidad, los GAPs alcanzados en este escenario son menores frente a los del TSPTW original para estas instancias, y que a su vez el heurístico PFIH sigue mostrando un mejor desempeño en cuanto a tiempos en ruta del agente viajero.

Posteriormente, el siguiente escenario planteó variar la velocidad a 20 Km/h para todas las instancias, donde el GAP de la distancia de la distancia total recorrida por el agente, presentó diferente comportamiento del escenario anterior. En las instancias de 20, 24 y 30 clientes, los GAPs de distancia total recorrida obtenidos fueron de 57.75%, 78.50% y 51.81% para la jornada de la mañana, y 51.49%, 77.53% y 28.01% para la jornada de la tarde respectivamente, mostrando ser mayores frente a la solución del TSPTW original, hasta la instancia de 24 clientes, donde los 9 clientes de la jornada tarde obtienen el mismo valor a la del TSPTW original (Ver tabla 15); a partir de allí, cuando la instancia del problema llega a 30 clientes tanto para la jornada de la mañana, como para la jornada de la tarde los GAPs de distancia total recorrida obtenidos fueron menores frente al problema original, por ejemplo, los 19 clientes de la jornada de la mañana obtuvieron un GAP de distancia total recorrida de 51.81%, 47.29 puntos porcentuales menores frente al problema original; de igual manera, los 11 clientes de la jornada de la tarde presentaron un GAP de distancia total recorrida de 28.01%, 6.01 puntos porcentuales menor que la solución del problema original para esta instancia. En este caso se demuestra que en el escenario donde la instancia es de 30 clientes con una variación de la velocidad a 20 Km/h, el GAP de distancia total recorrida obtiene el mejor desempeño, cumpliendo con las restricciones del sistema. Al analizar los GAPs globales de distancia total recorrida se observa para las instancias de 20, 24 y 30 clientes unos valores obtenidos de 35.39%, 43.84% y 29.47%, los cuales presentan un comportamiento ascendente hasta la instancia de 24 clientes, y descendente cuando ésta alcanza los 30 clientes, 8.87 puntos porcentuales menor que la instancia del problema original.

Una situación interesante, es la que sucedió durante la implementación del PFIH con disminución de la velocidad del vehículo a 20 Km/h para la instancia de 30 clientes, siendo esta la instancia más grande desarrollada, en ella, el agente repartidor no visitó un nodo perteneciente a cada jornada laboral, debido a que éste cuando realizaba el arribo al cliente específico, incumplía la ventana de tiempo asociada al mismo y por tanto no fue enrutado. En el caso de los 19 clientes de la jornada de la mañana, el cliente que el agente viajero no alcanza a visitar es el cliente *A*, el cual, a pesar de estar muy cercano al cliente *B* (nodo que antecede en la ruta al nodo *A*) llega al nodo *A* después de la ventana de tiempo de cierre, es por esto, que se enruta el cliente *LC* en lugar de *A*; igualmente ocurre para la ruta de la tarde, en la cual, cuando el agente viajero debe arribar al cliente *UAN*, el cual, después de haber salido del cliente¹¹ (nodo que antecede en la ruta al nodo *UAN*) y arribar a éste, llega después de la ventana de tiempo de cierre, incumpléndola de esta manera, entonces, se enruta el cliente *E* que es el siguiente en la ruta que cumple con las restricciones del PFIH, así, con estos clientes fuera de la secuencia, el total de nodos secuenciados por medio del PFIH en este caso fue de 18 y 10 clientes de la jornada mañana y tarde respectivamente, formando una instancia total de 28 clientes enrutados en esta situación. Todo lo anterior, tiene influencia en el comportamiento del GAP de distancia total y de tiempo total de recorrido del agente viajero, y se muestra como una limitación del PFIH al momento de realizar el programa de los recorridos con ensayos de velocidades menores.

Así como la distancia total recorrida en la instancia de 30 clientes se afecta por la situación anterior, al tiempo en ruta le ocurre lo mismo. En primer lugar, el tiempo improductivo generado por el método exacto para las instancias de 20, 24 y 30 clientes de la jornada de la mañana, fue de 27.03%, 16.48% y 19.80% y los de la jornada de la tarde fueron de 12.09%, 13.09% y 47.02% respectivamente; en el PFIH los tiempos improductivos generados fueron de 0%, 10.92% y 0.58% para la jornada de la mañana, y 0% para la jornada de la tarde de todas las instancias

respectivamente, éstos fueron significativamente menores frente a la solución del TSPTW original y a su vez, frente a los determinados mediante el método exacto. Las holguras generadas mediante el método exacto para las instancias de 20, 24 y 30 clientes en la jornada de la mañana fueron de 19.61%, 10.77% y 0% y para la jornada de la tarde, éstas fueron de 49.87%, 42.90% y 0%.

El GAP del tiempo en ruta del agente, obtenido al haber resuelto el escenario donde se disminuye la velocidad a 20 Km/h mediante el método exacto para 20, 24 y 30 clientes, obtuvo para la jornada de la mañana un -23.32%, 11.00% y -9.80% y para la jornada de la tarde, fueron de -6.17%, -11.27% y -45.45% respectivamente; éstos valores muestran que a medida que aumenta la cantidad de clientes disminuyen los GAPs de tiempo en ruta, exceptuando la instancia de 15 clientes del método exacto. El GAP global de tiempo en ruta obtenido para las instancias de 20, 24 y 30 clientes fue de -16.84%, -11.26% y -27.18%, lo que significa que de 20 a 24 clientes el GAP presenta un incremento, y cuando la instancia llega a 30 clientes, éste decrece mostrando el mejor desempeño del PFIH en términos del tiempo en ruta generado durante la jornada completa.

Plantear un escenario, en el cual, se permite una negociación de ventanas de tiempo con los clientes, generó cambios importantes en términos de la distancia y tiempo en ruta totales durante los recorridos. Por ejemplo, el GAP de la distancia total recorrida para los 20, 24 y 30 clientes fue de 25.06%, 42.69% y 50.27% para la jornada de la mañana, y de 50.61%, 53.80% y 40.29% en la jornada de la tarde respectivamente. Estos valores en comparación con la solución del problema original presentan una considerable mejoría en el desempeño de los métodos, puesto que el GAP de la distancia total recorrida para cada jornada laboral disminuyó significativamente para ambas jornadas laborales; dado que la negociación consta de realizar una expansión de la ventana de tiempo de un cliente, y el traslado del servicio a la jornada siguiente de otro cliente. Al observar el GAP global de distancia total recorrida obtenido para cada instancia (Ver tabla 17), los valores obtenidos fueron 27.78%, 32.45% y 31.41%, lo cual indica que a

medida que aumentan los clientes (hasta 24) el GAP global de la distancia recorrida incrementa, mientras que al aumentar la instancia a 30 clientes, éste disminuye en 1.04 puntos porcentuales; igualmente, éstos valores de GAPs obtenidos para la jornada completa, muestran que el escenario de negociación de ventanas de tiempo obtiene una mejora significativa en el desempeño al cumplir con las restricciones del sistema en comparación con la solución del TSPTW del problema original para este número de instancias, como se corroboró anteriormente para cada jornada laboral.

Para este escenario, el tiempo improductivo generado por ambos métodos disminuye a medida que aumentan los clientes para el caso de la jornada de la mañana (Ver tabla 16), en particular, el método exacto determinó para esta jornada en las instancias de 20, 24 y 30 clientes, unos tiempos improductivos de 38.57%, 29.41% y 11.01% y para la jornada de la tarde de 14.51%, 58.26% y 49.20% respectivamente. La jornada de la mañana de la instancia de 20 clientes presenta un aumento del tiempo improductivo generado de 9.46 puntos porcentuales en comparación con la misma instancia del problema original, por otra parte, éstos tiempos en la jornada de la tarde de la instancia de 24 y 30 clientes, tuvieron tendencia creciente con porcentajes significativos, por ejemplo, el tiempo improductivo de la jornada de la tarde de la instancia de 24 clientes incrementó en 42.19 puntos porcentuales, situación similar ocurrió para los clientes de la jornada de la tarde de la instancia de 30 clientes. Esta situación evidencia que la negociación de ventanas de tiempo que presenta mejor desempeño se da para la jornada de la mañana de las instancias de 24 y 30 clientes. Por su parte, el heurístico PFIH determina para las instancias de 20, 24 y 30 clientes unos tiempos improductivos de 28.41%, 18.49% y 1.46% para la jornada de la mañana y de 0%, 0.93% y 0% para la jornada de la tarde respectivamente; en esta situación, el heurístico PFIH no presenta disminución significativa de los tiempos improductivos generados con respecto a la solución del

problema original, pero éstos siguen siendo mucho menores que los determinados por el método exacto.

La holgura generada por cada método para este escenario, presenta un comportamiento diferente, en particular, se evidencia que a medida que incrementa el número de clientes este tiempo disminuye. El método exacto determinó para las instancias de 20, 24 y 30 clientes, unas holguras de 17.26%, 13.64% y 14.92% para la jornada de la mañana y de 47.01%, 0% y 0% para la jornada de la tarde respectivamente; de esta situación se observa que, al pasar un cliente de la jornada de la mañana para ser atendido en la jornada de la tarde, la holgura de la instancia de 24 y 30 para la jornada de la mañana incrementó considerablemente frente a la solución del problema original; situación similar se presentó para las holguras determinadas por el heurístico PFIH para las instancias de 20, 24 y 30 clientes, donde éstas incrementaron al suprimir un cliente de la secuencia, y por tanto las instancias de la jornada tarde disminuyeron su holgura a excepción de la jornada de la tarde compuesta por 10 clientes que obtuvo un tiempo de holgura del 60.50% del total de la jornada laboral, 1.11 puntos porcentuales superior al obtenido para los 9 clientes de la jornada de la tarde de la instancia de 24 clientes.

Lo anterior, define directamente la tendencia del tiempo en ruta establecido por cada método. Así pues, al realizar una negociación de ventanas de tiempo, los GAPs del tiempo total en ruta del agente para los clientes de la jornada mañana en las instancias de 20, 24 y 30 clientes fue de -9.32%, -7.91% y -4.16% para la jornada de la mañana respectivamente, presentan una tendencia creciente, sin embargo, este porcentaje decrece considerablemente, cuando los clientes de la jornada de la tarde obtienen un GAP de -18.61%, -61.68% y -44.38% respectivamente. Esta situación se presenta de igual manera a través del GAP global de tiempo total en ruta del agente viajero durante toda la jornada, el cual, para la instancia de 24 clientes obtiene su menor valor, el cual fue de -36.98% y aumenta cuando la instancia llega a 30 clientes con -25.83%. Al compararse los

valores anteriores del GAP global con el TSPTW del problema original se observa que los tiempos en ruta determinados por ambos métodos en el escenario de negociación de ventanas de tiempo son significativamente menores, es decir, se presenta un mejor desempeño del heurístico PFIH en términos del tiempo en ruta.

CONCLUSIONES

Las operaciones logísticas que comprenden los sistemas de distribución son actividades que se deben gestionar de manera estratégica en la cadena de suministro. El problema de diseñar y programar un sistema de rutas ha sido objeto de estudio de muchos autores a través de los años, los cuales, para representar, resolver y optimizar situaciones a las que se encuentra sujeto un sistema de transporte, han planteado y desarrollado diferentes técnicas de solución dentro de las cuales se encuentran los métodos exactos, heurísticos y metaheurísticos, éstos, permiten a las organizaciones tener capacidad de respuesta a las diferentes condiciones y variables que afectan directa o indirectamente estos sistemas.

Para el proceso de ruteo de vehículos, se deben considerar todas las restricciones que afectan un sistema de distribución, en particular, para la empresa del caso de estudio, se hizo una caracterización de las locaciones donde están ubicados geográficamente el depósito y los clientes (vías que permiten ir de un lugar a otro en distancias no euclidianas), donde el recorrido que realiza el agente repartidor consta de satisfacer el requerimiento cumpliendo con las ventanas de tiempo asociadas a cada cliente, para ello la operación de transporte es realizada en un vehículo que tiene capacidad ilimitada (las demandas de los clientes y el volumen de los productos no copan la capacidad de carga) y restricción de límite de velocidad, por último, hay una interrupción en la jornada laboral entre las 12:00 m y 2:00 p.m., debido a que en muchas organizaciones, instituciones y entes de diferentes índoles no tienen jornada continua de atención a los usuarios o clientes.

Inicialmente, para implementar las técnicas de ruteo, cuando se hizo el proceso de caracterización de los clientes y el CD, se observó que al ser en su gran mayoría colegios, instituciones educativas y universidades, tienen la característica de estar concentrados en el centro de la municipalidad y otros en las afueras, por tanto, se debe tener en cuenta que el agente viajero no realiza sus recorridos en línea recta

sino que viaja a través de una red de calles, por esta razón, se estimó el *factor de correlación* o el *factor de circuito* para el municipio de Palmira el cual fue de 1.12, éste, es un hallazgo muy importante, dado a que es un coeficiente significativo a pesar de tener una muestra de 20 clientes. Otro factor interesante para analizar, son las ventanas de tiempo de cada nodo, éstas tienen la característica de estar en función de la jornada académica en la mayoría de casos, y a pesar de intervalos de tiempo de dos horas en promedio, es complejo abastecer a una red de clientes dispersos en la municipalidad, por tanto, la velocidad de viaje a la que el agente realiza el recorrido tiene gran influencia sobre la programación de la ruta y está sujeta a la reglamentación del tránsito de vehículos de carga en los sectores educativos.

En la implementación de los métodos propuestos para resolver el problema, se encontró que el exacto permitió hallar rutas óptimas en términos de la reducción de costos, distancias recorridas, tiempo en ruta, improductivo y de holgura, para las instancias propuestas y finalmente, éste fue implementado en la herramienta ofimática en lenguaje ampl.

Por otro lado, el heurístico de inserción de Solomon PFIH, permite secuenciar cada nodo teniendo en cuenta el costo de inserción del mismo a la ruta actual, así como también tiene en cuenta todas las restricciones del sistema, minimizando costos, distancias recorridas y tiempo en ruta, improductivo y de holgura, especialmente cuando las instancias son mayores.

Utilizando el método exacto y el PFIH para el diseño y la programación de la ruta, se cumple la restricción de ventanas de tiempo de cada cliente. En particular, el primer método fue quien estableció las secuencias para cada caso, en las cuales, el agente viajero realiza recorridos con menores distancias, sin embargo, el modelo al tener el objetivo de minimizar las distancias recorridas, genera tiempos improductivos considerables, debido a las esperas del agente viajero antes del inicio del servicio en el cualquier nodo de la secuencia que en esa configuración

de ruta minimiza la distancia, por lo tanto, este tiempo en ruta se ve afectado directamente por el tiempo improductivo, ya que este es considerado dentro del tiempo total de recorrido del agente, que a su vez, al tener un tiempo de ruta significativo, minimiza el tiempo de holgura, el cual se compone de la llegada más temprana antes de la interrupción del mediodía o cierre de la ventana de tiempo del CD, claro que esto es importante por las oportunidades de programar nuevos clientes en esa zona. Por el contrario, el PFIH determina para cada programa de ruta mayores distancias de recorrido, menores tiempos en ruta dado que realiza menor número de esperas, o estas pueden tener lapsos pequeños, entonces, al tener un tiempo total de recorrido menor genera un tiempo de holgura más grande en comparación con el método exacto. Es importante resaltar en este punto, que el número máximo de clientes utilizados en cada método fue de 19, debido a la situación mencionada anteriormente sobre la continuidad en la jornada laboral.

Siguiendo el lineamiento anterior, se observó que al realizar una inclusión de más clientes, ya sea por jornada laboral, o la jornada completa, el GAP de distancia total recorrida incrementa considerablemente, exceptuando los casos donde se realizó un análisis de escenarios, los cuales en el GAP global de distancia recorrida por el agente mostraron una tendencia decreciente al aumentar la cantidad de nodos de 24 a 30, situación similar se observó en el GAP de tiempo en ruta del agente para los clientes de la jornada de la mañana de todas las instancias.

Es importante tener en cuenta que la velocidad es un factor que influye notablemente en la secuenciación de la ruta del agente viajero, a tal punto, que puede afectar la programación como se observó en el escenario en el cual la velocidad se disminuyó a 20 Km/h, lo que significó dejar por fuera de la secuencia dos clientes, uno de cada jornada laboral cuando la secuenciación fue desarrollada a través del PFIH. Esto no significa que el método sea limitado, lo que ocurre es que bajo ciertas situaciones, especialmente el tamaño de la instancia es grande, se deben tomar decisiones estratégicas en cuanto a la

elección del método de ruteo y establecimiento de políticas de distribución, como se observó en el escenario de negociación de ventanas de tiempo con los clientes, los cuales evidenciaron por ambos métodos mejoras significativas del desempeño frente a los demás escenarios, especialmente para las jornadas de la mañana donde las instancias eran mayores.

Por último, se puede plantear para una investigación futura la posibilidad de evaluar la decisión de escoger la función objetivo ya sea en términos de distancia o del tiempo en ruta, es decir, la conveniencia para la organización en función del costo de decidir si se quiere realizar recorridos con menores distancias o minimizar el tiempo en ruta (incluido el costo de espera tanto del agente viajero como el del vehículo); para estos escenarios se sugiere la utilización de técnicas multi-objetivo.

