

**Propuesta de ruteo de vehículos para la reducción de los costos logísticos de distribución
para NATURAL FOOD S.A.S mediante la aplicación de un modelo matemático.**

Valery Viviana Castañeda Agudelo
Jhon Alexander Gómez Pedraza
Jimmy Anderson Morales Lizarazo

Universitaria Agustiniana
Facultad De Ingenierías
Programa de Ingeniería Industrial
Bogotá D.C
2018

**Propuesta de ruteo de vehículos para la reducción de los costos logísticos de distribución
para NATURAL FOOD S.A.S mediante la aplicación de un modelo matemático.**

Valery Viviana Castañeda Agudelo

Jhon Alexander Gómez Pedraza

Jimmy Anderson Morales Lizarazo

Asesor de trabajo

Ing. Luis Alfonso Peña Flórez

Trabajo de grado para optar el título de profesional en Ingeniería Industrial

Universitaria Agustiniana
Facultad De Ingenierías
Programa de Ingeniería Industrial

Bogotá D.C
2018

Resumen

Este proyecto pretende elaborar una propuesta que permita reducir los costos de distribución en la empresa Natural Food S.A.S; por medio de la utilización de un modelo matemático. Por lo tanto, fue necesario realizar un levantamiento de información, en donde se lograron identificar y caracterizar las zonas, con las cuales cuenta la empresa y los puntos de venta que posee cada una de estas; también fue posible señalar los costos fijos y variables, que influyen directamente al área de distribución. Se graficaron los recorridos con el fin de definir rutas y distancias. Determinando con cuales parámetros y variables se cuenta, se realizó un repaso por las teorías de investigación de operaciones, relacionadas principalmente con problemas de transporte y distribución; con la finalidad de establecer cuál de estos se acomoda mejor a las características del problema. Se determinó que el modelo del agente viajero se adapta a las necesidades de la empresa Natural Food, por lo que se configuró con la información recolectada de cada una de las cinco zonas con las cuales cuenta la empresa; con el fin de obtener una disminución de las distancias recorridas. El modelo se validó mediante un análisis de sensibilidad; para así comprobar que cumple con las restricciones propuestas e identificar los cambios en la solución óptima. Finalmente se realizó un análisis de los resultados obtenidos, aproximadamente se redujeron 68,19 kilómetros diarios (17%), distribuidos entre todas las zonas analizadas; y una reducción de \$1.659.517 pesos mensuales, con respecto a los costos logísticos.

Palabras claves: Distribución, Investigación de operaciones, Modelo, Logística, Problema del agente viajero, Transporte.

Abstract

This project intends to elaborate a proposal that allows to reduce the distribution costs in the company Natural Food S.A.S; through the use of a mathematical model. Therefore, it was necessary to carry out an information survey, where the zones were identified and characterized, with which the company counts and the points of sale that each one possesses; it was also possible to point out the fixed and variable costs, which directly influence the distribution area. The routes were plotted in order to define routes and distances. Determining which parameters and variables are counted, and thus reviewing the research theories of operations, mainly related to transportation and distribution problems; in order to establish which of these best suits the characteristics of the problem. It was determined that the traveler agent model is adapted to the needs of the company Natural Food, so it was configured with the information collected from each of the five areas with which the company has; in order to obtain a decrease in the distances traveled. The model was validated by a sensitivity analysis; to verify that it complies with the proposed restrictions and identify the changes in the optimal solution. Finally, an analysis of the results obtained was carried out, approximately 68.19 kilometers per day (17%) were reduced, distributed among all the analyzed areas; and a reduction of \$ 1,659,517 pesos per month, with respect to logistics costs.

Key words: Distribution, Operations research, Models, Logistics, Traveling agent problem, Transport.

Tabla de contenido

Introducción	11
2. Identificación del problema	12
2.1. Presentación de la empresa.....	12
2.2. Antecedentes del problema	15
2.3. Descripción del problema.....	20
2.4. Formulación del problema.....	27
2.5. Sistematización del problema	27
3. Justificación	28
4. Objetivos.....	30
4.1. Objetivo general.....	30
4.2. Objetivos específicos	30
5. Marco Teórico	31
5.1. ¿Qué es la investigación de operaciones?	31
5.2. Modelos de transporte.....	31
5.3. Métodos de resolución	32
5.4. Problema de ruteo de vehículos (VRP).....	32
5.5. Historia del modelo de ruteo de vehículos	33
5.6. Variantes del modelo vrp	34
5.7. Identificación del modelo	36
6. Marco referencial	38
6.1. Estado del arte	38
7. Marco conceptual	42
8. Marco legal	44
9. Hipótesis	46
9.1. Variables del problema	46
10. Marco metodológico.....	47
10.1. Enfoque de la investigación	49
10.2. Tipo de investigación	49
10.3. Tamaño población.....	49
10.4. Calculo de la muestra.....	50
10.5. Recolección de datos.....	50
10.6. Alcance de la investigación.....	50
10.7. Análisis de datos	51
11. Desarrollo.....	52

11.1.	Modelo matemático utilizado	52
11.2.	Aplicación del modelo	54
11.2.1.	Zona sur.....	54
11.2.2.	Zona occidente.....	69
11.2.3.	Zona noroccidente.....	79
11.2.4.	Zona norte.....	89
11.2.5.	Zona centro.....	99
12.	Validación y resultados.....	109
12.1.	Resultados en función de la distancia	109
12.2.	Resultados en función de costos	110
12.3.	Cambios presentados en el flujo de los recorridos	112
13.	Análisis de sensibilidad	116
13.1.	Aplicación del análisis de sensibilidad	116
13.2.	Modelado de las nuevas restricciones	117
13.3.	Resultados del análisis de sensibilidad	118
	Conclusiones	120
	Recomendaciones	122
	Referencias	123
	Anexos	128

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Movimiento de Carga Nacional por modo de transporte en miles de Toneladas</i>	18
Tabla 2. <i>Peso trasportado por producto en un día de alta demanda en la empresa Natural Food S.A.S</i>	21
Tabla 3. <i>Costos variables mensuales por km</i>	23
Tabla 4. <i>Costos variables por zona</i>	24
Tabla 5. <i>Costos fijos mensuales por zona y por recorrido</i>	25
Tabla 6. <i>Evolución VRP</i>	33
Tabla 7. <i>Marco legal Empresa Natural Food SAS</i>	44
Tabla 8. <i>Variables independientes y dependientes del problema</i>	46
Tabla 9. <i>Agente viajero (TSP)</i>	53
Tabla 10. <i>Parámetros puntos de origen y destino Zona Sur</i>	55
Tabla 11. <i>Matriz de Parametros de distancias entre puntos Zona sur (Kilometros)</i>	58
Tabla 12. <i>Matriz de celdas variables Zona Sur</i>	59
Tabla 13. <i>Primera tabla de variables Zona sur</i>	64
Tabla 14. <i>Matriz de celdas variables, resultados finales y sobtoures generados</i>	67
Tabla 15. <i>Parámetros puntos de origen y destino Zona Occidente</i>	69
Tabla 16. <i>Matriz de Parametros de distancias entre puntos Zona Occidente (Kilometros)</i>	71
Tabla 17. <i>Matriz de celdas variables Zona Occidente</i>	72
Tabla 18. <i>Primera tabla de variables Zona Occidente</i>	74
Tabla 19. <i>Matriz de celdas variables, resultados finales y sobtoures generados</i>	78
Tabla 20. <i>Parámetros puntos de origen y destino Zona Noroccidente</i>	79
Tabla 21. <i>Matriz de Parámetros de distancias entre puntos Zona Noroccidente (Kilómetros)</i>	81
Tabla 22. <i>Matriz de celdas variables Zona Noroccidente</i>	82
Tabla 23. <i>Primera tabla de variables Zona Noroccidente</i>	84
Tabla 24. <i>Matriz de celdas variables, resultados finales y sobtoures generados</i>	88
Tabla 25. <i>Parámetros puntos de origen y destino Zona Norte</i>	89
Tabla 26. <i>Matriz de Parametros de distancias entre puntos Zona Norte (Kilometros)</i>	91
Tabla 27. <i>Matriz de celdas variables Zona Occidente</i>	92
Tabla 28. <i>Primera tabla de variables Zona Norte</i>	94

Tabla 29. <i>Matriz de celdas variables, resultados finales y sobtours generados Zona Norte</i>	98
Tabla 30. <i>Parámetros puntos de origen y destino Zona Centro</i>	99
Tabla 31. <i>Matriz de parámetros de distancia entre puntos zona centro</i>	101
Tabla 32. <i>Matriz de las celdas variables Zona Centro</i>	102
Tabla 33. <i>Primera iteración para el modelo de la zona Centro</i>	104
Tabla 34. <i>Tabla de variables de decisión para a solución óptima</i>	107
Tabla 35. <i>Iteraciones realizadas en cada una de las zonas</i>	109
Tabla 36. <i>Relación de distancias totales entre el método utilizado y el modelo</i>	109
Tabla 37. <i>Costos variables por mes- reducción</i>	111
Tabla 38. <i>Iteraciones del análisis de sensibilidad</i>	119
Tabla 39. <i>Sub tours Zona Sur</i>	129
Tabla 40. <i>Soubtours (1-12) Zona Occidente</i>	130
Tabla 41. <i>Subtours (13-34) Zona Occidente</i>	131
Tabla 42. <i>Subtours (35-46) Zona Occidente</i>	132
Tabla 43. <i>Subtours (1-9) Zona Noroccidente</i>	133
Tabla 44. <i>Subtours (10-18) Zona Noroccidente</i>	134
Tabla 45. <i>Subtours (1-16) Zona Norte</i>	135
Tabla 46. <i>Subtours (11-21) Zona Norte</i>	136
Tabla 47. <i>Subtours (1-12) Zona Centro</i>	137
Tabla 48. <i>Subtours (13-34) Zona Centro</i>	138

Lista de Figuras

Figura 1. Logo empresa Natural Food S.A.S (Tomada de la empresa Natural Food S.A.S).....	12
Figura 2. Organigrama de Natural Food S.A.S	14
Figura 3. Participación de los países en el sector de alimentos	15
Figura 4 Ventas de alimentos procesados en Colombia (2010-2020)}.....	16
Figura 5 Índice de desempeño logístico	17
Figura 6 Costos de transporte interno en dólares.....	19
Figura 7 Puntos de venta en Bogotá de Avena Cubana	20
Figura 8 Participación del rango de llegada de los conductores de la empresa Natural Food	22
Figura 9 Árbol del problema	26
Figura 10 Marco Conceptual	42
Figura 11 Metodología utilizada.....	48
Figura 12 Puntos de venta Avena Cubana.....	50
Figura 13 Recorrido realizado actualmente Zona Sur.....	55
Figura 14 Parametros del modelo de la Zona Sur en Solver	60
Figura 15 Advertencia Solver	61
Figura 16 Parámetros en Open Solver.....	62
Figura 17 Herramientas de Excel.....	62
Figura 18 Subtours de la primera tabla de variables Zona Sur.....	65
Figura 19 Nuevas restricciones Zona sur en Open Solver	66
Figura 20 Recorrido arrojado por el modelo matemático Zona sur.....	68
Figura 21 Recorrido realizado actualmente Zona Occidente	70
Figura 22 Parámetros en Open Solver Zona Occidente	73
Figura 23 Subtours de la primera tabla de variables Zona Occidente	75
Figura 24 Nuevas restricciones Zona Occidente en Open Solver	76
Figura 25 Recorrido arrojado por el modelo matemático Zona Occidente	77
Figura 26 Recorrido realizado actualmente Zona Noroccidente	80
Figura 27 Parámetros en Open Solver Zona Noroccidente	83
Figura 28 Subtours de la primera tabla de variables Zona Noroccidente	85
Figura 29 Nuevas restricciones Zona Noroccidente en Open Solver	86

Figura 30 Recorrido arrojado por el modelo matemático Zona Noroccidente	87
Figura 31 Recorrido realizado actualmente Zona Norte	90
Figura 32 Parámetros en Open Solver Zona Norte	93
Figura 33 Subtours de la primera tabla de variables Zona Norte	95
Figura 34 Nuevas restricciones Zona Norte en Open Solver	96
Figura 35 Recorrido arrojado por el modelo matemático Zona Norte.....	97
Figura 36 Recorrido realizado actualmente Zona Norte	100
Figura 37 Modelo inicial presentado en OpenSolver.....	103
Figura 38 Sub tours luego de la primera iteración Zona Centro.....	105
Figura 39 Modelo óptimo en Open Solver Zona Centro (iteración 34).....	106
Figura 40 Recorrido arrojado por el modelo matemático Zona Centro	108
Figura 41 Reducciones obtenidas en función de la distancia luego de la aplicación del modelo TSP.....	110
Figura 42 Reducción obtenida en función del costo variable un recorrido realizado.....	111
Figura 43 Gráfico comparativo entre el método utilizado actualmente en la empresa y resultado del modelo matemático (Zona Sur).....	112
Figura 44 Gráfico comparativo entre el método utilizado actualmente en la empresa y resultado del modelo matemático (Zona Occidente)	113
Figura 45 Gráfico comparativo entre el método utilizado actualmente en la empresa y resultado del modelo matemático (Zona Noroccidente)	113
Figura 46 Gráfico comparativo entre el método utilizado actualmente en la empresa y resultado del modelo matemático (Zona Norte)	114
Figura 47 Gráfico comparativo entre el método utilizado actualmente en la empresa y resultado del modelo matemático (Zona Centro).....	114
Figura 48 Ruta optima Zona Noroccidente	117
Figura 49 Nuevo recorrido zona Noroccidente – Post óptimo	118
Figura 50 Gráfica correlación método utilizado y resultado modelo matemático (Zona Noroccidente con análisis de sensibilidad).....	119

Introducción

Dentro de la cadena de abastecimiento hay diferentes etapas que componen el proceso, una de ellas es el transporte, este rubro representa un porcentaje importante de los costos logísticos, estos se subdividen entre costos fijos y variables; los primeros no se encuentran sujetos a cambios en el funcionamiento de los recorridos, pero por otro lado los costos variables se encuentran directamente relacionados al funcionamiento de los vehículos.

Para la optimización de los recursos se requiere la aplicación de conocimientos basados en las ciencias exactas de la ingeniería industrial, como lo son: la investigación de operaciones, logística, costos y modelamiento matemático; que permitirán llegar a resultados fiables, puesto que soportan la información obtenida.

Natural Food SAS es una empresa que elabora su materia prima en una planta central para su posterior distribución a cada uno de sus 107 puntos de venta en la ciudad de Bogotá, estas entregas se realizan en cinco vehículos, cubriendo cada una de las diferentes zonas en las que se encuentra subdividida la ciudad. Este proceso es diario y requiere de grandes esfuerzos por parte del personal del área de distribución, se requiere la implementación de métodos empíricos. Teniendo en cuenta el reto logístico al momento de coordinar las entregas; se hace necesaria la utilización de herramientas matemáticas que contribuyan a agilizar y optimizar el proceso logístico de distribución.

El modelo que mejor se adapta al funcionamiento de la compañía es el TSP (problema del agente viajero), el cual permitirá hallar un recorrido que disminuya la distancia de los trayectos, los cuales se verán reflejados en la disminución de los costos variables del proceso, que a su vez componen los gastos generales de la empresa.

Fue necesario realizar una investigación cuantitativa; dado que el modelaje del problema del agente viajero está relacionado principalmente con parámetros y variables cuantificables; se recolectaron datos tales como: las distancias entre puntos de venta, costos fijos y variables relacionados con la entrega de la materia prima, funcionamiento actual del proceso de entregas, entre otros. Con la aplicación del modelo, presentación y desarrollo paso a paso, se busca contextualizar e introducir al lector en los conceptos relacionados al TSP, con el fin de mostrar por qué la aplicación de este modelo llegará a disminuir los costos logísticos y cómo la ejecución, arrojará un resultado de las rutas óptimas que darán una posible solución al problema presentado por Natural Food SAS.

2. Identificación del problema

2.1. Presentación de la empresa

- **Nombre de la Empresa:** Natural Food S.A.S



Figura 1. Logo empresa Natural Food S.A.S
(Tomada de la empresa Natural Food S.A.S)

- **Nombre comercial:** Avena Cubana
- **NIT:** 900.380.783-2
- **Dirección:** Calle 63a n70-16
- **Teléfono:** 8059653
- **Actividad Económica:** Fabricación, distribución y venta de alimentos y bebidas
- **Misión:**

Somos una empresa, dedicada a satisfacer las necesidades de nuestros clientes, produciendo producto de excelente calidad, con saborizantes y aditivos 100% naturales. Somos una empresa basada en principios éticos y morales, con un alto sentido de pertenencia por todos nuestros miembros.

Somos una familia, en donde empleados, clientes y directivos hacemos parte de ella. Proporcionamos a cada uno de los trabajadores un ambiente digno y acogedor, donde se retribuye

equitativamente el esfuerzo y talento individual, promoviendo el crecimiento personal y formación integral en cada uno de ellos.

- **Visión:**

Avena Cubana es una compañía líder en el mercado. Contamos con un producto de excelente calidad (UHT- Ultra High Temperature), logrado gracias a la impecable labor de nuestros colaboradores, tecnología de punta y procedimientos legales y técnicos aplicados, que apuntan a elevar nuestro posicionamiento en el mercado. Para el 2020, Avena Cubana desea llegar a todo el territorio nacional y expandir nuestro mercado en el ámbito internacional.

- **Organigrama:**

Natural Food se encuentra liderada por el Gerente general, el Sr Aristóbulo Rojas Ángel, a su cargo se encuentran las diferentes gerencias que lideran las áreas neurálgicas de la empresa, una de ellas es la Gerencia de logística; esta área se encuentra compuesta por un líder (Gerente de Logística) que a su vez tiene a cargo a toda la flota de transportadores, contando con el apoyo de un asistente que le presta colaboración en las tareas administrativas (ver Figura 2).

El proyecto se enfoca principalmente el área anteriormente descrita, pero también se cuenta con la intervención de la Gerencia Administrativa y Financiera, dicha área es la encargada de llevar un control sobre los gastos producidos por el área logística, por lo que la información que maneja es importante para el desarrollo del proyecto.

El área administrativa se compone por las áreas de talento humano, salud ocupacional, servicios generales, tesorería y contabilidad, estas dos últimas prestarán el soporte necesario y suficiente para la recolección de datos, puesto que tienen acceso directo a las fuentes primarias de información, que permiten la obtención de cifras verídicas que le dan solidez al proyecto

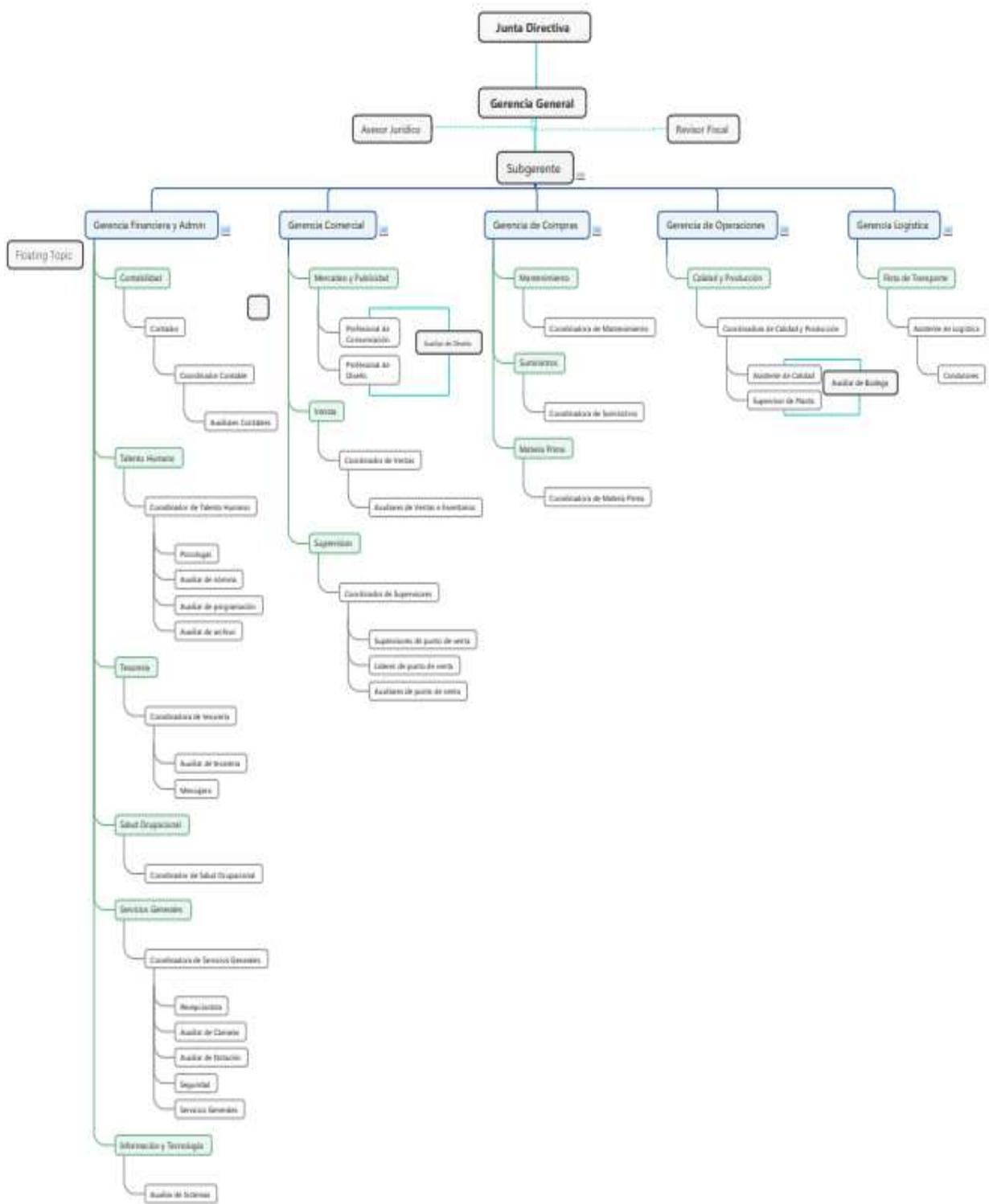


Figura 2. Organigrama de Natural Food S.A.S (Natural Food S.A.S)

2.2. Antecedentes del problema

La industria de alimentos a nivel global ha crecido exponencialmente debido al aumento de la población; según la investigación de la Agencia de promoción científica y tecnológica de Argentina, este sector es catalogado de mayor importancia dentro de las estructuras de la economía de los países. (Agencia de promoción científica y tecnológica de Argentina , 2018)

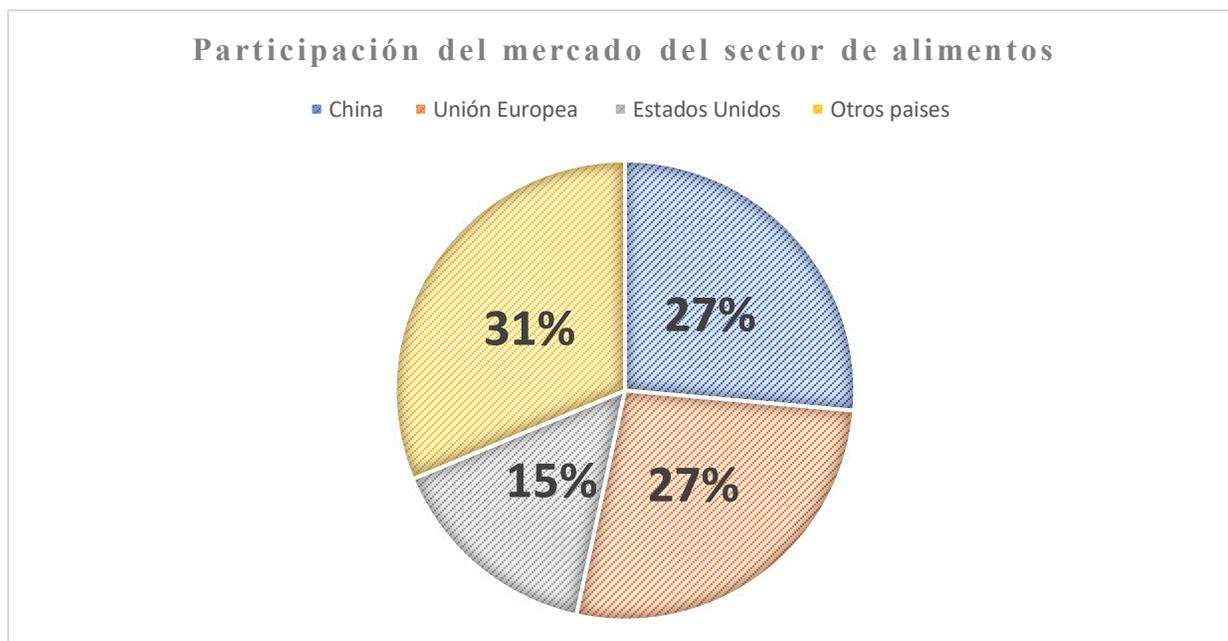


Figura 3. Participación de los países en el sector de alimentos (Programa Estratégico Regional Agroindustria para el Desarrollo., 2016)

En el sector de alimentos a nivel mundial la Unión Europea, Estados Unidos y China poseen los porcentajes más altos de participación 31% y 27% respectivamente (ver Figura 3), a causa de la densidad poblacional y el alto porcentaje en inversión tecnológica; han llegado a desarrollar nuevos métodos para así maximizar la producción de alimentos. Por otra parte, América latina se encuentra en el 31% donde se reúnen otros países, esto indica que la participación no es representativa para que sean clasificados independientes. Debido a esto se han venido creando recientemente diferentes alianzas como la ALAIAB (Alianza latinoamericana de asociaciones de la industria de alimentos y bebidas), que celebró su primera asamblea en Bogotá Colombia en el año 2017; en donde se trataron temas tales como: planes de acción para incrementar la participación activa del sector de alimentos, inocuidad alimentaria, calidad en los alimentos entre otros. Todo esto con el objetivo de impulsar el crecimiento del sector. (Camara de industria de Guatemala, 2017)

El desarrollo de este sector está directamente relacionado con la innovación que deben implementar las empresas para adaptarse a las necesidades del mercado, este es un factor clave que permite sobresalir ante la competencia y así mismo mejorar el PIB de los países.

La agencia de promoción de inversiones (Invest-Investment promotion agency) afirma que el sector de alimentos en Colombia es bastante prometedor, dado que el crecimiento estimado para cinco años desde el 2016 al 2021 es de aproximadamente un 39%. Invest resalta las ventajas de invertir en este sector, las cuales se relacionan a la continua expansión; debido al continuo crecimiento en las ventas de los alimentos procesados en Colombia (Ver Figura 4) (Invest in Bogota, 2018).

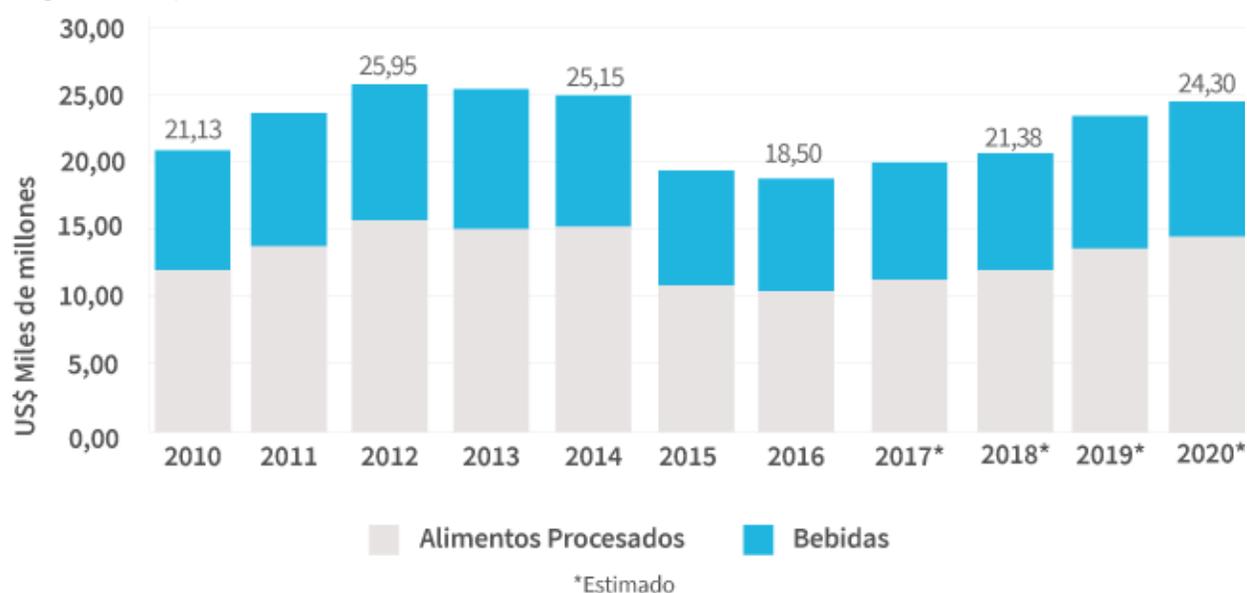


Figura 4 Ventas de alimentos procesados en Colombia (2010-2020)}
(Invest in Bogota, 2018)

El sector de alimentos y bebidas en el 2016 registro ventas de US\$18,50 miles de millones de dólares. Para el año 2020 este tendrá un aumento en ventas de aproximadamente el 35,35%, por ello la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia intenta promover los intereses por el aprovechamiento de este sector, por otra lado el gobierno también está buscando el incentivo por parte de los empresarios; para ello conformaron programas tales como: la Transformación productiva, que “busca fortalecer la industria a través de su modernización, garantizando una producción sostenible” (Invest in Bogota, 2018).

Es importante tener en cuenta que los países subdesarrollados se ven afectados a causa de las debilidades ya sea tecnológicas, industriales o económicas al momento de competir en el mercado

global; por ello es necesario innovar y cambiar los procesos de producción, logística, distribución, manejo de inventarios entre otros; logrando así mejor posicionamiento en el mercado (Revista Dinero, 2018).

El país se encuentra atrás en materia logística con respecto a los demás países, como lo indican en el manual de transporte limpio de NUTRESA, para el año 2007 el país se encontraba en el puesto 82 de 150 países evaluados y para el año 2016 paso a ocupar el puesto 94 de 160 países. Indicando que el país posee una baja competitividad a nivel logístico (Grupo Nutresa, 2017), esto se evidencia en la (figura 5) en el índice de desempeño logístico.