BIBLIOGRAFÍA

- Amaya Jaramillo, Carlos David. 2010.** *Sistema de monitoreo pasivo para vehículos mediante GPS.* Escuela Politécnica Nacional. Quito : s.n., 2010. Proyecto de grado.
- Ballou, Ronald H. 2004.** *Logística: Administración de la Cadena de Abastecimiento.* s.l. : Pearson Education, 2004. 637.
- Chopra, Peter, Sunil y Meindl. 2008.** *Administración de la cadena de suministro: Estrategia, Planeación y Operación.* Tercera Edición. s.l. : Pearson Education, 2008.
- Dantzig, G. B. y Ramser, J. H. . 1959.** *The Truck Dispatching Problem.* 1959.
- Desrochers, M., y otros. 1988.** *Vehicle Routing Problem with Time Windows: Optimization and Aproximation.* North-Holland : B.L. Golden and A.A. Assad, 1988.
- Díaz, Ariel Iván. 2012.** 41 JAIIO Jornadas Argentinas de Informática. [En línea] 2012. <http://41jaiio.sadio.org.ar/>.
- El-Sherbeny, Nasser A. 2010.** *Vehicle routing with time windows: An overview of exact, heuristic and metaheuristic methods.* 2010.
- Focacci, Filippo, y otros. 2002.** *A Hybrid Exact Algorithm for the TSPTW.* 2002.
- Gendreau, Michel y Braysy, Olli. 2002.** *Vehicle Routing Problem with Time Windows, Part II: Metaheuristics.* 2002.
- Glover, Fred, y otros. Exact, Heuristic and Metaheuristic methods for Confidentially Protection by Controlled Tabular Adjustment.** pág. 12.
- Vidal, Carlos Julio. 2010.** *Planeación, Optimización y Administración de la Cadena de Abastecimiento.* Santiago de Cali : s.n., 2010.
- Joubert Johannes, Wilhelm. 2006.** *An integrated and intelligent metaheuristic for constrained vehicle routing.* 2006. pág. 167.
- Keyhole Inc. . 2005.** Google Earth. [En línea] Google Inc., 21 de 05 de 2005. <http://bit.ly/1pfxMO1>.
- Laporte, Gilbert, y otros. 1998.** *A Generalized Insertion Heuristic for the Traveling Salesman Problem with the Time Windows.* 1998.
- Larsen, Allan, Madsen, Oli B. G. y Solomon, Marius M. 2013.** *The a Priori Dynamic Traveling Salesman Problem with the Time Windows.* 2013.
- Matai, Rajesh. 2010.** *Traveling salesman problem: an overview of applications, formulations, and solution approaches.* 2010.
- Ministerio de Transporte. 2010.** *Resolución 001384 de 2010.* Rama Ejecutiva . Colombia : s.n., 2010. Por la cual se adopta el método para establecer los límites

de velocidad en las carreteras nacionales, departamentales, distritales y municipales de Colombia.

Olivera, Alfredo. 2004. *Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos*. Universidad de la República. Montevideo, Uruguay : s.n., 2004.

Potvin, Jean-Yves, y otros. 1998. *An Exact Constraint Logic Programming Algorithm for the Traveling Salesman Problem*. Institute for Operations Research and the Management Sciences. 1998.

Robusté, Francesc y Robusté Anton, Francesc . 2005. *Logística del Transporte*. Catalunya : Ediciones UPC, 2005. pág. 16.

Sarhadi, Hassan y Ghoseiri, Keivan. 2010. *An Colony System Approach For Fuzzy Traveling Salesman Problem with the Time Windows*. 2010.

Solomon, Marius M. 1985. *Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints*. Boston, Massachusetts : Operations Research Vol 35, pp255, 1985. págs. 254-265.

Solomon, Marius y Desrosiers, Jacques. 1988. *Time Window Constrained Routing and Scheduling Problems*. 1988.

Taha, Hamdy A. 2012. *Investigación de Operaciones*. México D.C. : Pearson Education, 2012.

Ramser, J. H. y Dantzing, G. B. 1959. *The Truck Dispatching Problem*. Octubre de 1959, Management Science, Vol. 6, págs. 80-91.

Toth, Paolo y Vigo, Daniele. 2002. *The Vehicle Routing Problem*. s.l. : SIAM, 2002.

Universidad de Valladolid. 2012. Departamento de Estadística e I.O. [En línea] 2012. [Citado el: 28 de 8 de 2014.] <http://bit.ly/1qcOM9r>. *Las coordenadas geográficas y la proyección UTM*. Área de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría. Palencia : s.n. pág. 86.

Zhu Qili, Kenny. 1999. *Heuristic Methods for Vehicle Routing Problem with Time Windows*. Department of Electrical Engineering, National University of Singapore. 1999. págs. 32-34.

ANEXOS

Anexo 1. Datos de posición de los clientes

NODO	CLIENTE	LATITUD (°)	LONGITUD (°)	LATITUD (° decimales)	LONGITUD (° decimales)	X (Km)	Y (Km)	X (Centrado)	Y (Centrado)	ÁNGULO POLAR
0	CENTRO DEPÓSITO (CD)	3°32'51.62"N	76°18'55.55"O	3.547672	-76.315431	353.89	392.32	0	0	
1	CLIENTE 1	3°31'59.89"N	76°17'49.70"O	3.533303	-76.297139	355.92	390.64	2.029709104	-1.680962283	-0.691688603
2	CLIENTE 2	3°31'50.57"N	76°17'44.10"O	3.530714	-76.295583	356.09	390.36	2.202122043	-1.967437313	-0.729172229
3	CLIENTE 3	3°31'49.46"N	76°17'53.63"O	3.530450	-76.298230	355.80	390.32	1.907985026	-2.001117431	-0.809218155
4	CLIENTE 4	3°31'30.26"N	76°18'7.18"O	3.525072	-76.301994	355.38	389.73	1.489015748	-2.590201157	-1.049063579
5	CLIENTE 5	3°32'14.10"N	76°17'27.69"O	3.537250	-76.291025	356.60	391.08	2.709526851	-1.245493878	-0.430868067
6	CLIENTE 6	3°31'52.75"N	76°18'5.41"O	3.531319	-76.301503	355.44	390.42	1.544602919	-1.89956742	-0.888097978
7	CLIENTE 7	3°31'46.63"N	76°17'36.53"O	3.529619	-76.293481	356.33	390.23	2.435558741	-2.088766815	-0.708897227
8	CLIENTE 8	3°31'57.01"N	76°17'8.44"O	3.532303	-76.285678	357.19	390.55	3.302836565	-1.771180873	-0.492233512
9	CLIENTE 9	3°32'50.75"N	76°18'31.44"O	3.547259	-76.308722	354.64	392.21	0.743844679	-0.11714598	-0.156204182
10	CLIENTE 10	3°33'5.63"N	76°17'27.31"O	3.551564	-76.290919	356.61	392.66	2.723458043	0.337066616	0.123138026
11	CLIENTE 11	3°33'7.30"N	76°17'56.69"O	3.552028	-76.299081	355.71	392.71	1.816903881	0.389625028	0.211245134
12	CLIENTE 12	3°32'5.27"N	76°17'54.48"O	3.534797	-76.298467	355.77	390.81	1.882432709	-1.51552663	-0.677836543
13	CLIENTE 13	3°32'13.41"N	76°18'0.25"O	3.537133	-76.300214	355.60	391.06	1.70472488	-1.265283088	-0.638504114
14	CLIENTE 14	3°30'41.87"N	76°18'24.30"O	3.511631	-76.306750	354.85	388.25	0.95861879	-4.075611911	-1.339786735
15	CLIENTE 15	3°32'15.18"N	76°17'59.10"O	3.537550	-76.299750	355.63	391.11	1.740289011	-1.210972779	-0.607932458
16	CLIENTE 16	3°32'1.99"N	76°17'48.88"O	3.533886	-76.296911	355.95	390.71	2.05510368	-1.616502766	-0.666504074
17	CLIENTE 17	3°31'45.32"N	76°17'47.94"O	3.529256	-76.296650	355.97	390.19	2.083397536	-2.128509238	-0.796108272
18	CLIENTE 18	3°31'54.44"N	76°18'53.83"O	3.531789	-76.314953	353.94	390.48	0.050461671	-1.845562281	-1.543460971
19	CLIENTE 19	3°31'25.97"N	76°17'6.71"O	3.523881	-76.285197	357.25	389.60	3.354906729	-2.724545141	-0.682080126
20	CLIENTE 20	3°33'5.59"N	76°18'38.40"O	3.551553	-76.310667	354.42	392.66	0.529712073	0.338923922	0.569190231

[Fuente: Autor]

Anexo 2. Fracción de la matriz de distancia convertida a minutos

ALFA	BETA	GAMMA
0.7	0.20	0.10

Nodo	bi	li	pi	pj	t _{0-i}	MATRIZ DE DISTANCIAS (minutos)					
					D	1	2	3	4	5	6
0	0	0	0.00000		0	5.79	6.50	6.06	6.55	6.60	5.35
1	420	555	-0.69169	-1.543	5.79	0	0.75	0.76	2.38	1.81	1.19
2	420	555	-0.72917	-1.543	6.50	0.75	0	0.66	2.13	1.98	1.48
3	420	555	-0.80922	-1.543	6.06	0.76	0.66	0	1.63	2.47	0.84
4	420	555	-1.04906	-1.543	6.55	2.38	2.13	1.63	0	4.08	1.56
5	420	555	-0.43087	-1.543	6.60	1.81	1.98	2.47	4.08	0	2.99
6	420	555	-0.88810	-1.543	5.35	1.19	1.48	0.84	1.56	2.99	0

[Fuente: Autor]

Anexo 3. Segunda iteración del algoritmo heurístico PFIH

ITERACIÓN 2		
CLIENTE	Costo Inserción C7	Validación
1	107.39	Hora de salida
2	106.95	441.16
3	107.22	
4	106.92	Vel Km/min
5	106.88	0.50
6	107.67	Distancias del cliente 8 al cliente 7
7	106.59	
9	142.96	
10	188.15	0.58
11	189.37	Tiempo en ruta mínimo
12	188.69	1.16
13	189.13	Hora llegada
14	186.24	431.16
15	189.10	Cumple ventana
16	224.42	SI
17	223.92	Capacidad
18	141.53	Se cumple por suposición
19	138.03	Tiempo de servicio (min)
20	143.05	10

Denote que el cliente 8 no aparece ya que fue insertado en la ruta actual

Cliente que minimiza el costo total de la inserción en la ruta actual

	INICIAL (eo) (min)	FINAL (lo)(min)
Ventana de tiempo	420	555
Intervalo Si	431	441
Tiempo ocioso	-11.16	113.84

Mínimo	106.59
--------	--------

[Fuente: Autor]

Resultados del TSPTW con instancias futuras

▪ Instancia de 24 clientes

Anexo 4. Secuencia determinada por el método exacto y el PFIH del TSPTW para 15 clientes de la jornada de la mañana

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA																	
MODELO EXACTO	1	CD	HE	5	1	2	3	4	6	7	8	19	LC	18	20	T	9	CD	
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	8	HE	7	5	4	2	3	1	6	LC	19	T	18	9	20	CD	

[Fuente: Autor]

Anexo 5. Resultados del modelo exacto para el TSPTW para 15 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	415.8	410	1140	0
CLIENTE HE	2.09	4.17	420.0	10	430.0	420	540	0
CLIENTE 5	2.61	5.22	476.4	10	486.4	420	555	41.18
CLIENTE 1	0.82	1.65	488.1	10	498.1	420	555	0
CLIENTE 2	0.44	0.87	498.9	10	508.9	420	555	0
CLIENTE 3	0.33	0.66	509.6	10	519.6	420	555	0
CLIENTE 4	0.82	1.63	521.2	10	531.2	420	555	0
CLIENTE 6	0.78	1.56	532.8	10	542.8	420	555	0
CLIENTE 7	0.53	1.06	543.8	10	553.8	420	555	0
CLIENTE 8	0.58	1.16	555.0	10	565.0	420	555	0
CLIENTE 19	1.05	2.10	600.0	10	610.0	600	630	32.90
CLIENTE LC	2.34	4.68	614.7	10	624.7	540	630	0
CLIENTE 18	0.30	0.60	685.1	10	695.1	600	720	59.80
CLIENTE 20	0.75	1.51	696.6	10	706.6	600	720	0
CLIENTE T	0.76	1.52	708.1	10	718.1	600	600	0
CLIENTE 9	0.94	1.88	720.0	10	730.0	600	720	0
DEPÓSITO	0.84	1.67	731.7	10	741.7	410	1140	0
TOTAL	15.97	31.94	TIEMPO DE HOLGURA	0.00	RETRASO	(11.70)	TIEMPO IMPRODUCTIVO	133.88

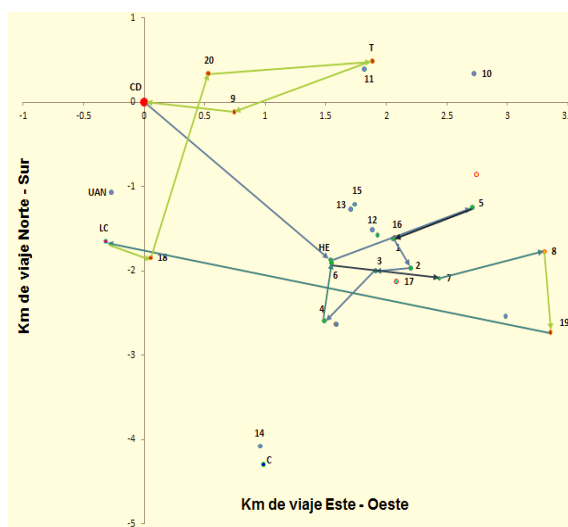
[Fuente: Autor]

Anexo 6. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW para 15 clientes en la jornada de la mañana

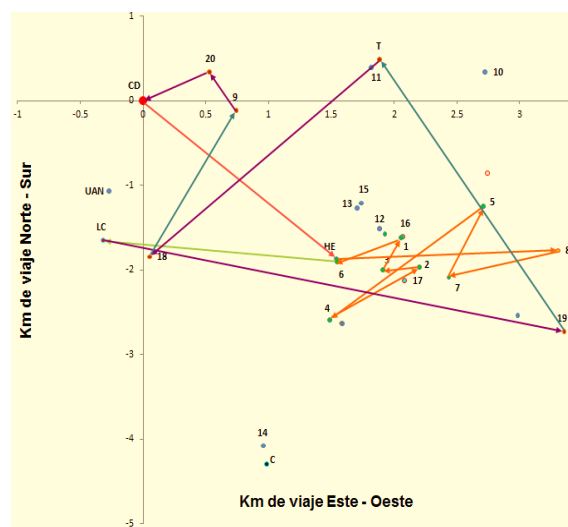
SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						$[a_i]$	$[b_i]$	
DEPÓSITO	0	0	0	0	410	410	1140	0
CLIENTE HE	2.09	4.17	420.00	10	430	420	540	5.83
CLIENTE 8	3.47	6.95	436.95	10	446.95	420	555	0
CLIENTE 7	0.58	1.16	448.11	10	458.11	420	555	0
CLIENTE 5	1.00	2.00	460.10	10	470.10	420	555	0
CLIENTE 4	2.04	4.08	474.18	10	484.18	420	555	0
CLIENTE 2	1.062	2.12	486.31	10	496.31	420	555	0
CLIENTE 3	0.331	0.66	496.97	10	506.97	420	555	0
CLIENTE 1	0.48	0.95	507.92	10	517.92	420	555	0
CLIENTE 6	0.67	1.35	519.27	10	529.27	420	555	0
CLIENTE LC	1.05	2.11	540.00	10	550.00	540	630	8.62
CLIENTE 19	2.34	4.68	600.00	10	610.00	600	720	45.32
CLIENTE T	3.71	7.42	617.42	10	627.42	600	720	0
CLIENTE 18	2.82	5.03	632.45	10	642.45	600	720	0
CLIENTE 9	1.96	3.93	646.37	10	656.37	600	600	0
CLIENTE 20	0.55	1.10	657.47	10	667.47	600	720	0
DEPÓSITO	0.76	1.53	669.00	10	679.00	410	1140	0
TOTAL	24.92	45.05	TIEMPO DE HOLGURA		51.00	TIEMPO IMPRODUCTIVO		59.77

[Fuente: Autor]

Anexo 7. Secuencia del TSPTW determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 15 clientes de la jornada de la mañana



(a)



(b)

[Fuente: Autor]

Anexo 8. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW para 9 clientes de la jornada de la tarde

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA											
MODELO EXACTO	1	CD	UAN	10	11	15	13	12	14	17	16	CD	
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	14	10	12	15	13	11	UAN	17	16	CD	

[Fuente: Autor]

Anexo 9. Resultados del modelo exacto para el TSPTW para 9 clientes en la jornada de la tarde

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						$[a_i]$	$[b_i]$	
DEPÓSITO	0	0	0	0	837.72	410	1140	0
CLIENTE UAN	1.14	2.28	840	10	850.0	840	960	0
CLIENTE 10	0.08	0.16	850.2	10	860.2	840	1140	0
CLIENTE 11	0.50	1.00	861.2	10	871.2	840	1140	0
CLIENTE 15	1.80	3.61	874.8	10	884.8	840	960	0
CLIENTE 13	0.06	0.12	933.5	10	943.5	840	960	48.58
CLIENTE 12	0.31	0.62	944.1	10	954.1	840	960	0
CLIENTE 14	2.93	5.86	960	10	970.0	840	960	0
CLIENTE 17	2.28	4.56	974.6	10	984.6	840	960	0
CLIENTE 16	0.58	1.15	985.7	10	995.7	840	960	0
DEPÓSITO	2.87	5.74	1001.4	10	1011.4	410	1140	0
TOTAL	12.54	25.09	TIEMPO DE HOLGURA		138.56	TIEMPO IMPRODUCTIVO		48.58

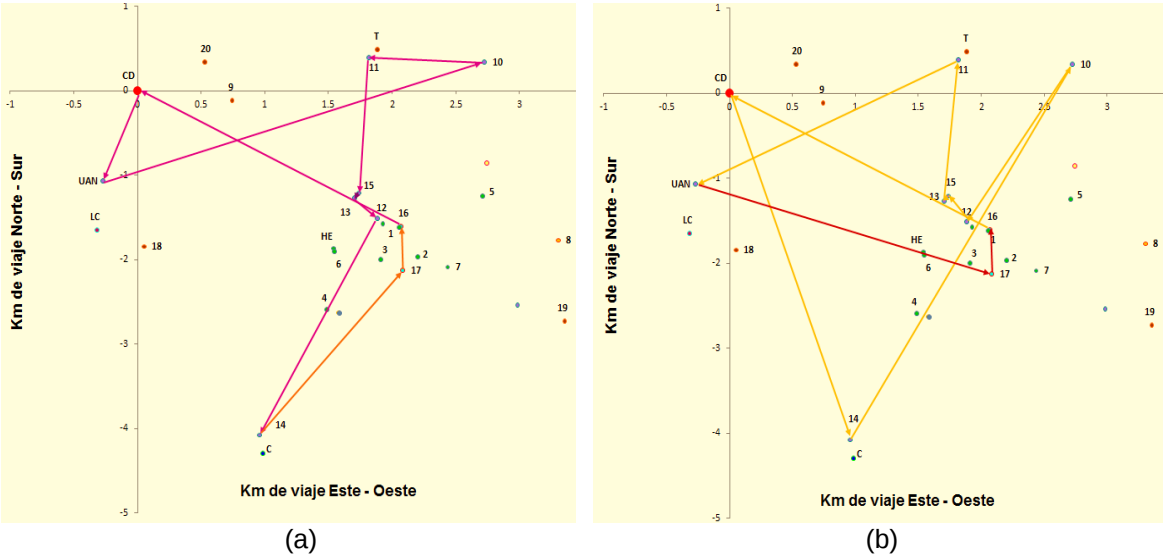
[Fuente: Autor]

Anexo 10. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW para 9 clientes en la jornada de la tarde

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						$[a_i]$	$[b_i]$	
DEPÓSITO	0	0	0	0	840	410	1140	0
CLIENTE 14	4.62	6.16	846.16	10	856.16	840	960	0
CLIENTE 10	5.06	6.75	862.91	10	872.91	840	960	0
CLIENTE 12	2.14	2.85	875.76	10	885.76	840	960	0
CLIENTE 15	0.35	0.47	886.23	10	896.23	840	960	0
CLIENTE 13	0.06	0.08	896.31	10	906.31	840	960	0
CLIENTE 11	1.86	2.48	908.78	10	918.78	840	960	0
CLIENTE UAN	2.00	2.66	921.44	10	931.44	840	960	0
CLIENTE 17	2.74	3.65	935.09	10	945.09	840	1140	0
CLIENTE 16	0.58	2.89	947.99	10	957.99	840	1140	0
DEPÓSITO	2.87	3.83	961.82	10	971.82	410	1140	0
TOTAL	22.27	31.82	TIEMPO DE HOLGURA		178.18	TIEMPO IMPRODUCTIVO		0.00

[Fuente: Autor]

Anexo 11. Secuencia del TSPTW determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 9 clientes de la jornada de la tarde



[Fuente: Autor]

▪ **Instancia de 30 clientes**

Anexo 12. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW para 19 clientes de la jornada de la mañana

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA																
MODELO EXACTO	1	CD	HE	5	8	7	B	2	1	F	3	6	4	A	C	19	LC	18
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	F	8	7	HE	5	4	2	3	1	6	B	A	LC	19	T	18

[Fuente: Autor]

Anexo 13. Resultados del modelo exacto para el TSPTW para 19 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	415.8	410	1140	0
CLIENTE HE	2.09	4.17	420	10	430.00	420	540	0
CLIENTE 5	2.61	5.22	435.2	10	445.20	420	555	0
CLIENTE 8	0.91	1.81	447.0	10	457.00	420	555	0
CLIENTE 7	0.161	0.32	478.7	10	488.70	420	525	21.38
CLIENTE B	0.47	0.94	490.2	10	500.20	420	555	0
CLIENTE 2	0.421	0.84	500.5	10	510.50	420	555	0
CLIENTE 1	0.821	1.64	511.3	10	521.30	420	570	0
CLIENTE F	0.11	0.22	521.7	10	531.70	420	555	0
CLIENTE 3	0.11	0.22	532.6	10	542.60	420	570	0
CLIENTE 6	0.14	0.28	543.4	10	553.40	420	555	0
CLIENTE 4	0.29	0.59	555.0	10	565.00	420	555	1.01
CLIENTE A	0.58	1.16	570.0	10	580.00	420	555	3.84
CLIENTE C	1.05	2.10	584.0	10	594.00	600	720	1.90
CLIENTE 19	3.19	6.38	600.4	10	610.40	600	720	0
CLIENTE LC	3.07	6.13	630.0	10	640.00	540	630	13.47
CLIENTE 18	0.30	0.60	640.6	10	650.60	600	720	0
CLIENTE 20	0.75	1.51	652.1	10	662.10	600	720	0
CLIENTE T	0.76	1.52	708.1	10	718.10	600	720	44.48
CLIENTE 9	0.94	1.88	720.0	10	730.00	600	720	0
DEPÓSITO	0.84	1.67	731.7	10	741.70	410	1140	0
TOTAL	19.61	39.22	TIEMPO DE HOLGURA	0.00	RETRASO	(11.70)	TIEMPO IMPRODUCTIVO	86.08

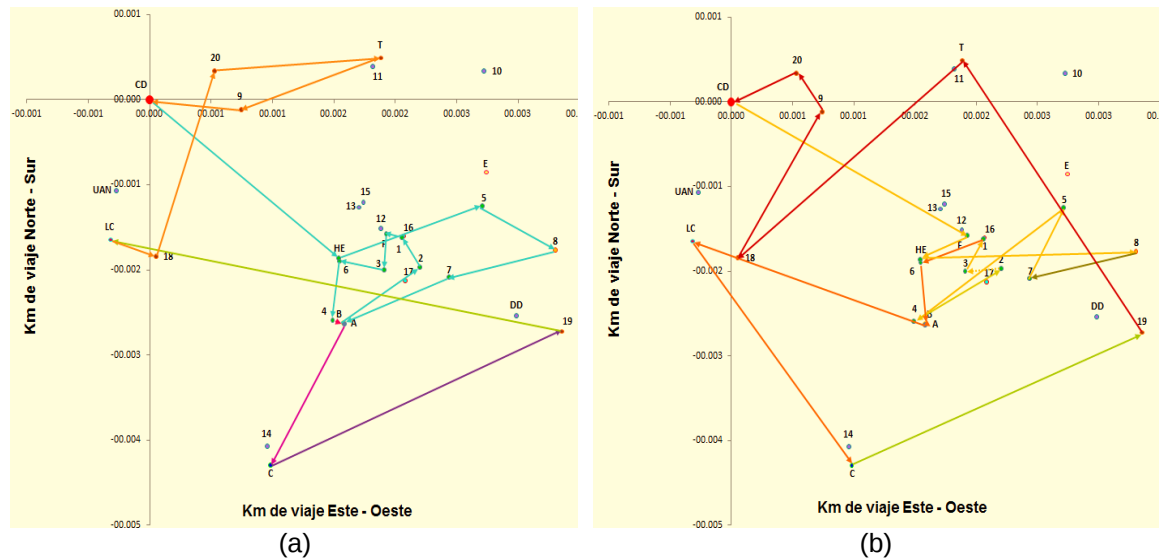
[Fuente: Autor]

Anexo 14. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW para 19 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	410	410	1140	0
CLIENTE F	2.73	5.46	420.00	10	430.00	420	525	4.54
CLIENTE HE	2.71	5.41	435.41	10	445.41	420	540	0
CLIENTE 8	3.47	6.95	452.36	10	462.36	420	555	0
CLIENTE 7	0.579	1.16	463.52	10	473.52	420	555	0
CLIENTE 5	1.00	2.00	475.52	10	485.52	420	555	0
CLIENTE 4	2.039	4.08	489.60	10	499.60	420	555	0
CLIENTE 2	1.062	2.12	501.72	10	511.72	420	555	0
CLIENTE 3	0.33	0.66	512.38	10	522.38	420	555	0
CLIENTE 1	0.48	0.95	523.34	10	533.34	420	555	0
CLIENTE 6	0.67	1.35	534.68	10	544.68	420	555	0
CLIENTE B	0.82	1.64	546.32	10	556.32	420	570	0
CLIENTE A	0.99	1.98	558.31	10	568.31	420	570	0
CLIENTE LC	2.40	4.79	573.10	10	583.10	540	630	0
CLIENTE C	3.07	6.13	589.23	10	599.23	570	720	0
CLIENTE 19	3.19	6.38	605.61	10	615.61	600	720	0
CLIENTE T	7.42	14.83	630.44	10	640.44	600	720	0
CLIENTE 18	2.82	5.63	646.08	10	656.08	600	720	0
CLIENTE 9	1.96	3.93	660.00	10	670.00	600	720	0
CLIENTE 20	0.55	1.10	671.10	10	681.10	600	720	0
DEPÓSITO	0.76	1.53	682.63	10	692.63	410	1140	0
TOTAL	39.04	78.09	TIEMPO DE HOLGURA		37.37	TIEMPO IMPRODUCTIVO		4.54

[Fuente: Autor]

Anexo 15. Secuencia del TSPTW determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 19 clientes de la jornada de la mañana



[Fuente: Autor]

Anexo 16. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW para 11 clientes de la jornada de la tarde

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA												
MODELO EXACTO	1	CD	UAN	12	13	15	11	10	E	DD	14	17	16	CD
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	14	DD	10	12	15	13	11	E	17	16	CD	

[Fuente: Autor]

Anexo 17. Resultados del modelo exacto para el TSPTW para 11 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						$[a_i]$	$[b_i]$	
DEPÓSITO	0	0	0	0	857.6	410	1140	0
CLIENTE UAN	1.14	2.28	859.9	10	869.9	840	960	0
CLIENTE 12	2.14	4.28	872.4	10	882.4	840	960	0
CLIENTE 13	0.31	0.62	883.1	10	893.1	840	960	0
CLIENTE 15	0.06	0.12	893.2	10	903.2	840	1140	0
CLIENTE 11	1.80	3.61	906.8	10	916.8	840	1140	0
CLIENTE 10	0.50	1.00	917.8	10	927.8	840	960	0
CLIENTE E	1.34	2.68	930.5	10	940.5	840	960	0
CLIENTE DD	1.92	3.83	944.3	10	954.3	840	960	0
CLIENTE 14	2.85	5.71	960.0	10	970.0	900	1080	0
CLIENTE 17	2.28	4.56	974.6	10	984.6	840	960	0
CLIENTE 16	0.58	1.15	985.7	10	995.7	840	960	0
DEPÓSITO	2.87	5.74	1001.4	10	1011.4	410	1140	0
TOTAL	17.79	35.57	TIEMPO DE HOLGURA		139	TIEMPO IMPRODUCTIVO		0

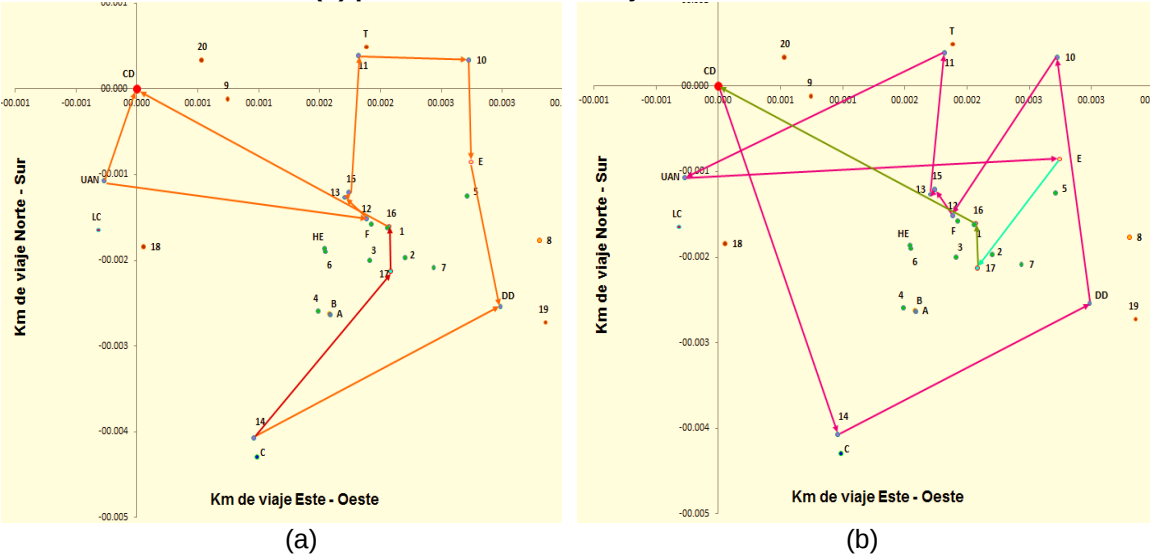
[Fuente: Autor]

Anexo 18. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW para 11 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_i	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	840	410	1140	0
CLIENTE 14	4.62	9.23	849.23	10	859	840	960	0
CLIENTE DD	2.85	5.71	864.94	10	875	840	960	0
CLIENTE 10	3.24	6.48	881.42	10	891	840	960	0
CLIENTE 12	2.14	4.28	895.70	10	906	840	960	0
CLIENTE 15	0.35	0.70	906.40	10	916	840	960	0
CLIENTE 13	0.06	0.12	916.52	10	927	840	960	0
CLIENTE 11	1.86	3.71	930.23	10	940	840	960	0
CLIENTE UAN	2.00	3.99	944.22	10	954	840	960	0
CLIENTE E	1.66	3.32	957.54	10	968	900	1080	0
CLIENTE 17	1.61	3.23	970.77	10	981	840	1140	0
CLIENTE 16	0.58	1.15	981.93	10	992	840	1140	0
DEPÓSITO	2.87	5.74	997.67	10	1008	410	1140	0
TOTAL	23.84	47.67	TIEMPO DE HOLGURA		142.33	TIEMPO IMPRODUCTIVO		0

[Fuente: Autor]

Anexo 19. Secuencia del TSPTW determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 11 clientes de la jornada de la tarde



[Fuente: Autor]

Resultados del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h

- *Instancia de 20 clientes*

Anexo 20. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 12 clientes de la jornada de la mañana

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA														
MODELO EXACTO	1	CD	6	4	3	2	1	5	8	7	19	9	20	18	CD	
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	8	7	5	4	2	3	1	6	19	18	9	20	CD	

[Fuente: Autor]

Anexo 21. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 12 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	414.06	410	1140	0
CLIENTE 6	2.67	5.94	420	10	430.00	420	555	0
CLIENTE 4	0.78	1.73	431.7	10	441.70	420	555	0
CLIENTE 3	0.817	1.82	443.5	10	453.50	420	555	0
CLIENTE 2	0.33	0.73	454.3	10	464.30	420	555	0
CLIENTE 1	0.376	0.84	519.7	10	529.70	420	555	54.56
CLIENTE 5	0.905	2.01	531.7	10	541.70	420	555	0
CLIENTE 8	0.91	2.01	543.7	10	553.70	420	555	0
CLIENTE 7	0.58	1.29	555	10	565.00	420	555	0
CLIENTE 19	0.87	1.94	600	10	610.00	600	720	33.06
CLIENTE 9	3.24	7.20	617.2	10	627.20	600	720	0
CLIENTE 20	0.55	1.22	628.4	10	638.40	600	720	0
CLIENTE 18	0.75	1.68	640.1	10	650.10	600	720	0
DEPÓSITO	1.98	4.40	654.5	10	664.50	410	1140	0
TOTAL	14.76	32.81	TIEMPO DE HOLGURA		65.50	TIEMPO IMPRODUCTIVO		87.62

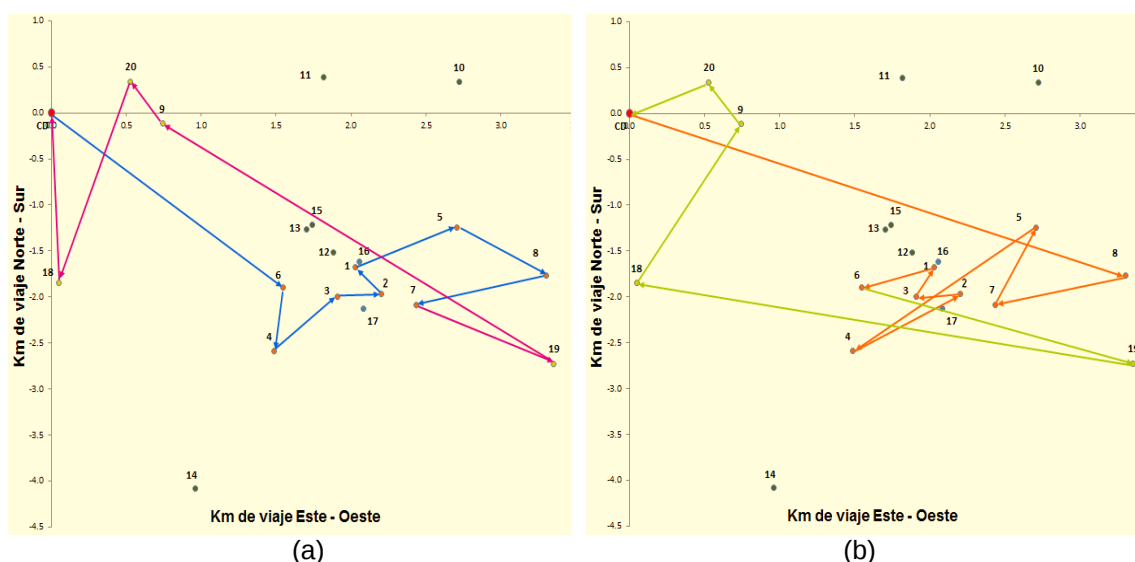
[Fuente: Autor]

Anexo 22. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 12 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	410	410	1140	0
CLIENTE 8	4.16	9.25	420.0	10	430.00	420	555	0.75
CLIENTE 7	0.58	1.29	431.29	10	441.29	420	555	0
CLIENTE 5	0.998	2.22	443.51	10	453.51	420	555	0
CLIENTE 4	2.04	4.53	458.04	10	468.04	420	555	0
CLIENTE 2	1.063	2.36	470.40	10	480.40	420	555	0
CLIENTE 3	0.331	0.73	481.13	10	491.13	420	555	0
CLIENTE 1	0.38	0.85	491.98	10	501.98	420	555	0
CLIENTE 6	0.60	1.32	503.30	10	513.30	420	555	0
CLIENTE 19	1.35	3.01	600.00	10	610.00	600	720	83.69
CLIENTE 18	5.24	11.64	621.64	10	631.64	600	720	0
CLIENTE 9	1.96	4.36	636.00	10	646.00	600	600	0
CLIENTE 20	0.55	1.22	647.22	10	657.22	600	720	0
DEPÓSITO	0.76	1.70	658.91	10	668.91	410	1140	0
TOTAL	20.02	44.48	TIEMPO DE HOLGURA		61.09	TIEMPO IMPRODUCTIVO		84.43