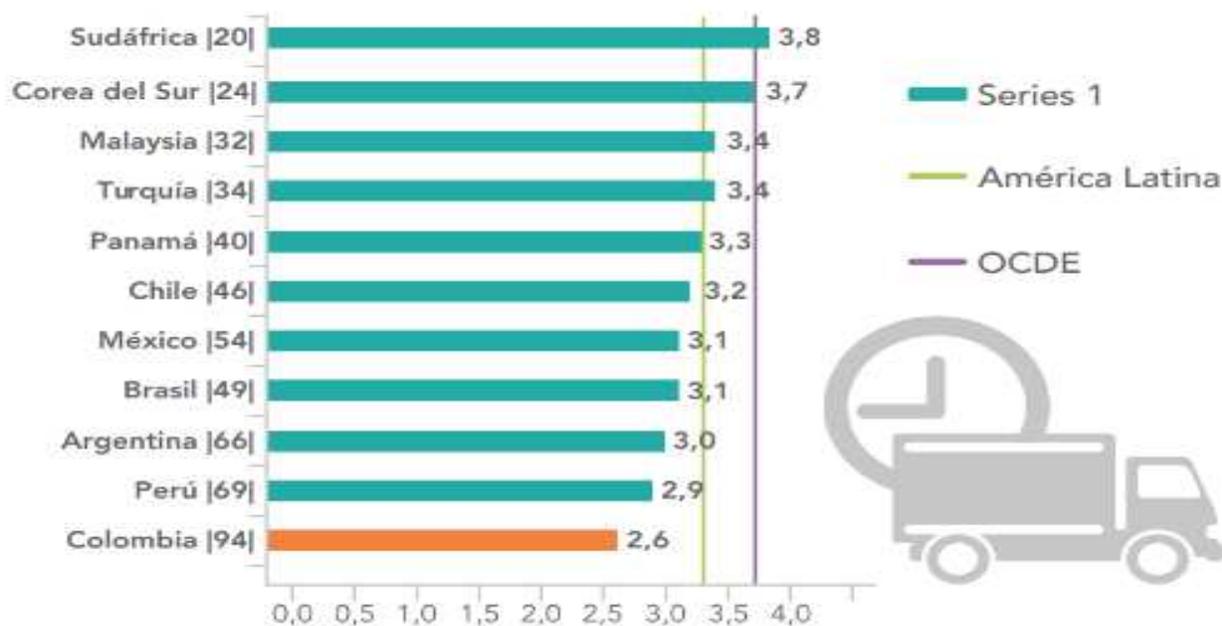


Figura 5 Índice de desempeño logístico (Grupo Nutresa, 2017) con datos del Banco Mundial

En Colombia se han venido desarrollando nuevas políticas que tratan temas que incentivan la competitividad; como el Compes 3547 donde el Concejo Nacional de política económica y social, estipula “la política nacional de logística”; con la que promueven la creación de nuevas estrategias en los procesos logísticos, con el fin de aumentar la productividad.

La adecuada ejecución de los procesos logísticos es sinónimo de competitividad; esto se relaciona a rutas óptimas en la distribución, desde producción hasta el cliente final. Algunas industrias en Colombia carecen de sistemas logísticos, debido a la ausencia de información al interior de las empresas; sin embargo, es importante resaltar que los procedimientos que componen el transporte de los productos, implican tiempo y si este es usado inadecuadamente puede conllevar a demoras o cuellos de botella, los cuales según la investigación presentada en el Compes 3547

influyen para el aumento en los costos de distribución. (Departamento Nacional de Planeación, 2008).

Luis Aníbal Mora especialista en mercadeo internacional de la Universidad Eafit y autor de cinco libros de gestión logística, afirma que la distribución es un factor clave para la efectividad en las entregas; también identifica cómo el transporte es la actividad más crítica dentro de la gestión de la cadena de abastecimiento. Resalta la importancia de realizar un correcto diseño de rutas de comercialización y para ello se tienen en cuenta la utilización eficiente de los vehículos, por ende una correcta distribución en las compañías permitiría maximizar la rapidez y flexibilidad en las entregas, cabe resaltar que se debe garantizar la calidad en los productos que se transportan. (García, 2014)

Las toneladas transportadas por medios terrestres pasó de 139.646.000 toneladas en el 2005 a 238.880.000 en el año 2015, mostrando un crecimiento exponencial. Es posible determinar que seguirá en ascenso a diferencia de los demás modales de transporte, como lo son: aéreo y fluvial, que manejan menores unidades de carga. En la tabla 1 se muestran las cifras exactas de las toneladas transportadas en cada uno de los modos. Reforzando la importancia que tiene el transporte terrestre en la logística nacional.

Tabla 1.

Movimiento de Carga Nacional por modo de transporte en miles de Toneladas

AÑO	TERRESTRE	CONCESIONES	CARBÓN	TOTAL	FLUVIAL	AÉREO	CABOTAJE	TOTAL
2002	84.019	N.D	31.032	31.032	3.480	122	532	119.185
2003	99.782	37	42.744	42.781	3.725	132	928	147.348
2004	117.597	317	45.865	46.182	4.211	129	588	168.707
2005	139.646	308	48.919	49.227	4.863	135	400	194.271
2006	155.196	314	49.394	49.708	4.025	138	509	209.576
2007	183.126	375	52.829	53.204	4.563	137	454	241.484
2008	169.714	236	58.236	58.472	4.953	123	372	233.634
2009	173.558	254	59.144	59.398	4.070	109	364	237.499
2010	181.021	366	66.659	67.025	3.691	119	353	252.209
2011	191.707	204	74.350	74.554	3.650	124	646	270.029
2012	199.369	20	76.780	76.800	3.474	127	388	280.158
2013	220.309	97	76.684	76.781	2.968	149	774	300.981
2014	229.410	174	42.733	42.907	2.958	163	615	275.953
2015	238.880	230	42.705	42.935	3.524	179	967	291.485

Nota: Elaboración propia con datos de (Grupo Nutresa, 2017) *datos del Ministerio de transporte 2016*

Analizando la tabla 1, es evidente el crecimiento que ha tenido el transporte terrestre con un aumento del 71 % en tan solo una década, soportando la idea de que cada vez los sistemas de

producción y logística se enfrentan a retos más complejos, en donde aumentar la utilidad marginal por muy poco que sea; puede llegar a representar un mejor posicionamiento en el mercado. Por ello surge la necesidad de la optimización en los procesos y surgen las herramientas para el mejoramiento de las operaciones, resaltando que van de la mano con profesionales altamente cualificados.

En la distribución y transporte no solo se habla del modo de entregar los productos a los clientes o centros de distribución; también existen factores que pueden influir para que esta actividad represente un alto porcentaje en los costos totales de las empresas.

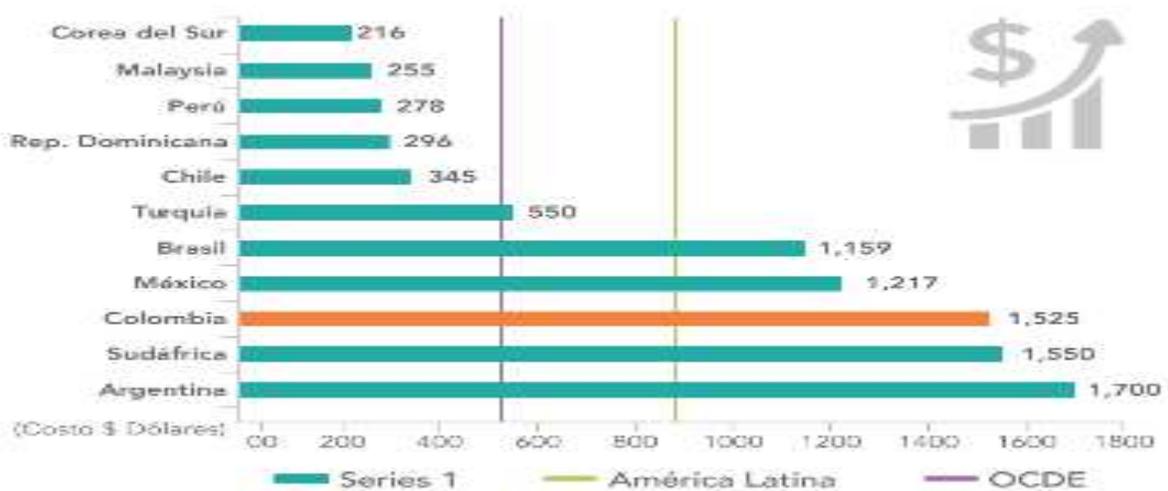


Figura 6 Costos de transporte interno en dólares
(Grupo Nutresa, 2017) datos de Doing Bussines 2016

En la figura 6 son evidentes los altos costos en transporte, “Colombia tiene uno de los costos de transporte interno más elevados respecto a países de referencia, muy por encima de los de la OCDE (Organización para la cooperación y el desarrollo económico) y América Latina” (Duarte, 2016). Estos costos se ven representados en variables como: los altos precios de la gasolina, fletes, mantenimientos, infraestructura vial, densidad del flujo vehicular entre otros

Todo esto hace que la administración en la última etapa de la cadena de abastecimiento sea una tarea ardua, provocando que la distribución y el transporte del producto final no sea del todo un trabajo fácil, por ende, algunos autores recomiendan el uso de herramientas que permitan la optimización de tiempo y distancia. “(...) Entre más complejo sea dicho proceso, los beneficios de este tipo de herramientas tendrán mayor impacto en la operación (...)” (García, 2014).

2.3.Descripción del problema

La empresa Natural Food S.A.S es una empresa que se dedica a la elaboración y venta de productos lácteos (avena - kumis), y pastelería como los pandebonos, pan de yuca, pastel de pollo y almohabana. Reconocida comercialmente con la marca de AVENA CUBANA.

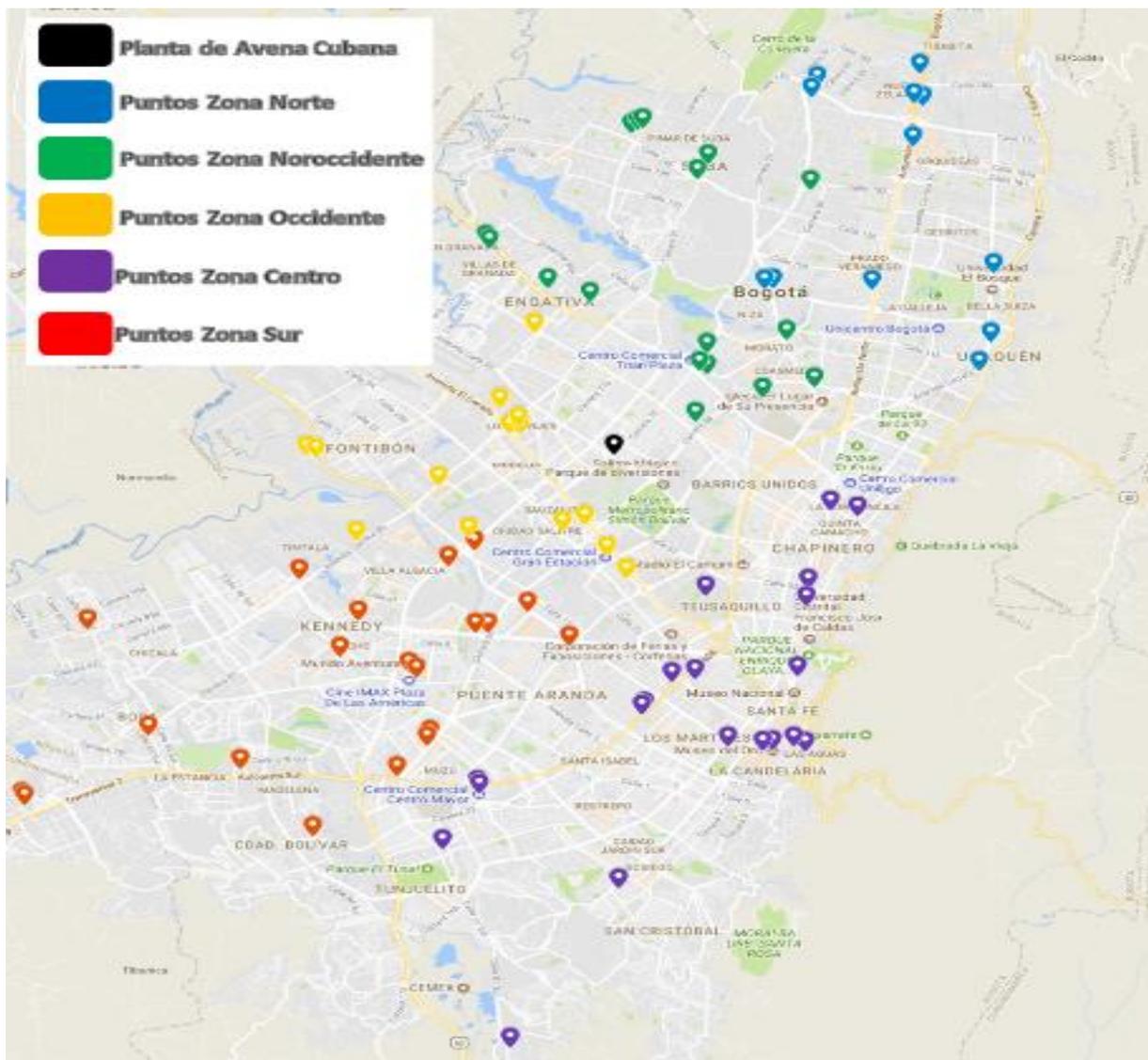


Figura 7 Puntos de venta en Bogotá de Avena Cubana
Elaboración propia con datos de la empresa Natural Food S.A.

Natural Food S.A, S cuenta con 107 puntos de venta distribuidos en Bogotá y la sabana, los cuales se visitan diariamente. Las rutas de recorrido están distribuidas por zonas ya establecidas por la compañía (zona Norte, Sur, Occidente, Noroccidente y Centro), en la figura 7 están resaltadas con diferentes colores, en donde se puede identificar que cada zona está compuesta por un máximo de 20 a 24 puntos de venta.

Diariamente la empresa tiene definidos cinco recorridos, para los cuales destina un vehículo de los cinco que compone la flota de transporte, es importante resaltar que los puntos de venta deben ser abastecidos con materia prima acorde a la demanda.

Anteriormente se manejaba el sistema de producción tipo push, el cual se caracteriza por fabricar sin tener en cuenta la demanda ni las preferencias o exigencias del cliente, hoy por hoy se hace uso del sistema pull donde se tiene en cuenta que la demanda “es el punto de partida para armar cualquier cadena logística o carta de navegación y no el destino. Es lo que se conoce como una política *pull* (que la demanda tira la cadena logística)” (Moreno, 2018).

Basándose en la información recolectada a lo largo del mes de mayo del 2018. Se realizó la tabla 2, en donde fueron consolidados los pesos de cada producto con relación a la zona para un día que presenta alta demanda, según la empresa Natural Food. Los sábados se caracterizan por presentar mayor demanda, en vista que se transporta materia prima para todo el fin de semana y se transporta entre el 30% y el 35% de todo el producto de la semana. Cabe resaltar que la capacidad de los vehículos se mide por el peso del producto transportado, la flota de transporte (homogénea) de Natural Food S.A.S cuenta con una capacidad de carga entre 1.800 kg y 2.000 kg ([Ver anexo](#)), Según la columna “Peso total del producto transportado” de la tabla 2; es posible afirmar que el peso actualmente transportado diariamente no es un factor limitante; ya que no logra superar la capacidad de carga de los vehículos disponibles.

Tabla 2.

Peso transportado por producto en un día de alta demanda en la empresa Natural Food S.A.S

Ruta	Avena	PandeBono	Almojábana	Pan de Yuca Queso	Pan de Yuca de Cuajada	Paste de Pollo Y Pastel de Carne	Peso Total del producto transportado (kg)
Norte	786 kg	158 kg	42 kg	36 kg	37 kg	139 kg	1.198 kg
Sur	911 kg	92 kg	59 kg	33 kg	23 kg	244 kg	1.362 kg
Occidente	684 kg	58 kg	35 kg	25 kg	22 kg	205 kg	1.029 kg
Centro	872 kg	93 kg	48 kg	28 kg	22 kg	202 kg	1.266 kg
Noroccidente	1.147 kg	193 kg	66 kg	48 kg	43 kg	237 kg	1.734 kg
TOTAL, TRANS	4.400 kg	594 kg	250 kg	170 kg	147 kg	1.028 kg	6.589 kg

Nota: Elaboración propia con datos de la empresa Natural Food S.A.S.

El diseño de las rutas se realiza empíricamente, sin tener en cuenta las distancias entre los puntos; por ende, estas cinco rutas cumplen con el mismo recorrido de lunes a sábado; esto se ve reflejado

en el aumento de los costos, dado que en ocasiones los recorridos tardan más tiempo de la jornada laboral de los conductores y eso repercute en la alta rotación de personal.

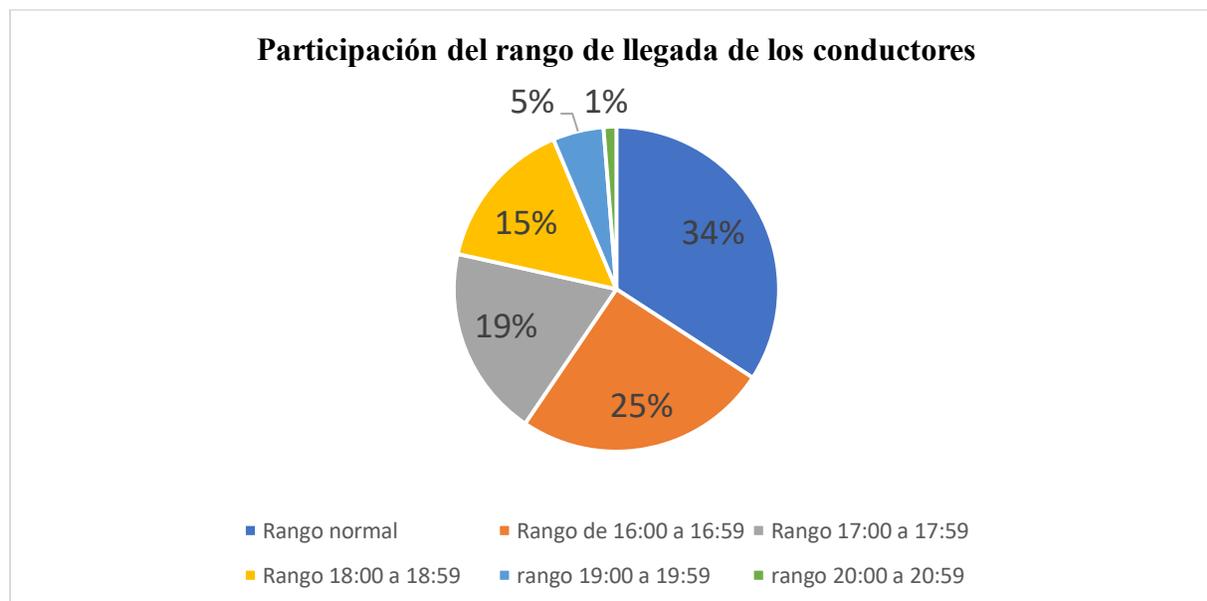


Figura 8 Participación del rango de llegada de los conductores de la empresa Natural Food
Elaboración propia con datos de la empresa Natural Food S.A.S

Se realizó un análisis con respecto a la hora de llegada de los conductores con respecto a 16 días del mes de mayo del 2018. Se efectuaron un total de 79 recorridos; se utiliza un método empírico para el ruteo y distribución de los vehículos. Durante el análisis y recopilación de los datos se dio una hora de holgura para estandarizar el rango normal de llegada. Con la figura 8 se pretende mostrar como alrededor del 34% de las llegadas es decir 27 recorridos cumplieron con el horario establecido (7:00 am a 3:00pm). Por consiguiente, 52 recorridos (66%) están por fuera del rango óptimo, esto se ve reflejado directamente en el aumento de los costos; a manera de horas extras, desgaste de los vehículos debido a la sobreutilización, demora en las entregas programadas y costos relacionados a la manutención de la flota de transporte. Durante este diagnóstico realizado también fue posible identificar que la compañía se vio obligada al alquiler de un vehículo por cinco días; este alquiler tiene un costo alrededor de \$200.000 pesos por día es decir \$1.000.000 de pesos, en los cinco días con respecto a los 16 días analizados; situación que se presentó debido al mantenimiento correctivo que necesitaron algunos vehículos.

Un factor que incrementa los costos de transporte de la materia prima son las novedades que pueden llegar a presentarse, se entiende por novedad un evento fortuito que requiere de atención inmediata para ser solucionado. Generalmente se dan ya sea por un mal pronóstico o por un pico

en la venta; donde el punto de venta amanece sin materia prima, por ello el recorrido debe ser modificado, en donde es visitado en primer lugar el punto que presenta la novedad, después el conductor continua con el recorrido haciendo uso de sus conocimientos.

Se realizó un levantamiento de información en la empresa Natural Food S.A.S, Para el mes de mayo en donde solo 27 días se distribuyó materia prima a los puntos de venta, esta información se recolectó; gracias a la consulta en fuente primaria (archivo, área contable y programa HELISA), puesto que se puede filtrar información por vehículo, tipo de gasto, fecha y valor; permitiendo encontrar en el archivo los soportes de dichos gastos.

Dentro de los días que se realizaron recorridos en el mes de mayo (27 días en donde se realizan los cinco recorridos), entre todos los vehículos se realizaron un total de 135 recorridos a lo largo del mes. En donde los costos totales fueron de \$15'967.941 pesos, de los cuales se dividen entre costos variables y fijos; estos se pueden encontrar en la tabla 3, 4 y 5.

Los costos variables son directamente proporcionales al volumen de la producción es decir a la demanda de los puntos de venta. Estos se clasifican en la tabla 3 se componen de valores tales como: combustible, lubricantes, llantas, entre otros; dichos costos representan el 40.81% del costo total. Donde el combustible es el más representativo ya que las rutas son largas debido al método que actualmente se está manejando.

Tabla 3.

Costos variables mensuales por km

Costos variables		Promedio
Combustible	\$ 478,02	75,3%
Lubricantes	\$ 41	6,4%
Llantas y neumáticos	\$ 16	2,5%
Mantenimiento y reparación	\$ 70	11,1%
Lavado	\$ 30	4,7%
Costo variable por km	\$ 635,22	

Nota: Esta tabla se realizó haciendo uso del libro costos logísticos del transporte terrestre de carga en Colombia donde el autor hace referencia a la importancia de calcularlos y según la investigación que realizo a diferentes empresas; logro identificar una lista de variables, las cuales son las más relevantes al momento de calcular los costos totales. (Silvera Escudero & Mendoza Valencia, 2017) (Fuente Elaboración propia con datos de la empresa Natural Food S.A.S).

Los costos variables y los costos fijos son determinantes en cualquier estudio que se esté realizando para determinar la rentabilidad en los viajes que deben hacer los diferentes camiones en una jornada

laboral que puede durar hasta más de 12 horas en un día. (Silvera Escudero & Mendoza Valencia, 2017)

Para encontrar que el costo variable por kilómetro (\$635,22) se tomaron todos los gastos generados por cada vehículo a lo largo del mes de mayo (se consulta información contable suministrada por Natural Food SAS), gastos por concepto de combustible, mantenimiento, lavado, lubricante, etc. Luego con la información de los tickets de tanqueo en la estación de servicio; se calculó el número de kilómetros que cada vehículo habría recorrido desde su primer tanqueo del mes hasta el último tanqueo, seguido a esto se sumaron los Kilómetros obtenidos por cada vehículo y se realizó un promedio del cual se obtuvo (1932 km en promedio), de esta forma los costos fueron divididos por 1932 kilómetros.

Tabla 4.

Costos variables por zona

RECORRIDO	DISTANCIA (KM)	COSTO VARIABLE DE CADA RECORRIDO	COSTO VARIABLE AL FINAL DEL MES
NORTE	128	\$ 81.308	\$ 2'195.310
OCCIDENTE	53,4	\$ 35.064	\$ 946.728
SUR	65,5	\$ 33.921	\$ 915.856
CENTRO	71,5	\$ 41.607	\$ 1'123.381
NOROCCIDENTE	65,9	\$ 45.418	\$ 1'226.287
TOTAL, DEL COSTO VARIABLE			\$ 6'407.562

Nota: Esta tabla se realizó con la recopilación de información durante el mes de mayo en la empresa Natural Food SAS. (Fuente Elaboración propia con datos de la empresa Natural Food S.A.S).

Primero se multiplicó el valor del costo variable por kilómetro, por la distancia total (kilómetros) de cada una de las rutas preestablecidas para cada zona; este es el costo variable del recorrido por zona (ver tabla 4). Se puede afirmar que la ruta del Norte es la que posee mayor costo variable (\$81.308 pesos) con respecto a las demás zonas, debido a que el recorrido que actualmente realizan los conductores para satisfacer todos los puntos de venta, suma un total de 128 kilómetros.

Seguido a esto, se toma el costo variable de cada recorrido y se multiplica por el número de recorridos realizados en cada zona, durante los 27 días que se distribuyó producto a los puntos de venta, este valor se denomina “Costo variable al final del mes por zona”, después se suman los resultados obtenidos por zona; para encontrar el costo variable mensual (\$6'407.562).

Tabla 5.
Costos fijos mensuales por zona y por recorrido

COSTOS FIJOS	NORTE	OCCIDENTE	SUR	CENTRO	NOROCCIDENTE	PROMEDIO
Salario y prestaciones	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000	\$ 2.000.000	\$ 2.000.000	71,5%
Seguro	\$ 170.151	\$ 170.151	\$ 170.151	\$ 170.151	\$ 170.151	9,4%
Parqueadero	\$ -	\$ -	\$ 9.200	\$ -	\$ 21.200	0,3%
Soat	\$ 49.650	\$ 49.650	\$ 49.650	\$ 49.650	\$ 49.650	2,8%
Impuesto de rodamiento	\$ 63.813	\$ 63.813	\$ 63.813	\$ 63.813	\$ 63.813	3,5%
Recuperación de capital	\$ 116.667	\$ 116.667	\$ 116.667	\$ 116.667	\$ 116.667	6,5%
Acompañamiento satelital	\$ 48.836	\$ 48.836	\$ 48.836	\$ 48.836	\$ 48.836	2,7%
Plan de telecomunicaciones	\$ 30.000	\$ 30.000	\$ 30.000	\$ 30.000	\$ 30.000	1,7%
Peajes	\$ 134.400	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	1,7%
Totales de costos fijos por mes	\$ 1.613.516	\$ 1.479.116	\$ 1.488.316	\$ 2.479.116	\$ 2.500.316	
Totales de costos fijos por ruta	\$ 59.760	\$ 54.782	\$ 55.123	\$ 91.819	\$ 92.604	

Nota: Esta tabla se realizó haciendo uso del libro costos logísticos del transporte terrestre de carga en Colombia “Los costos fijos del transporte terrestre de carga son determinantes en el análisis que se debe hacer de los costos totales al finalizar un ciclo o un periodo determinado en el transporte terrestre de la carga”. (Silvera Escudero & Mendoza Valencia, 2017) (Fuente Elaboración propia con datos de la empresa Natural Food S.A.S).

En la tabla 5 se especifican los costos fijos de la empresa, se identifica la zona noroccidente con el trayecto más costoso en vista que tiene un costo fijo diario de \$92.604 pesos, este costo aumenta en comparación a las demás rutas; dado que durante el proceso de distribución y transporte, los conductores se ven obligados a pagar parqueaderos además la empresa debe incurrir en pago de horas extras y salarios por contratación de auxiliares, debido a que se encuentran sujetos al volumen de la demanda. Esto se ve directamente representado en el tiempo de descarga de la materia prima. Cabe resaltar que, con el método de operación actual, se observa que la ruta del noroccidente es una de las que sobrepasa el rango de tiempo establecido para la entrega de materia prima a los puntos de venta. Otra ruta que se caracteriza por tener los costos altos es el recorrido del centro, se requiere de un auxiliar por políticas de seguridad, lo cual incrementa los costos y es una de las rutas que suele llegar fuera de los rangos que comprenden el horario de los conductores. Los otros recorridos manejan un estándar en relación al costo fijo por ruta, alrededor de \$50.000 a \$60.000 pesos.

El total de los costos fijos mensuales es de \$9.560.380 pesos, donde están sumados las cinco rutas (Norte, Occidente, Sur, Centro, Noroccidente) del cual el 71,5% se compone por salario y prestaciones, otra variable que posee participación relevante es el seguro con un 9,4%, el porcentaje restante se divide en las demás variables expuestas en la tabla 5.

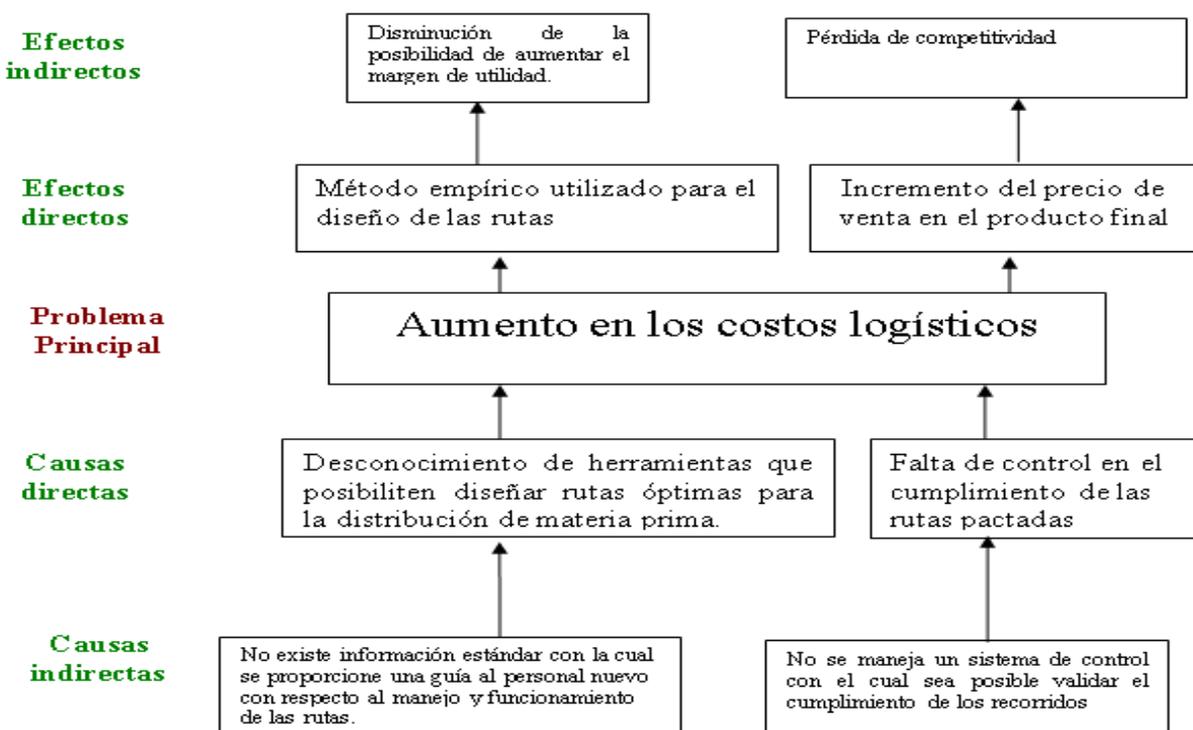


Figura 9 Árbol del problema

Elaboración propia

En la figura 9 se hace uso de la herramienta del árbol de problemas para realizar un diagnóstico asertivo, donde se identifican las causas y efectos del problema principal, que se está presentando actualmente en la empresa Natural Food SAS en el desarrollo de sus procesos logísticos.

2.4. Formulación del problema

¿Cómo un modelo matemático podría disminuir los costos logísticos en comparación con el método empírico empleado actualmente en la empresa Natural Food S.A.S?

2.5. Sistematización del problema

- ¿Cuál modelo es el más adecuado para disminuir las distancias en cada recorrido por zona en la empresa Natural Food S.A.S ?
- ¿Qué efectos tendría en la solución óptima, tener en cuenta las novedades que se presentan a diario o que afectan el flujo normal del funcionamiento de alguna ruta?

3. Justificación

Actualmente las empresas se ven enfrentadas a nuevos retos. Cada día la competencia se hace fuerte, es importante resaltar que la economía del país está pasando por dificultades; debido al poco crecimiento que ha presentado el PIB, ya que para el año 2017 la economía colombiana creció tan solo el (1,8%) y está por debajo del rango meta. (Portafolio, 2018), a causa de esto el panorama actual exige que las empresas se encuentren a la vanguardia en todos sus procesos; dado que la solución es aumentar sus márgenes de ganancia sin que se vea afectada la calidad de los productos, esto se puede lograr optimizando los procesos de tal manera que les permita disminuir sus costos operacionales.

Natural Food SAS se ha destacado por sus productos tradicionales y sin conservantes; esto los ha llevado a ocupar un puesto importante en el mercado, pero el crecimiento exponencial en puntos de venta que hacen parte de Bogotá, ha hecho de las operaciones logísticas un trabajo complejo, que se agudiza, debido al método empírico utilizado por parte de los coordinadores del área logística para el diseño de las rutas de distribución; bajo estas circunstancias surge la necesidad de implementar nuevas metodologías, no solo que cumplan con los requisitos, sino que lo hagan de la manera más eficiente y con los costos más bajos.

Para lograr la resiliencia y ser gestores de cambio con miras en la competitividad, las organizaciones tienen que entender la logística como una herramienta estratégica que le ayude a las empresas, no solo a enfrentar las situaciones adversas sino a sacar ventaja de ellas. (Zona Logística, 2014)

Las ciencias básicas se caracterizan por ser indispensables y por ende necesarias; tanto para los profesionales como para la sociedad en general. En vista de que permiten el manejo de los datos o de la información, y este es un activo intangible importante en todas las compañías. Aunque muchos estudiantes principalmente de las carreras relacionadas con la ingeniería, no ven el uso de estas ciencias, que son necesarias en el ámbito laboral, sustancialmente sirven para hallar posibles mejoras en las diferentes áreas en donde se pueden desempeñar. En el VIII Congreso Internacional de Formación y Modelación en Ciencias Básicas que se desarrolló en la Universidad de Medellín en mayo del 2016, donde el objetivo fue intercambiar conocimiento y potencializar la usabilidad de las ciencias básicas para brindar soluciones, el jefe del Departamento de Ciencias Básicas de la institución, José Alberto Rúa Vásquez, aseguro que es importante aplicar estas ciencias porque permiten dar respuestas en términos cuantitativos. (Revista Semana, 2016)

Hoy en día existen gran variedad de modelos matemáticos, los cuales se caracterizan por ser útiles en diferentes áreas de una empresa, aunque también se pueden implementar en los negocios y hasta en la vida real, dado que es posible simular procesos o tareas, aunque la elección del modelo más acertado, depende de la necesidad que se posea. Cabe resaltar que estos son métodos que pueden brindar óptimas soluciones siempre y cuando exista el personal cualificado para realizar su respectiva simulación.

El empleo de Modelos para analizar información y tomar decisiones que anticipen y resuelvan los problemas antes de que estos impacten en la operación, hace a la organización más proactiva dando más tiempo para pensar, planear, medir, evaluar y actuar. (Cantú & Sellers, 2018)

Las empresas deben adaptarse al cambio, principalmente las PYMES puesto que son estas empresas que suelen ser más resistentes al cambio, es sus prioridades la innovación y la aplicación del conocimiento no están presentes (Revista Dinero, 2015), por ello es necesario concientizar a las empresas, sobre la importancia de la implementación de metodologías; que permitan optimizar no solo los procesos logísticos, sino todos los procesos que se llevan a cabo dentro de las empresas.

4. Objetivos

4.1.Objetivo general

Diseñar una propuesta que reduzca los costos logísticos de distribución para la empresa Natural Food S.A.S, mediante la aplicación de un modelo matemático que optimice las distancias en cada recorrido.

4.2.Objetivos específicos

- Aplicar un modelo matemático que minimice los costos y optimice las distancias de cada uno de los recorridos.
- Validar el modelo a través la interpretación de los resultados encontrados y contrastarlos con el método empírico que actualmente se maneja.
- Realizar un análisis de sensibilidad que permita medir el impacto luego de hacer cambios en los parámetros de modelo.

5. Marco Teórico

El presente proyecto se realiza con base en algunas teorías que se desarrollan en la investigación de operaciones, para la solución de problemas que se presentan en la industria. Se busca encontrar una solución óptima para el problema de ruteo que actualmente posee la empresa Natural Food SAS.

5.1.¿Qué es la investigación de operaciones?

Los inicios de la IO (Investigación de operaciones) surgen por las necesidades en la distribución de recursos a lo largo de la segunda guerra mundial, gracias a los resultados obtenidos dicha ciencia continuó en desarrollo dado que estos modelos eran aplicables, no solo en entornos bélicos si no también era posible aplicarlos a los problemas que se fueron presentando a causa del desarrollo de la industria. (Hillier & Lieberman, 2010, pág. 31)

Una definición muy acertada para la investigación de operaciones es la que presenta (Kong, 2010, pág. 11) en su libro Investigación de Operaciones:

La investigación de operaciones trata el estudio y despliegue de métodos científicos para usar eficazmente los recursos. Tales métodos comprenden modelos matemáticos —y estadísticos— y diversos algoritmos que sirven para tomar decisiones en problemas relacionados con la planificación, coordinación y ejecución de operaciones en las organizaciones. (Kong, 2010, pág. 11)

Las tres etapas principales para la aplicación de la IO son descritas por (Martinez, Vértiz, Jesús, Jimenez, & Moncayo , 2014, pág. 2) como:

1. Formulación del modelo matemático
2. Solución del modelo matemático
3. Validación del modelo matemático

5.2.Modelos de transporte

Dentro de los modelos que comprende la IO, desarrollaron aquellos modelos enfocados en hallar la solución a problemas de transporte. (Hillier & Lieberman) sintetizan un problema de transporte como: “la distribución de cualquier mercancía desde cualquier grupo de centros de suministro, llamados orígenes, a cualquier grupo de centros de recepción, llamados destinos, de tal manera que se minimicen los costos totales de distribución.” (Hillier & Lieberman, 2010, pág. 285), por lo que en esencia cumple con los requerimientos del problema.

Para la solución de problemas de este tipo son conocidos modelos como: la ruta más corta, flujo máximo, árbol de expansión mínima, problema del agente viajero entre otros.

5.3.Métodos de resolución

Existen 3 métodos de resolución para modelos de transporte, (Bustos , Vanegas, Benavente, & Lüer, 2009) los enlistan de la siguiente manera:

- Métodos exactos

Son los métodos mediante los cuales se pretende usar un modelo para llegar una solución muy aproximada a la óptima, pero su desventaja es que puede llegar a tardar demasiado tiempo o puede haber problemas que por sus dimensiones sea casi imposible hallar una solución óptima.

- Meta heurística

Una meta heurística facilita la resolución de problemas en donde no se han establecido algoritmos confiables para obtener resultados óptimos, a causa de la complejidad de los problemas planteados o falta de estudio en el tema. (Bustos , Vanegas, Benavente, & Lüer, 2009)

- Heurística

Las técnicas de heurística son las que permiten tomar un problema combinatorio y hallar una buena solución, que sea muy próxima a la óptima, (Taha, 2012) lo define de la siguiente manera:

Una heurística es una técnica de búsqueda directa que utiliza reglas favorables prácticas para localizar soluciones mejoradas. La ventaja de la heurística es que en general determina (buenas) soluciones con rapidez, utilizando reglas de solución simples. La desventaja es que la calidad de la solución (con respecto a la óptima) suele desconocerse. (pág. 351)

5.4.Problema de ruteo de vehículos (VRP)

El problema de VRP es uno de los más comunes en la optimización de operaciones logísticas y uno de los más estudiados; plantea la búsqueda de la solución óptima con diferentes restricciones tales como: número de vehículos, su capacidad, lugares de destino (clientes) y demanda de los clientes, entre otras. (Rocha Medina , González La Rota, & Orjuela Castro, 2011)

“El VRP surge naturalmente como el problema central en los campos de transporte, distribución y logística. En algunos mercados, el transporte significa un alto porcentaje del valor de los bienes” (Bustos , Vanegas, Benavente, & Lüer, 2009, pág. 1). Cabe resaltar que los problemas de VRP son conocidos por su complejidad cayendo en la categoría NP-Hard , (Bustos , Vanegas, Benavente, & Lüer, 2009) lo describen así : “El tiempo y esfuerzo computacional requerido para resolver este problema aumenta exponencialmente, respecto al tamaño del problema, es decir, la cantidad de nodos a ser visitados por los vehículos”.

5.5.Historia del modelo de ruteo de vehículos

Tabla 6.
Evolución VRP

Evolución histórica modelo VRP		
Año	Acontecimiento	Descripción
1956	Primer problema planteado tipo VRP, el cual fue el agente viajero o TSP introducido por Flood	Recibe este nombre a razón de que se describe como un vendedor que debe visitar un grupo de ciudades en un solo viaje.
1959	Nacen variaciones como el TPS generalizado por Dantzing y Ramser, se convierte en la base para posteriores formulaciones	Trabajo en el cual se modela un problema en donde se debe despachar combustible a través de una flota de camiones a diferentes servicios.
1960	Se encuentra la primera referencia del TSP múltiple o m-TSP con Miller, Tucker y Zemlin	El objetivo planteado es construir exactamente m rutas, una para cada vehículo, de modo que cada cliente sea visitado una vez por uno de los vehículos.
1967	Aparece el VRPTW (VRP con ventanas de tiempo)	En donde los vehículos deben cumplir recorridos con unos horarios establecidos
1969	A partir de Tillman se da paso al TSP probabilístico o PTSP	El objetivo es encontrar el mínimo costo de recorrido esperado por medio de probabilidades
1985	Aparecen los tipos de VRP homogéneos VRPB	
1986	Variaciones como VRP con ventanas de tiempo tales como VRPTD) VRP con ventanas rígidas de tiempo)	
1988	Es formulado el VRPMTW (VRP con ventanas de tiempo múltiples)	
1989	El ultimo tipo en desarrollar es el SDVRP (VRP con entregas fraccionadas)	
1992	Es formulado el VRPSTW (VRP con ventanas blandas de tiempo)	
1994	Se realiza una combinación de VRPB y VRPTW	
1995	El SDVRP sufre una variación SDVRPTW (entregas fraccionadas y ventanas de tiempo)	

Nota: Elaboración propia, información tomada (Rocha Medina , González La Rota, & Orjuela Castro, 2011).

En la tabla 6 se pueden ver los acontecimientos más relevantes que se han presentado con relación al problema de ruteo de vehículos, es fundamental resaltar que el aumento de publicaciones con respecto a la solución de problemas de transporte, ha aumentado exponencialmente; La mayoría de variaciones del VRP se desarrollaron a causa de necesidades que se fueron presentando en el día a día ya sea de las empresas o de las personas.

5.6. Variantes del modelo vrp

- **Agente viajero (tsp)**

“El primer problema planteado tipo VRP fue el del agente viajero o TSP (*Travelling Salesman Problem*) introducido por Flood en 1956. El problema recibe este nombre porque puede describirse en términos de un agente vendedor que debe visitar cierta cantidad de ciudades en un solo viaje” (Rocha Medina , González La Rota, & Orjuela Castro, 2011).

Una de las características importantes dentro de este modelo es la simetría del caso a estudiar, un modelo puede llegar a ser simétrico o asimétrico, esto depende de las distancias de un punto de origen a un punto de destino. Es simétrico si las distancias entre un nodo X y un nodo Y son iguales tanto de X a Y como de Y a X. (Taha, 2012, pág. 397). En el problema planteado será asimétrico dado que las distancias no son iguales, las distancias son tomadas haciendo uso de la herramienta tecnológica Google Maps que permite calcular las distancias reales entre los puntos.

Es importante dejar claro que por condiciones de movilidad (normas de tránsito), los recorridos de un punto a otro; pueden variar en distancia; en vista que el recorrido tomado puede que no sea el adecuado para hacer el viaje de regreso, llegando a tomar un camino alternativo. Esto lo convierte en un modelo asimétrico.

- **Modelamiento del modelo tsp.**

La estructura del modelo del agente viajero es la siguiente:

Función Objetivo:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij}, d_{ij} = \infty \text{ para todas las } i = j \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1 \forall (i, j) \in E, i \neq 0, j \neq 0 \quad (4)$$

Fuente: (Oliveira, Facultad de Ingenierias Universidad de la Republica de Uruguay, 2004)

En la ecuación 1 se muestra la función objetivo, donde se busca minimizar la distancia recorrida por cada vehículo, en donde d_{ij} es la distancia de cada nodo de origen a un nodo de destino, x_{ij} es la variable binaria que indica si ese recorrido hace parte de la ruta óptima.

Dentro de las restricciones se encuentra la restricción (2) la cual garantiza que cada punto de origen sea visitado una única vez, la restricción (3) garantiza que todo punto sea punto de destino por una sola vez.

La restricción (4) busca eliminar los sub tours. En donde u_i es la cantidad de nodos de origen, u_j es la cantidad de nodos de destino, n es la cantidad de nodos del modelo, y finalmente x_{ij} es la variable binaria que indica si el punto hace parte de la solución óptima.

El modelo estándar consta de variables y restricciones en donde no se tienen en cuenta algunos factores o requerimientos que se llegan a presentar en otras situaciones o problemas prácticos de la industria, por lo que se han desarrollado variantes de VRP que permiten solucionar inconvenientes más específicos, algunas variantes del VRP serán referenciadas a continuación:

- **El Problema con Capacidades (VRP o CVRP)**

Es una extensión del m-TSP “este modelo se caracteriza por que hay m vendedores que viajan en un conjunto de n ciudades, ubicadas al azar en las que solo se visita cada ciudad una vez.” (Shokowhi Rostami, Mohanna, keshavar, & Ragmani Hosseinabadi, 2015) En el CVRP (ruteo de vehículos con capacidad) “en esta formulación la cantidad de vehículos m es una variable de decisión que no tiene cota superior, es decir, se asume que la disponibilidad de vehículos es ilimitada.” (Oliveira, Facultad de Ingenierias Universidad de la Republica de Uruguay, 2004), como su nombre lo indica es necesario incluir la capacidad de los vehículos al momento de implementarlo, y tener en cuenta la programación de las visitas a los puntos de destino, se requiere tener consideración factores importantes como: la capacidad máxima de carga por vehículo, el número de vehículos disponible, la capacidad promedio de visitas por hora de un vehículo y el tiempo disponible por vehículo como los menciona (Lopez Santana, Rodriguez, & Mendez , 2017)

- **OVRP (OPEN VRP).**

Esta variante del VRP tiene la singularidad de que los vehículos salen de una bodega principal pero no requieren volver a ella luego de completar la ruta.

- **VRPTW (VRP con ventanas de tiempo).**

Se caracteriza por ser problemas de decisión con el objetivo de diseñar un conjunto posible de rutas para una flota de vehículos de igual capacidad, que salen y llegan a un depósito, de modo que se visiten todos los destinos una sola vez buscando minimizar los costos y cumplir las restricciones de horario y de capacidad. (Lozada Díaz & Cadena González, 2012)

- **MDVRP (VRP con depósitos múltiples).**

En el MDVRP existe más de un depósito para abastecer a los clientes.

- **VRPPD (VRP con recolección y entrega).**

En esta variante los vehículos no solo llevan mercancías a los puntos de entrega, también existe la posibilidad de recoger y llevar mercancías a la bodega de vuelta; en este modelo se tiene en cuenta el volumen de carga que se va a dejar en cada punto, el volumen o peso de la carga que será recogida.

- **SDVRP (VRP con entrega dividida).**

En esta derivación de VRP “el mismo cliente puede ser servido por diferentes vehículos” (Arboleda Zuñiga, Lopez, & Lozano, 2016).

- **SVRP (VRP con datos estocásticos).**

Algunas de las variables pueden contener valores aleatorios, como por ejemplo la demanda, número de cliente entre otros. Este modelo estocástico pretende hallar una solución óptima o cercana a la óptima a través del uso de herramientas estadísticas para dar valores a las variables o que pueden llegar a ser aleatorias (Arboleda Zuñiga, Lopez, & Lozano, 2016).

5.7. Identificación del modelo

Gracias al repaso por la literatura fue posible determinar el modelo que se ajusta al problema planteado en la empresa Natural Food S.A.S. Se identificó la razón para no utilizar el VRP no se puede utilizar para resolver la problemática de la empresa, en vista que ya hay zonas de reparto preestablecidas, cada una cuenta con un vehículo y puntos de venta asignados. Por temas internos de la compañía no es posible modificar las zonas (norte, sur, centro, occidente, noroccidente) limitando los recursos (vehículos disponibles) a uno por zona.. Tampoco se aplicaran las variantes del VRP para el problema que se describio anteriormente: El CVRP en vista que la capacidad de los vehiculos actualmente no es un problema para la empresa, dado que la demanda no supera la capacidad disponible por cada vehiculo. El modelo OVRP no es aplicable en este proyecto dado que los vehículos salen de la planta principal y deben volver al lugar de origen luego de realizar su respectivo recorrido. VRPTW Con esta extensión del TSP no es posible desarrollar el problema planteado; dado que actualmente no se presentan restricciones de horarios para la entrega de materia prima a los puntos de venta. La variante MDVRP no es una opción muy acertada para el caso de distribución de Natural Food debido a que la logística de entregas en esta empresa parte de un único punto de abastecimiento a cada uno de los diferentes puntos de venta. El VRPPD no es factible puesto que el sistema de entregas que se maneja actualmente se contempla solo para

recoger mercancías. El modelo SDVRP no es funcional en este caso, porque la compañía cuenta con cinco vehículos y cada uno está repartido para una zona, por consiguiente, se pierde la posibilidad de que algún punto de venta pueda ser servido por más vehículos. Finalmente, el SVRP busca hallar una solución a través de una metodología determinística ya que los valores son abstraídos de la realidad y son fácilmente observables.

El problema del agente viajero (TSP), consiste en encontrar una de las rutas con distancia más corta en donde se recorran un número determinado de ciudades (n) y después regresar al punto de origen habiendo visitado una única vez cada ciudad (Taha, 2012, pág. 359), este modelo se adapta a las necesidades del problema debido a que se toma cada punto como si fuese una ciudad, y las características del ejercicio se acoplan, por lo que cada punto debe ser visitado una sola vez. Siendo la planta el lugar de origen. De acuerdo a las características anteriormente mencionadas muchos autores han implementado esta variante del VRP para la solución de problemas, en donde el fin de la implementación; es la reducción de distancias en los recorridos de las rutas y este es el principal objetivo de esta investigación. La información recolectada luego del trabajo de campo, como costos fijos (Salarios, depreciación del equipo, parqueaderos, etc.), costos variables (Combustible, mantenimientos, entre otros), el orden establecido de las zonas en las cuales se dividen los 107 puntos localizados en la ciudad de Bogotá, y la flota de vehículos con los que cuenta la empresa (un vehículo por cada zona). Hacen del modelo TSP la mejor alternativa para resolver el problema de ruteo.

6. Marco referencial

6.1. Estado del arte

Esta investigación está enfocada a disminuir los costos logísticos de la empresa Natural FOOD SAS, se ha realizado un análisis y selección de fuentes teóricas que ayudan a soportar el tema y el problema de estudio.

- En el proyecto titulado *Aplicación de un modelo VRP para la reducción de costos operacionales en vehículos de carga en la empresa de transporte especializado de vehículos CY*”, su autor (Alvarez Molano & Yate Linares, 2016) elabora un modelo que optimiza los costos operacionales; donde se tienen en cuenta variables como: catálogo de productos, rutas de mayor demanda, servicio al cliente, sistema de turnos, prestación de servicios entre otros. En el desarrollo de este proyecto se evidencia la aplicación del modelo VRP con datos reales, gracias a la aplicación obtuvieron la minimización de los costos operacionales; y lograron encontrar rutas óptimas arrojadas por el modelo.
- El autor hace referencia a la utilidad de aplicar un modelo; resalta aspectos tales como integración de técnicas heurísticas y metaheurísticas, donde (Yepes Piqueras, 2008) también realiza un diagnóstico a fondo para determinar cuáles son las variables relevantes que debe tener en cuenta al momento de implementar el modelo VRPTW (Vehicle routing problema With time Windows), resalta la importancia de aplicar la investigación de operaciones en los procesos; principalmente en el área de logística; ya que es una área que se compone de varias subáreas, por ende su gestión tiende a ser un poco más complicada; esto conlleva a problemas en la toma de decisiones, puesto que muchas veces al momento de tomar una decisión no se tienen en cuenta todas las variables, ya sea dependientes o independientes que componen el problema o que condicionan la posible solución; aquí es donde la aplicabilidad de la investigación de operaciones se vuelve necesaria ya que con modelos matemáticos es posible simular situaciones reales, donde el objetivo es tomar una decisión óptima. El autor resalta como el uso de esta ciencia ayuda a que las empresas sean más competitivas en el mercado.
- (Restrepo & Medina, 2008) dan a conocer en su artículo un caso logístico, presentando a fondo las características del modelo, de esta forma los autores explican detalladamente los aspectos y lo relacionan con datos reales; despliegan el modelo poco a poco y paso a paso para lograr el objetivo; también muestran las ventajas de este.

- Mediante una descripción del estado del arte y las versiones del VRP vigentes (Arboleda Zuñiga, Lopez, & Lozano, 2016) buscan mostrar el mejor camino para la solución de problemas de ruteo en las empresas colombianas; hacen énfasis en las pequeñas y medianas empresas, aunque sus volúmenes transportados no son exorbitantes, si pueden llegar a ser significativos. Afirman que el uso de técnicas heurísticas y meta heurísticas no está reservado exclusivamente para las grandes empresas, sino que por el contrario es necesaria su aplicación en todo tipo de empresas; para lograr una reducción de los costos operacionales. Los autores desarrollan dos casos de estudio a lo largo de su trabajo, el primero consiste en una empresa de recolección de desechos inorgánicos, que requiere diseñar la mejor ruta que permita recoger los residuos de hospitales e industrias; optimizando la capacidad de los cinco vehículos de la compañía. En el segundo caso de estudio, trata el problema de distribución de mercancías en una empresa de mensajería; estos dos casos de estudio son útiles para el desarrollo de este proyecto puesto que fundamenta teóricamente cómo abordar un problema de entregas, problemas que se asemeja al estudiado.
- Para encontrar una solución óptima en un problema relacionado al ruteo de vehículos, se requiere de grandes recursos informáticos que permitan calcular todas las posibles soluciones, que permiten que el resultado se acerque a la óptima dentro de un tiempo que sea razonable, así lo describió (Carrillo, 2014), quien utilizó la técnica meta heurística llamada Búsqueda Tabú, para encontrar una solución al problema de ruteo para las empresas Laboratorios Veterland, Laboratorios Callbest y Cosméticos Marlioü París, en donde aplicó un modelo VRPTW; dado que las características de su problema requerían limitaciones por ventanas de tiempo, debido a que sus clientes no contaban con disponibilidad para recibir los pedidos en cualquier momento del día. Concluyendo que la utilización de esta técnica logra reducir notablemente el tiempo invertido, su resultado puede llegar a variar solo entre el 2% y 3% con un problema de 15 nodos de entrega.
- La utilización de metodologías para solución de problemas VRP se desprende del problema del agente viajero, así lo indican (González Vargas & González Aristizábal, 2006) en su artículo y hacen una breve descripción de las modalidades de VRP existentes, y su posible aplicación para el problema que se encontraban estudiando. La situación a resolver tenía una particularidad, no buscaban únicamente la ruta más corta de recorrido para seis vehículos de una compañía manufacturera al momento de realizar las entregas, sino que dicho lugar de

despacho no estaba fijado, mediante el estudio de diferentes posibilidades buscaban asesorar a esta empresa con una ubicación estratégica, que les permitiera mantener sus costos de transporte a un nivel muy bajo. Mediante la utilización de técnicas de minimización de distancia recorrida; determinaron tres posibles ubicaciones de centros de consumo, de ahí partieron a estudiar cada caso de forma individual para hallar la mejor opción.

- Día a día la industria se va desarrollando, surgen necesidades más complejas y específicas, por lo que una nueva interpretación de las técnicas clásicas; permitiría adaptar estos modelos a problemas actuales. (Rocha Medina , González La Rota, & Orjuela Castro, 2011) buscan contextualizar los métodos de solución para problemas de ruteo de vehículos acorde a las necesidades modernas, esto lo hacen mediante una taxonomía que diferencia los métodos exactos, heurísticos, meta heurísticos y sus posibles híbridos. Siendo de gran utilidad su investigación puesto que recopilan información valiosa sobre el tema y la presentan de tal forma que sirve como punto de partida para investigaciones como la que se está desarrollando a lo largo de este proyecto.
- (Lopez Santana, Rodriguez, & Mendez , 2017) En su artículo realizan un repaso por la literatura que les permitió identificar como el VRP ha tenido gran auge y por ende se caracteriza por ser un problema de optimización combinatoria ampliamente estudiado; en vista que tiene un gran número de variantes que se acomodan a las exigencias de la industria. Resaltan que este incluye varias características de la vida real. El problema que exponen se presenta en una empresa de mensajería; en donde pretenden mejorar la manera en que la empresa reparte los paquetes diariamente a un conjunto de clientes distribuidos geográficamente, haciendo uso de diferentes variantes del VRP las cuales son: DCVRP (Distance Constrained Vehicle Routing Problem), CVRP (Capacity Vehicle Routing Problem), VRPTW (Vehicle Routing Problem Time Window), MP-VRP (Multi Period Vehicle Routing Problem), y VRPPD(Vehicle Routing Problem Pick-up and Delivering). Que permiten llegar a la mejor solución del problema planteado; el cual es encontrar el mejor conjunto de rutas que logren servir a un conjunto de clientes cumpliendo con las necesidades de la empresa.
- Los cálculos que se requieren para encontrar la solución de un modelo matemático de gran escala como un VRP, necesitan de herramientas tecnológicas que permitan minimizar el desgaste y el tiempo para hallar los resultados, en este proceso las computadoras son el aliado

más indicado. Pero dichos equipos son operados por programas que se encargan de optimizar los recursos del mismo, dentro de estos programas se encuentra algunos de uso específico para la solución de problemas matemáticos, dentro de ellos existe uno muy versátil que es Excel, apoyado de su complemento OpenSolver permite realizar cálculos, evaluar soluciones y descartarlas si es necesario, hasta encontrar la mejor solución posible. Por lo anterior se requirió del profundo análisis del caso de estudio elaborado por (Cruz, Restrepo, & Medina, 2007) que cuenta con una metodología de sencilla aplicación haciendo uso de OpenSolver para resolver un problema de agente viajero, problema que se trata en este proyecto. Se siguió el paso a paso presentado en la investigación llegando a los resultados esperados, permitiendo afirmar que hace parte integral de la solución del problema encontrado en NATURAL FOOD SAS.

- En este problema de Agente Viajero se cuenta con un solo vehículo y no se cuenta con limitaciones de capacidad o de tiempos de entrega, en esto se basa (Oliveira, Heurística para problema de ruteo de vehículos , 2004, pág. 8) para diferenciar a un modelo TSP de otra variante de VRP. Da un planteamiento matemático del TSP que es utilizado en este proyecto, en donde es posible identificar las características del modelo, su funcionamiento y sus parámetros, lo cual es importante para soportar la decisión de aplicarlo en la empresa NATURAL FOOD SAS.