[Fuente: Autor]

Anexo 23. Secuencia del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 12 clientes de la jornada de la mañana



[Fuente: Autor]

Anexo 24. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 8 clientes de la jornada de la tarde

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA									
MODELO EXACTO	1	CD	11	10	15	13	12	14	17	16	CD
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	14	10	12	15	13	11	17	16	CD

[Fuente: Autor]

Anexo 25. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 8 clientes en la jornada de la tarde

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						$[a_i]$	$[b_i]$	
DEPÓSITO	0	0	0	0	835.33	410	1140	0
CLIENTE 11	2.10	4.67	830.65	10	840.65	840	960	0
CLIENTE 10	0.50	1.11	851.10	10	861.10	840	1140	0
CLIENTE 15	1.826	4.06	865.20	10	875.20	840	1140	0
CLIENTE 13	0.06	0.13	875.30	10	885.30	840	960	0
CLIENTE 12	0.310	0.69	886.00	10	896.00	840	960	0
CLIENTE 14	2.929	6.51	944.90	10	954.90	840	960	42.39
CLIENTE 17	2.28	5.06	960.00	10	970.00	840	960	0
CLIENTE 16	0.58	1.28	971.30	10	981.30	840	960	0
DEPÓSITO	2.87	6.38	987.70	10	997.70	410	1140	0
TOTAL	13.45	29.89	TIEMPO DE HOLGURA		152.30	TIEMPO IMPRODUCTIVO		42.39

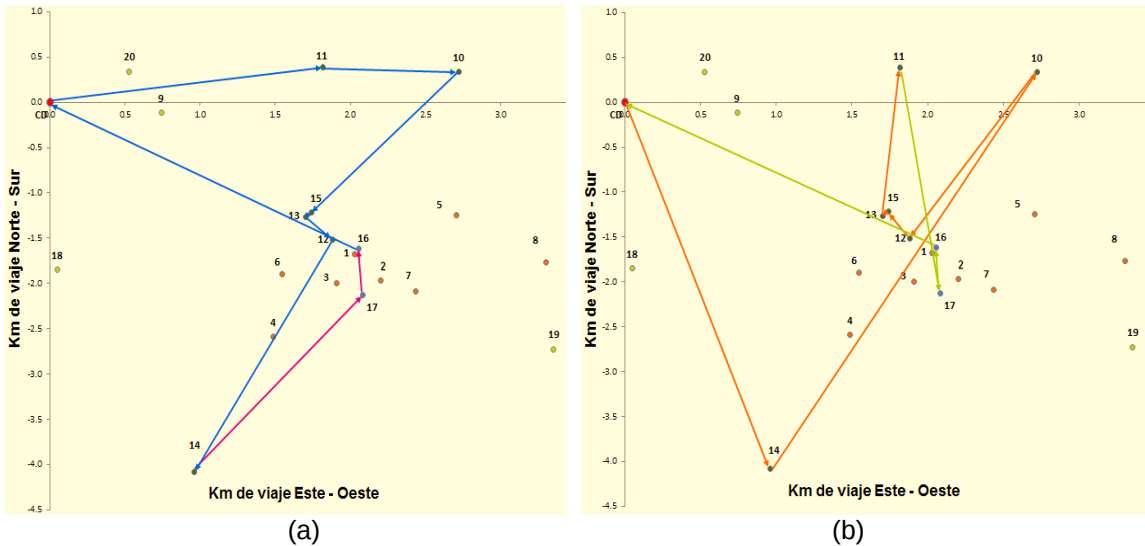
[Fuente: Autor]

Anexo 26. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 8 clientes en la jornada de la tarde

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						$[a_i]$	$[b_i]$	
DEPÓSITO	0	0	0	0	840	410	1140	0
CLIENTE 14	4.62	10.26	850.26	10	860.26	840	960	0
CLIENTE 10	5.07	11.26	871.52	10	881.52	840	960	0
CLIENTE 12	2.138	4.75	886.27	10	896.27	840	960	0
CLIENTE 15	0.35	0.78	897.05	10	907.05	840	960	0
CLIENTE 13	0.059	0.13	907.18	10	917.18	840	960	0
CLIENTE 11	1.856	4.13	921.30	10	931.30	840	960	0
CLIENTE 17	2.84	6.31	937.62	10	947.62	840	1140	0
CLIENTE 16	0.58	1.28	948.90	10	958.90	840	1140	0
DEPÓSITO	2.87	6.38	965.28	10	975.28	410	1140	0
TOTAL	20.38	45.28	TIEMPO DE HOLGURA		174.72	TIEMPO IMPRODUCTIVO		0

[Fuente: Autor]

Anexo27. Secuencia del TSPTW variando la velocidad a 27 Km/h del vehículo determinada por el modelo exacto (izq.) y el heurístico PFIH (a) para 8 clientes de la jornada de la tarde



[Fuente: Autor]

▪ **Instancia de 24 clientes**

Anexo 28. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 15 clientes de la jornada de la mañana

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA														
MODELO EXACTO	1	CD	HE	5	1	2	3	4	6	7	8	19	LC	18	20	T
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	8	7	HE	5	4	2	3	1	6	LC	19	T	18	9

[Fuente: Autor]

Anexo 29. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 15 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_i	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						$[a_i]$	$[b_i]$	
DEPÓSITO	0	0	0	0	414.64	410	1140	0
CLIENTE HE	2.09	4.64	420.00	10	430.0	420	540	0
CLIENTE 5	2.61	5.79	435.80	10	445.8	420	555	0
CLIENTE 1	0.82	1.83	447.60	10	457.6	420	555	0
CLIENTE 2	0.44	0.97	458.60	10	468.6	420	555	0
CLIENTE 3	0.33	0.73	469.30	10	479.3	420	555	0
CLIENTE 4	0.82	1.82	481.10	10	491.1	420	555	0
CLIENTE 6	0.78	1.73	492.90	10	502.9	420	555	0
CLIENTE 7	0.53	1.18	543.70	10	553.7	420	555	39.62
CLIENTE 8	0.58	1.29	555.00	10	565.0	420	555	0
CLIENTE 19	1.05	2.33	600.00	10	610.0	540	630	32.67
CLIENTE LC	2.34	5.20	615.20	10	625.2	600	720	0
CLIENTE 18	0.30	0.67	625.80	10	635.8	600	720	0
CLIENTE 20	0.75	1.68	637.50	10	647.5	600	720	0
CLIENTE T	0.76	1.68	649.20	10	659.2	600	600	0
CLIENTE 9	0.94	2.09	661.30	10	671.3	600	720	0
DEPÓSITO	0.84	1.86	673.10	10	683.1	410	1140	0
TOTAL	15.97	35.49	TIEMPO DE HOLGURA		46.90	TIEMPO IMPRODUCTIVO		72.29

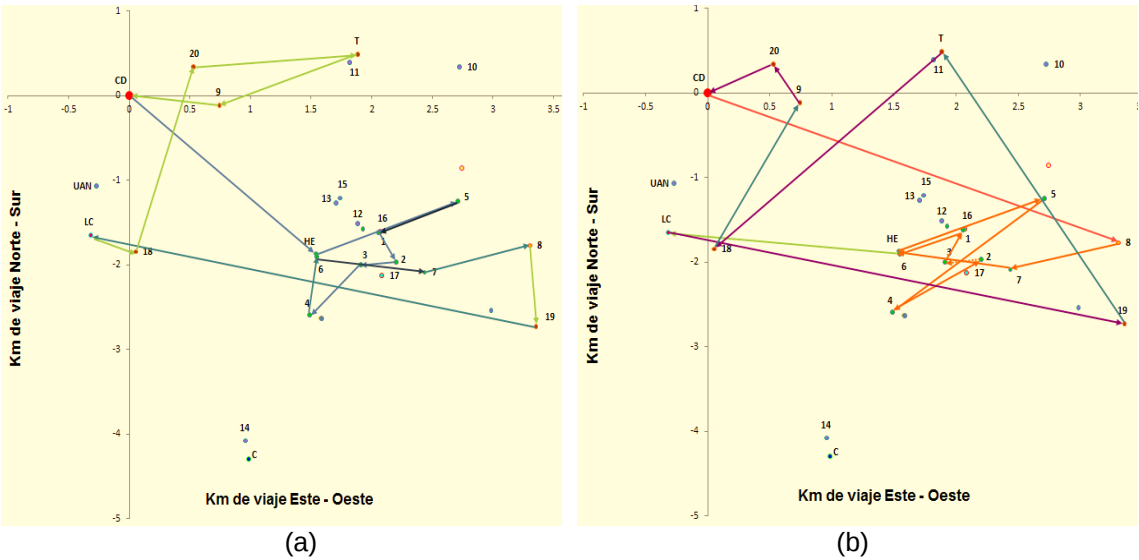
[Fuente: Autor]

Anexo 30. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 15 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_i	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						$[a_i]$	$[b_i]$	
DEPÓSITO	0	0	0	0	410.0	410	1140	0.75
CLIENTE 8	4.16	9.25	420.00	10	430.0	420	540	0
CLIENTE HE	3.47	7.72	437.72	10	447.72	420	555	0
CLIENTE 7	3.38	7.52	455.24	10	465.24	420	555	0
CLIENTE 5	0.998	2.22	467.46	10	477.46	420	555	0
CLIENTE 4	2.04	4.53	481.99	10	491.99	420	555	0
CLIENTE 2	1.062	2.36	494.35	10	504.35	420	555	0
CLIENTE 3	0.331	0.73	505.09	10	515.09	420	555	0
CLIENTE 1	0.48	1.06	516.15	10	526.15	420	555	0
CLIENTE 6	0.67	1.50	527.64	10	537.64	420	555	0.02
CLIENTE LC	1.05	2.34	540.00	10	550.00	540	630	44.80
CLIENTE 19	2.34	5.20	600.00	10	610.00	600	720	0
CLIENTE T	3.71	8.24	618.24	10	628.24	600	720	0
CLIENTE 18	2.82	5.59	633.83	10	643.83	600	720	0
CLIENTE 9	1.96	4.36	648.19	10	658.19	600	600	0
CLIENTE 20	0.55	1.22	659.41	10	669.41	600	720	0
DEPÓSITO	0.76	1.70	671.11	10	681.11	410	1140	0
TOTAL	29.80	65.55	TIEMPO DE HOLGURA		48.89	TIEMPO IMPRODUCTIVO		45.56

[Fuente: Autor]

Anexo 31. Secuencia del TSPTW variando la velocidad a 27 Km/h del vehículo determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 15 clientes de la jornada de la mañana.



[Fuente: Autor]

Anexo 32. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 9 clientes de la jornada de la tarde

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA										
MODELO EXACTO	1	CD	UAN	10	11	15	13	12	14	17	16	CD
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	14	10	12	15	13	11	UAN	17	16	CD

[Fuente: Autor]

Anexo 33. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 9 clientes en la jornada de la tarde

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						$[a_i]$	$[b_i]$	
DEPÓSITO	0	0	0	0	840.0	410	1140	0
CLIENTE UAN	1.14	2.53	887.4	10	897.4	840	960	44.87
CLIENTE 10	0.08	0.17	897.50	10	907.5	840	1140	0
CLIENTE 11	0.50	1.11	908.70	10	918.7	840	1140	0
CLIENTE 15	1.80	4.01	922.70	10	932.7	840	960	0
CLIENTE 13	0.06	0.13	932.80	10	942.8	840	960	0
CLIENTE 12	0.31	0.69	943.50	10	953.5	840	960	0
CLIENTE 14	2.93	6.51	960.00	10	970.0	840	960	0
CLIENTE 17	2.28	5.06	975.10	10	985.1	840	960	0
CLIENTE 16	0.58	1.28	986.30	10	996.3	840	960	0
DEPÓSITO	2.87	6.38	1002.70	10	1012.7	410	1140	0
TOTAL	12.54	27.87	TIEMPO DE HOLGURA		137.30	TIEMPO IMPRODUCTIVO		44.87

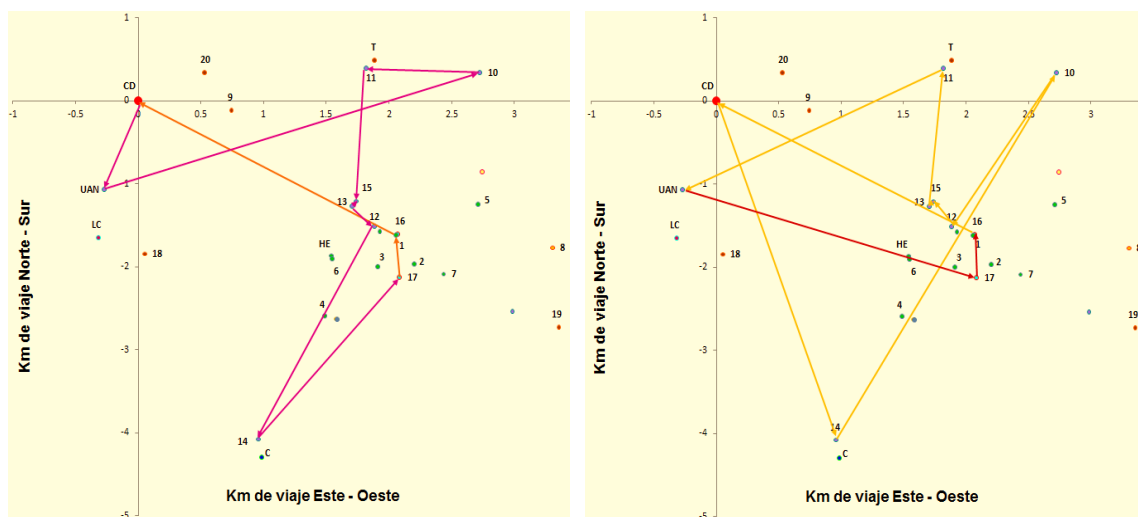
[Fuente: Autor]

Anexo 34. Resultados obtenidos del heurístico PFIH para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 9 clientes de la jornada de la tarde

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	840	410	1140	0
CLIENTE 14	4.62	10.26	850.26	10	860	840	960	0
CLIENTE 10	5.06	11.25	871.51	10	881.51	840	960	0
CLIENTE 12	2.14	4.75	886.26	10	896.26	840	960	0
CLIENTE 15	0.35	0.78	897.04	10	907.04	840	960	0
CLIENTE 13	0.06	0.13	907.18	10	917.18	840	960	0
CLIENTE 11	1.86	4.13	921.30	10	931.30	840	960	0
CLIENTE UAN	2.00	4.44	935.74	10	945.74	840	960	0
CLIENTE 17	2.74	6.08	951.82	10	961.82	840	1140	0
CLIENTE 16	0.58	1.28	963.10	10	973.10	840	1140	0
DEPÓSITO	2.87	6.38	979.49	10	989.49	410	1140	0
TOTAL	22.27	49.49	TIEMPO DE HOLGURA		160.51	TIEMPO IMPRODUCTIVO		0.00

[Fuente: Autor]

Anexo 35. Secuencia del TSPTW variando la velocidad a 27 Km/h del vehículo determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 9 clientes de la jornada de la tarde



(a)

(b)

[Fuente: Autor]

▪ Instancia de 30 clientes

Anexo 36. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 19 clientes de la jornada de la mañana

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA																					
MODELO EXACTO	1	CD	HE	5	8	7	B	2	1	F	3	6	4	A	C	19	LC	18	20	T	9	CD	
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	F	8	HE	7	5	4	2	3	1	6	B	A	LC	C	19	T	18	9	20	CD	

[Fuente: Autor]

Anexo 37. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 19 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	415.4	410	1140	0
CLIENTE HE	2.09	4.64	420.0	10	430.0	420	540	0
CLIENTE 5	2.61	5.79	435.8	10	445.8	420	555	0
CLIENTE 8	0.91	2.01	447.8	10	457.8	420	555	0
CLIENTE 7	0.579	1.29	477.9	10	487.9	420	555	18.81
CLIENTE B	0.77	1.70	489.6	10	499.6	420	570	0
CLIENTE 2	0.141	0.31	499.9	10	509.9	420	555	0
CLIENTE 1	0.437	0.97	510.9	10	520.9	420	555	0
CLIENTE F	0.16	0.36	521.3	10	531.3	420	525	0
CLIENTE 3	0.47	1.05	532.3	10	542.3	420	555	0
CLIENTE 6	0.42	0.94	543.3	10	553.3	420	555	0
CLIENTE 4	0.78	1.73	555.0	10	565.0	420	555	0
CLIENTE A	0.11	0.25	568.5	10	578.5	420	570	0
CLIENTE C	1.99	4.43	582.9	10	592.9	570	720	0
CLIENTE 19	3.19	7.09	600.0	10	610.0	600	720	0
CLIENTE LC	2.34	5.20	615.2	10	625.2	540	630	0
CLIENTE 18	0.30	0.67	625.9	10	635.9	600	720	0
CLIENTE 20	0.75	1.68	637.5	10	647.5	600	720	0
CLIENTE T	0.76	1.68	707.9	10	717.9	600	720	58.72
CLIENTE 9	0.94	2.09	720.0	10	730.0	600	720	0
DEPÓSITO	0.84	1.86	732.7	10	742.7	410	1140	0
TOTAL	20.58	45.74	TIEMPO DE HOLGURA	0.00	RETRASO	(12.69)	TIEMPO IMPRODUCTIVO	77.53