7. Marco conceptual

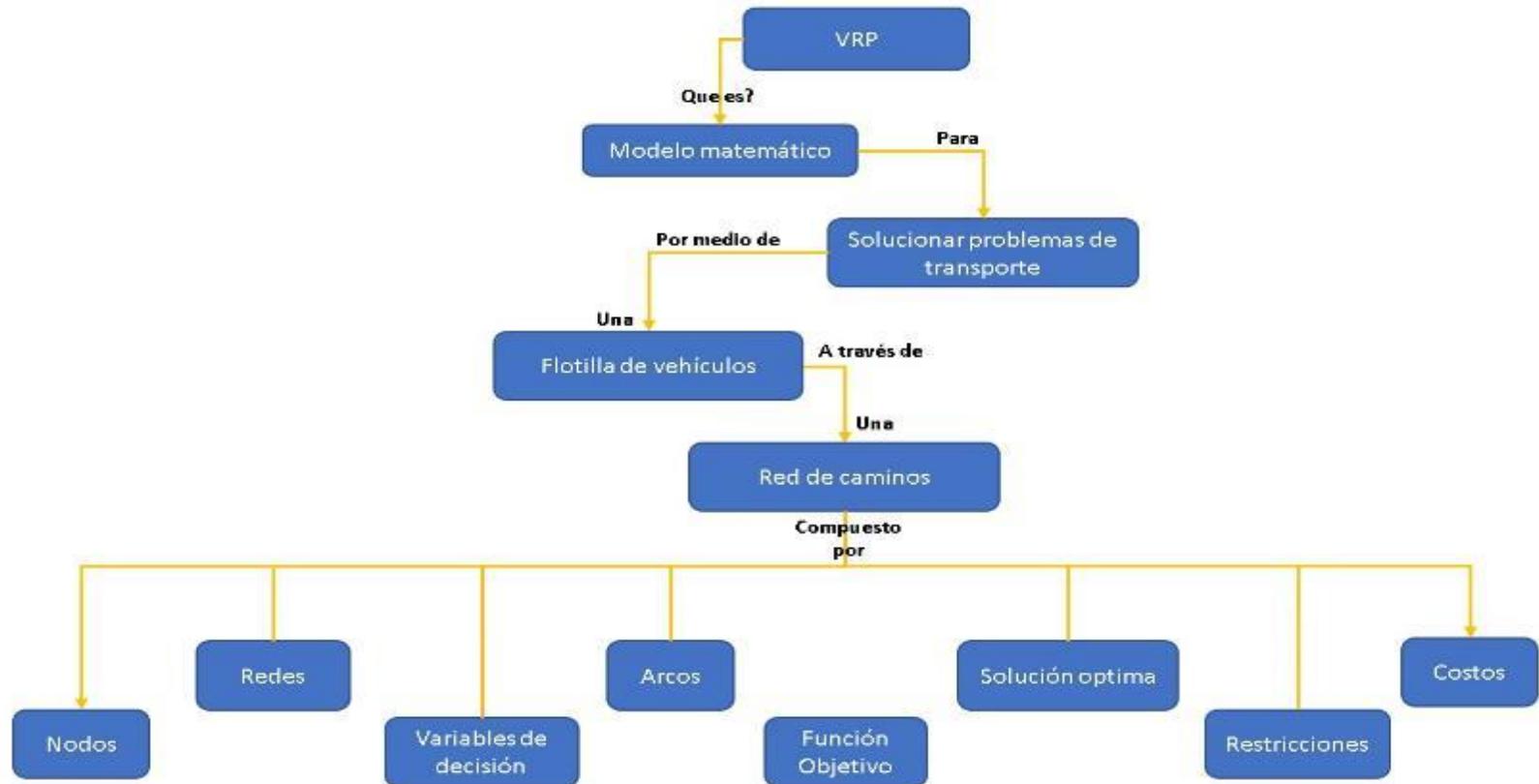


Figura 10 Marco Conceptual

Elaboración propia con información de (Yepes Piqueras , 2008)

Durante el diagnóstico, sistematización del problema, formulación de objetivos y revisión de teorías; surgieron ciertos conceptos que son importantes para comprender la investigación. En la figura 10 se presentan en forma de mapa conceptual; los términos encontrados que abarcan el tema de investigación y se definen a continuación:

- Modelo matemático:

Es una construcción matemática abstracta y simplificada relacionada con una parte de la realidad y creada para un propósito particular. (Empresas Polar)

- Flota de vehículos

Son el conjunto de automóviles de los que dispone una empresa. Desde vehículos industriales usados para gestiones logística, pasando por otros destinados a los comerciales e incluso los coches de uso diario de los trabajadores. (Quadis, 2018)

- Redes

Una red se compone de un conjunto de nodos unidos por arcos (o ramas). La notación para describir una red es (N, A) , donde N es el conjunto de nodos, y A es el conjunto de arcos. (López, 2018)

- Nodos

Una red se compone de un conjunto de nodos unidos, es uno de los elementos de una lista enlazada. (Taha, 2012)

- Arcos

Los arcos representan el mejor camino para ir desde el nodo i hacia el nodo j en la red de transporte y tiene asociado un costo c_{ij} . (Oliveira, Facultad de Ingenierias Universidad de la Republica de Uruguay, 2004)

- Variables de decisión

Las Variables de Decisión representan una característica o propiedad desconocida de un Índice o Conjunto, cuyo valor será determinado una vez ejecutado el Modelo (Perez, Cruz Lario, & Alemany, 2010)

- Función objetivo

La función objetivo es la ecuación que será optimizada dadas las limitaciones o restricciones determinadas y con variables que necesitan ser minimizadas o maximizadas usando técnicas de programación lineal o no lineal. (Perez A. B., 2017)

- Restricciones

Estas son las que limitan el modelo; se modifican o se ingresan de acuerdo a los requerimientos de cada problema.

- Excel Solver

“Solver es una herramienta de análisis de hipótesis que busca el valor óptimo de una celda objetivo, cambiando los valores de las celdas usadas para calcular la celda objetivo” (Programa Excel, 2016).

8. Marco legal

La empresa Natural FOOD SAS esta vigilada por el instituto nacional de medicamentos y alimentos de la república de Colombia (INVIMA) y el ministerio de salud; los cuales velan por la calidad de los productos, estos realizan una serie de controles y auditorias.

Las empresas que pertenezcan a estos sectores deben seguir una serie de normas para que la producción, el transporte y la distribución de los alimentos cumpla con los estándares de higiene y calidad establecidos. Todo esto con el fin de proteger la salud y seguridad del consumidor final. (ver tabla 7)

Tabla 7.

Marco legal Empresa Natural Food SAS

Ley	Descripción	Fecha
Resolución 293 de 1992	Por la cual se reglamenta el trámite y expedición de la Licencia Sanitaria de Transporte de Alimentos para vehículos no automotores y remolques.	1992
Ley 9 de 1979	Reglamenta el transporte y distribución de alimentos para vehículos automotores	24/01/1979
Decreto 3075 de 1997	Por la cual se reglamenta parcialmente la Ley 9 de 1979 y se dictan otras disposiciones.	23/12/1997
Resolución 2674 de 2013	En ejercicio de sus atribuciones legales, en especial, de las conferidas en la Ley 09 de 1979	22/07/2013
Resolución No. 002505	Se reglamentan las condiciones que deben cumplir los vehículos para transportar carne, pescado o alimentos fácilmente corruptibles	6/09/2004
Resolución 5109 de 2005	Reglamento Técnico sobre los requisitos de rotulado o etiquetado para alimentos envasados y materias primas de alimentos para consumo humano, expedido por el Ministerio de Protección Social	29/12/2005

Resolución 765 de 2010	La presente resolución tiene por objeto regular el proceso de capacitación para manipulación de alimentos	21/06/2010
Norma técnica nts-usna sectorial colombiana 007	Norma sanitaria de manipulación de alimentos	22/07/2005
Ley 769 de 2002	Por la cual se expide el Código Nacional de Tránsito Terrestre y se dictan otras disposiciones	6/08/2002

Nota. Elaboración propia con datos del Ministerio de Salud.

9. Hipótesis

- El TSP extensión del modelo VRP (Vehicle Routing Problem), es la herramienta adecuada para la optimización de las rutas de distribución de materia prima hacia los puntos de venta.
- Los costos logísticos disminuirán con los nuevos recorridos de distribución propuestos.

9.1. Variables del problema

Tabla 8.

Variables independientes y dependientes del problema

Variables dependientes	Variables independientes
Rutas de distribución	Tiempos de espera durante el recorrido
Tiempos de entrega de materia prima	Demanda diaria de producto de cada punto de venta
Aprovechamiento de la capacidad de carga de vehículos	Distancia en kilómetros desde la planta a cada PDV
La cantidad de vehículos utilizados en el recorrido diario.	Tiempos de alistamiento y entrega de pedido en punto de venta
Margen de utilidad	

Nota. Elaboración propia

10. Marco metodológico

Al momento de realizar una investigación es importante tener claro el proceso a seguir para cumplir con los objetivos planteados; como lo afirma (Hernandez Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio) “la investigación es un proceso compuesto, a su vez, por otros procesos sumamente interrelacionados” (Metodología de la Investigación, 2006, pág. 23); por tal motivo, en toda investigación es necesario plantear la metodología que se utilizara; dado que es la que reúne los procesos que nombra el autor.

En este proyecto se realizó un flujograma para explicar los métodos que se aplicaran durante el desarrollo (Ver figura 11), Se puede notar que se parte desde el planteamiento del problema en donde están incluido el desarrollo de la idea, formulación de los objetivos (proceso que pretende señalar lo que se quiere obtener con el estudio), preguntas de investigación, justificación (explica la viabilidad y necesidad de la investigación). Cabe resaltar que en este proyecto se determinó que posee un enfoque cuantitativo, en vista que se representan un conjunto de procesos de manera secuencial y probatoria, esta investigación se caracteriza por medir y estimar magnitudes del problema planteado, en donde el levantamiento de información es de vital importancia, puesto que este enfoque está dirigido principalmente al manejo de los datos, así como lo afirma (Hernandez Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2006) “los datos son producto de mediciones, se representan mediante números (cantidades) y se deben analizar con métodos estadísticos”. Para poder manejarlos se vio la necesidad de realizar un repaso por la literatura, afianzando los conocimientos en teorías relacionadas con la distribución y el transporte; considerando que son la guía del estudio; fue indispensable realizar un repaso por investigaciones en donde resolvieran problemas similares, puesto que esto permite identificar el proceso o metodología que utilizaron para resolver el problema que se propusieron, además para soportar la elección del modelo matemático con el cual se intenta resolver el problema planteado, seguido a esto se realizó un análisis de resultados, en donde se crearon gráficos descriptivos, los cuales representan numéricamente la comparación con respecto al antes y después; es decir método utilizado actualmente en el área de distribución y resultados arrojados por el modelo TSP, datos relacionados a costos, distancias y secuencia de distribución.

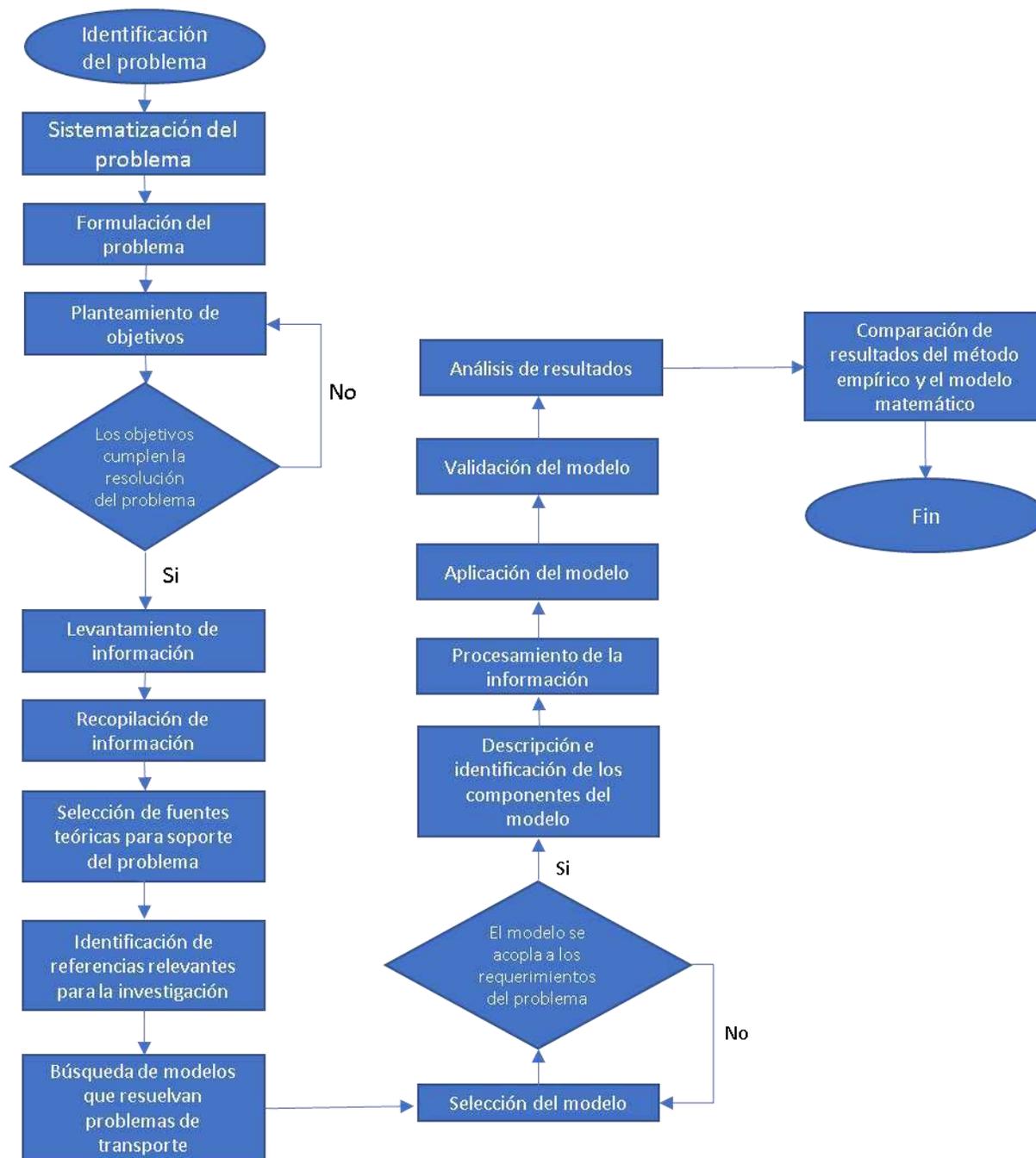


Figura 11 Metodología utilizada
Elaboración propia

El desarrollo de un proyecto requiere tener definida la metodología a aplicar, que vendría siendo el paso a paso del proyecto que servirá de hoja de ruta durante la elaboración del mismo, es por esto que en la Figura 11 se muestra la metodología a utilizar en la identificación del problema, selección del método de solución, búsqueda del resultado y la presentación de lo obtenido.

10.1. Enfoque de la investigación

El enfoque de la presente investigación es principalmente cuantitativo, como menciona (Hernandez Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2006). La investigación se fundamenta en la recolección de datos medibles (generalmente representados numéricamente o en cantidades) y en la utilización de procedimientos ya establecidos para la obtención de resultados de la misma manera medibles que puedan ser analizados con herramientas estadísticas, dando explicación a un fenómeno real.

10.2. Tipo de investigación

Principalmente la investigación presenta un alcance descriptivo, porque se realiza un diagnóstico del proceso mediante el cual se distribuye la materia prima, desde la planta hasta los puntos de venta. Con la realización del planteamiento del problema fue posible describir situaciones, detallar y definir variables importantes, como la distancias entre puntos de venta, vehículos disponibles para la distribución, zonas y puntos de venta que actualmente posee la empresa en la ciudad de Bogotá.

La identificación de teorías con respecto a problemas de transporte; obtenidas al realizar los respectivos estudios en fuentes primarias y secundarias de información; permiten determinar el modelo matemático que más se adapta a la problemática en estudio, además de hallar una metodología fundamentada en los conocimientos obtenidos a lo largo de la carrera de ingeniería industrial; permiten llegar a una solución que cumpla con las necesidades planteadas.

Encontrar el Know How y llegar a la solución del modelo requiere del uso de la investigación explicativa, que nos brinda las herramientas que dan claridad al por qué se da el fenómeno y cómo mejorar el estado actual.

10.3. Tamaño población

La población en la que se centra el estudio y la recolección de datos se encuentra comprendida por los 134 puntos de venta con los que cuenta Natural Food SAS en todo el territorio nacional, de estos, 17 están ubicados en Medellín, 10 en la ciudad de Cali y 107 en la sede principal de la ciudad de Bogotá, se va a trabajar con todos los puntos ubicados en Bogotá; dado que es un grupo representativo de la población.

En la figura 12 se puede ver claramente la participación porcentual de las ciudades de Bogotá, Cali y Medellín es importante decir que Bogotá tiene el 81% de los puntos de venta que tiene la empresa Natural Food.

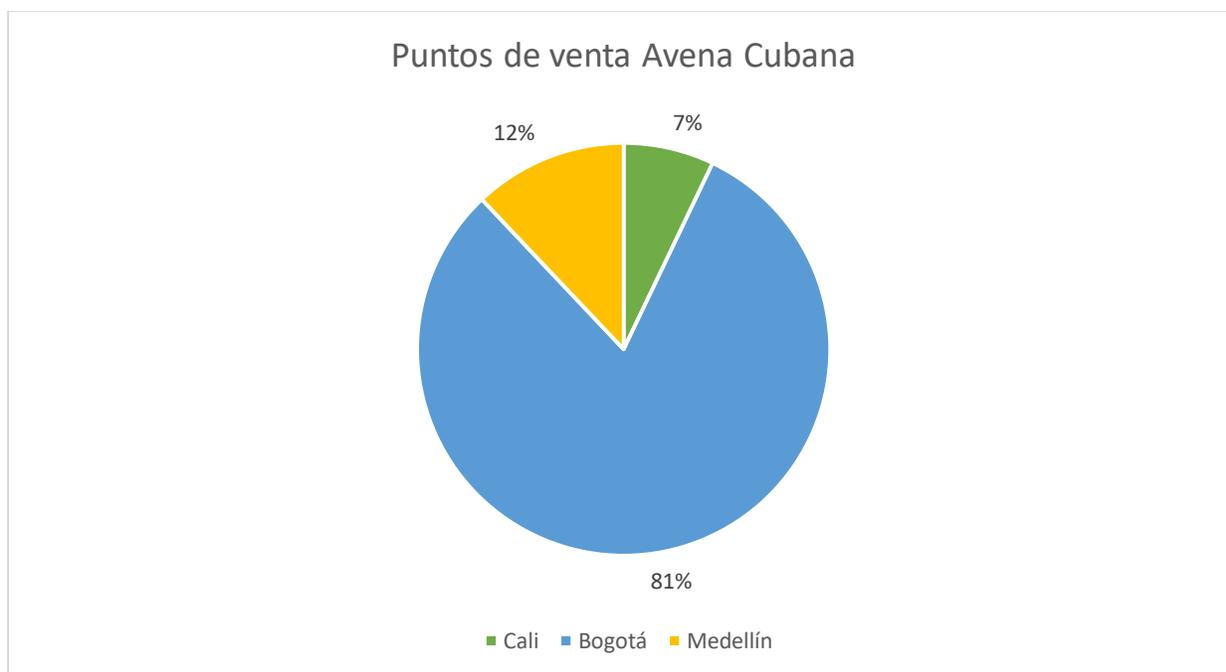


Figura 12 Puntos de venta Avena Cubana
Elaboración propia con datos de Natural Food SAS

10.4. Cálculo de la muestra

No se requiere de una muestra poblacional debido a que se trabajará sobre todo el grupo existente de puntos de venta en la ciudad de Bogotá, Siendo esta última la población total.

10.5. Recolección de datos

Las dos herramientas que se utilizarán en esta investigación están descritas por (Hernandez Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2006) las cuales son observación cuantitativa y consulta de fuentes de datos secundarios.

Inicialmente se consultarán fuentes de información secundaria, estos son los formatos que la empresa emplea para recolectar información sobre los recorridos actuales de cada una de las rutas establecidas; esta información está compuesta por la secuencia de los recorridos, distancia actual de las rutas y consumo de recursos para cada recorrido. Esta primera información será fundamental para la realización de un diagnóstico claro y preciso.

La observación cuantitativa será utilizada para definir las distancias entre los puntos de venta y así conformar la matriz de distancias entre los puntos de origen y destino por zona.

10.6. Alcance de la investigación

En su primera etapa es descriptiva, esto se debe a que mediante la recolección de datos se pretende diagnosticar cuantitativamente el estado actual de la empresa en sus procesos logísticos

de distribución, y con base en esa descripción se desarrollará una propuesta que mejore el funcionamiento actual de estos procesos mediante la utilización de TSP, que pueda llegar a reemplazar los métodos empíricos que actualmente se están manejando.

10.7. Análisis de datos

Los datos para los diagnósticos permitirán determinar el estado actual de la empresa, con dicha información se pretende tener claro qué recursos está invirtiendo actualmente la empresa en el transporte de sus materias primas hacia cada uno de los puntos de venta.

Los datos referentes a la ubicación de los puntos de venta serán calculados con la herramienta de Google Maps, con el fin de hacer uso del componente tecnológico para llegar a resultados más precisos.

11. Desarrollo

Siguiendo con la metodología planteada en la figura 11, para el desarrollo del modelo propuesto se partió desde la declaración de las variables y se fijaron los parámetros; fue necesario definir estas variables de decisión como binarias; en donde 1 representa que hará parte de la secuencia de visita, y 0 que no se tomará este punto dentro del recorrido. Los puntos de venta y los parámetros darán un lineamiento al modelo, también se agregaron las restricciones anteriormente expuestas que componen el problema del agente viajero, y evitarán que se causen errores al momento de su ejecución, como recorridos incoherentes, falta de secuencia en los puntos visitados, hallar una solución no óptima, entre otros.

Para la ejecución del modelo se utilizará la herramienta adicional de Excel llamada Open Solver, este complemento es programado con la información de entrada (Matriz de distancias, matriz de celdas variables, celdas de restricción, celda de función objetivo); que le permitirá calcular la mejor combinación que cumpla con las restricciones. Al tratarse de un modelo heurístico, este no podrá calcular las 10^{16} posibles soluciones factibles para el problema, sino que hallará una solución óptima inicial, puesto que la primera solución suele contener varios sub tours (rutas intermedias) que a pesar de ser una solución matemática, no es una solución óptima debido a que Natural Food SAS solo tiene destinado un vehículo para cada zona, por ello es necesario agregar la restricción de eliminación de sub rutas y ejecutar el modelo; esto se debe realizar la cantidad de veces que sea necesario, hasta que el modelo dé una solución, en donde el vehículo parta de la planta, visite una única vez a cada punto de venta, y luego regrese a la planta. Cuando las condiciones se cumplen se ha llegado a una solución óptima

11.1. Modelo matemático utilizado

A continuación, se presenta en la tabla 9 la definición de cada uno de los componentes de un modelo TSP, los parámetros están compuestos por la función objetivo, esta expresa matemáticamente que se quiere lograr. Para el modelo en desarrollo se busca encontrar la menor distancia a ser recorrida por cada vehículo, esta función consta de la multiplicación de la distancia de recorrido de un origen i a un destino j con la variable de decisión. Si la variable toma valor de cero (0) indica que esta ruta no será tomada y como resultado dará cero, en cambio cuando la variable de decisión es uno (1) indica que la ruta si será tomada y al multiplicarse por la distancia entrará a formar parte de la sumatoria de la función objetivo.

El TSP consta de cuatro restricciones: inicialmente las restricciones 1 y 2 de la tabla 9, restringen al modelo a visitar a todos los puntos de venta y que todos sean en algún momento origen y destino. Esto garantiza que si el vehículo llega a un punto de venta salga posteriormente de él. La restricción 3 dicta que las variables de decisión solo pueden tomar valores de cero o uno. Finalmente, la restricción 4 aparece por cada iteración que se realice, si se realizan 10 iteraciones deberá haber 10 restricciones, esta restricción evita que un Sub Tour que ya fue asignado se repita, esto le quita una solución no viable al modelo, llevándolo a encontrar una solución que cumpla con las necesidades de la empresa.

Tabla 9.
Agente viajero (TSP)

Que compone el modelo	Ecuación o simbología	Descripción
VARIABLES	(X_{ij})	(1) Variable decisión de la ruta seleccionada (Puede tomar el valor de 1 o 0)
Parámetros	(D_{ij})	(2) Distancia entre un nodo i a un nodo j
Función Objetivo	$\text{Minimizar } Z = \sum_i \sum_j D_{ij} X_{ij}$	La función objetivo pretende hallar valor mínimo del modelo; puede estar basado en costos o en distancia. Para este proyecto el objetivo principal es minimizar la distancia recorrida puesto que la empresa Natural Food SAS cuenta con una flota de vehículos homogénea, por lo tanto, los costos de transporte por kilómetro son similares, en estos términos al minimizar la distancia se representa directamente en los costos de distribución.
Restricciones	$\sum_j X_{ij} = 1 \text{ para todo } i$	(1) La sumatoria de los valores binarios resultantes debe ser igual a 1, esto garantiza que cada punto de venta sea asignado una única vez como punto de origen.
	$\sum_i X_{ij} = 1 \text{ para todo } j$	(2) La sumatoria de los valores binarios resultantes debe ser igual a 1, esto garantiza que cada punto de venta sea asignado una única vez como punto de destino.

$X_{ij} = 1 \text{ o } 0$	(3)	Esta restricción limita a cada punto de venta de origen y destino a que tome valor de 1 o 0 con el fin de determinar si es visitado (1) o no (0) y en qué momento del recorrido.
$\sum_i \sum_j X_{ij} \leq n - 1$	(4)	Para la eliminación de sub rutas se aplica esta restricción donde n se entiende como el número de arcos dentro de la sub tour. Un sub tour es un circuito formado por un subconjunto de N.

Nota: Elaboración propia con información (Taha, 2012).

Para dar solución al problema se optó por modelar cada una de las zonas (Sur, Norte, Occidente, Noroccidente y Centro) en una hoja de Excel, haciendo uso de la herramienta OpenSolver y siguiendo la metodología de solución utilizada por (Cruz, Restrepo, & Medina, 2007) los autores dan solución a un problema de ruteo de vehículos, mediante la adaptación la metodología de solución heurística de un TSP; dentro de una hoja de cálculo en Excel, todo esto desarrollado a lo largo de su artículo titulado “Un problema logístico de ruteo de vehículos y una solución con Solver de Excel en su caso de estudio”. Se siguió el paso a paso expuesto para el desarrollo del modelo; puesto que facilitan la comprensión y utilización del problema de ruteo.

11.2. Aplicación del modelo

Cada zona será desarrollada de forma individual, el proceso con la primera zona (sur) se realizará de forma detallada, pero para evitar caer en la redundancia; a las demás zonas se mostrarán únicamente las tablas y los resultados obtenidos.

El primer paso es declarar cada uno de los puntos de venta que componen la ruta como un origen y destino, asignándoles un carácter que lo represente, en este caso se utilizaron las letras del alfabeto en mayúscula.

Luego de tener la información de entrada clara, se procede a ejecutar el modelo como se explicará a continuación.

11.2.1. Zona sur.

La zona sur está compuesta por 21 puntos de venta e inicialmente cuenta con un recorrido de 65,5 kilómetros con la metodología actual de la empresa, en la figura 13 se realizó un mapa con el recorrido que se cumple actualmente y el que se pretende optimizar con los resultados obtenidos.

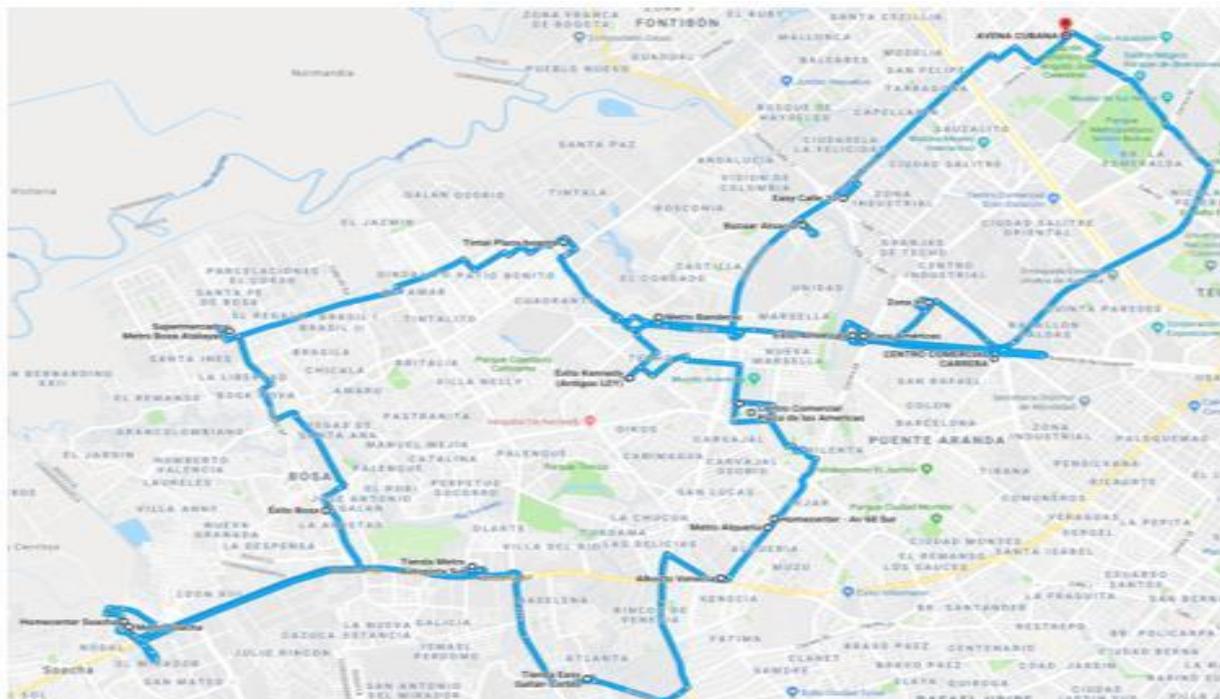


Figura 13 Recorrido realizado actualmente Zona Sur
Nota Elaboración propia utilizando la herramienta de Google Maps

En la tabla 10 se evidencian los puntos de origen y destino que conforman la zona sur. Para el desarrollo del modelo es indispensable tener claro qué compone cada ruta

Tabla 10.

Parámetros puntos de origen y destino Zona Sur

<i>$i = \text{Puntos de origen}$</i>	<i>$j = \text{Puntos de destino}$</i>
<i>$i = (A, B, C, D, E, F \dots V)$</i>	<i>$j = (A, B, C, D, E, F \dots V)$</i>
A Planta	A Planta
B Zona In	B Zona In
C Leroy Zona In	C Leroy Zona In
D CC Carrera	D CC Carrera
E Éxito Américas	E Éxito Américas
F Easy Américas	F Easy Américas
G Éxito Kennedy	G Éxito Kennedy
H Sentry Sur	H Sentry Sur
I Plaza de las Américas	I Plaza de las Américas
J Homecenter Alquilería	J Homecenter Alquilería
K Metro Alquilería	K Metro Alquilería
L Alkosto Venecia	L Alkosto Venecia

M	Easy Gaitán Cortez	M	Easy Gaitán Cortez
N	Metro autopista Sur	N	Metro autopista Sur
O	Homecenter Soacha	O	Homecenter Soacha
P	Metro Soacha	P	Metro Soacha
Q	Éxito Soacha	Q	Éxito Soacha
R	Éxito Bosa	R	Éxito Bosa
S	Metro Bosa	S	Metro Bosa
T	CC Tintal Plaza	T	CC Tintal Plaza
U	Bazar Alsacia	U	Bazar Alsacia
V	Easy Calle 13	V	Easy Calle 13

Nota: Elaboración propia con información proporcionada por la empresa Natural Food S.A.S

En la tabla 11 se conformó la matriz de distancias, en donde se calcularon las distancias de cada origen hasta cada uno de los destinos (la intersección de dos puntos de venta es la distancia que hay de i a j), esta información es necesaria debido a que el modelo llega a tener en cuenta en algún momento muchas de las opciones de ir de un punto a otro, que incluso a simple vista podemos pensar que no llegan a ser importantes. Los valores i (orígenes) son las filas y los valores j (destinos) son las columnas, como es evidente los puntos de venta ubicados en las columnas son los mismos que en las filas, esto se debe a que todo punto de venta llega a ser origen y destino. Cuando se intercepta un mismo punto de venta como origen y destino se asigna un valor M (muy grande), para evitar que el modelo tome como una opción ir de un punto y volver al mismo ya que la distancia a recorrer siempre será cero.

La tabla 12 contiene la matriz de variables de decisión, esta matriz inicialmente se encuentra vacía, ya que es el Open Solver quien empieza a cambiar estos valores dando cumplimiento a las restricciones; como se mencionó anteriormente en esta matriz las variables toman únicamente los valores 1 y 0, por ejemplo si en la intersección de la fila Metro Bosa y la columna Easy 13 se encuentra el valor 0 indica que dentro de la solución que se tiene, no se contempla un recorrido en donde Metro Bosa sea el origen y Easy 13 sea el destino, por otro lado si el valor fuera 1 se estaría incluyendo este recorrido en la solución dada. También se puede apreciar que, en esta tabla, cada columna y cada fila tiene una sumatoria, esta sumatoria siempre debe ser uno (es una de las restricciones), esto asegura que en cada fila y en cada columna solo haya una celda con un valor de 1; garantizando que cada punto de venta será origen una vez en el caso de las filas, y una sola

vez destino en el caso de las columnas, cerciorándose que cada punto será visitado en una sola oportunidad.

Tabla 11.
Matriz de Parametros de distancias entre puntos Zona sur (Kilometros)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
1			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
2			PLANTA	Zona IN	Leroy Zona In	CC Carrera	Éxito Americas	Easy Americas	Metro Banderas	Exito Kennedy	Sentry sur	Plaza de las Americas	Home center Alqueria	Metro Alqueria	Alkosto Venecia	Easy Gaitan Cortez	Metro Autopista sur	Homecenter soacha	Metro soacha	Éxito Bosa	Metro Bosa	CC tintal Plaza	Bazar alsacia	Easy calle 13
3	A	PLANTA	9999	6,8	6,8	8,6	6,6	6,6	7,8	9,2	8,4	8,6	9,6	9,8	10,8	14	13,5	18	17,8	14,8	14,8	9,7	5,7	5,3
4	B	Zona IN	7,8	9999	0	2,9	3,3	3,3	6,4	6,1	5,1	5,2	6	5,9	6,6	10	9,8	15	15	10,5	12,3	7	3,7	3,1
5	C	Leroy Zona In	7,8	0	9999	2,9	3,3	3,3	6,4	6,1	5,1	5,2	6	5,9	6,6	10	9,8	15	15	10,5	12,3	7	3,7	3,1
6	D	CC Carrera	8,5	2,7	2,7	9999	2,9	2,4	5,5	5,2	4,1	4,5	5,5	5,4	6	10,7	9,5	14,5	14,5	9,6	11,4	6,1	5,5	4,8
7	E	Éxito Americas	6,6	2,1	2,1	3,8	9999	0,098	5,7	5,4	4,4	4,7	5,3	5,2	5,9	10,5	9,7	14,3	14,3	9,8	11,6	6,3	3,8	3,1
8	F	Easy Americas	6,5	2,2	2,2	3,9	0,85	9999	5,8	5,5	4,4	4,7	5,3	5,3	5,9	10,6	9,6	14,4	14,4	9,9	11,7	6,4	3,7	3
9	G	Metro Banderas	9,1	3,8	3,8	5,5	2,4	2,5	9999	1,9	3,4	2,8	5,3	5,1	5,4	8,8	6,9	11,3	11,3	6,1	7,8	2,6	3,5	4,4
10	H	Éxito Kennedy	10,4	5,1	5,1	6,8	3,8	3,9	2,1	9999	3,1	2,2	4,6	4,2	4,9	6,8	5	10,5	10,5	5,3	7,3	2,7	4,6	5,5
11	I	Sentry sur	9,4	4,8	4,8	6,5	3,5	3,2	4,1	2,4	9999	0,3	3,2	3	3,5	7,3	6,5	11,9	11,9	6,7	9,1	4	4,3	5,2
12	J	Plaza de las Americas	9,1	4,7	4,7	6,4	3,4	2,9	5,1	3,5	1,2	9999	2,8	2,6	3,2	7,9	5,7	11,7	11,8	7,4	9,7	5,7	6,2	6,2
13	K	Home center Alqueria	9,5	5,1	5,1	6,9	3,8	3,4	6,3	4	2,7	3	9999	0,9	1,5	7,5	5,3	12,2	12,2	7,7	10	6,9	6,7	6,7
14	L	Metro Alqueria	9,7	5,3	5,3	7,1	4	3,6	6,5	4,2	2,9	3,2	0,2	9999	1,7	7,7	5,5	12,4	12,4	7,9	10,2	7,1	6,9	6,2
15	M	Alkosto Venecia	10,8	6,4	6,4	8,1	5,1	4,6	6,5	4,8	4	4,1	3,3	1,1	9999	6,3	4,1	10,1	10,2	7,1	9,5	7,1	7,1	7,9
16	N	Easy Gaitan Cortez	14,6	10,2	10,2	10,1	8,9	8,5	8,3	7,5	7,8	6,8	4,7	4,5	4,2	9999	3,8	8,4	8,5	5,6	9,1	9,8	9,9	10,8
17	O	Metro Autopista sur	14,1	9,9	9,9	10,8	8,6	8	6,4	5,8	6,8	5,9	4,6	4,4	3,5	3,9	9999	7,8	7,8	4	8,1	7,1	9,4	10,3
18	P	Homecenter soacha	18,7	14,3	14,3	15,5	12,4	12,5	10	10,6	11,6	10,6	9,2	9	8	7,8	5,2	9999	0,16	4	7,3	10,6	13,9	14,8
19	Q	Metro soacha	18,5	14,1	14,1	15,3	12,3	12,4	9,8	10,4	11,4	10,3	9	8,8	7,8	7,6	5	1,6	9999	3,8	7,1	10,4	13,9	14,6
20	R	Éxito Bosa	14,8	9,4	9,4	11,2	8,1	8,2	7,3	6,3	7,3	6,3	6,9	6,7	5,7	5,5	2,8	5,2	5,2	9999	3,6	6,3	9,2	10,6
21	S	Metro Bosa	15,8	10,4	10,4	12,1	9,1	9,2	6,6	7,5	9,5	8,5	10,5	10,3	9,2	9,1	6,5	8,7	8,8	3,5	9999	5,2	10,8	13,5
22	T	CC tintal Plaza	10	5,4	5,4	7,2	4,1	4,2	1,7	3,3	5,1	4,5	7	6,7	7,1	8,9	6,6	11,4	11,4	6,2	5,3	9999	5,2	5,6
23	U	Bazar alsacia	6,1	4,7	4,7	6,6	3,5	3,6	3,3	4,2	4,3	3,6	6,1	5,9	6,2	10,9	9	14	14,1	8,8	9,8	4,4	9999	2,8
24	V	Easy calle 13	5,4	2,6	2,6	4,5	4,7	4,8	5,9	5,6	5,4	4,8	7,3	7,1	7,4	12,1	11,1	15,2	15,2	10	11,3	5,9	1,8	9999

Nota: Elaboración propia con información proporcionada por la empresa Natural Food S.A.S

Tabla 12.
Matriz de celdas variables Zona Sur

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z			
			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V					
			PLANTA	Zona IN	Leroy Zona In	CC Carrera	Éxito Americas	Easy Américas	Metro Banderas	Éxito Kennedy	Sentry sur	Plaza de las Americas	Home center	Metro Alquileria	Alkosto Venecia	Easy Gaitan Cortez	Metro Autopista sur	Homecenter soacha	Metro soacha	Éxito Bosa	Metro Bosa	CC tintal Plaza	Bazar alsacia	Easy calle 13					
28 A	PLANTA																										0	0	
29 B	Zona IN																											0	0
30 C	Leroy Zona In																											0	0
31 D	CC Carrera																											0	0
32 E	Éxito Americas																											0	0
33 F	Easy Américas																											0	0
34 G	Metro Banderas																											0	0
35 H	Éxito Kennedy																											0	0
36 I	Sentry sur																											0	0
37 J	Plaza de las Américas																											0	0
38 K	Home center Alquileria																											0	0
39 L	Metro Alquileria																											0	0
40 M	Alkosto Venecia																											0	0
41 N	Easy Gaitan Cortez																											0	0
42 O	Metro Autopista sur																											0	0
43 P	Homecenter soacha																											0	0
44 Q	Metro soacha																											0	0
45 R	Éxito Bosa																											0	0
46 S	Metro Bosa																											0	0
47 T	CC tintal Plaza																											0	0
48 U	Bazar alsacia																											0	0
49 V	Easy calle 13																											0	0
50			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51			1= 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: Elaboración propia

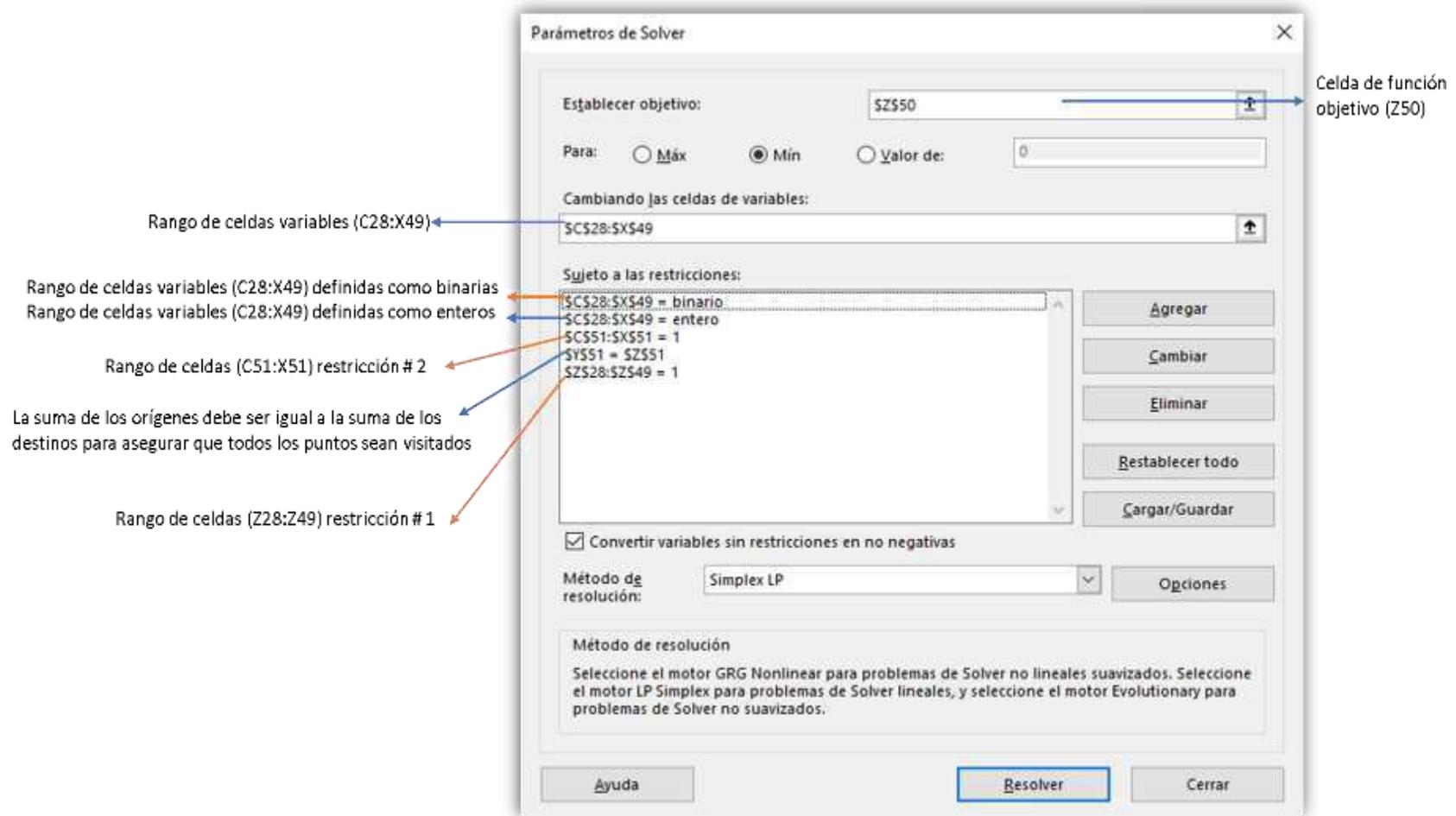


Figura 14 Parametros del modelo de la Zona Sur en Solver
 Captura de programa Excel

En la figura 14, se tomó una captura del programa de Excel con respecto a la ventana de parámetros de Solver; en donde se identifica: la función objetivo que está representada en la celda Z50 que tiene una fórmula (es el producto de la matriz de distancias y de variables). Las restricciones 1 y 2 del modelo matemático se representan en los rangos Z28:Z49 (que son la suma de las filas) y C51:X51 (que son la suma de las columnas), se identifica el rango de las celdas variables C28:X49, como ya se ha mencionado; es necesario que sean binarias, por tal motivo en la ventana de parámetros de Solver se definen como binarias y enteras. Para afirmar que los puntos de origen sean iguales a los puntos de destino, es decir que solo se visitaran una vez; se agrega la restricción en donde $Y51=Z51$ es decir Y51(Sumatoria de los puntos de destino) es igual a Z51 sumatoria de los puntos de origen (ver tabla 13). En la ventana de parámetros de Solver es en donde se ingresan los componentes del modelo, se identifican los rangos anteriormente explicados, aquí se ubican los rangos de celdas que contienen las restricciones, el rango de celdas variable de decisión y la celda objetivo.

El problema que se busca solucionar cuenta con un gran número de variables cambiantes; el máximo aceptado por Solver es de 200 y la zona sur cuenta con más de 400 resaltando que es la zona que posee menos variables, por lo tanto, la herramienta Solver no tiene la capacidad de resolver este problema (ver figura 15). Por lo que se hizo necesaria la utilización de Open Solver.

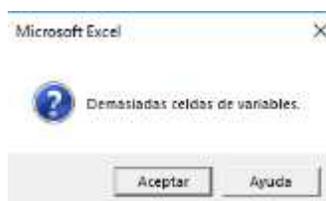


Figura 15 Advertencia Solver

Captura de programa Excel

En la Figura 16 se muestra la ventana de parámetros de Open Solver, es significativo resaltar que para hacer uso de esta extensión de Excel es necesario descargarla e instalarla. Los parámetros de entrada requeridos son la función objetivo, variables y restricciones. Cuando esta información esté declarada se procederá a ejecutar la herramienta dando clic al botón Solve (ver figura 17).

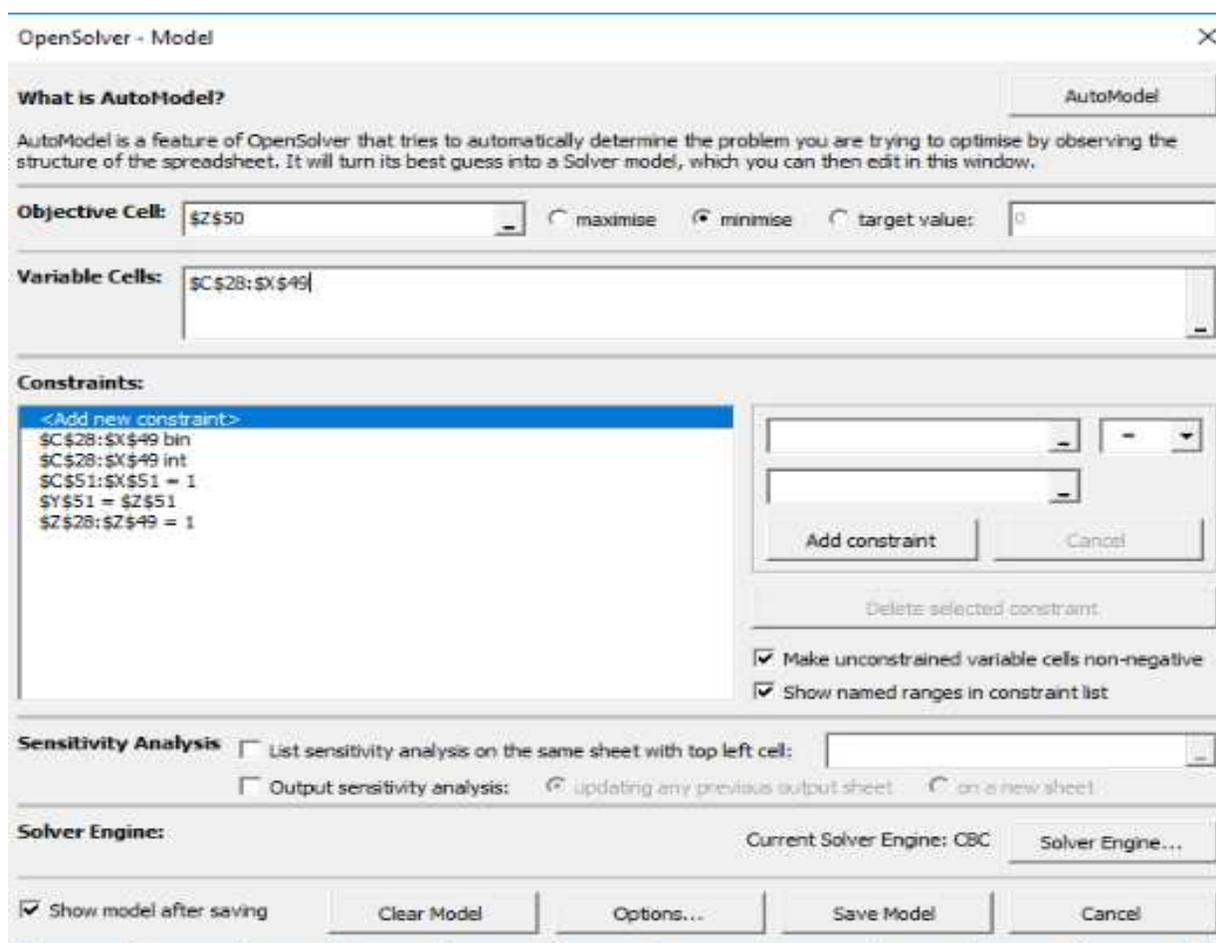


Figura 16 Parámetros en Open Solver
Captura de programa Excel



Figura 17 Herramientas de Excel
Captura de programa Excel

Para dar funcionamiento a OpenSolver e iniciar la búsqueda de una solución óptima se debe ejecutar el complemento haciendo clic en el botón Solve de la pestaña datos de la barra de herramientas, en la figura 17 se encuentra la dicha barra para dar claridad.

Ya declaradas las restricciones iniciales se procede a dar ejecución a la primera iteración, el resultado son sub rutas, en vista que solo se cuenta con un vehículo para satisfacer todos los puntos

de venta, es en este momento que surge la necesidad de evitar que se presenten varias rutas dentro de una misma zona, esto se logra adicionando una restricción nueva, lo primero que se debe hacer es identificar los sub tours, como se muestra en la tabla 13, donde se halla el primer sub tour que parte de la planta, seguido del punto Easy 13, pasando luego por Bazar Alsacia, y regresando nuevamente a la planta.

Posteriormente se continua con la siguiente ruta y se identifican los nodos que la conforman, el orden de salida se dicta en las filas de arriba hacia abajo, como el primer nodo es la planta se inicia por ahí, luego de que se termine el sub tour se continua con el siguiente punto en ese orden, pero debe ser un punto que no haya sido incluido en ningún sub tour anteriormente.

Luego de que ya tenemos definidos todos los subtours se suman las celdas de cada subtour que contengan el 1 que indica que se toma esa ruta, esto se realiza para que la sumatoria de esa ruta pueda restringirse a un valor $n-1$, lo cual obliga al modelo a buscar otra ruta que no sea la misma ya que si se repitiera daría la misma sumatoria y no estaría cumpliendo el objetivo del modelo.

Para ver de una forma más grafica el concepto de los sub tours, en la figura 18 se encuentran graficados los sub tours obtenidos en la primera iteración de la zona sur, este proceso anteriormente descrito se realiza hasta que el recorrido inicie en la planta, recorra todos los puntos y regrese a la planta, por lo tanto, no habrían más sub tours sino únicamente el recorrido óptimo.

Tabla 13.
Primera tabla de variables Zona sur

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	
	PLANTA	Zona IN	Leroy Zona In	CC Carrera	Éxito Americas	Easy Americas	Metro Banderas	Éxito Kennedy	Sentry sur	Plaza de las Americas	Home center	Metro Alquería	Alkosto Venecia	Easy Gaitan	Metro Autopista	Homecenter soacha	Metro soacha	Éxito Bosa	Metro Bosa	CC tintal Plaza	Bazar alsacia	Easy calle 13					
28 A	PLANTA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
29 B	Zona IN	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
30 C	Leroy Zona In	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
31 D	CC Carrera	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
32 E	Éxito Americas	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
33 F	Easy Americas	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
34 G	Metro Banderas	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
35 H	Éxito Kennedy	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
36 I	Sentry sur	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
37 J	Plaza de las Americas	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
38 K	Home center Alquería	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
39 L	Metro Alquería	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
40 M	Alkosto Venecia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
41 N	Easy Gaitan Cortez	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
42 O	Metro Autopista sur	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
43 P	Homecenter soacha	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
44 Q	Metro soacha	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
45 R	Éxito Bosa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
46 S	Metro Bosa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
47 T	CC tintal Plaza	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
48 U	Bazar alsacia	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
49 V	Easy calle 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
50		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	FO	46,908	
51		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	22	22	

Nota: Elaboración propia

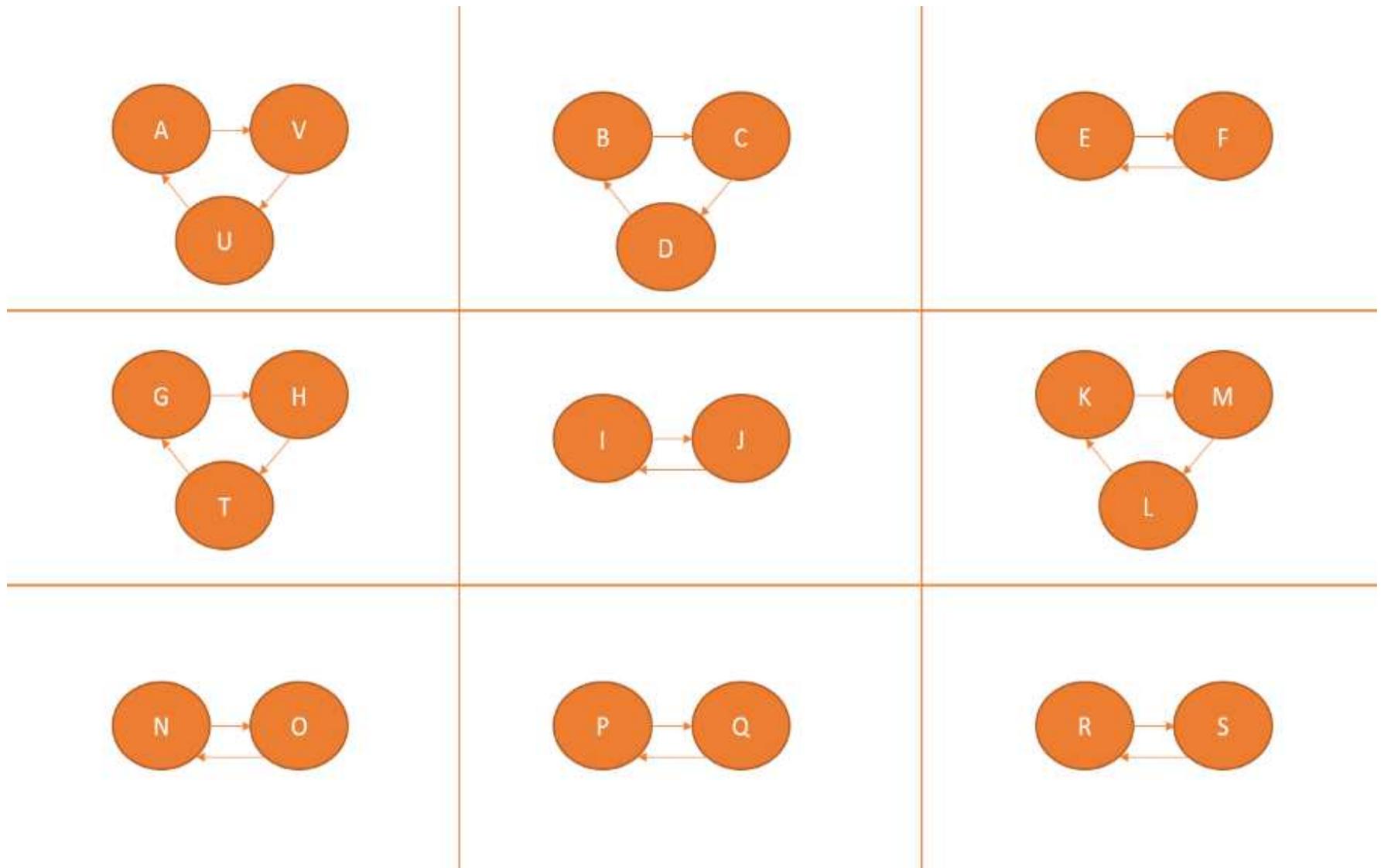


Figura 18 Subtours de la primera tabla de variables Zona Sur
Elaboración propia

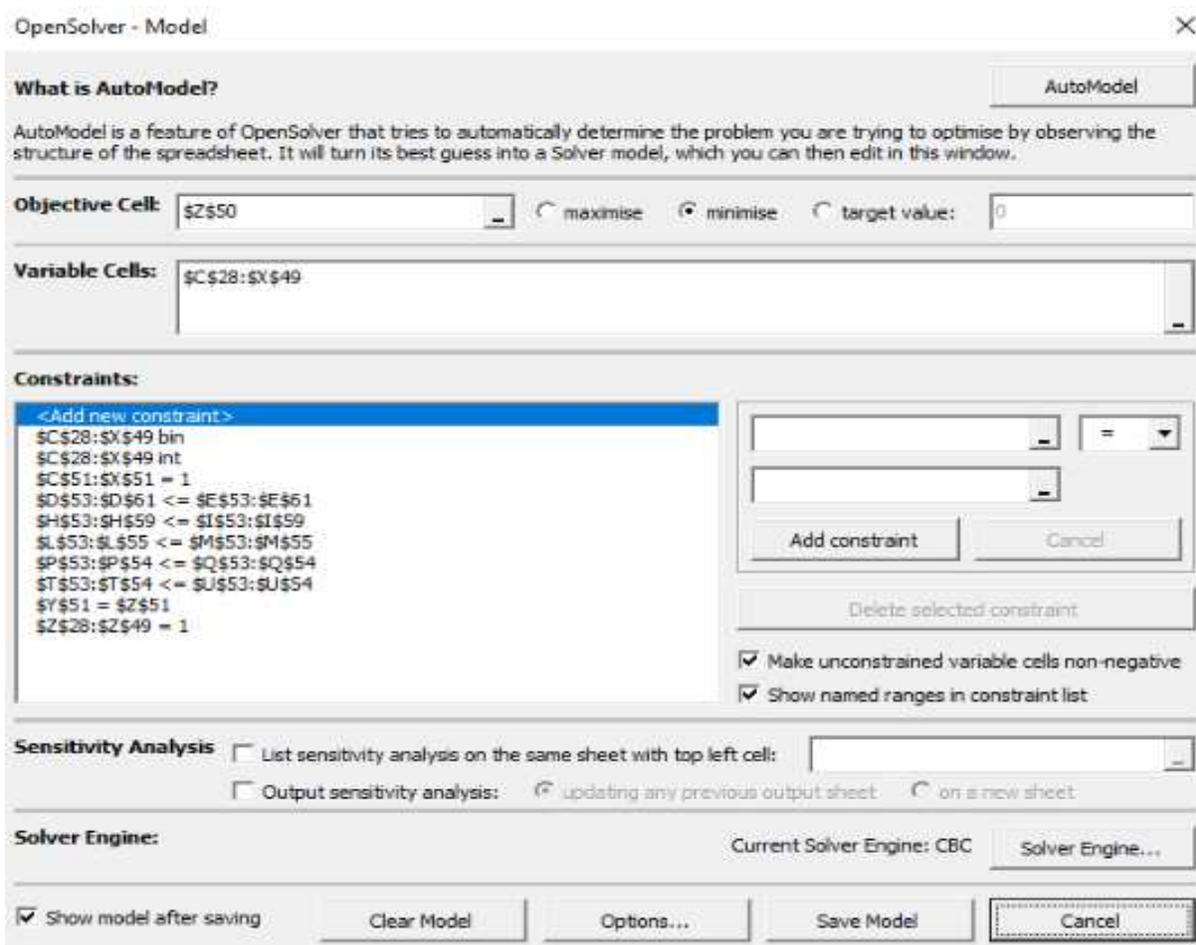


Figura 19 Nuevas restricciones Zona sur en Open Solver Tomada de Excel

Para romper los subtours encontrados se agregan nuevas restricciones al modelo, esto se muestra en la figura 19 (ventana de OpenSolver), en la hoja de Excel se registraron estas iteraciones en el rango A53:X61 donde se muestra el nombre del subtour seguido de la restricción; que se compone de la suma de arcos que lo conforman, en la celda del lado derecho se coloca el valor es decir (n-1).

Este paso de eliminación de subtours se realiza tantas veces hasta que OpenSolver logre encontrar una ruta que pase por todos los nodos; estas iteraciones se muestran en la tabla 39 o en los [anexos de iteraciones de la zona sur](#) donde se especifican que nodos conforman cada subtour de cada iteración realizada. En total resultaron 5 iteraciones.

En la tabla 14 muestra la matriz de celdas variables formando un tour que cumple con todas las restricciones del problema, logrando un objetivo de 63,658 kilómetros para el recorrido óptimo que minimiza el costo de distribución, en la fila 65 se especifica la ruta que minimiza los costos.

11.2.2. Zona occidente.

Tabla 15.