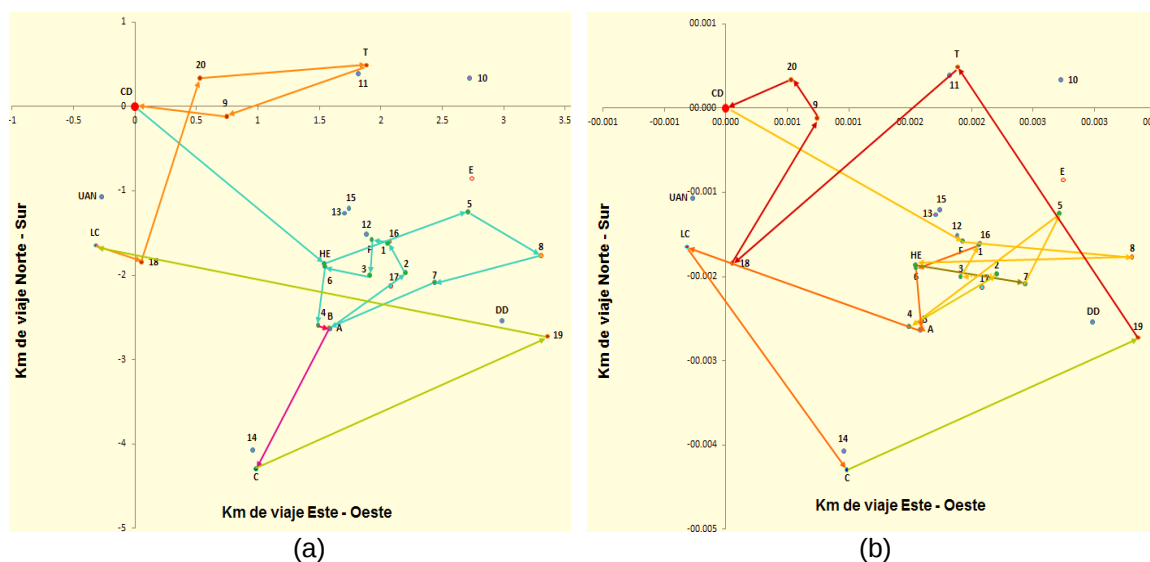
[Fuente: Autor]

Anexo 38. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 19 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	410	410	1140	3.93
CLIENTE F	2.73	6.07	420.00	10	430.00	420	525	0
CLIENTE 8	1.56	3.46	433.46	10	443.46	420	555	0
CLIENTE HE	3.47	7.72	451.19	10	461.19	420	540	0
CLIENTE 7	3.384	7.52	468.71	10	478.71	420	555	0
CLIENTE 5	1.00	2.22	480.92	10	490.92	420	555	0
CLIENTE 4	2.039	4.53	495.46	10	505.46	420	555	0
CLIENTE 2	1.062	2.36	507.82	10	517.82	420	555	0
CLIENTE 3	0.33	0.73	518.55	10	528.55	420	555	0
CLIENTE 1	0.48	1.06	529.61	10	539.61	420	555	0
CLIENTE 6	0.67	1.50	541.11	10	551.11	420	555	0
CLIENTE B	0.82	1.82	552.93	10	562.93	420	570	0
CLIENTE A	0.99	2.20	565.14	10	575.14	420	570	0
CLIENTE LC	2.40	5.32	580.46	10	590.46	540	630	0
CLIENTE C	3.07	6.82	597.28	10	607.28	570	720	0
CLIENTE 19	3.19	7.09	614.37	10	624.37	600	720	0
CLIENTE T	3.71	8.24	632.60	10	642.60	600	720	0
CLIENTE 18	2.82	6.26	648.86	10	658.86	600	720	0
CLIENTE 9	1.96	4.36	663.23	10	673.23	600	720	0
CLIENTE 20	0.55	1.22	674.44	10	684.44	600	720	0
DEPÓSITO	0.76	1.70	686.14	10	696.14	410	1140	0
TOTAL	36.99	82.21	TIEMPO DE HOLGURA		33.86	TIEMPO IMPRODUCTIVO		3.93

[Fuente: Autor]

Anexo 39. Secuencia del TSPTW variando la velocidad a 27 Km/h del vehículo determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 19 clientes de la jornada de la mañana



[Fuente: Autor]

Anexo 40. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 11 clientes de la jornada de la tarde

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA												
MODELO EXACTO	1	CD	UAN	12	13	15	11	10	E	DD	14	17	16	CD
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	14	DD	10	12	15	13	11	UAN	E	17	16	CD

[Fuente: Autor]

Anexo 41. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 11 clientes en la jornada de la tarde

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_i	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						$[a_i]$	$[b_i]$	
DEPÓSITO	0	0	0	0	837.5	410	1140	0
CLIENTE UAN	1.14	2.53	840.0	10	850.0	840	960	0
CLIENTE 12	1.28	2.84	852.8	10	862.8	840	960	0
CLIENTE 13	0.31	0.69	863.5	10	873.5	840	960	0
CLIENTE 15	0.06	0.13	873.7	10	883.7	840	960	0
CLIENTE 11	1.80	4.01	905.3	10	915.3	840	960	17.59
CLIENTE 10	0.50	1.11	916.4	10	926.4	840	960	0
CLIENTE E	1.34	2.98	929.4	10	939.4	900	1080	0
CLIENTE DD	1.92	4.26	943.7	10	953.7	840	960	0
CLIENTE 14	2.85	6.34	960.0	10	970.0	840	960	0
CLIENTE 17	2.28	5.06	975.1	10	985.1	840	1140	0
CLIENTE 16	0.58	1.28	986.3	10	996.3	840	1140	0
DEPÓSITO	2.87	6.38	1002.7	0	1002.7	410	1140	0
TOTAL	16.92	37.61	TIEMPO DE HOLGURA		137.3	TIEMPO IMPRODUCTIVO		17.59

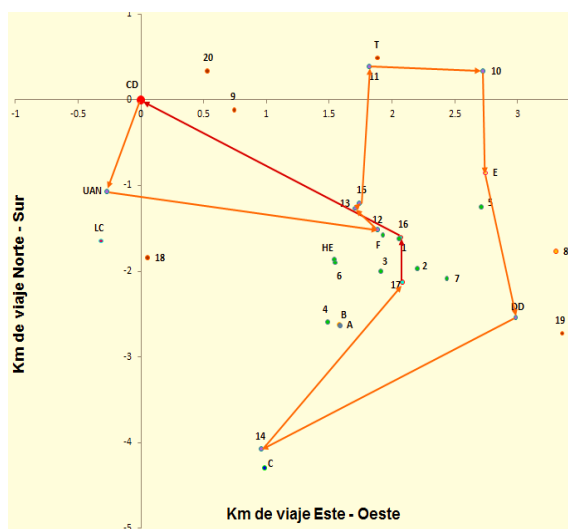
[Fuente: Autor]

Anexo 42. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 27 Km/h para 11 clientes en la jornada de la tarde

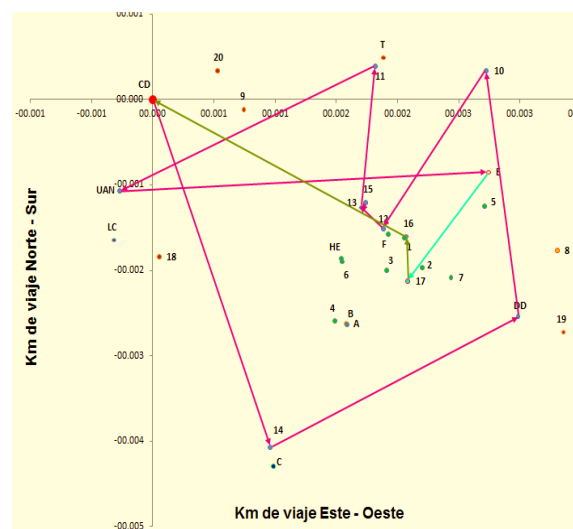
SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_i	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						$[a_i]$	$[b_i]$	
DEPÓSITO	0	0	0	0	840.00	410	1140	0
CLIENTE 14	4.62	10.26	850.26	10	860.26	840	960	0
CLIENTE DD	2.85	6.34	866.60	10	876.60	840	960	0
CLIENTE 10	3.24	7.20	883.80	10	893.80	840	960	0
CLIENTE 12	2.14	4.75	898.55	10	908.55	840	960	0
CLIENTE 15	0.35	0.78	909.33	10	919.33	840	960	0
CLIENTE 13	0.06	0.13	919.46	10	929.46	840	960	0
CLIENTE 11	1.86	4.13	933.59	10	943.59	840	960	0
CLIENTE UAN	2.00	4.44	948.03	10	958.03	840	960	0
CLIENTE E	1.66	3.69	961.72	10	971.72	900	1080	0
CLIENTE 17	1.61	3.59	975.30	10	985.30	840	1140	0
CLIENTE 16	0.58	1.28	986.59	10	996.59	840	1140	0
DEPÓSITO	2.87	6.38	1002.97	10	1012.97	410	1140	0
TOTAL	23.84	52.97	TIEMPO DE HOLGURA		137.03	TIEMPO IMPRODUCTIVO		0

[Fuente: Autor]

Anexo 43. Secuencia del TSPTW variando la velocidad a 27 Km/h del vehículo determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 11 clientes de la jornada de la tarde



(a)



(b)

[Fuente: Autor]

Resultados del TSPTW de variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h

- **Instancia de 20 clientes**

Anexo 44. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 12 clientes de la jornada de la mañana

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA															
MODELO EXACTO	1	CD	6	4	3	2	1	5	8	7	19	9	20	18	CD		
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	8	7	5	4	2	3	1	6	19	18	9	20	CD		

[Fuente: Autor]

Anexo 45. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 12 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0.00	0	411.98	410	1140	0
CLIENTE 6	2.67	8.02	420.00	10	430.00	420	555	0
CLIENTE 4	0.78	2.34	432.30	10	442.30	420	555	0
CLIENTE 3	0.817	2.45	444.80	10	454.80	420	555	0
CLIENTE 2	0.33	0.99	455.80	10	465.80	420	555	0
CLIENTE 1	0.376	1.13	517.80	10	527.80	420	555	50.87
CLIENTE 5	0.905	2.72	530.50	10	540.50	420	555	0
CLIENTE 8	0.91	2.72	543.30	10	553.30	420	555	0
CLIENTE 7	0.58	1.74	555.00	10	565.00	420	555	0
CLIENTE 19	0.87	2.62	600.00	10	610.00	600	720	32.38
CLIENTE 9	3.24	9.73	619.70	10	629.70	600	720	0
CLIENTE 20	0.55	1.64	631.40	10	641.40	600	720	0
CLIENTE 18	0.75	2.26	643.60	10	653.60	600	720	0
DEPÓSITO	1.98	5.94	659.60	10	669.60	410	1140	0
TOTAL	14.76	44.29	TIEMPO DE HOLGURA		60.40	TIEMPO IMPRODUCTIVO		83.25

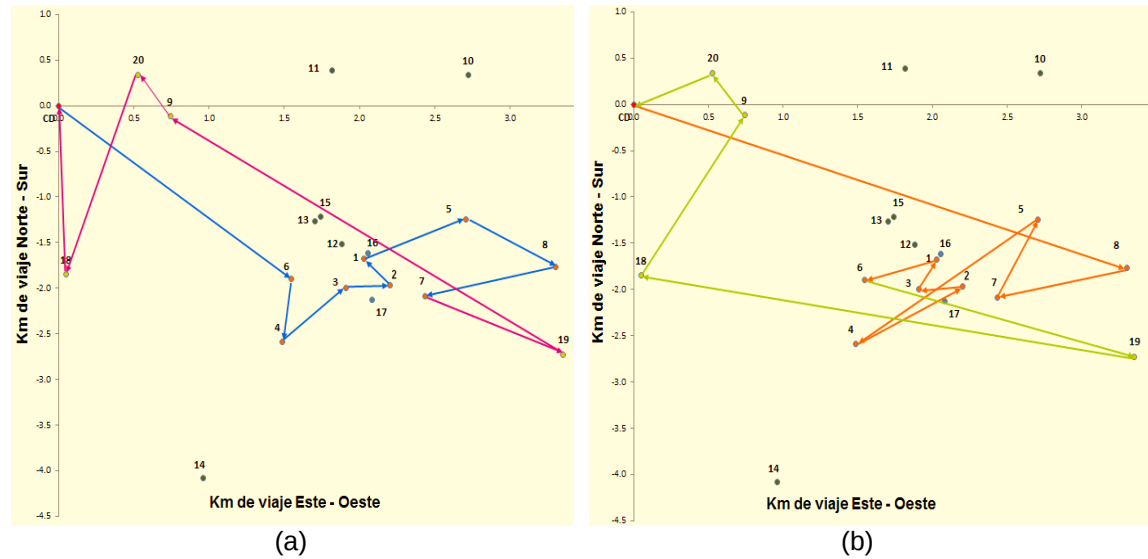
[Fuente: Autor]

Anexo 46. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 12 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	410	410	1140	0
CLIENTE 8	4.16	12.49	422.5	10	432.49	420	555	0
CLIENTE 7	0.58	1.74	434.23	10	444.23	420	555	0
CLIENTE 5	0.998	2.99	447.23	10	457.23	420	555	0
CLIENTE 4	2.04	6.12	463.34	10	473.34	420	555	0
CLIENTE 2	1.063	3.19	476.53	10	486.53	420	555	0
CLIENTE 3	0.331	0.99	487.52	10	497.52	420	555	0
CLIENTE 1	0.38	1.14	498.67	10	508.67	420	555	0
CLIENTE 6	0.60	1.79	510.45	10	520.45	420	555	0
CLIENTE 19	1.35	4.06	524.52	10	534.52	600	720	0
CLIENTE 18	5.24	15.71	550.23	10	560.23	600	720	0
CLIENTE 9	5.24	15.71	575.93	10	585.93	600	600	0
CLIENTE 20	0.55	1.64	587.58	10	597.58	600	720	0
DEPÓSITO	0.76	2.29	599.87	10	609.87	410	1140	0
TOTAL	23.29	69.87	TIEMPO DE HOLGURA		120.13	TIEMPO IMPRODUCTIVO		0.00

[Fuente: Autor]

Anexo 47. Secuencia del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 12 clientes de la jornada de la mañana



Anexo 48. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 8 clientes de la jornada de la tarde

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA									
MODELO EXACTO	1	CD	11	10	15	13	12	14	17	16	CD
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	14	10	12	15	13	11	17	16	CD

[Fuente: Autor]

Anexo 49. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 8 clientes en la jornada de la tarde

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	840.00	410	1140	0
CLIENTE 11	2.10	6.31	833.69	10	843.69	840	960	0
CLIENTE 10	0.50	1.49	851.50	10	861.50	840	1140	0
CLIENTE 15	1.825	5.48	867.00	10	877.00	840	1140	0
CLIENTE 13	0.06	0.18	877.10	10	887.10	840	960	0
CLIENTE 12	0.310	0.93	888.10	10	898.10	840	960	0
CLIENTE 14	2.928	8.78	906.90	10	916.90	840	960	0
CLIENTE 17	2.28	6.84	960.00	10	970.00	840	960	36.26
CLIENTE 16	0.58	1.73	971.70	10	981.70	840	960	0
DEPÓSITO	2.87	8.62	990.40	10	1000.40	410	1140	0
TOTAL	13.45	40.35	TIEMPO DE HOLGURA		149.60	TIEMPO IMPRODUCTIVO		36.26

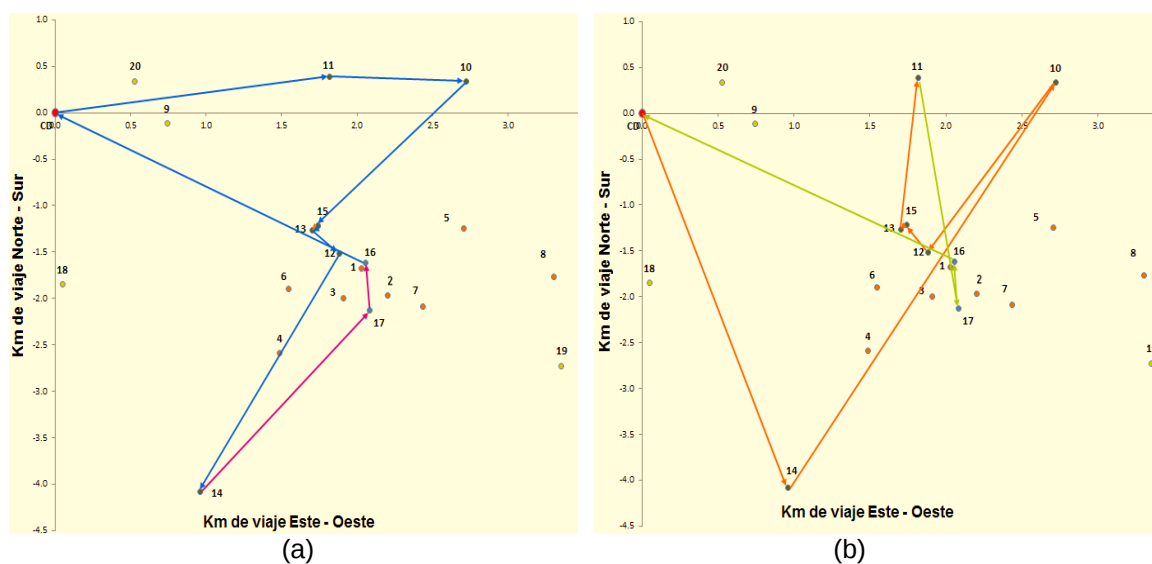
[Fuente: Autor]

Anexo 50. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 8 clientes en la jornada de la tarde