Parámetros puntos de origen y destino Zona Occidente

<i>i = Puntos de origen</i>		<i>j = Puntos de destino</i>	
<i>i = (A, B, C, D, E, F ... U)</i>		<i>j = (A, B, C, D, E, F ... U)</i>	
A	Planta	A	Planta
B	Sarmiento Angulo	B	Sarmiento Angulo
C	CC gran estación	C	CC gran estación
D	Leroy Gran estación	D	Leroy Gran estación
E	Éxito Gran estación	E	Éxito Gran estación
F	Multiplaza la felicidad	F	Multiplaza la felicidad
G	Dorado plaza	G	Dorado plaza
H	Metro san Cayetano	H	Metro san Cayetano
I	Homecenter dorado	I	Homecenter dorado
J	Leroy Conecta	J	Leroy Conecta
K	Conecta 26	K	Conecta 26
L	Diver plaza 1	L	Diver plaza 1
M	Diver plaza 2	M	Diver plaza 2
N	Zona Franca	N	Zona Franca
O	Éxito Fontibón	O	Éxito Fontibón
P	Homecenter Tintal	P	Homecenter Tintal
Q	Jumbo Hayuelos 1	Q	Jumbo Hayuelos 1
R	Jumbo Hayuelos 2	R	Jumbo Hayuelos 2
S	Leroy Hayuelos	S	Leroy Hayuelos
T	Éxito salitre	T	Éxito salitre
U	Ktronix	U	Ktronix

Nota: Elaboración propia con información proporcionada por la empresa Natural Food S.A.S

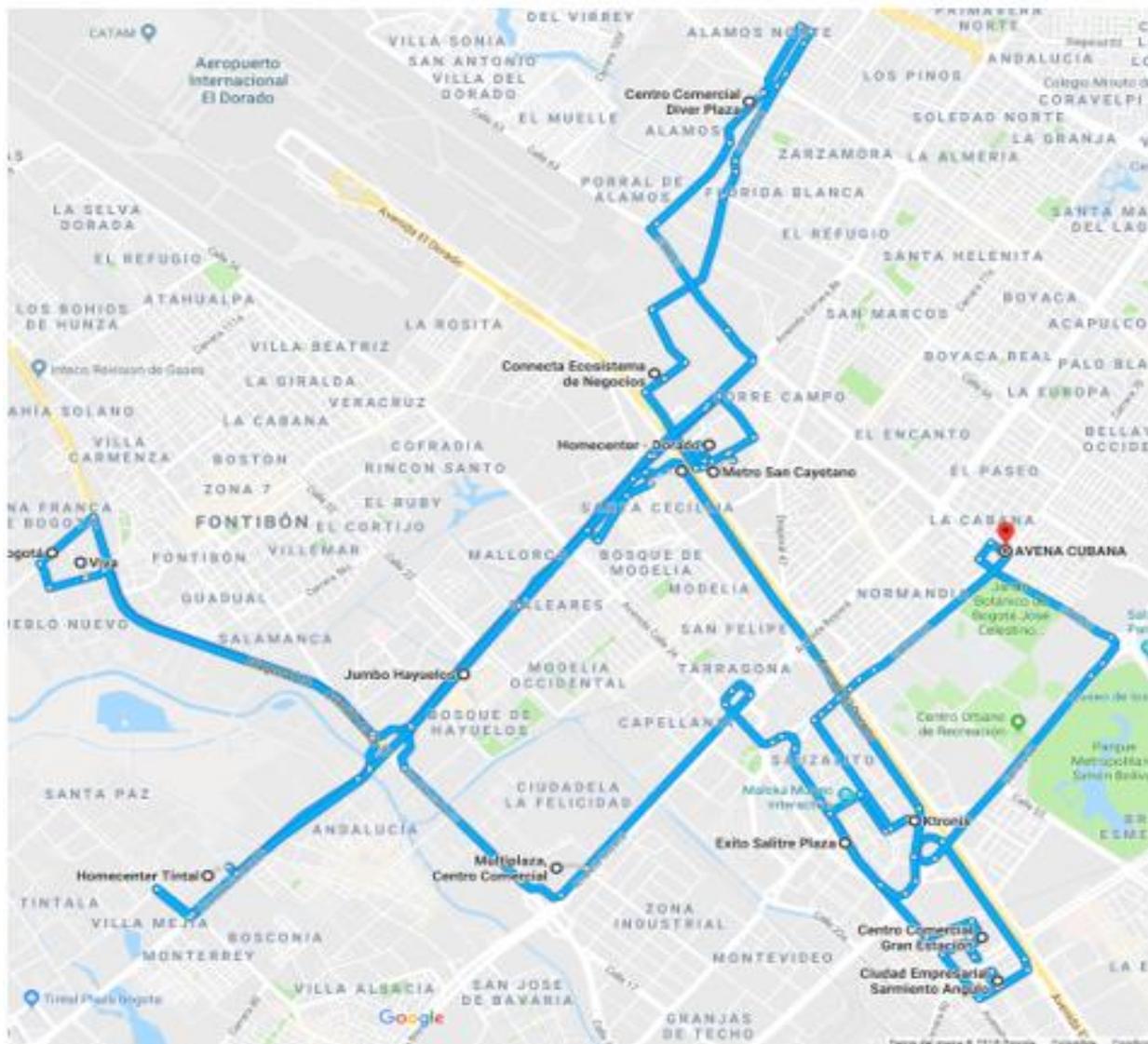


Figura 21 Recorrido realizado actualmente Zona Occidente
 Nota Elaboración propia utilizando la herramienta de Google Maps

Tabla 16.
Matriz de Parametros de distancias entre puntos Zona Occidente (Kilometros)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	
2		PLANTA	Sarmiento Angulo	CC gran estación	Leroy Gran estación	Éxito Gran estación	Multipaza la felicidad	Dorado plaza	Metro san cayetano	Homecenter dorado	Leroy Conecta	Conecta 26	Diver plaza 1	Diver plaza 2	Zona Franca	Éxito fontibon	Homecenter tintal	Jumbo Hayuelos 1	Jumbo Hayuelos 2	Leroy hayuelos	Éxito salitre	Ktronix	
3	A	PLANTA	9999	4,9	4,8	4,8	4,8	4,7	4	3,3	3,1	3,7	3,7	5,2	5,2	3,8	3,9	8	6,4	6,4	6,4	3,4	3,4
4	B	Sarmiento Angulo	4,8	9999	1	1	1	6,3	4,3	5,7	6,1	7,3	7,3	8,2	8,2	10,2	9,7	9,9	5,8	5,8	5,8	2,4	2,1
5	C	CC gran estación	4,7	1,2	9999	0	0	6,2	4,1	5,5	6	7,1	7,1	8	8	10,1	9,5	9,8	5,9	5,9	5,9	2,2	2
6	D	Leroy Gran estación	4,7	1,2	0	9999	0	6,2	4,1	5,5	6	7,1	7,1	8	8	10,1	9,5	9,8	5,9	5,9	5,9	2,2	2
7	E	Éxito Gran estación	4,7	1,2	0	0	9999	6,2	4,1	5,5	6	7,1	7,1	8	8	10,1	9,5	9,8	5,9	5,9	5,9	2,2	2
8	F	Multipaza la felicidad	4,7	5,1	4,7	4,7	4,7	9999	3,4	4,4	5,2	6,1	6,1	7,1	7,1	8,1	7,6	7,1	3,1	3,1	3,1	3,3	3,8
9	G	Dorado plaza	4,7	5,1	6,6	6,6	6,6	4,2	9999	1,8	1,3	2,9	2,9	3,8	3,8	5,8	5,2	5,9	1,9	1,9	1,9	3,3	3,8
10	H	Metro san cayetano	3,7	5,8	5,4	5,4	5,4	5,5	2,5	9999	1,1	2,9	2,9	3,8	3,8	7,5	9,2	6,7	3,2	3,2	3,2	4,2	4,3
11	I	Homecenter dorado	3,4	6	5,6	5,6	5,6	5,6	2,7	0,29	9999	3,1	3,1	4,4	4,4	7,7	7,1	6,8	3,3	3,3	3,3	4,4	4,5
12	J	Leroy Conecta	4,3	6,3	5,9	5,9	5,9	5,5	2,5	1,1	1,1	9999	0	3,5	3,5	7,5	7	6,7	3,2	3,2	3,2	4,8	4,8
13	K	Conecta 26	4,3	6,3	5,9	5,9	5,9	5,5	2,5	1,1	1,1	0	9999	3,5	3,5	7,5	7	6,7	3,2	3,2	3,2	4,8	4,8
14	L	Diver plaza 1	5,5	9,3	8,8	8,8	8,8	8,4	5,5	4	4	2,6	2,6	9999	0	13,3	10,5	9,6	6,7	6,7	6,7	7,7	7,6
15	M	Diver plaza 2	5,5	9,3	8,8	8,8	8,8	8,4	5,5	4	4	2,6	2,6	0	9999	13,3	10,5	9,6	6,7	6,7	6,7	7,7	7,6
16	N	Zona Franca	9,5	9,9	9,5	9,5	9,5	4,7	5,9	6,8	6,8	8	8	3,9	3,9	9999	0,8	6,2	4,8	4,8	4,8	8	8,8
17	O	Éxito fontibon	9,6	10,1	9,7	9,7	9,7	4,8	6	7	7	8,1	8,1	9	9	0,55	9999	6,4	4,9	4,9	4,9	8,2	9
18	P	Homecenter tintal	8,2	8,6	8,1	8,1	8,1	3,4	4,4	5,3	5,3	6,4	6,4	7,3	7,3	4,3	3,7	9999	3,7	3,7	3,7	6,7	7,3
19	Q	Jumbo Hayuelos 1	7,1	7,6	7,1	7,1	7,1	2,3	3,3	4,2	4,2	5,3	5,3	6,3	6,3	4,9	4,4	3,5	9999	0	0	5,7	6,2
20	R	Jumbo Hayuelos 2	7,1	7,6	7,1	7,1	7,1	2,3	3,3	4,2	4,2	5,3	5,3	6,3	6,3	4,9	4,4	3,5	0	9999	0	5,7	6,2
21	S	Leroy hayuelos	7,1	7,6	7,1	7,1	7,1	2,3	3,3	4,2	4,2	5,3	5,3	6,3	6,3	4,9	4,4	3,5	0	0	9999	5,7	6,2
22	T	Éxito salitre	3,6	1,8	1,3	1,3	1,3	5,9	3,6	5,3	5,7	6,9	6,9	7,8	7,8	9,8	9,3	9,5	4,7	4,7	4,7	9999	0,55
23	U	Ktronix	3,5	2	1,6	1,6	1,6	4,8	2,8	4,2	4,6	5,7	5,7	6,8	6,8	8,7	8,2	8,4	4,6	4,6	4,6	0,7	9999
24																							

Nota: Elaboración propia con información proporcionada por la empresa Natural Food S.A.S

Tabla 17.
Matriz de celdas variables Zona Occidente

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y		
25			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U				
26		PLANTA	Sarmient o Angulo	CC gran estación	Leroy Gran estación	Éxito Gran estación	Multiplaz a la felicidad	Dorado plaza	Metro san cayetano	Homecen ter dorado	Leroy Conecta	Conecta 26	Diver plaza 1	Diver plaza 2	Zona Franca	Éxito fontibon	Homecen ter tital	Jumbo Hayuelos 1	Jumbo Hayuelos 2	Leroy hayuelos	Éxito salitre	Ktronix					
27	A	PLANTA																							0	0	
28	B	Sarmiento Angulo																								0	0
29	C	CC gran estación																								0	0
30	D	Leroy Gran estación																								0	0
31	E	Éxito Gran estación																								0	0
32	F	Multipaza la felicidad																								0	0
33	G	Dorado plaza																								0	0
34	H	Metro san cayetano																								0	0
35	I	Homecenter dorado																								0	0
36	J	Leroy Conecta																								0	0
37	K	Conecta 26																								0	0
38	L	Diver plaza 1																								0	0
39	M	Diver plaza 2																								0	0
40	N	Zona Franca																								0	0
41	O	Éxito fontibon																								0	0
42	P	Homecenter tital																								0	0
43	Q	Jumbo Hayuelos 1																								0	0
44	R	Jumbo Hayuelos 2																								0	0
45	S	Leroy hayuelos																								0	0
46	T	Éxito salitre																								0	0
47	U	Ktronix																								0	0
48			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49			1=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50																											

Nota: Elaboración propia

OpenSolver - Model

What is AutoModel? AutoModel

AutoModel is a feature of OpenSolver that tries to automatically determine the problem you are trying to optimise by observing the structure of the spreadsheet. It will turn its best guess into a Solver model, which you can then edit in this window.

Objective Cell: maximise minimise target value:

Variable Cells:

Constraints:

<Add new constraint>

\$Y\$27:\$Y\$47 = 1

\$C\$27:\$W\$47 int

\$C\$27:\$W\$47 bn

\$T\$91:\$T\$92 <= \$U\$91:\$U\$92

\$X\$49 = \$Y\$49

\$C\$49:\$W\$49 = 1

Make unconstrained variable cells non-negative

Show named ranges in constraint list

Sensitivity Analysis List sensitivity analysis on the same sheet with top left cell:

Output sensitivity analysis: updating any previous output sheet on a new sheet

Solver Engine: Current Solver Engine: CBC

Show model after saving

Figura 22 Parámetros en Open Solver Zona Occidente
Tomado de excel

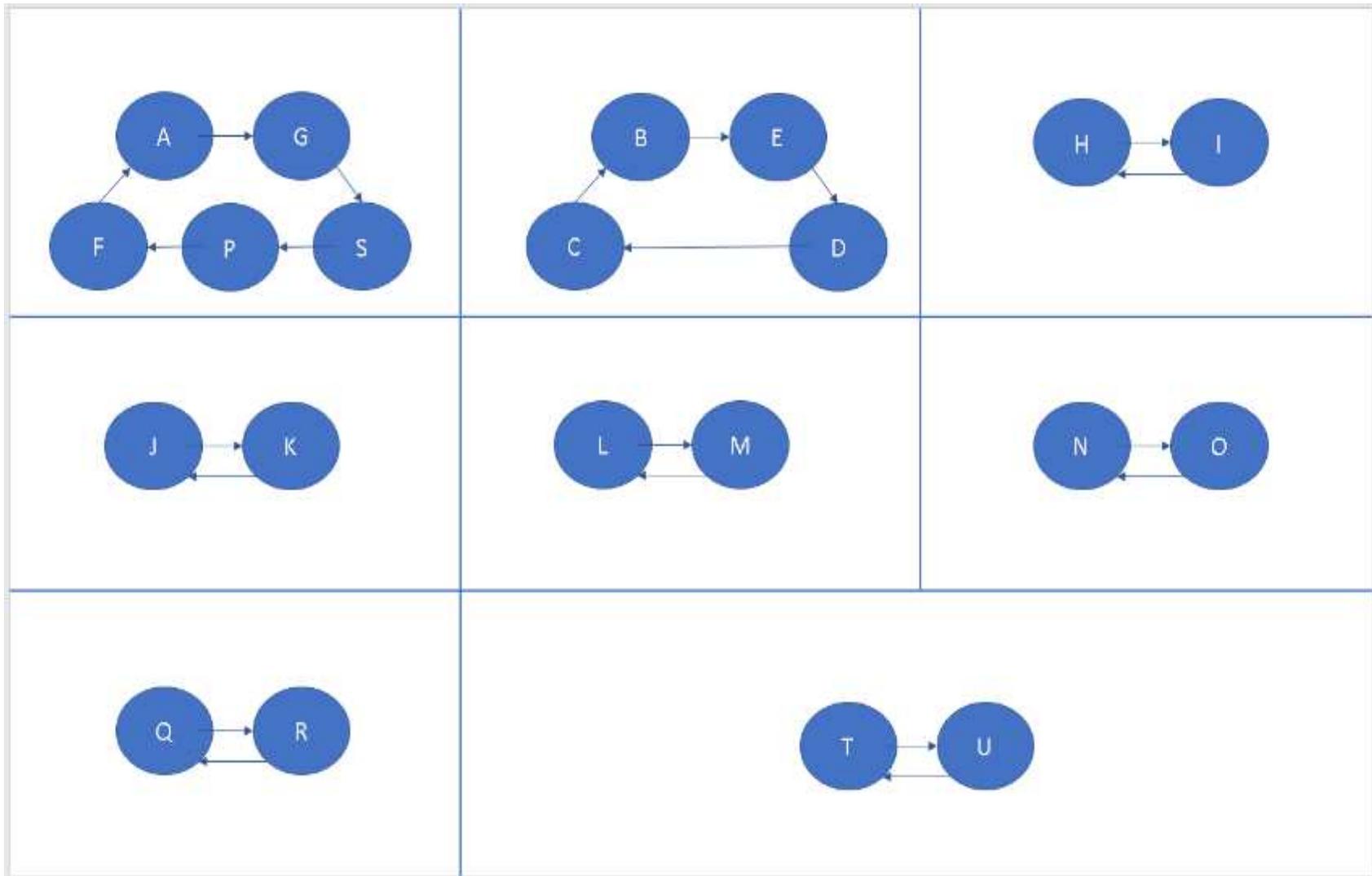


Figura 23 Subtours de la primera tabla de variables Zona Occidente
Nota Elaboración propia

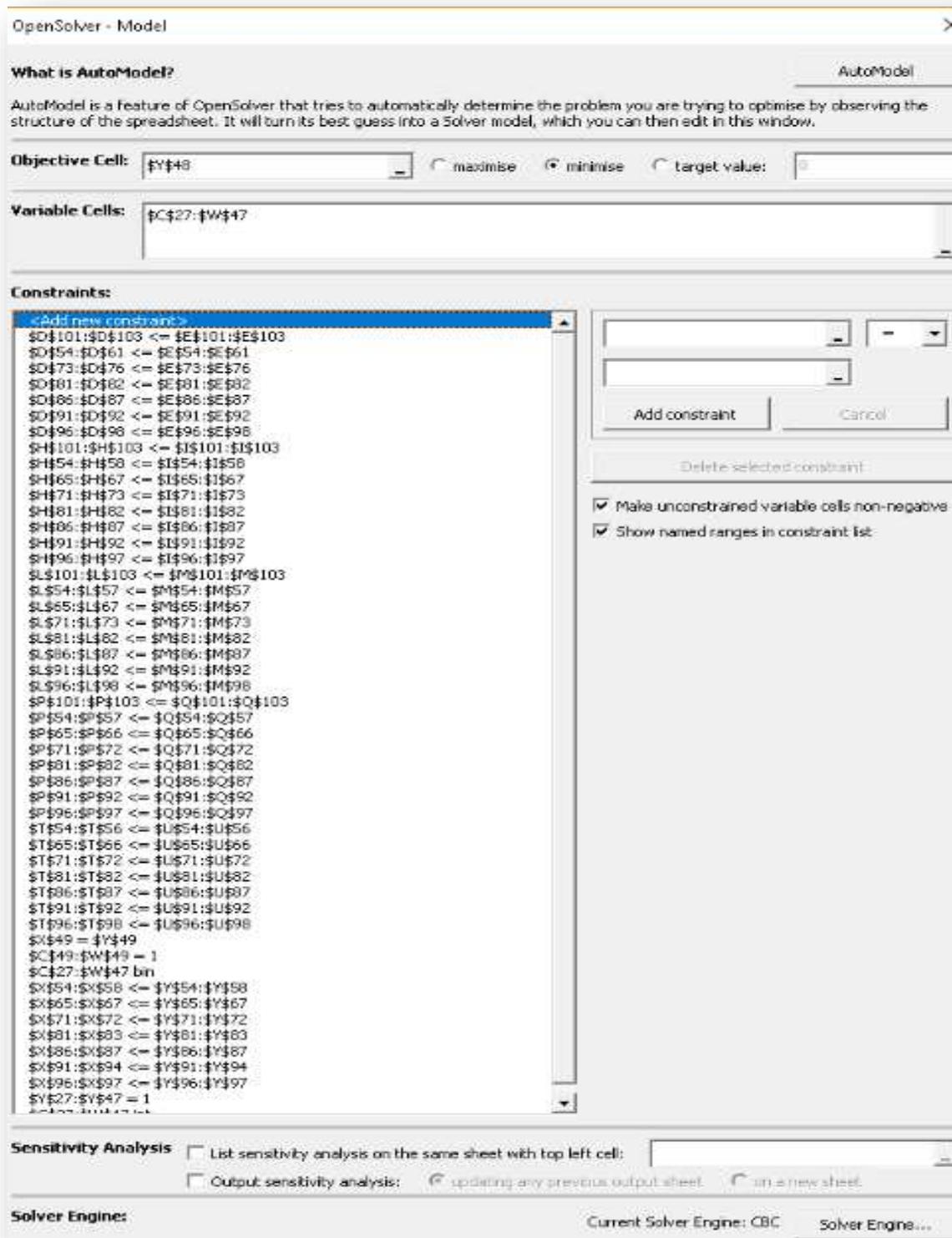


Figura 24 Nuevas restricciones Zona Occidente en Open Solver
Nota Captura del programa excel

En los [anexos](#) se pueden encontrar todas las iteraciones resultantes por esta zona; donde se especifican que nodos conforman cada subtour en el total de 45 iteraciones realizadas.

En la tabla 19 se muestra la matriz de celdas variables formando un tour que cumple con todas las restricciones del problema, logrando un objetivo de 37,44 kilómetros para el recorrido que minimiza el costo de distribución. En la fila 50 y en la figura 25 se representa la ruta que minimiza los costos.

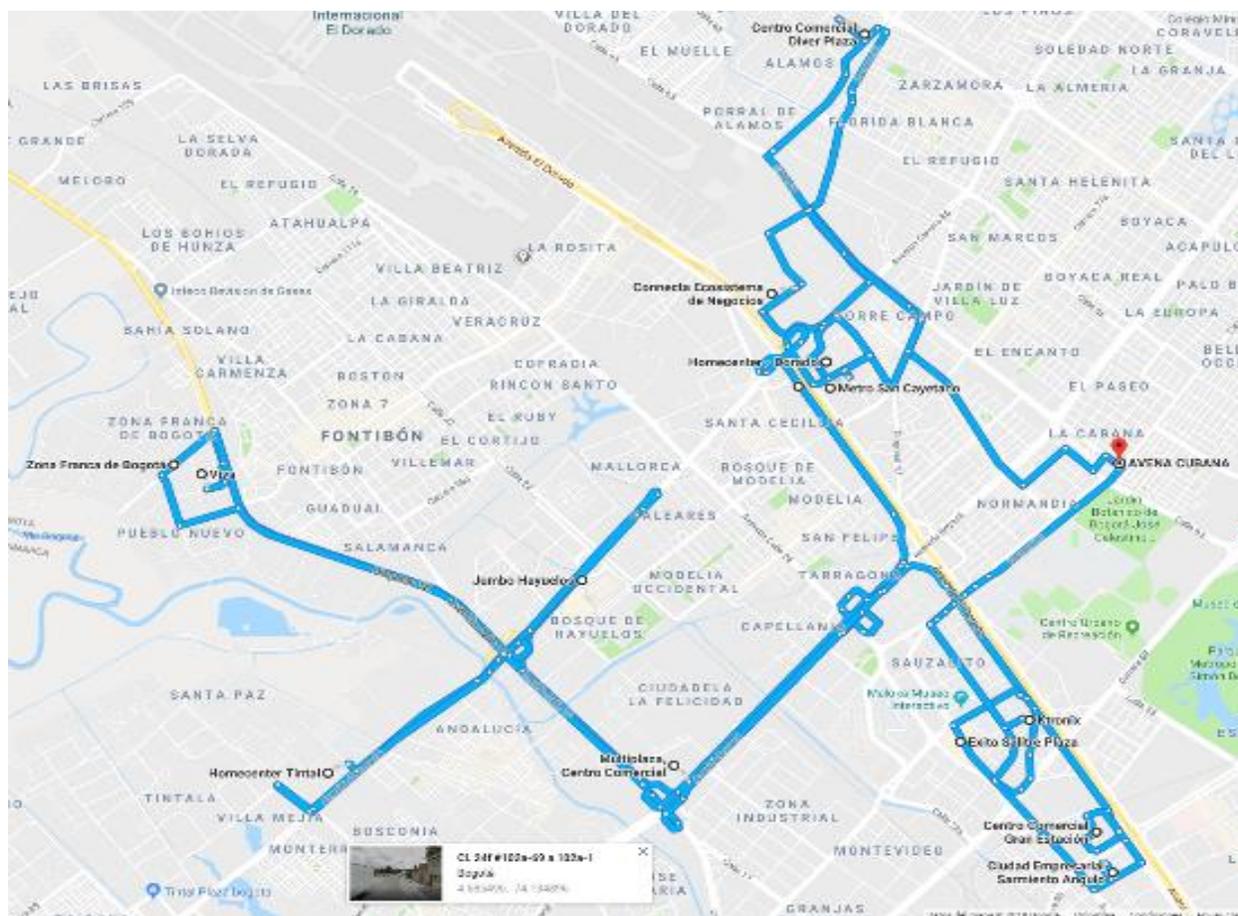


Figura 25 Recorrido arrojado por el modelo matemático Zona Occidente
Nota Elaboración propia utilizando la herramienta de Google Maps

Tabla 19.
Matriz de celdas variables, resultados finales y sobtours generados

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
	PLANTA	Sarmiento Angulo	CC gran estación	Leroy Gran estación	Éxito Gran estación	Multiplaza la felicidad	Dorado plaza	Metro san cayetano	Homecenter dorado	Leroy Conecta	Conecta 26	Diver plaza 1	Diver plaza 2	Zona Franca	Éxito fontibon	Homecenter tintal	Jumbo Hayuelos 1	Jumbo Hayuelos 2	Leroy hayuelos	Éxito salitre	Kronix			
25																								
26																								
27	A	PLANTA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
28	B	Sarmiento Angulo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
29	C	CC gran estación	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
30	D	Leroy Gran estación	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
31	E	Éxito Gran estación	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
32	F	Multiplaza la felicidad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
33	G	Dorado plaza	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1
34	H	Metro san cayetano	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
35	I	Homecenter dorado	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
36	J	Leroy Conecta	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
37	K	Conecta 26	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
38	L	Diver plaza 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
39	M	Diver plaza 2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
40	N	Zona Franca	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
41	O	Éxito fontibon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
42	P	Homecenter tintal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1
43	Q	Jumbo Hayuelos 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1
44	R	Jumbo Hayuelos 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1
45	S	Leroy hayuelos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1
46	T	Éxito salitre	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
47	U	Kronix	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
48			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	37,44	21
49			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	21	21
50		A	L	M	K	J	I	H	G	Q	R	S	P	O	N	F	T	C	E	D	B	U	A	
51																								
52			1	rest	valor																			
53		subtour1	1		4																			
54		subtour2	1		3																			
55		subtour3	1		1																			
56		subtour4	1		1																			
57		subtour5	1		1																			
58		subtour6	1		1																			
59		subtour7	1		1																			
60		subtour8	0		1																			
61		subtour9																						

Nota: Elaboración propia

11.2.3. Zona noroccidente.

Tabla 20.

Parámetros puntos de origen y destino Zona Noroccidente

<i>i = Puntos de origen</i>		<i>j = Puntos de destino</i>	
<i>i = (A, B, C, D, E, F ... W)</i>		<i>j = (A, B, C, D, E, F ... W)</i>	
A	Planta	A	Planta
B	Alkosto 68	B	Alkosto 68
C	Leroy Alk 68	C	Leroy Alk 68
D	Fruver 80	D	Fruver 80
E	Fruvar Pontevedra	E	Fruvar Pontevedra
F	Éxito calle 80	F	Éxito calle 80
G	Jumbo 80	G	Jumbo 80
H	Leroy Jumbo 80	H	Leroy Jumbo 80
I	Floresta 1	I	Floresta 1
J	Floresta 2	J	Floresta 2
K	Iserra 100	K	Iserra 100
L	Ilarco	L	Ilarco
M	Éxito Colina	M	Éxito Colina
N	Centro suba	N	Centro suba
O	Centro histórico	O	Centro histórico
P	Éxito suba 1	P	Éxito suba 1
Q	Éxito suba 2	Q	Éxito suba 2
R	Jumbo suba	R	Jumbo suba
S	Homecenter suba	S	Homecenter suba
T	Portal 80	T	Portal 80
U	éxito Quiriguá	U	éxito Quiriguá
V	Easy 80	V	Easy 80
W	Éxito occidente	W	Éxito occidente

Nota: Elaboración propia con información proporcionada por la empresa Natural Food S.A.S

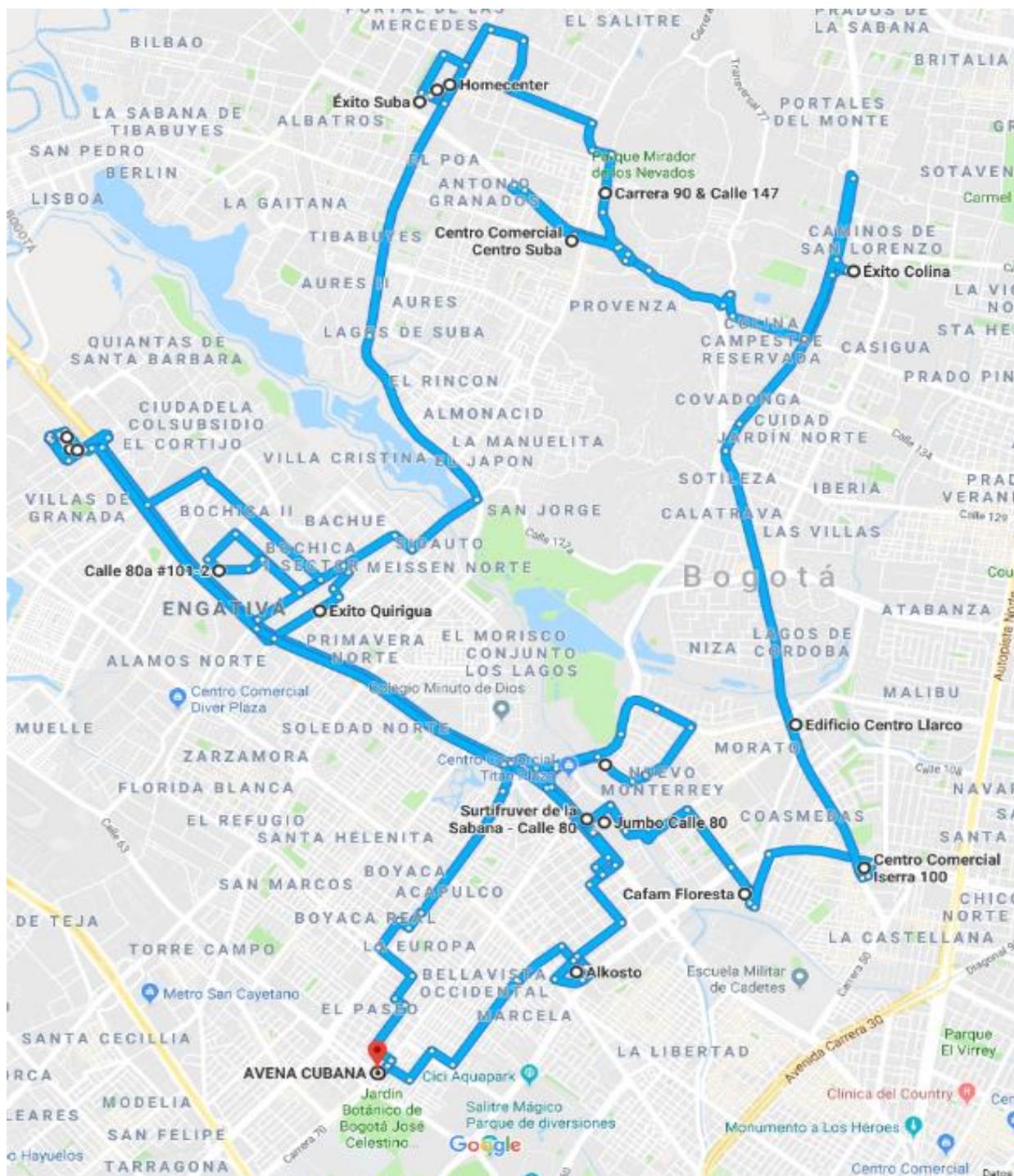


Figura 26 Recorrido realizado actualmente Zona Noroccidente
 Nota Elaboración propia utilizando la herramienta de Google Maps