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_i	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						$[a_i]$	$[b_i]$	
DEPÓSITO	0	0	0	0	840.00	410	1140	0
CLIENTE 14	4.62	13.85	853.85	10	863.85	840	960	0
CLIENTE 10	5.07	15.20	879.05	10	889.05	840	960	0
CLIENTE 12	2.138	6.41	895.46	10	905.46	840	960	0
CLIENTE 15	0.35	1.05	906.51	10	916.51	840	960	0
CLIENTE 13	0.059	0.18	916.69	10	926.69	840	960	0
CLIENTE 11	1.856	5.57	932.26	10	942.26	840	960	0
CLIENTE 17	2.84	8.52	950.78	10	960.78	840	1140	0
CLIENTE 16	0.58	1.73	962.51	10	972.51	840	1140	0
DEPÓSITO	2.87	8.62	981.13	10	991.13	410	1140	0
TOTAL	20.38	61.13	TIEMPO DE HOLGURA		158.87	TIEMPO IMPRODUCTIVO		0

[Fuente: Autor]

Anexo 51. Secuencia del TSPTW variando la velocidad a 20 Km/h del vehículo determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 8 clientes de la jornada de la tarde



[Fuente: Autor]

▪ **Instancia de 24 clientes**

Anexo 52. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 15 clientes de la jornada de la mañana

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA														
MODELO EXACTO	1	CD	HE	5	1	2	3	4	6	7	8	19	LC	18	20	T
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	8	7	HE	5	4	2	3	1	6	LC	19	T	18	9

[Fuente: Autor]

Anexo 53. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 15 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	448.00	410	1140	0
CLIENTE HE	2.09	6.26	454.30	10	464.30	420	540	0
CLIENTE 5	2.61	7.82	472.10	10	482.10	420	555	0
CLIENTE 1	0.82	2.47	484.60	10	494.60	420	555	0
CLIENTE 2	0.44	1.31	495.90	10	505.90	420	555	0
CLIENTE 3	0.33	0.99	506.90	10	516.90	420	555	0
CLIENTE 4	0.82	2.45	519.30	10	529.30	420	555	0
CLIENTE 6	0.78	2.34	531.70	10	541.70	420	555	0
CLIENTE 7	0.53	1.59	543.30	10	553.30	420	555	0
CLIENTE 8	0.58	1.74	555.00	10	565.00	420	555	0
CLIENTE 19	1.05	3.15	600.00	10	610.00	540	630	31.85
CLIENTE LC	2.34	7.02	630.00	10	640.00	600	720	12.98
CLIENTE 18	0.30	0.90	640.80	10	650.80	600	720	0
CLIENTE 20	0.75	2.26	653.10	10	663.10	600	720	0
CLIENTE T	0.76	2.27	665.30	10	675.30	600	600	0
CLIENTE 9	0.94	2.82	678.20	10	688.20	600	720	0
DEPÓSITO	0.84	2.51	690.70	10	700.70	410	1140	0
TOTAL	15.97	47.92	TIEMPO DE HOLGURA		29.30	TIEMPO IMPRODUCTIVO		44.83

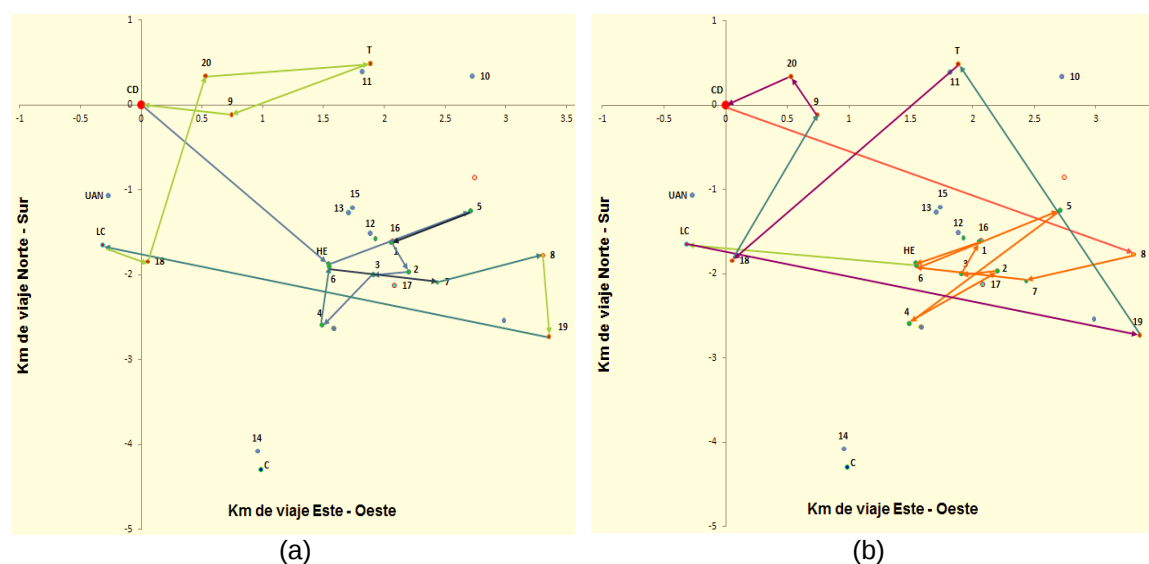
[Fuente: Autor]

Anexo 54. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 15 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	410	410	1140	0
CLIENTE 8	4.16	12.49	422.49	10	432	420	540	0
CLIENTE 7	0.58	1.74	434.23	10	444.23	420	555	0
CLIENTE HE	3.38	10.15	454.38	10	464.38	420	555	0
CLIENTE 5	2.61	7.82	472.20	10	482.20	420	555	0
CLIENTE 4	2.04	6.12	488.32	10	498.32	420	555	0
CLIENTE 2	1.062	3.19	501.51	10	511.51	420	555	0
CLIENTE 3	0.331	0.99	512.50	10	522.50	420	555	0
CLIENTE 1	0.48	1.43	523.93	10	533.93	420	555	0
CLIENTE 6	0.67	2.02	535.95	10	545.95	420	555	0
CLIENTE LC	1.05	3.16	549.11	10	559.11	540	630	33.87
CLIENTE 19	2.34	7.02	600.00	10	610.00	600	720	0
CLIENTE T	3.71	11.12	621.12	10	631.12	600	720	0
CLIENTE 18	2.82	8.45	639.57	10	649.57	600	720	0
CLIENTE 9	1.96	5.89	655.46	10	665.46	600	600	0
CLIENTE 20	0.55	1.64	667.11	10	677.11	600	720	0
DEPÓSITO	0.76	2.29	679.40	10	689.40	410	1140	0
TOTAL	28.51	73.04	TIEMPO DE HOLGURA		40.60	TIEMPO IMPRODUCTIVO		33.87

[Fuente: Autor]

Anexo 55. Secuencia del TSPTW variando la velocidad a 20 Km/h del vehículo determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 15 clientes de la jornada de la mañana



[Fuente: Autor]

Anexo 56. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 9 clientes de la jornada de la tarde

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA											
MODELO EXACTO	1	CD	UAN	10	11	15	13	12	14	17	16	CD	
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	14	10	12	15	13	11	UAN	17	16	CD	

[Fuente: Autor]

Anexo 57. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 9 clientes en la jornada de la tarde

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						$[a_i]$	$[b_i]$	
DEPÓSITO	0	0	0	0	830.5	410	1140	0
CLIENTE UAN	1.14	3.42	840.00	10	850.0	840	960	0
CLIENTE 10	0.08	0.23	850.20	10	860.2	840	1140	0
CLIENTE 11	0.50	1.49	904.70	10	914.7	840	1140	43.01
CLIENTE 15	1.80	5.41	920.10	10	930.1	840	960	0
CLIENTE 13	0.06	0.18	930.30	10	940.3	840	960	0
CLIENTE 12	0.31	0.93	941.20	10	951.2	840	960	0
CLIENTE 14	2.93	8.78	960.00	10	970.0	840	960	0
CLIENTE 17	2.28	6.84	976.80	10	986.8	840	960	0
CLIENTE 16	0.58	1.73	988.60	10	998.6	840	960	0
DEPÓSITO	2.87	8.62	1007.22	10	1017.2	410	1140	0
TOTAL	12.54	37.63	TIEMPO DE HOLGURA		132.78	TIEMPO IMPRODUCTIVO		43.01

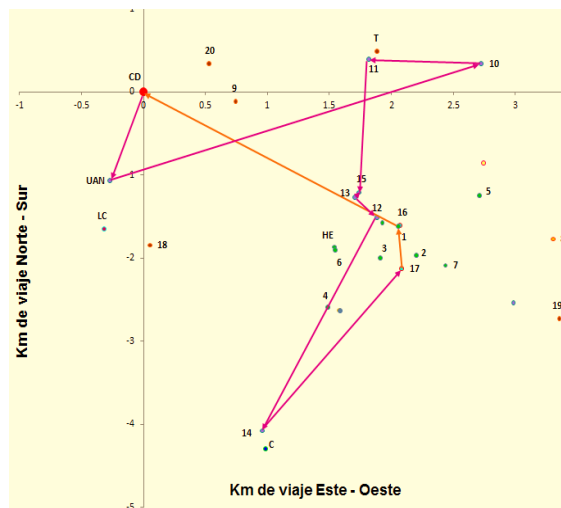
[Fuente: Autor]

Anexo 58. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 9 clientes en la jornada de la tarde

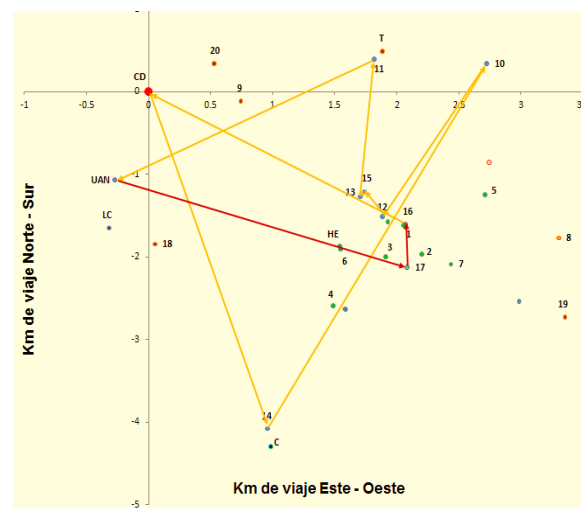
SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	840	410	1140	0
CLIENTE 14	4.62	13.85	853.85	10	864	840	960	0
CLIENTE 10	5.06	15.19	879.04	10	889.04	840	960	0
CLIENTE 12	2.14	6.41	895.46	10	905.46	840	960	0
CLIENTE 15	0.35	1.05	906.51	10	916.51	840	960	0
CLIENTE 13	0.06	0.18	916.69	10	926.69	840	960	0
CLIENTE 11	1.86	5.57	932.26	10	942.26	840	960	0
CLIENTE UAN	2.00	5.99	948.25	10	958.25	840	960	0
CLIENTE 17	2.74	8.21	966.46	10	976.46	840	1140	0
CLIENTE 16	0.58	1.73	978.19	10	988.19	840	1140	0
DEPÓSITO	2.87	8.62	996.81	10	1006.81	410	1140	0
TOTAL	22.27	66.81	TIEMPO DE HOLGURA		143.19	TIEMPO IMPRODUCTIVO		0.00

[Fuente: Autor]

Anexo 59. Secuencia del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 9 clientes de la jornada de la tarde



(a)



(b)

[Fuente: Autor]

▪ **Instancia de 30 clientes**

Anexo 60. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 19 clientes de la jornada de la mañana

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA																		
MODELO EXACTO	1	CD	HE	5	8	7	B	2	1	F	3	6	4	A	C	19	LC	18	20	T
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	F	8	7	HE	5	4	2	3	1	6	B	A	LC	C	19	T	18	9

[Fuente: Autor]

Anexo 61. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 19 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	413.7	410	1140	0
CLIENTE HE	2.09	6.26	420.0	10	430.0	420	540	0
CLIENTE 5	2.61	7.82	437.8	10	447.8	420	555	0
CLIENTE 8	0.91	2.72	450.5	10	460.5	420	555	0
CLIENTE 7	0.579	1.74	462.3	10	472.3	420	555	0
CLIENTE B	0.77	2.30	474.6	10	484.6	420	570	0
CLIENTE 2	0.141	0.42	485.0	10	495.0	420	555	0
CLIENTE 1	0.437	1.31	496.3	10	506.3	420	555	0
CLIENTE F	0.16	0.48	506.8	10	516.8	420	525	0
CLIENTE 3	0.47	1.42	518.2	10	528.2	420	555	0
CLIENTE 6	0.42	1.26	529.5	10	539.5	420	555	0
CLIENTE 4	0.78	2.34	543.7	10	553.7	420	555	0
CLIENTE A	0.11	0.33	554.0	10	564.0	420	570	0
CLIENTE C	1.99	5.98	570.0	10	580.0	570	720	0
CLIENTE 19	3.19	9.57	600.0	10	610.0	600	720	10.43
CLIENTE LC	2.34	7.02	617.0	10	627.0	540	630	0
CLIENTE 18	1.80	5.39	682.6	10	692.6	600	720	50.21
CLIENTE 20	0.94	2.82	694.9	10	704.9	600	720	0
CLIENTE T	0.76	2.27	707.2	10	717.2	600	720	0
CLIENTE 9	0.75	2.26	720.0	10	730.0	600	720	0
DEPÓSITO	1.98	5.94	732.5	10	742.5	410	1140	0
TOTAL	23.22	69.67	TIEMPO DE HOLGURA	0.00	RETRASO	(12.50)	TIEMPO IMPRODUCTIVO	60.64

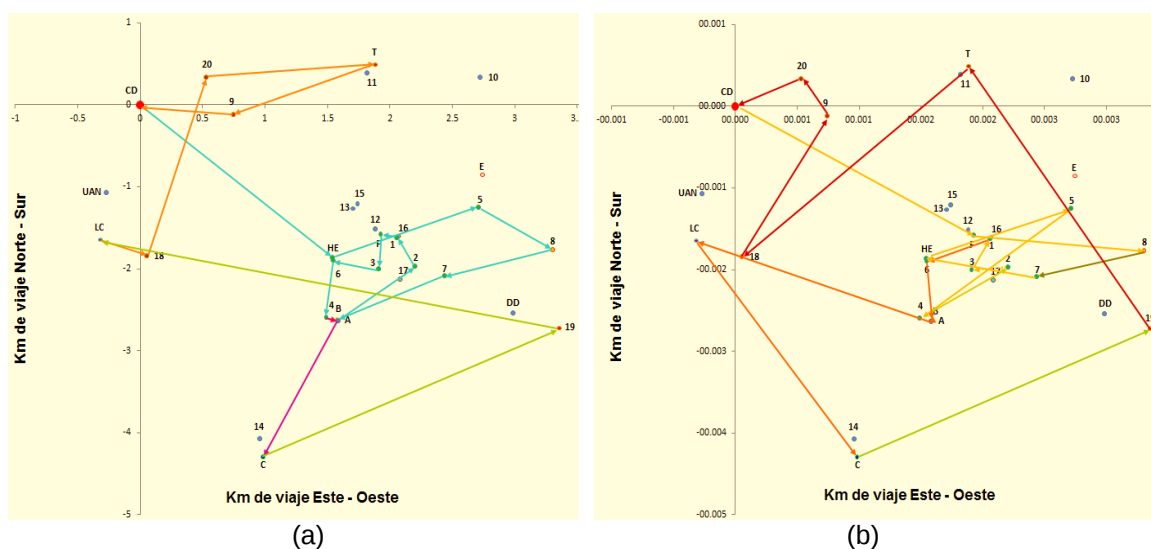
[Fuente: Autor]

Anexo 62. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 19 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	410	410	1140	1.81
CLIENTE F	2.73	8.19	420.00	10	430.00	420	525	0
CLIENTE 8	1.56	4.68	434.68	10	444.68	420	555	0
CLIENTE 7	0.58	1.74	446.41	10	456.41	420	555	0
CLIENTE HE	3.384	10.15	466.57	10	476.57	420	540	0
CLIENTE 5	2.61	7.82	484.39	10	494.39	420	555	0
CLIENTE 4	2.039	6.12	500.51	10	510.51	420	555	0
CLIENTE 2	1.062	3.19	513.69	10	523.69	420	555	0
CLIENTE 3	0.33	0.99	524.69	10	534.69	420	555	0
CLIENTE 1	0.48	1.43	536.12	10	546.12	420	555	0
CLIENTE 6	0.67	2.02	548.14	10	558.14	420	555	0
CLIENTE B	0.82	2.46	560.60	10	570.60	420	570	0
CLIENTE LC	2.93	8.80	579.40	10	589.40	540	630	0
CLIENTE C	3.07	9.20	598.60	10	608.60	570	720	0
CLIENTE 19	3.19	9.57	618.17	10	628.17	600	720	0
CLIENTE T	3.71	11.12	639.30	10	649.30	600	720	0
CLIENTE 18	2.82	8.45	657.75	10	667.75	600	720	0
CLIENTE 9	1.96	5.89	673.64	10	683.64	600	720	0
CLIENTE 20	0.55	1.64	685.28	10	695.28	600	720	0
DEPÓSITO	0.76	2.29	697.57	10	707.57	410	1140	0
TOTAL	35.25	105.76	TIEMPO DE HOLGURA	22.43	TIEMPO IMPRODUCTIVO			1.81

[Fuente: Autor]

Anexo 63. Secuencia del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 19 clientes de la jornada de la mañana



[Fuente: Autor]

Anexo 64. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 11 clientes de la jornada de la tarde

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA													
MODELO EXACTO	1	CD	UAN	12	13	15	11	10	E	DD	14	17	16	CD	
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	14	DD	10	12	15	13	11	UAN	E	17	16	CD	

[Fuente: Autor]

Anexo 65. Resultados del modelo exacto para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 11 clientes en la jornada de la tarde

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_i	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	836.6	410	1140	0
CLIENTE UAN	1.14	3.42	840.0	10	850.0	840	960	0
CLIENTE 12	1.28	3.83	853.8	10	863.8	840	960	0
CLIENTE 13	0.31	0.93	874.6	10	884.6	840	960	9.87
CLIENTE 15	0.06	0.18	884.8	10	894.8	840	960	0
CLIENTE 11	1.80	5.41	900.2	10	910.2	840	960	0
CLIENTE 10	0.50	1.49	911.7	10	921.7	840	960	0
CLIENTE E	1.34	4.02	925.7	10	935.7	900	1080	0
CLIENTE DD	1.92	5.75	941.4	10	951.4	840	960	0
CLIENTE 14	2.85	8.56	960.0	10	970.0	840	960	0
CLIENTE 17	2.28	6.84	976.8	10	986.8	840	1140	0
CLIENTE 16	0.58	1.73	988.6	10	998.6	840	1140	0
DEPÓSITO	2.87	8.62	1140.0	0	1140.0	410	1140	132.78
TOTAL	16.92	50.77	TIEMPO DE HOLGURA		0.00	TIEMPO IMPRODUCTIVO		142.66

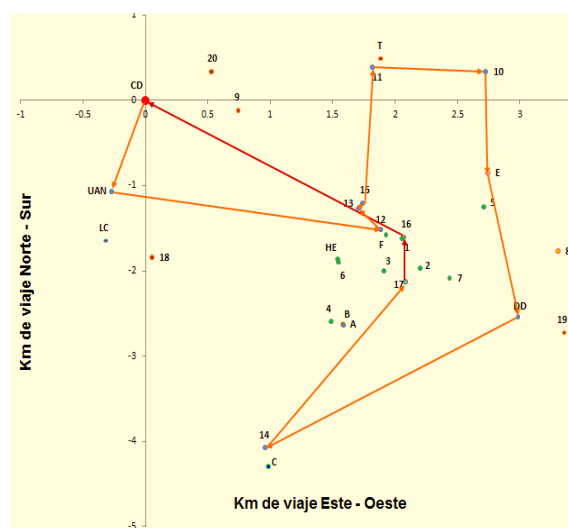
[Fuente: Autor]

Anexo 66. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h para 11 clientes en la jornada de la tarde

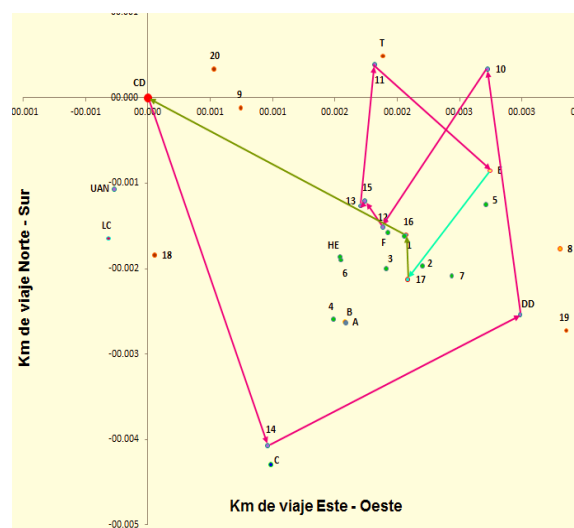
SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						$[a_i]$	$[b_i]$	
DEPÓSITO	0	0	0	0	840.00	410	1140	0
CLIENTE 14	4.62	13.85	853.85	10	863.85	840	960	0
CLIENTE DD	2.85	8.56	872.41	10	882.41	840	960	0
CLIENTE 10	3.24	9.72	892.13	10	902.13	840	960	0
CLIENTE 12	2.14	6.41	908.54	10	918.54	840	960	0
CLIENTE 15	0.35	1.05	919.60	10	929.60	840	960	0
CLIENTE 13	0.06	0.18	929.78	10	939.78	840	960	0
CLIENTE 11	1.86	5.57	945.35	10	955.35	840	960	0
CLIENTE E	1.49	4.98	960.33	10	970.33	900	1080	0
CLIENTE 17	1.61	4.84	975.17	10	985.17	840	1140	0
CLIENTE 16	0.58	1.73	986.90	10	996.90	840	1140	0
DEPÓSITO	2.87	8.62	1005.52	10	1015.52	410	1140	0
TOTAL	21.67	65.52	TIEMPO DE HOLGURA		134.48	TIEMPO IMPRODUCTIVA		0.00

[Fuente: Autor]

Anexo 67. Secuencia del TSPTW variando la velocidad del vehículo a 20 Km/h determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 11 clientes de la jornada de la tarde



(a)



(b)

[Fuente: Autor]

Resultados del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo

- *Instancia de 20 clientes*

Anexo 68. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 11 clientes de la jornada de la mañana

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA													
MODELO EXACTO	1	CD	6	4	3	1	5	2	7	19	8	9	20	CD	
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	7	5	4	2	3	1	6	8	19	9	20	CD	

[Fuente: Autor]

Anexo 69. Resultados del modelo exacto para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 11 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	414.65	410	1140	0
CLIENTE 6	2.67	5.35	420.00	10	430.00	420	555	0
CLIENTE 4	0.78	1.56	431.60	10	441.60	420	555	0
CLIENTE 3	0.817	1.63	443.20	10	453.20	420	555	0
CLIENTE 1	0.38	0.76	453.90	10	463.90	420	555	0
CLIENTE 5	0.905	1.81	465.80	10	475.80	420	555	0
CLIENTE 2	0.992	1.98	544.40	10	554.40	420	555	66.62
CLIENTE 7	0.29	0.59	555.00	10	565.00	420	555	0
CLIENTE 19	0.87	1.75	600.00	10	610.00	600	720	33.25
CLIENTE 8	1.05	2.10	630.00	10	640.00	420	630	17.90
CLIENTE 9	2.33	4.65	644.60	10	654.60	600	720	0
CLIENTE 20	0.55	1.10	655.70	10	665.70	600	720	0
DEPÓSITO	0.76	1.53	667.30	10	677.30	410	1140	0
TOTAL	12.40	24.81	TIEMPO DE HOLGURA		52.70	TIEMPO IMPRODUCTIVO		117.77

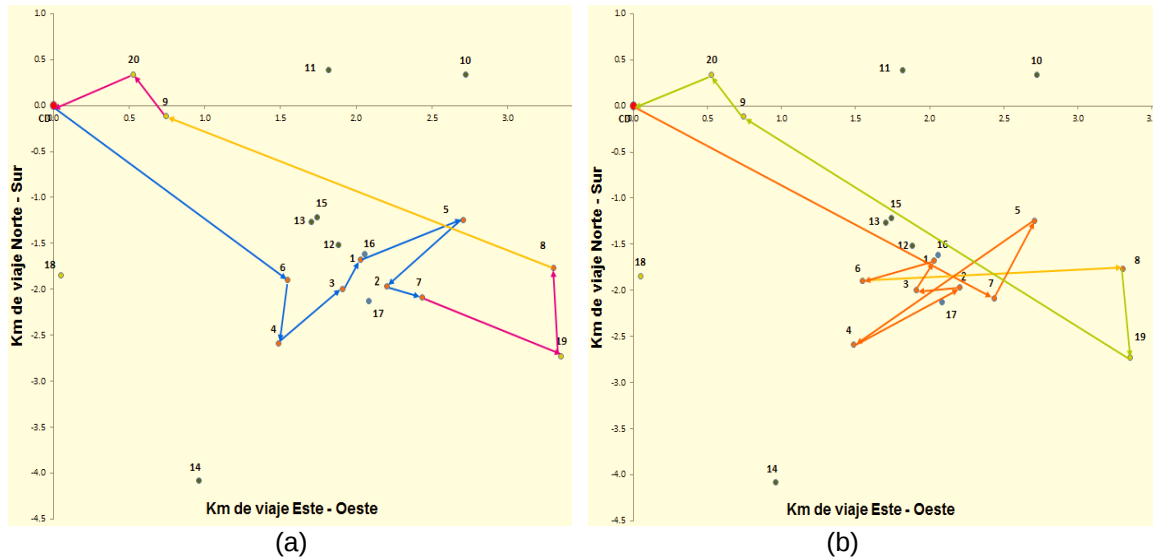
[Fuente: Autor]

Anexo 70. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 11 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	410.00	410	1140	0
CLIENTE 7	3.54	7.07	417.07	10	427.07	420	555	2.93
CLIENTE 5	1.00	2.00	432.00	10	442.00	420	555	0
CLIENTE 4	2.040	4.08	446.08	10	456.08	420	555	0
CLIENTE 2	1.06	2.13	458.20	10	468.20	420	555	0
CLIENTE 3	0.331	0.66	468.86	10	478.86	420	555	0
CLIENTE 1	0.380	0.76	479.62	10	489.62	420	555	0
CLIENTE 6	0.60	1.19	490.82	10	500.82	420	555	0
CLIENTE 8	0.97	1.93	502.75	10	512.75	420	630	0
CLIENTE 19	1.05	2.10	514.85	10	524.85	600	720	85.15
CLIENTE 9	3.24	6.48	616.48	10	626.48	600	720	0
CLIENTE 20	0.55	1.10	627.58	10	637.58	600	600	0
DEPÓSITO	0.76	1.53	639.11	10	649.11	410	1140	0
TOTAL	15.51	31.03	TIEMPO DE HOLGURA		80.89	TIEMPO IMPRODUCTIVO		88.08

[Fuente: Autor]

Anexo 71. Secuencia del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 11 clientes de la jornada de la mañana



Anexo 72. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 9 clientes de la jornada de la tarde

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA										
MODELO EXACTO	1	CD	11	10	15	13	12	14	17	16	18	CD
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	14	10	12	15	13	11	17	16	18	CD

[Fuente: Autor]

Anexo 73. Resultados del modelo exacto para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 9 clientes en la jornada de la tarde

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						$[a_i]$	$[b_i]$	
DEPÓSITO	0	0	0	0	835.79	410	1140	0
CLIENTE 11	2.10	4.21	840.00	10	850.00	840	960	0
CLIENTE 10	0.50	1.00	851.0	10	861.00	840	960	0
CLIENTE 15	1.826	3.65	864.6	10	874.60	840	960	0
CLIENTE 13	0.06	0.12	874.8	10	884.80	840	960	0
CLIENTE 12	0.310	0.62	885.4	10	895.40	840	960	0
CLIENTE 14	2.929	5.86	901.3	10	911.30	840	960	0
CLIENTE 17	2.28	4.56	960.0	10	970.00	960	1140	44.14
CLIENTE 16	0.58	1.15	971.1	10	981.10	960	1140	0
CLIENTE 18	1.12	2.25	983.1	10	993.10	960	1140	0
DEPÓSITO	1.98	3.96	997.0	10	1007.00	410	1140	0
TOTAL	13.68	27.36	TIEMPO DE HOLGURA		143.00	TIEMPO IMPRODUCTIVO		44.14

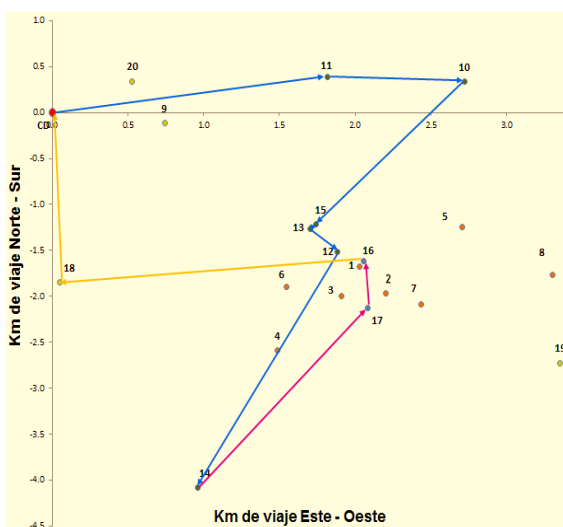
[Fuente: Autor]

Anexo 74. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 9 clientes en la jornada de la tarde

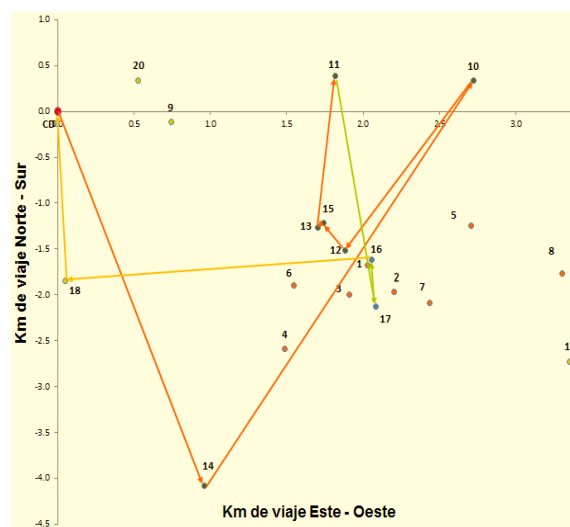
SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						$[a_i]$	$[b_i]$	
DEPÓSITO	0	0	0	0	840.00	410	1140	0
CLIENTE 14	4.62	9.23	849.23	10	859.23	840	960	0
CLIENTE 10	5.07	10.13	869.36	10	879.36	840	960	0
CLIENTE 12	2.138	4.28	883.64	10	893.64	840	960	0
CLIENTE 15	0.35	0.70	894.34	10	904.34	840	960	0
CLIENTE 13	0.059	0.12	904.46	10	914.46	840	960	0
CLIENTE 11	1.856	3.71	918.17	10	928.17	840	960	0
CLIENTE 17	2.84	5.68	933.85	10	943.85	840	1140	0
CLIENTE 16	0.58	1.15	945.01	10	955.01	840	1140	0
CLIENTE 18	1.12	2.25	957.25	10	967.25	960	1140	0
DEPÓSITO	1.98	3.96	971.21	10	981.21	410	1140	0
TOTAL	20.61	41.21	TIEMPO DE HOLGURA		168.79	TIEMPO IMPRODUCTIVO		0

[Fuente: Autor]

Anexo 75. Secuencia del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 9 clientes de la jornada de la tarde



(a)



(b)

[Fuente: Autor]

▪ **Instancia de 24 clientes**

Anexo 76. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 14 clientes de la jornada de la mañana

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA															
MODELO EXACTO	1	CD	HE	5	1	2	3	4	6	7	19	8	LC	9	T	20	CD
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	HE	7	5	4	2	3	1	6	8	LC	19	T	9	20	CD

[Fuente: Autor]

Anexo 77. Resultados del modelo exacto para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 14 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						$[a_i]$	$[b_i]$	
DEPÓSITO	0	0	0	0	415.8	410	1140	0
CLIENTE HE	1.14	2.28	420.0	10	430.0	420	540	0
CLIENTE 5	2.61	5.22	435.2	10	445.2	420	555	0
CLIENTE 1	0.82	1.65	446.9	10	456.9	420	555	0
CLIENTE 2	0.44	0.87	510.1	10	520.1	420	555	52.33
CLIENTE 3	0.33	0.66	520.8	10	530.8	420	555	0
CLIENTE 4	0.82	1.63	532.4	10	542.4	420	555	0
CLIENTE 6	0.78	1.56	543.9	10	553.9	420	555	0
CLIENTE 7	0.53	1.06	555.0	10	565.0	420	555	0
CLIENTE 19	0.87	1.75	603.9	10	613.9	420	555	37.15
CLIENTE 8	1.05	2.10	616.0	10	626.0	600	630	0
CLIENTE LC	1.98	3.96	630.0	10	640.0	540	630	0
CLIENTE 9	1.80	3.59	643.6	10	653.6	600	720	0
CLIENTE T	0.94	1.88	655.5	10	665.5	600	720	0
CLIENTE 20	0.76	1.52	667.0	10	677.0	600	600	0
DEPÓSITO	0.76	1.53	678.5	10	688.5	410	1140	0
TOTAL	15.63	31.26	TIEMPO DE HOLGURA		41.50	TIEMPO IMPRODUCTIVO		89.48

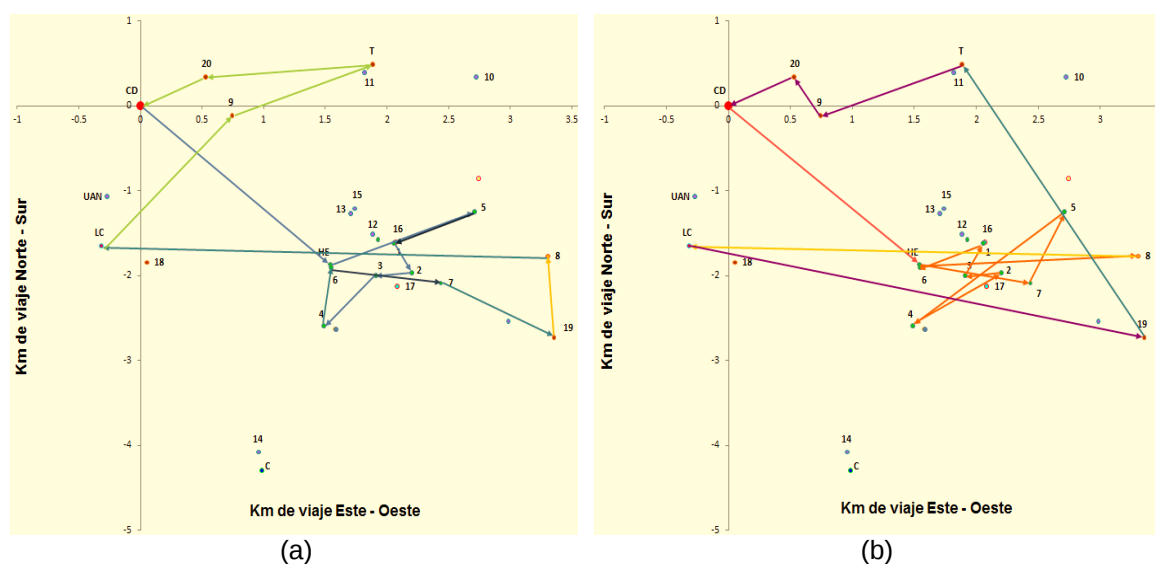
[Fuente: Autor]