Tabla 21.
Matriz de Parámetros de distancias entre puntos Zona Noroccidente (Kilómetros)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	
		PLANTA	Alkoze 60	Leroy Alk 60	Fruver 80	Fruver pontevedra	Éxito calle 80	Jumbo 80	Leroy Jumbo 80	Floresta 1	Floresta 2	Iserra 100	Ilarco	Éxito Collina	Centro Suba	Centro histórico	Éxito suba 1	Éxito suba 2	Jumbo suba	Homecenter suba	Portal 60	Éxito quinquia	Easy 60	Éxito occidente	
4 A	PLANTA	9999	5,1	8,1	4,4	4	7,9	3,9	3,5	4,8	4,5	6	6,4	8,9	10,6	10,1	11,9	11,9	11,9	11,6	6,4	6,4	8,4	7,9	
5 B	Alkoze 60	2,6	9999	0	2,9	3	7,2	2,4	2,4	2,8	2,9	4	4,7	9,3	8,3	9,6	10	10	11	10,2	6,3	5,3	7,6	7,9	
6 C	Leroy Alk 60	2,6	0	9999	2,9	3	7,2	2,4	2,4	2,8	2,9	4	4,7	9,3	8,3	9,6	10	10	11	10,2	6,3	5,3	7,6	7,9	
7 D	Fruver 80	4,5	2	2	9999	1,7	6,7	0,023	0,023	2,6	2,9	4,1	2,9	6,8	7,3	8,7	9,1	9,1	10,5	9,4	5,8	4,8	7,2	7,4	
8 E	Fruver pontevedra	4,1	2,9	2,9	0,96	9999	6,2	1	1	5	5	4,1	2,7	7,6	6,6	7,9	8,3	8,3	9,6	8,7	5,4	4,4	6,7	6,9	
9 F	Éxito calle 80	6	7,2	7,2	5,7	7,5	9999	5,8	5,8	8,5	8,5	9,4	8	11,3	7,6	8,8	6,4	6,4	8,8	6,7	3,7	3,7	6,5	0,004	
10 G	Jumbo 80	4,5	1,9	1,9	0,023	1,3	6,5	9999	0	2,7	2,7	3,8	2,5	6,3	6,9	8,3	8,7	8,7	9,9	9	5,7	4,7	7	7,3	
11 H	Leroy Jumbo 80	4,5	1,9	1,9	0,023	1,3	6,5	0	9999	2,7	2,7	3,8	2,5	6,3	6,9	8,3	8,7	8,7	9,9	9	5,7	4,7	7	7,3	
12 I	Floresta 1	4,6	2,9	2,9	2,1	2,3	7,7	1,7	1,7	9999	0	2,6	2,6	6,3	6,9	8,3	8,7	8,7	9,9	9	6,8	5,9	8,2	8,4	
13 J	Floresta 2	4,6	2,9	2,9	2,1	2,3	7,7	1,7	1,7	0	9999	2,6	2,6	6,3	6,9	8,3	8,7	8,7	9,9	9	6,8	5,9	8,2	8,4	
14 K	Iserra 100	5,9	4,3	4,3	3,2	3,4	9,1	2,8	2,8	1,9	1,9	9999	2,2	6,2	6,8	8,2	8,6	8,6	9,8	6,9	8,2	7,3	9,6	9,8	
15 L	Ilarco	6,5	3,7	3,7	2,5	2,4	8,3	1,9	1,5	2,3	2,3	1,4	9999	5	5,6	7	7,4	7,4	8,6	7,7	7,4	6,5	8,8	9	
16 M	Éxito Collina	8,7	8	8	6	5,1	10,9	6,1	6,1	6,8	6,3	5,8	4,5	9999	5,4	4	5,9	5,9	5,4	6,5	10	6,8	11,4	11,6	
17 N	Centro sube	5	6,2	6,2	6,4	6	7	7,3	7,3	7,7	7,7	6,7	5,4	5	9999	1,9	1,7	1,7	3	2,1	6,2	4,1	7,5	7,7	
18 O	Centro histórico	10,2	9	9	7,1	6,2	8,3	7,3	7,3	7,6	7,6	6,7	5,3	4,9	1,2	9999	2,9	2,9	2,9	2,1	7,4	5,4	8,8	9	
19 P	Éxito suba 1	10,9	10,1	10,1	8,2	8,1	8,2	8,5	8,5	9,4	9,4	8,5	7,1	6,7	2,6	2,5	9999	0	0,019	0,26	9,2	6	8,7	8,9	
20 Q	Éxito suba 2	10,9	10,1	10,1	8,2	8,1	8,2	8,5	8,5	9,4	9,4	8,5	7,1	6,7	2,6	2,5	0	9999	0,019	0,26	9,2	6	8,7	8,9	
21 R	Jumbo suba	12,3	11,4	11,4	9,7	9,4	9,1	9,9	9,9	10,7	10,7	9,8	8,5	8,1	4,4	3,2	0,003	0,003	9999	0,26	10,6	7,4	9,5	9,8	
22 S	Homecenter suba	12	11,2	11,2	9,5	9,1	8,8	9,6	9,6	10,5	10,5	9,6	8,2	7,8	4,1	2,9	0,9	0,9	0,85	9999	10,3	7,1	9,3	9,5	
23 T	Portal 60	6,7	5,9	5,9	5,5	5,9	3	4,3	4,3	7,8	7,9	7,9	5,5	5,8	6	9,8	7,7	7,7	0	7,1	9999	2,2	3,5	3,6	
24 U	Éxito quinquia	5,8	5	5	3,2	5	2,9	3,4	3,4	6	6	7	5,6	6,9	5,1	9,1	6	6	7,1	6,2	2	9999	3,4	3,6	
25 V	Easy 60	8,5	7,7	7,7	6,2	8	0,27	6,3	6,3	9	9	9,9	8,6	11,9	8,1	9,4	6,9	6,9	7,3	5,2	4,2	4,1	9999	0,55	
26 W	Éxito occidente	6	7,2	7,2	5,7	7,5	0,061	5,8	5,8	8,5	8,5	9,4	8	11,3	7,7	8,8	6,4	6,4	6,8	6,6	3,7	3,7	0,55	9999	

Nota: Elaboración propia con información proporcionada por la empresa Natural Food S.A.S

Tabla 22.
Matriz de celdas variables Zona Noroccidente

	PLANTA	Alfonso 68	Leroy Alk 68	Fruver 80	Fruver pontevedra	Éxito calle 80	Jumbo 80	Leroy Jumbo 80	Floresta 1	Floresta 2	Iserre 100	Ilarco	Éxito Colina	Centro Suba	Centro histórico	Éxito suba 1	Éxito suba 2	Jumbo suba	Humecenter suba	Portal 80	Éxito quirigua	Easy 80	Éxito occidente					
29																												
30	PLANTA																											
31	A costo 68																									0	0	
32	Leroy Alk 68																										0	0
33	Fruver 80																										0	0
34	Fruver pontevedra																										0	0
35	Éxito calle 80																										0	0
36	Jumbo 80																										0	0
37	Leroy Jumbo 80																										0	0
38	Floresta 1																										0	0
39	Floresta 2																										0	0
40	Iserre 100																										0	0
41	Ilarco																										0	0
42	Éxito Colina																										0	0
43	Centro suba																										0	0
44	Centro histórico																										0	0
45	Éxito suba 1																										0	0
46	Éxito suba 2																										0	0
47	Jumbo suba																										0	0
48	Humecenter suba																										0	0
49	Portal 80																										0	0
50	Éxito quirigua																										0	0
51	Easy 80																										0	0
52	Éxito occidente																										0	0
53		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	FO	0,00
54		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: Elaboración propia

OpenSolver - Model X

What is AutoModel? AutoModel

AutoModel is a feature of OpenSolver that tries to automatically determine the problem you are trying to optimise by observing the structure of the spreadsheet. It will turn its best guess into a Solver model, which you can then edit in this window.

Objective Cell: maximise minimise target value:

Variable Cells:

Constraints:

<Add new constraint >

\$AA\$30:\$AA\$52 = 1
 \$C\$30:\$Y\$52 bin
 \$C\$30:\$Y\$52 int
 \$C\$54:\$Y\$54 = 1
 \$Z\$54 = \$AA\$54

=

Make unconstrained variable cells non-negative
 Show named ranges in constraint list

Sensitivity Analysis List sensitivity analysis on the same sheet with top left cell:

Output sensitivity analysis: updating any previous output sheet on a new sheet

Solver Engine: Current Solver Engine: CBC

Show model after saving

Figura 27 Parámetros en Open Solver Zona Noroccidente
 Nota Captura del programa Excel

Tabla 23.
Primera tabla de variables Zona Noroccidente

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W			
	PLANTA	Alkosto 68	Leroy Alk 68	Fruver 80	Fruver pontevedr	Éxito calle 80	Jumbo 80	Leroy Jumbo 80	Floresta 1	Floresta 2	Iserra 100	Ilarco	Éxito Colina	Centro Suba	Centro histórico	Éxito suba 1	Éxito suba 2	Jumbo suba	Homecenter r suba	Portal 80	Éxito quiriquis	Easy 80	Éxito occidente			
PLANTA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Alkosto 68	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Leroy Alk 68	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Fruver 80	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Fruver pontevedr	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Éxito calle 80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
Jumbo 80	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Leroy Jumbo 80	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Floresta 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Floresta 2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Iserra 100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Ilarco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Éxito Colina	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Centro suba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Centro histórico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Éxito suba 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Éxito suba 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Jumbo suba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
Homecenter suba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
Portal 80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
Éxito quiriquis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1
Easy 80	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Éxito occidente	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	FD	29,00
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	23	23

Nota: Elaboración propia

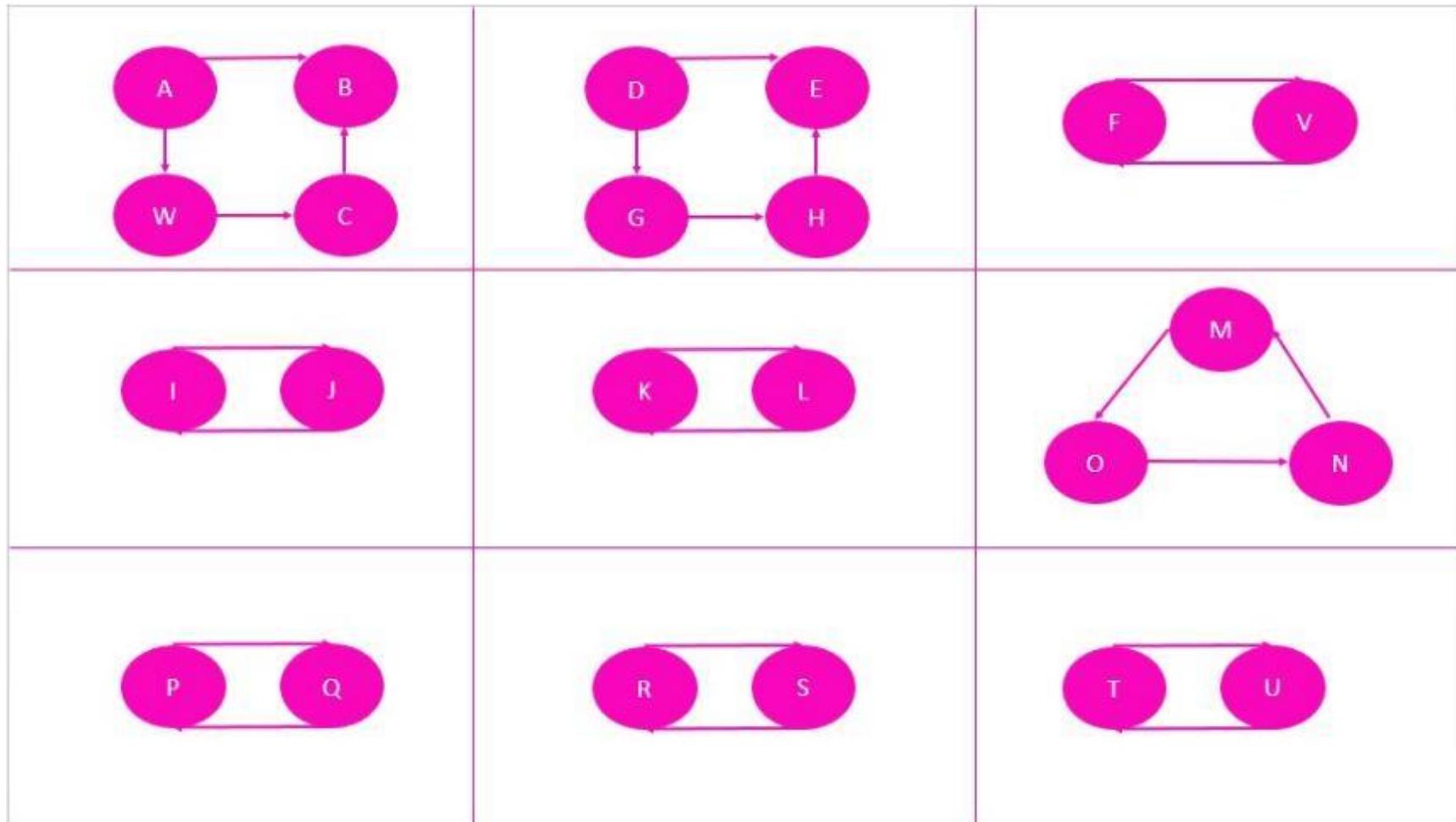


Figura 28 Subtours de la primera tabla de variables Zona Noroccidente
Nota Elaboración propia

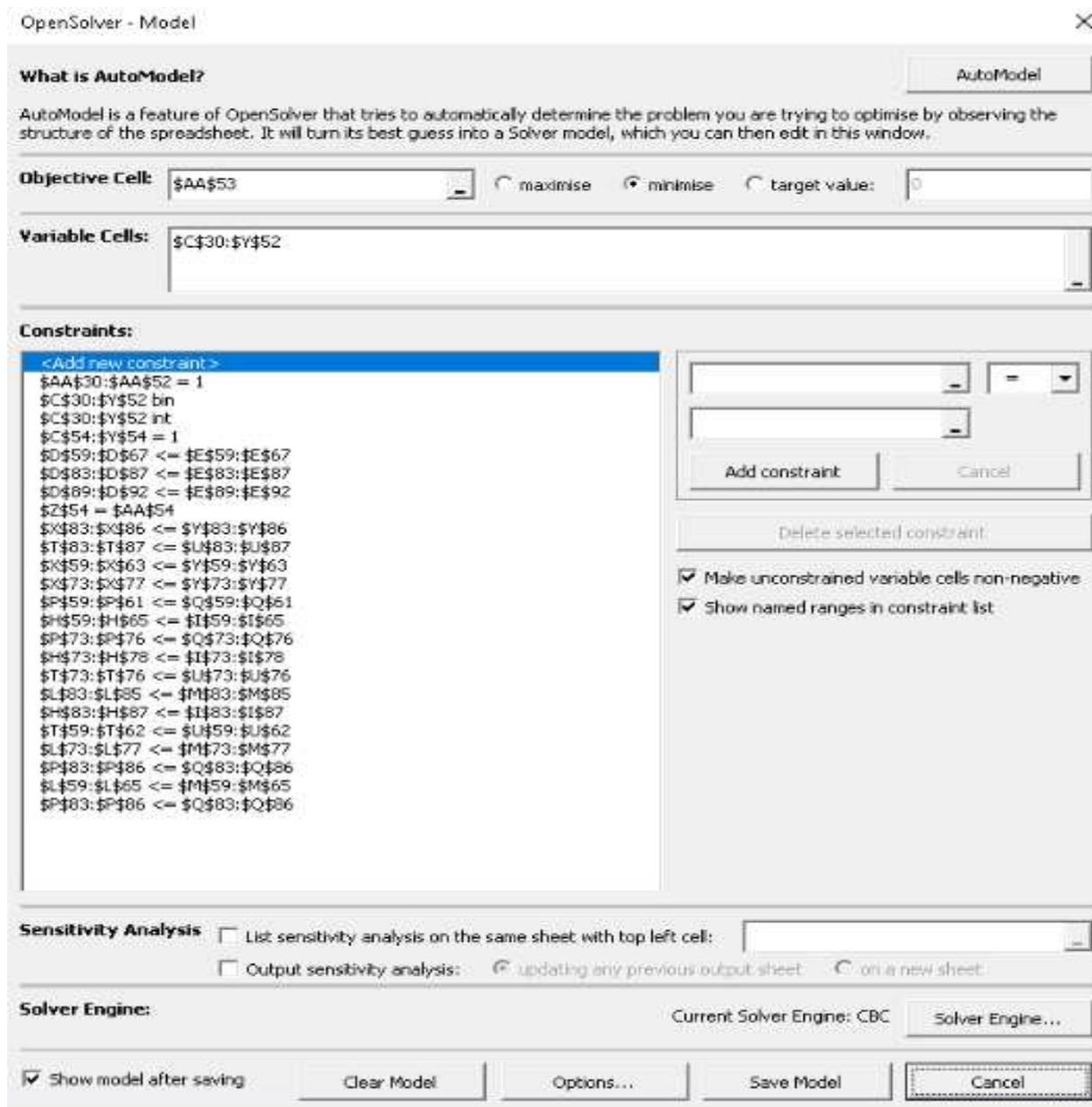


Figura 29 Nuevas restricciones Zona Noroccidente en Open Solver

Nota: Captura programa Excel

En los [anexos](#) se puede encontrar las 12 iteraciones realizadas. En la tabla 24 se muestra la matriz de celdas variables formando un tour que cumple con todas las restricciones del problema representado gráficamente en la figura 30, logrando un objetivo de 43,53 kilómetros para el recorrido que minimiza el costo de distribución, en la fila 56 se especifica la ruta que minimiza los costos.

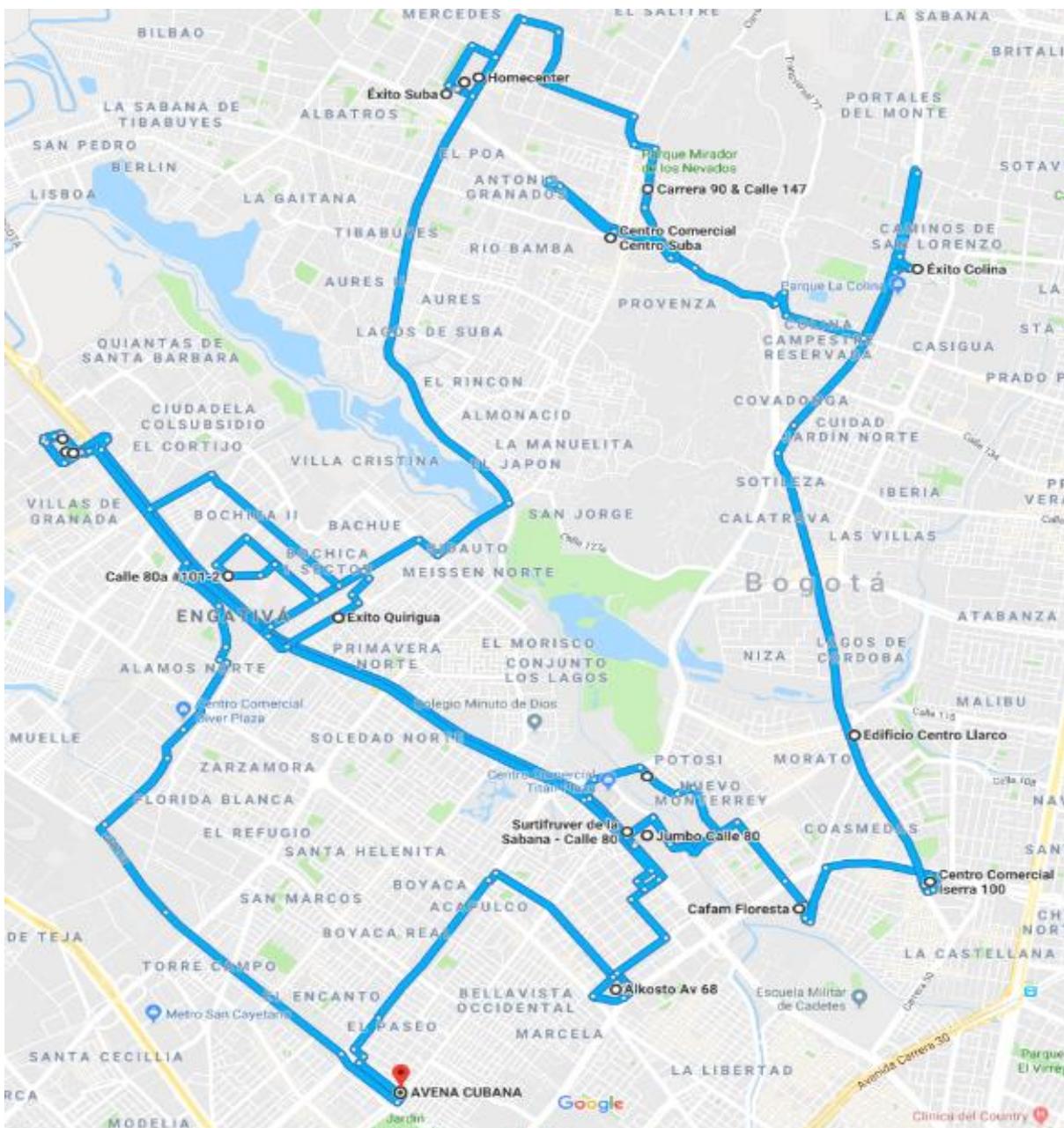


Figura 30 Recorrido arrojado por el modelo matemático Zona Noroccidente
 Nota Elaboración propia utilizando la herramienta de Google Maps

Tabla 24.

Matriz de celdas variables, resultados finales y sobtoures generados

28	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W			
	PLANTA	Alkosto 68	Leroy Alk 68	Fruver 80	Fruver pontevedr	Éxito calle 80	Jumbo 80	Leroy Jumbo 80	Floresta 1	Floresta 2	Iserra 100	Ilarco	Éxito Colina	Centro Suba	Centro histórico	Éxito suba 1	Éxito suba 2	Jumbo suba	Homecenter r suba	Portal 80	Éxito quiriqua	Eazy 80	Éxito occidente			
29	PLANTA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
30	Alkosto 68	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
31	Leroy Alk 68	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
32	Fruver 80	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
33	Fruver pontevedra	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
34	Éxito calle 80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
35	Jumbo 80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
36	Leroy Jumbo 80	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
37	Floresta 1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
38	Floresta 2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
39	Iserra 100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
40	Ilarco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
41	Éxito Colina	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
42	Centro suba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
43	Centro histórico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
44	Éxito suba 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
45	Éxito suba 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
46	Jumbo suba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
47	Homecenter suba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
48	Portal 80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
49	Éxito quiriqua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1
50	Eazy 80	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
51	Éxito occidente	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
52		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	FD	44,37
53		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	23	23
54																										
55																										
56		A	U	T	V	F	W	Q	P	R	S	O	N	M	L	K	I	J	E	D	G	H	B	C	A	

Nota: Elaboración propia

11.2.4. Zona norte.

Tabla 25.

Parámetros puntos de origen y destino Zona Norte

<i>i = Puntos de origen</i>		<i>j = Puntos de destino</i>	
<i>i = (A, B, C, D, E, F ... U)</i>		<i>j = (A, B, C, D, E, F ... U)</i>	
A	Planta	A	Planta
B	Fruver 164	B	Fruver 164
C	Éxito 170 1	C	Éxito 170 1
D	Éxito 170 2	D	Éxito 170 2
E	Jumbo Zipaquirá	E	Jumbo Zipaquirá
F	CC fontanar	F	CC fontanar
G	Jumbo Santafé	G	Jumbo Santafé
H	Leroy Santafé	H	Leroy Santafé
I	Homecenter 170	I	Homecenter 170
J	Alkosto 170	J	Alkosto 170
K	Leroy Alkosto 170	K	Leroy Alkosto 170
L	Jumbo 170	L	Jumbo 170
M	y Jumbo 170	M	Leroy Jumbo 170
N	Fruver 137	N	Fruver 137
O	Fruver 121	O	Fruver 121
P	Torre Ar	P	Torre Ar
Q	Sentry Norte	Q	Sentry Norte
R	Jumbo Bulevar	R	Jumbo Bulevar
S	CC bulevar	S	CC bulevar
T	CC bulevar 2	T	CC bulevar 2
U	CC Niza	U	CC Niza

Nota: Elaboración propia con información proporcionada por la empresa Natural Food S.A.S

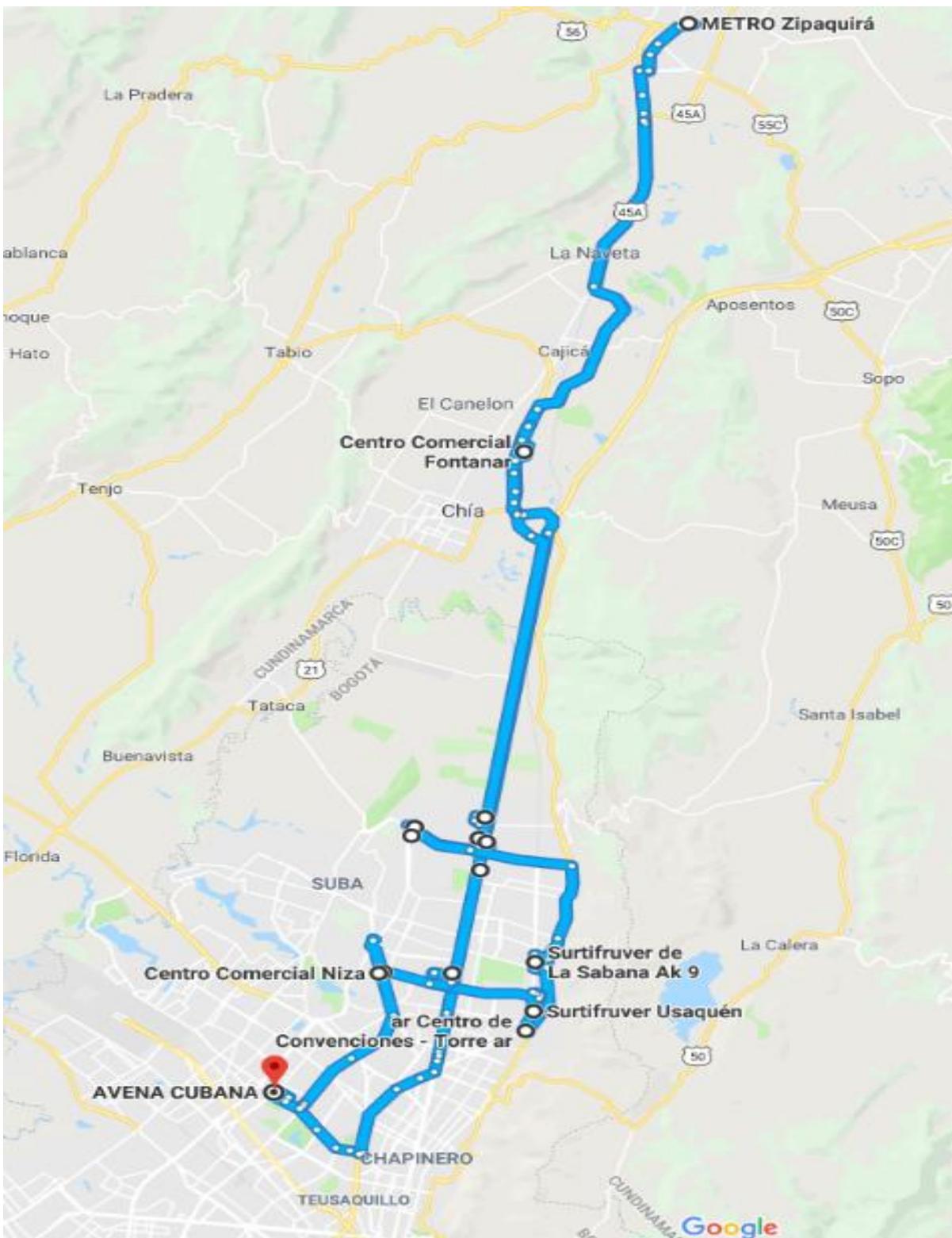


Figura 31 Recorrido realizado actualmente Zona Norte
 Nota Elaboración propia utilizando la herramienta de Google Maps

Tabla 26.
Matriz de Parametros de distancias entre puntos Zona Norte (Kilometros)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	
1		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
2		PLANTA	Fruver 164	Éxito 170 1	Éxito 170 2	Jumbo Zipaquira	CC fontanar	Jumbo Santafé	Leroy Santafé	Homecenter 170	Alkosto 170	Leroy Alkosto 170	Jumbo 170	Leroy Jumbo 170	Fruver 137	Fruver 121	Torre Ar	Sentry Norte	Jumbo Bulevar	CC bulevar	CC bulevar 2	CC nba		
3	A	PLANTA	9999	15,8	17,2	17,2	32,7	32,4	17,5	17,5	16,9	12,3	12,3	11,6	11,6	13	11,2	10,5	9,9	6	8	8	8	6,9
4	B	Fruver 164	15,7	9999	3,2	3,2	36,1	19,7	3	3	2,2	4,3	4,3	3,5	3,5	5	7	7,7	4,9	6,8	5,8	6,8	6,8	7,4
5	C	Éxito 170 1	17	1,5	9999	0	36,1	19,7	3	3	2,1	4,2	4,2	3,4	3,4	6	7,9	8,7	6,3	6,2	3,2	8,2	8,2	6,8
6	D	Éxito 170 2	17	1,5	0	9999	36,1	19,7	3	3	2,1	4,2	4,2	3,4	3,4	6	7,9	8,7	6,3	6,2	3,2	8,2	8,2	6,8
7	E	Jumbo Zipaquira	51,3	37,3	34,6	34,6	9999	21,1	35,8	36,8	38	40,1	40,1	37,7	37,7	40,3	42,1	42,9	43,2	44,5	44,5	44,5	44,5	44,6
8	F	CC fontanar	32,7	17,1	15	15	21,3	9999	15,5	16,5	17,7	19,8	19,8	19,1	19,1	21,7	23,5	24,3	22,9	24,2	24,2	24,2	24,2	24,1
9	G	Jumbo Santafé	20,3	3,6	2,6	2,6	34,2	17,8	9999	0	1,9	4,3	4,3	3,7	3,7	7,9	11,1	11,9	9,4	9,6	9,6	9,6	9,6	11,7
10	H	Leroy Santafé	20,3	3,6	2,6	2,6	34,2	17,8	0	9999	1,9	4,3	4,3	3,7	3,7	7,9	11,1	11,9	9,4	9,6	9,6	9,6	9,6	11,7
11	I	Homecenter 170	20,2	3	2,7	2,7	34,2	17,7	1,1	1,1	9999	3,6	3,6	3,1	3,1	7,2	9	9,9	8,8	9	9	9	9	8,7
12	J	Alkosto 170	12,4	3,4	3,4	3,4	36,6	20,1	3,5	3,5	2,6	9999	0	1,8	1,8	7,7	9,5	10,4	9,2	6,5	5,5	6,5	6,5	6,8
13	K	Leroy Alkosto 170	12,4	3,4	3,4	3,4	36,6	20,1	3,5	3,5	2,6	0	9999	1,8	1,8	7,7	9,5	10,4	9,2	6,5	5,5	6,5	6,5	6,8
14	L	Jumbo 170	11,6	3,8	3,8	3,8	36,9	20,5	3,8	3,8	3	1,3	1,3	9999	0	0,1	9,9	10,8	8,2	5,8	5,8	5,8	5,8	6,1
15	M	Leroy Jumbo 170	11,6	3,8	3,8	3,8	36,9	20,5	3,8	3,8	3	1,3	1,3	0	9999	0,1	9,9	10,8	8,2	5,8	5,8	5,8	5,8	6,1
16	N	Fruver 137	12,9	6,4	8,7	8,7	42,5	26,1	9,1	9,1	8,2	10,4	10,4	9,6	9,6	9999	1,8	2,7	5,5	6,8	6,8	6,8	6,8	7
17	O	Fruver 121	10,6	6,4	10,9	10,9	46,8	30,4	10,7	10,7	9,8	11,6	11,6	11	11	3,3	9999	0,9	5	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4
18	P	Torre Ar	10	8,3	10,8	10,8	46,2	29,8	10,6	10,6	9,7	12	12	11,8	11,8	3,6	1,3	9999	6	6,8	6,8	6,8	6,8	6,9
19	Q	Sentry Norte	10	6,2	6,2	6,2	38,1	22,7	6	6	5,2	7,6	7,6	6,8	6,8	5	5,3	6,2	9999	3,3	3,3	3,3	3,3	4,4
20	R	Jumbo Bulevar	8,1	7,5	10	10	41,5	25	8,4	8,4	7,5	6,8	6,8	6,2	6,2	7,2	5,7	5,5	2,4	9999	0	0	0	2,1
21	S	CC bulevar	8,1	7,5	10	10	41,5	25	8,4	8,4	7,5	6,8	6,8	6,2	6,2	7,2	5,7	5,5	2,4	0	9999	0	0	2,1
22	T	CC bulevar 2	8,1	7,5	10	10	41,5	25	8,4	8,4	7,5	6,8	6,8	6,2	6,2	7,2	5,7	5,5	2,4	0	0	9999	0	2,1
23	U	CC nba	6,4	7,5	8,7	8,7	41,6	25,9	8,5	8,5	7,6	6,5	6,5	5,8	5,8	7,3	5,8	5,7	2,5	0,85	0,85	0,85	0,85	9999

Nota: Elaboración propia con información proporcionada por la empresa Natural Food S.A.S

Tabla 27.
Matriz de celdas variables Zona Occidente

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	X	Y	
25																								
26		PLANTA	Fruer 164	Exito 170 1	Exito 170 2	Jumbo Zipaquira	CC Fontanar	Jumbo Santafé	Leroy Santafé	Homenaje 170	Albosto 170	Leroy Albosto 170	Jumbo 170	Leroy Jumbo 170	Fruer 137	Fruer 121	Torre Ar	Sentry Norte	Jumbo Bulevar	CC Bulevar	CC Bulevar 2	CC niza		
27	A	PLANTA																					0	0
28	B	Fruer 164																					0	0
29	C	Exito 170 1																					0	0
30	D	Exito 170 2																					0	0
31	E	Jumbo Zipaquira																					0	0
32	F	CC Fontanar																					0	0
33	G	Jumbo Santafé																					0	0
34	H	Leroy Santafé																					0	0
35	I	Homenaje 170																					0	0
36	J	Albosto 170																					0	0
37	K	Leroy Albosto 170																					0	0
38	L	Jumbo 170																					0	0
39	M	Leroy Jumbo 170																					0	0
40	N	Fruer 137																					0	0
41	O	Fruer 121																					0	0
42	P	Torre Ar																					0	0
43	Q	Sentry Norte																					0	0
44	R	Jumbo Bulevar																					0	0
45	S	CC Bulevar																					0	0
46	T	CC Bulevar 2																					0	0
47	U	CC niza																					0	0
48			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50																								

Nota: Elaboración propia

OpenSolver - Model

What is AutoModel? AutoModel

AutoModel is a feature of OpenSolver that tries to automatically determine the problem you are trying to optimise by observing the structure of the spreadsheet. It will turn its best guess into a Solver model, which you can then edit in this window.