Anexo 78. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 14 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						$[a_i]$	$[b_i]$	
DEPÓSITO	0	0	0	0	410.00	410	1140	0
CLIENTE HE	2.09	4.17	420.00	10	430.00	420	540	5.83
CLIENTE 7	3.38	6.77	436.77	10	446.77	420	555	0
CLIENTE 5	1.00	2.00	448.76	10	458.76	420	555	0
CLIENTE 4	2.039	4.08	462.84	10	472.84	420	555	0
CLIENTE 2	1.06	2.12	474.97	10	484.97	420	555	0
CLIENTE 3	0.331	0.66	485.63	10	495.63	420	555	0
CLIENTE 1	0.477	0.95	496.58	10	506.58	420	555	0
CLIENTE 6	0.67	1.35	507.93	10	517.93	420	555	0
CLIENTE 8	0.97	1.93	519.86	10	529.86	420	630	0
CLIENTE LC	1.98	3.96	540.00	10	550.00	540	630	6.18
CLIENTE 19	2.34	4.68	600.00	10	610.00	600	720	45.32
CLIENTE T	3.71	7.42	617.42	10	627.42	600	720	0
CLIENTE 9	0.94	1.88	629.30	10	639.30	600	720	0
CLIENTE 20	0.55	1.10	640.39	10	650.39	600	720	0
DEPÓSITO	0.76	1.53	651.92	10	661.92	410	1140	0
TOTAL	22.30	44.60	TIEMPO DE HOLGURA		68.08	TIEMPO IMPRODUCTIVO		57.32

[Fuente: Autor]

Anexo 79. Secuencia del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 14 clientes de la jornada de la mañana



[Fuente: Autor]

Anexo 80. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 10 clientes de la jornada de la tarde

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA											
MODELO EXACTO	1	CD	14	UAN	10	11	15	13	12	16	17	18	CD
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	14	10	12	15	13	11	UAN	17	16	18	CD

[Fuente: Autor]

Anexo 81. Resultados del modelo exacto para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 10 clientes en la jornada de la tarde

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	830.77	410	1140	0
CLIENTE 14	4.62	9.23	840.00	10	850.00	840	960	0
CLIENTE UAN	3.45	6.91	856.90	10	866.90	840	960	0
CLIENTE 10	0.08	0.16	867.10	10	877.10	840	960	0
CLIENTE 11	0.50	1.00	878.10	10	888.10	840	960	0
CLIENTE 15	1.80	3.61	891.70	10	901.70	840	960	0
CLIENTE 13	0.06	0.12	901.80	10	911.80	840	960	0
CLIENTE 12	0.31	0.62	912.40	10	922.40	840	960	0
CLIENTE 16	0.15	0.29	960.00	10	970.00	960	1140	37.31
CLIENTE 17	0.58	1.15	1114.00	10	1124.00	960	1140	142.85
CLIENTE 18	1.03	2.06	1126.00	10	1136.00	960	1140	0
DEPÓSITO	1.98	3.96	1140.00	10	1150.00	410	1140	0
TOTAL	14.55	29.10	TIEMPO DE HOLGURA		0.00	TIEMPO IMPRODUCTIVO		180.15

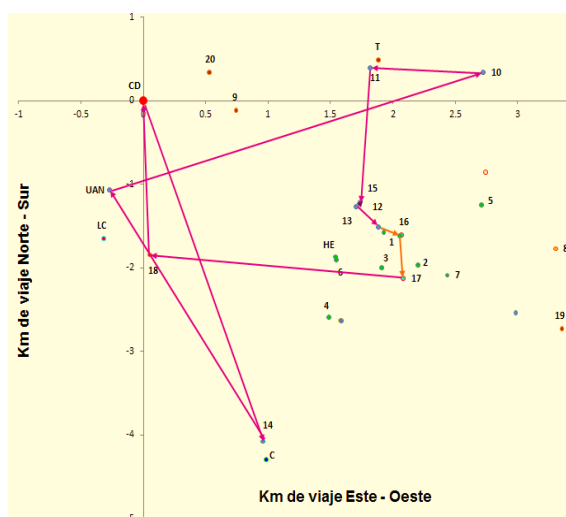
[Fuente: Autor]

Anexo 82. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 10 clientes en la jornada de la tarde

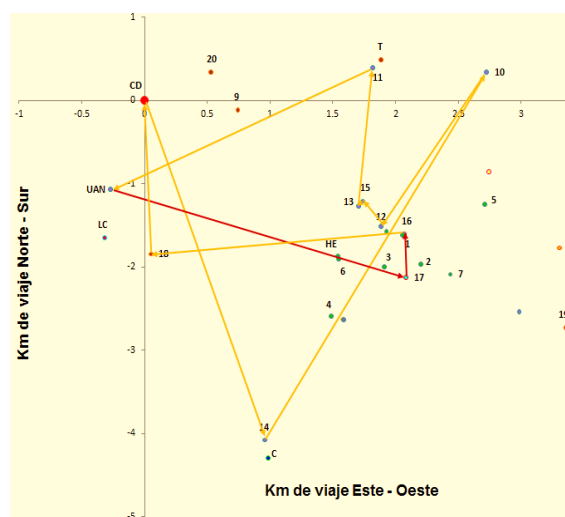
SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						$[a_i]$	$[b_i]$	
DEPÓSITO	0	0	0	0	840.00	410	1140	0
CLIENTE 14	4.62	6.16	846.16	10	856.16	840	960	0
CLIENTE 10	5.06	6.75	862.91	10	872.91	840	960	0
CLIENTE 12	2.14	2.85	875.76	10	885.76	840	960	0
CLIENTE 15	0.35	0.47	886.23	10	896.23	840	960	0
CLIENTE 13	0.06	0.08	896.31	10	906.31	840	960	0
CLIENTE 11	1.86	2.48	908.78	10	918.78	840	960	0
CLIENTE UAN	2.00	2.66	921.44	10	931.44	840	960	0
CLIENTE 17	2.74	3.65	935.09	10	945.09	840	1140	0
CLIENTE 16	0.58	0.77	945.86	10	955.86	840	1140	2.80
CLIENTE 18	1.00	1.34	960.00	10	970.00	960	1140	0
DEPÓSITO	1.98	2.64	958.50	10	968.50	410	1140	0
TOTAL	22.38	29.84	TIEMPO DE HOLGURA		181.50	TIEMPO IMPRODUCTIVO		2.80

[Fuente: Autor]

Anexo 83. Secuencia del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 10 clientes de la jornada de la tarde



(a)



(b)

[Fuente: Autor]

▪ **Instancia de 30 clientes**

Anexo 84. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 18 clientes de la jornada de la mañana

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA																			
MODELO EXACTO	1	CD	HE	5	1	F	6	4	B	7	2	3	A	C	19	8	LC	9	T	20	CD
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	F	HE	7	5	4	2	3	1	6	B	A	8	LC	C	19	T	9	20	CD

[Fuente: Autor]

Anexo 85. Resultados del modelo exacto para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 18 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_i	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	415.8	410	1140	0
CLIENTE HE	2.09	4.17	420	10	430.00	420	540	0
CLIENTE 5	2.61	5.22	435.2	10	445.20	420	555	0
CLIENTE 1	0.82	1.65	446.9	10	456.90	420	555	0
CLIENTE F	0.161	0.32	490.7	10	500.70	420	525	33.48
CLIENTE 6	0.56	1.12	501.8	10	511.80	420	555	0
CLIENTE 4	0.780	1.56	513.3	10	523.30	420	555	0
CLIENTE B	0.111	0.22	523.6	10	533.60	420	570	0
CLIENTE 7	0.09	0.19	533.8	10	543.80	420	555	0
CLIENTE 2	0.29	0.59	544.3	10	554.30	420	555	0
CLIENTE 3	0.33	0.66	555.0	10	565.00	420	555	0
CLIENTE A	0.80	1.60	566.6	10	576.60	420	570	0
CLIENTE C	1.99	3.99	580.6	10	590.60	570	720	0
CLIENTE 19	3.19	6.38	600.0	10	610.00	600	720	0
CLIENTE 8	1.05	2.10	612.1	10	622.10	420	630	0
CLIENTE LC	1.98	3.96	626.1	10	636.10	540	630	0
CLIENTE 9	1.80	3.59	639.7	10	649.70	600	720	0
CLIENTE T	0.94	1.88	651.5	10	661.50	600	720	0
CLIENTE 20	0.76	1.52	663.1	10	673.10	600	720	0
DEPÓSITO	0.76	1.53	674.6	10	684.60	410	1140	0
TOTAL	21.12	42.25	TIEMPO DE HOLGURA		45.40	TIEMPO IMPRODUCTIVO		33.48

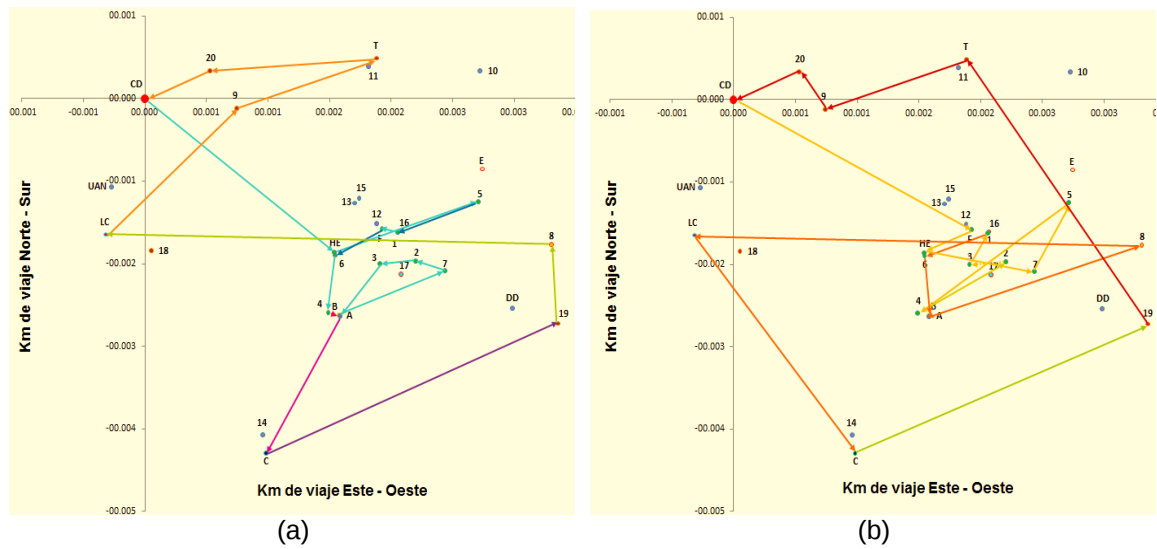
[Fuente: Autor]

Anexo 86. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 18 clientes en la jornada de la mañana

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_i	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	410.0	410	1140	4.54
CLIENTE F	2.73	5.46	420.00	10	430.00	420	525	0
CLIENTE HE	2.71	5.41	435.41	10	445.41	420	540	0
CLIENTE 7	3.38	6.77	452.18	10	462.18	420	555	0
CLIENTE 5	0.998	2.00	464.18	10	474.18	420	555	0
CLIENTE 4	2.04	4.08	478.26	10	488.26	420	555	0
CLIENTE 2	1.062	2.12	490.38	10	500.38	420	555	0
CLIENTE 3	0.331	0.66	501.04	10	511.04	420	555	0
CLIENTE 1	0.48	0.95	512.00	10	522.00	420	555	0
CLIENTE 6	0.67	1.35	523.34	10	533.34	420	555	0
CLIENTE B	0.82	1.64	534.98	10	544.98	420	570	0
CLIENTE A	0.99	1.98	546.97	10	556.97	420	570	0
CLIENTE 8	1.33	2.66	559.63	10	569.63	420	630	0
CLIENTE LC	1.98	3.96	573.59	10	583.59	540	630	0
CLIENTE C	3.07	6.13	589.72	10	599.72	570	720	0
CLIENTE 19	3.19	6.38	606.10	10	616.10	600	720	0
CLIENTE T	3.71	7.42	623.52	10	633.52	600	720	0
CLIENTE 9	0.94	1.88	635.40	10	645.40	600	720	0
CLIENTE 20	0.55	1.10	646.49	10	656.49	600	720	0
DEPÓSITO	0.76	1.53	658.02	10	668.02	410	1140	0
TOTAL	31.74	63.48	TIEMPO DE HOLGURA		61.98	TIEMPO IMPRODUCTIVO		4.54

[Fuente: Autor]

Anexo 87. Secuencia del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 18 clientes de la jornada de la mañana



[Fuente: Autor]

Anexo 88. Secuencia determinada por el método exacto y el heurístico PFIH del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 12 clientes de la jornada de la tarde

MÉTODO DE SOLUCIÓN	#	SECUENCIA															
MODELO EXACTO	1	CD	UAN	12	13	15	11	10	E	DD	14	17	16	18	CD		
HEURÍSTICO PFIH	1	CD	14	DD	10	12	15	13	11	UAN	E	17	16	18	CD		

[Fuente: Autor]

Anexo 89. Resultados del modelo exacto para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 12 clientes en la jornada de la tarde

SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_j	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						[a _i]	[b _i]	
DEPÓSITO	0	0	0	0	837.7	410	1140	0
CLIENTE UAN	1.14	2.28	840.0	10	850.0	840	960	0
CLIENTE 12	1.28	2.55	852.6	10	862.6	840	960	0
CLIENTE 13	0.31	0.62	883.1	10	893.1	840	960	19.88
CLIENTE 15	0.06	0.12	893.2	10	903.2	840	960	0
CLIENTE 11	1.80	3.61	906.8	10	916.8	840	960	0
CLIENTE 10	0.50	1.00	917.8	10	927.8	840	960	0
CLIENTE E	1.34	2.68	930.5	10	940.5	900	1080	0
CLIENTE DD	1.92	3.83	944.3	10	954.3	840	960	0
CLIENTE 14	2.85	5.71	960.0	10	970.0	840	960	0
CLIENTE 17	2.28	4.56	974.6	10	984.6	960	1140	0
CLIENTE 16	0.58	1.15	985.7	10	995.7	960	1140	0
CLIENTE 18	1.12	2.25	997.2	10	1007.2	960	1140	0
DEPÓSITO	1.98	3.96	1140.0	10	1150.0	410	1140	128.84
TOTAL	17.15	34.31	TIEMPO DE HOLGURA		0.00	TIEMPO IMPRODUCTIVO		148.72

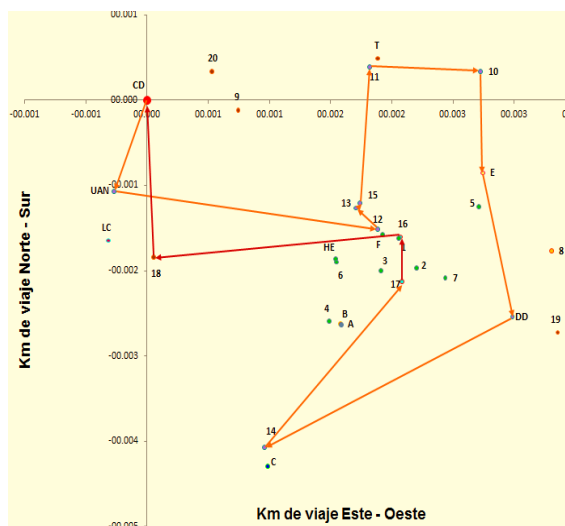
[Fuente: Autor]

Anexo 90. Resultados del heurístico PFIH para el TSPTW con negociación de ventanas de tiempo para 12 clientes en la jornada de la tarde

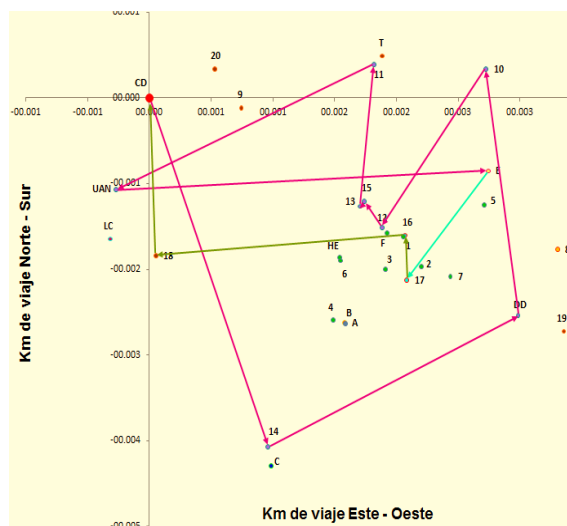
SECUENCIA [CLIENTES]	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	TIEMPO EN RUTA [min]	HORA DE LLEGADA W_i	TIEMPO DE SERVICIO S_i	HORA DE SALIDA W_i	VENTANA DE TIEMPO		TIEMPO DE ESPERA [min]
						$[a_i]$	$[b_i]$	
DEPÓSITO	0	0	0	0	840	410	1140	0
CLIENTE 14	4.62	9.23	849.23	10	859.23	840	960	0
CLIENTE DD	2.85	5.71	864.94	10	874.94	840	960	0
CLIENTE 10	3.24	6.48	881.42	10	891.42	840	960	0
CLIENTE 12	2.14	4.28	895.70	10	905.70	840	960	0
CLIENTE 15	0.35	0.70	906.40	10	916.40	840	960	0
CLIENTE 13	0.06	0.12	916.52	10	926.52	840	960	0
CLIENTE 11	1.86	3.71	930.23	10	940.23	840	960	0
CLIENTE UAN	2.00	3.99	944.22	10	954.22	840	960	0
CLIENTE E	1.66	3.32	957.54	10	967.54	900	1080	0
CLIENTE 17	1.61	3.23	970.77	10	980.77	840	1140	0
CLIENTE 16	0.58	1.15	981.93	10	991.93	840	1140	0
CLIENTE 18	1.12	2.25	994.17	10	1004.17	960	1140	0
DEPÓSITO	1.98	3.96	1008.13	10	1018.13	410	1140	0
TOTAL	24.07	48.13	TIEMPO DE HOLGURA		131.87	TIEMPO IMPRODUCTIVO		0.00

[Fuente: Autor]

Anexo 91. Secuencia del TSPTW con negociación de ventanas de tiempo determinada por el modelo exacto (a) y el heurístico PFIH (b) para 12 clientes de la jornada de la tarde



(a)



(b)

[Fuente: Autor]