Objective Cell: maximise minimise target value:

Variable Cells:

Constraints:

<Add new constraint>

\$C\$26:\$W\$47 bin

\$C\$26:\$W\$47 int

\$C\$49:\$W\$49 = 1

\$X\$49 = \$Y\$49

\$Y\$27:\$Y\$47 = 1

Make unconstrained variable cells non-negative

Show named ranges in constraint list

Sensitivity Analysis List sensitivity analysis on the same sheet with top left cell:

Output sensitivity analysis: updating any previous output sheet on a new sheet

Solver Engine: Current Solver Engine: CBC

Show model after saving

Figura 32 Parámetros en Open Solver Zona Norte
 Nota: Captura programa Excel

Tabla 28.
Primera tabla de variables Zona Norte

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y		
25		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U					
26		PLANTA	Fruver 164	Éxito 170 1	Éxito 170 2	Jumbo Zipaquira	CC Fontanar	Jumbo Santafé	Leroy Santafé	Homecenter 170	Alkosto 170	Leroy Alkosto 170	Jumbo 170	Leroy Jumbo 170	Fruver 137	Fruver 121	Torre Ar	Sentry Norte	Jumbo Bulevar	CC Bulevar	CC Bulevar 2	CC nica					
27	A	PLANTA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	
28	B	Fruver 164	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
29	C	Éxito 170 1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
30	D	Éxito 170 2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
31	E	Jumbo Zipaquira	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
32	F	CC Fontanar	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
33	G	Jumbo Santafé	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
34	H	Leroy Santafé	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
35	I	Homecenter 170	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
36	J	Alkosto 170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
37	K	Leroy Alkosto 170	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
38	L	Jumbo 170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
39	M	Leroy Jumbo 170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
40	N	Fruver 137	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
41	O	Fruver 121	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
42	P	Torre Ar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
43	Q	Sentry Norte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
44	R	Jumbo Bulevar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
45	S	CC Bulevar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1
46	T	CC Bulevar 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
47	U	CC nica	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
48			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20	72,9
49			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	21	21

Nota: Elaboración propia

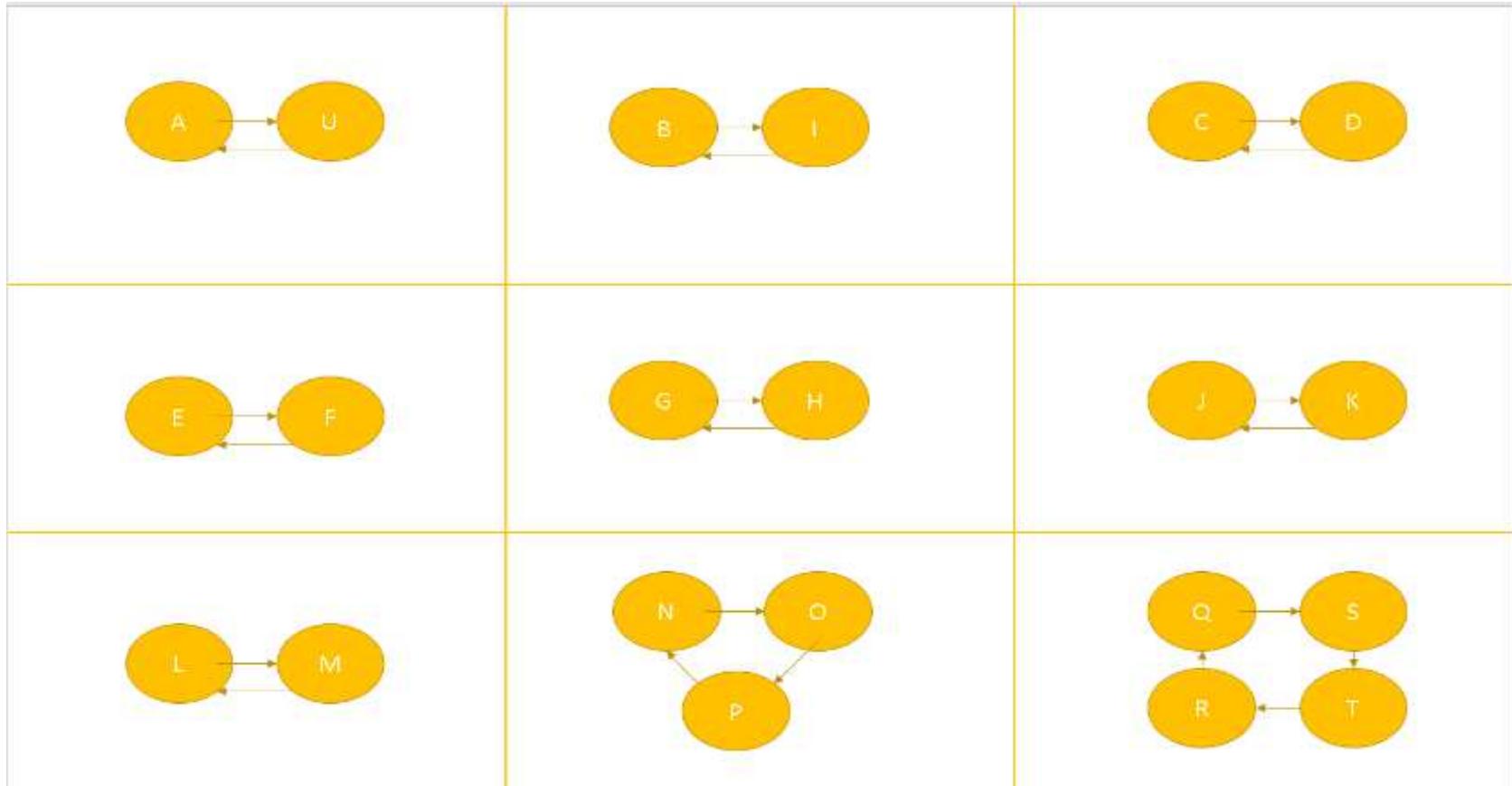


Figura 33 Subtours de la primera tabla de variables Zona Norte
Elaboración propia

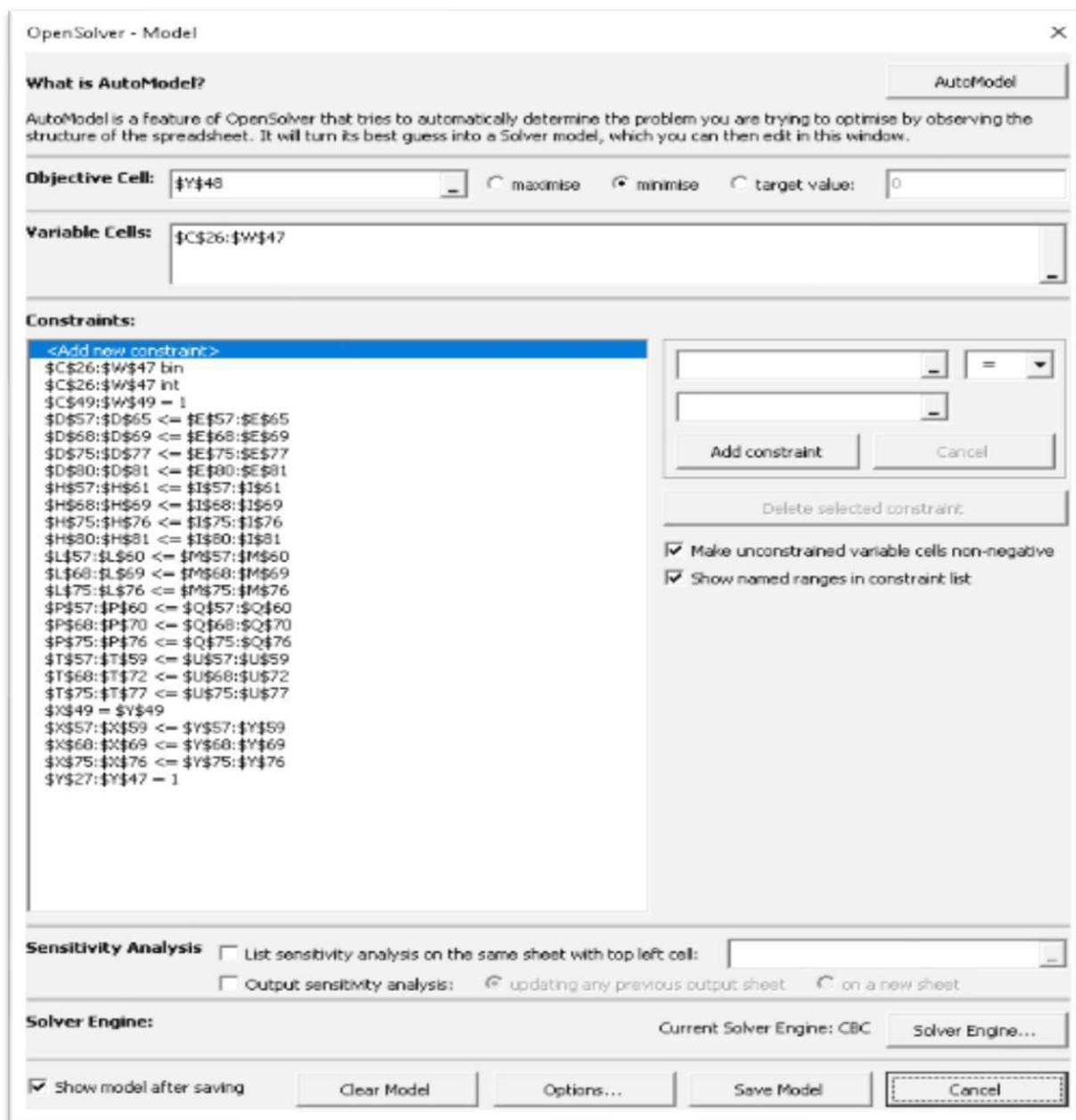


Figura 34 Nuevas restricciones Zona Norte en Open Solver

Nota: Captura programa Excel

En los [anexos](#) se especifican que nodos conforman cada subtour en el total de 20 iteraciones realizadas.

En la tabla 29 se muestra la matriz de celdas variables formando un tour que cumple con todas las restricciones del problema representado gráficamente en la figura 35, logrando un objetivo de

Tabla 29.
Matriz de celdas variables, resultados finales y sobtours generados Zona Norte

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	
		PLANTA	Fraser 164	Edto 170 1	Edto 170 2	Jumbo Zipaquirá	CC Fontanar	Jumbo Santafé	Leroy Santafé	Humescaler 170	Alkosto 170	Leroy Alkosto 170	Jumbo 170	Leroy Jumbo 170	Fraser 137	Fraser 121	Torre Ar	Sentry Norte	Jumbo Bulvar	CC bulvar	CC bulvar 2	CC niza				
25																										
26	A	PLANTA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
27	B	Fraser 164	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
28	C	Edto 170 1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
29	D	Edto 170 2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
30	E	Jumbo Zipaquirá	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
31	F	CC Fontanar	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
32	G	Jumbo Santafé	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
33	H	Leroy Santafé	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
34	I	Humescaler 170	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
35	J	Alkosto 170	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
36	K	Leroy Alkosto 170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
37	L	Jumbo 170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
38	M	Leroy Jumbo 170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
39	N	Fraser 137	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
40	O	Fraser 121	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
41	P	Torre Ar	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
42	Q	Sentry Norte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
43	R	Jumbo Bulvar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1
44	S	CC bulvar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
45	T	CC bulvar 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
46	U	CC niza	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
47			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	FO	11,85
48			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	FO	21,25
49																										
50																										
51		A	U	R	S	T	Q	M	L	K	J	I	H	G	E	F	D	C	B	N	O	P	A			
52		PLANTA	CC NIZA	JUMBO BULEVAR	CC BULEVAR	CC BULEVAR 2	SENTRY NORTE	LEROY JUMBO 170	JUMBO 170	LEROY AR 170	ALK 170	HOME 170	LEROY SANTA FE	JUMBO SANTAFE	JUMBO ZIPAQUIRA	CC FONTANAR	EDTO 170 2	EX 170 1	FRASER 164	FRASER 137	FRASER 121	TORRE AR	PLANTA			
53																										
54																										
55																										
56																										
57			1	Rest	Valor			2	Rest	Valor			3	Rest	Valor			4	Rest	Valor			5	Rest	Valor	
58			SubTour1	1	1			SubTour1	1	2			SubTour1	4	5			SubTour1	5	6			SubTour1	5	6	
59			SubTour2	0	1			SubTour2	7	7			SubTour2	4	7			SubTour2	1	7			SubTour2	4	11	
60			SubTour3	1	1			SubTour3	0	3			SubTour3	3	3			SubTour3	1	3			SubTour3	1	1	
61			SubTour4	1	1			SubTour4	0	2			SubTour4	2	2			SubTour4	1	1						
62			SubTour5	1	1			SubTour5	0	2																
63			SubTour6	1	1																					
64			SubTour7	1	1																					
65			SubTour8	2	2																					
66			SubTour9	1	3																					

Nota: Elaboración propia

11.2.5. Zona centro.

Tabla 30.

Parámetros puntos de origen y destino Zona Centro

<i>i = Puntos de origen</i>		<i>j = Puntos de destino</i>	
<i>i = (A, B, C, D, E, F ... Y)</i>		<i>j = (A, B, C, D, E, F ... Y)</i>	
A	Planta	A	Planta
B	Universidad Nacional	B	Universidad Nacional
C	Éxito Av Chile	C	Éxito Av Chile
D	U Santo Tomás	D	U Santo Tomás
E	Éxito 53-1	E	Éxito 53-1
F	Éxito 53-2	F	Éxito 53-2
G	Droguería 48	G	Droguería 48
H	San Martín	H	San Martín
I	Universidad de los Andes	I	Universidad de los Andes
J	Las Aguas	J	Las Aguas
K	Centro Dian	K	Centro Dian
L	Candelaria	L	Candelaria
M	Manzana 12	M	Manzana 12
N	CC Calima	N	CC Calima
O	Jumbo Cr 30	O	Jumbo Cr 30
P	Leroy Jumbo Cr 30	P	Leroy Jumbo Cr 30
Q	Alkosto Cr 30	Q	Alkosto Cr 30
R	Leroy Alkosto Cr 30	R	Leroy Alkosto 30
S	EDS 30	S	EDS 30
T	Éxito Villamayor	T	Éxito Villamayor
U	Centro Mayor	U	Centro Mayor
V	Easy Centro Mayor	V	Easy Centro Mayor
W	Éxito Tunal	W	Éxito Tunal
X	Éxito Usme	X	Éxito Usme
Y	Metro 20 de Julio	Y	Metro 20 de Julio

Nota: Elaboración propia

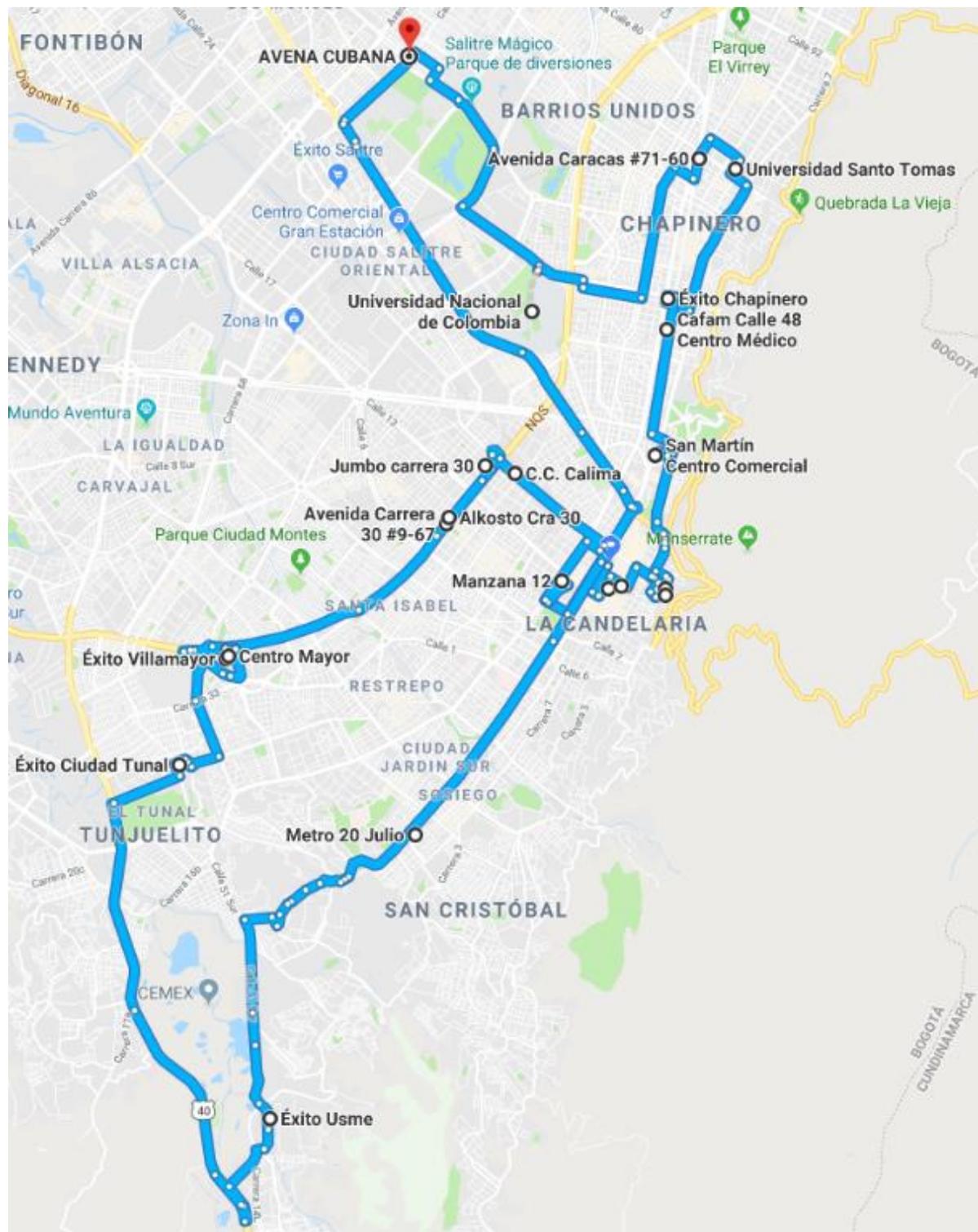


Figura 36 Recorrido realizado actualmente Zona Norte
 Nota Elaboración propia utilizando la herramienta de Google Maps

Tabla 31.
Matriz de parámetros de distancia entre puntos zona centro

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA
1	Zona Centro	PLANTA	U nacional	Éxito Av Chile	U santo Tomas	Éxito 53 1	Éxito 53 2	Droguería 48	San martin	Uni Andes	Las aguas	Centro Dian	Candelaria	Manzana 12	CC calima	Jumbo CR 30	Leroy Jumbo 30	Alkosto 30	Leroy Aik 30	Eds 30	Éxito villa mayor	Centro Mayor	Easy centro mayor	Éxito tunal	Éxito usme	Metro 20 de julio	
2	PLANTA	3999,0	4,7	6,4	7,1	6,8	6,8	7,0	9,2	10,6	10,9	10,2	10,3	12,3	9,8	8,0	8,0	8,9	8,9	3,0	13,1	13,4	13,4	13,6	20,9	14,8	
3	U nacional	4,7	3999,0	5,1	5,4	3,9	3,9	4,1	5,3	7,3	7,5	7,7	7,6	8,9	5,1	5,9	5,9	6,2	6,2	7,1	10,2	9,5	9,5	11,5	16,4	11,7	
4	Éxito Av Chile	6,4	3,9	3999,0	1,2	2,1	2,1	3,0	5,0	7,1	7,3	7,5	7,3	7,6	6,2	7,3	7,3	8,2	8,2	8,4	11,4	12,2	12,2	13,9	17,7	11,4	
5	U santo Tomas	7,1	4,6	1,0	3999,0	2,8	2,8	3,3	5,5	9,0	9,2	8,2	8,0	8,3	8,6	8,5	8,5	10,3	10,3	10,7	12,7	14,2	14,2	16,1	18,4	12,1	
6	Éxito 53 1	6,8	2,0	2,9	2,9	3999,0	0,0	0,9	2,8	4,9	5,1	5,4	5,1	5,4	4,6	5,4	5,4	6,4	6,4	6,7	9,5	10,3	10,3	12,0	15,5	9,3	
7	Éxito 53 2	6,8	2,0	2,9	2,9	0,0	3999,0	0,9	2,8	4,9	5,1	5,4	5,1	5,4	4,6	5,4	5,4	6,4	6,4	6,7	9,5	10,3	10,3	12,0	15,5	9,3	
8	Droguería 48	7,1	2,6	3,1	3,0	0,6	0,6	3999,0	2,5	4,9	5,1	5,3	5,0	5,4	4,7	5,7	5,7	6,7	6,7	6,8	9,9	10,3	10,3	12,1	15,5	9,3	
9	San martin	9,9	4,6	5,9	5,5	2,9	2,9	2,3	3999,0	2,6	2,8	3,0	2,7	3,9	4,6	4,3	4,3	6,2	6,2	5,7	8,9	9,6	9,6	10,5	14,0	6,7	
10	Uni Andes	10,6	6,0	8,2	7,6	5,2	5,2	5,1	2,7	3999,0	0,8	1,0	1,9	3,3	5,1	3,7	3,7	5,1	5,1	5,6	8,5	9,2	9,2	10,0	12,7	6,2	
11	Las aguas	10,9	6,2	8,5	7,9	5,5	5,5	5,4	3,0	0,3	3999,0	0,8	1,7	3,6	5,3	3,9	3,9	5,4	5,4	5,4	8,1	8,8	8,8	9,6	12,3	6,0	
12	Centro Dian	10,2	5,8	8,1	7,4	5,2	5,2	4,3	2,4	1,1	1,3	3999,0	1,4	2,9	4,1	3,3	3,3	4,7	4,7	4,9	8,0	8,6	8,6	9,5	12,2	5,8	
13	Candelaria	10,2	5,8	7,5	7,1	4,9	4,9	4,2	2,8	1,5	1,7	0,4	3999,0	2,7	4,0	3,1	3,1	4,5	4,5	5,0	7,8	8,5	8,5	9,4	12,8	5,7	
14	Manzana 12	11,3	6,9	8,6	8,1	5,9	5,9	5,3	4,4	3,1	3,3	2,9	2,6	3999,0	5,1	4,1	4,1	3,3	3,3	3,2	6,0	6,7	6,7	7,6	11,1	4,8	
15	CC calima	9,9	4,4	7,9	7,8	5,4	5,4	4,8	4,1	2,9	3,1	3,2	2,8	3,7	3999,0	1,5	1,5	2,1	2,1	2,5	5,5	6,2	6,2	8,1	12,8	6,9	
16	Jumbo CR 30	8,0	3,6	7,3	7,3	5,3	5,3	4,2	5,0	3,8	4,0	4,2	3,7	4,6	0,9	3999,0	0,0	3,0	3,0	3,4	6,2	6,9	6,9	8,7	13,4	8,5	
17	Leroy Jumbo 30	8,0	3,6	7,3	7,3	5,3	5,3	4,2	5,0	3,8	4,0	4,2	3,7	4,6	0,9	0,0	3999,0	3,0	3,0	3,4	6,2	6,9	6,9	8,7	13,4	8,5	
18	Alkosto 30	8,9	4,5	8,2	8,2	6,2	6,2	5,1	6,0	4,8	5,0	5,2	4,7	5,0	1,8	1,0	1,0	3999,0	0,0	0,9	5,6	6,3	6,3	8,3	13,2	8,0	
19	Leroy Aik 30	8,9	4,5	8,2	8,2	6,2	6,2	5,1	6,0	4,8	5,0	5,2	4,7	5,0	1,8	1,0	1,0	0,0	3999,0	0,9	5,6	6,3	6,3	8,3	13,2	8,0	
20	Eds 30	9,0	4,6	8,3	8,3	6,3	6,3	5,2	7,3	4,9	5,1	5,3	4,8	5,0	1,9	1,0	1,0	0,1	0,1	3999,0	5,7	6,4	6,4	8,4	13,3	8,1	
21	Éxito villa mayor	12,2	10,0	13,7	13,7	11,7	11,7	10,5	11,4	9,6	9,8	9,0	8,6	7,8	7,3	6,4	6,4	5,4	5,4	5,4	3999,0	1,4	1,4	3,4	8,3	5,7	
22	Centro Mayor	11,5	8,8	12,5	12,4	10,5	10,5	9,3	9,7	8,3	8,5	9,0	7,3	6,5	6,1	5,2	5,2	4,2	4,2	4,2	0,2	3999,0	0,0	2,8	7,8	4,4	
23	Easy centro mayor	11,5	8,8	12,5	12,4	10,5	10,5	9,3	9,7	8,3	8,5	8,2	7,3	6,5	6,1	5,2	5,2	4,2	4,2	4,2	0,2	0,0	3999,0	2,8	7,8	4,4	
24	Éxito tunal	13,5	11,0	14,7	14,7	12,7	12,7	11,6	18,4	9,5	9,7	9,4	8,9	8,3	8,3	7,4	7,4	6,5	6,5	6,4	4,6	2,4	2,4	3999,0	6,1	4,9	
25	Éxito usme	20,8	16,9	20,7	20,7	18,7	18,7	16,2	16,2	14,4	14,6	13,1	13,2	12,4	22,0	13,3	13,3	12,3	12,3	12,2	9,4	8,6	8,6	7,3	3999,0	8,2	
26	Metro 20 de julio	14,8	10,4	12,8	11,6	9,6	9,6	8,8	7,8	6,6	6,3	5,5	5,3	5,1	8,5	7,6	7,6	6,7	6,7	6,6	5,5	5,5	5,5	5,1	6,3	3999,0	

Nota: Elaboración propia con información obtenida de Natural Food SAS

Tabla 32.
Matriz de las celdas variables Zona Centro

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC			
28			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y					
29			PLANTA	U nacional	Éxito AV chile	U santo Tomas	Éxito 53 1	Éxito 53 2	Droguería 48	San martin	Uni Andes	Las aguas	Centro Dian	Candelaria	Manzana 12	CC calima	Jumbo CR 30	Leroy Jumbo 30	Alkosto 30	Leroy Alk 30	Eds 30	Éxito villa mayor	Centro Mayor	Easy centro mayor	Éxito tunal	Éxito usme	Metro 20 de julio					
30	A	PLANTA																											0	0		
31	B	U nacional																												0	0	
32	C	Éxito Av chile																												0	0	
33	D	U santo Tomas																												0	0	
34	E	Éxito 53 1																												0	0	
35	F	Éxito 53 2																												0	0	
36	G	Droguería 48																												0	0	
37	H	San martin																												0	0	
38	I	Uni Andes																												0	0	
39	J	Las aguas																												0	0	
40	K	Centro Dian																												0	0	
41	L	Candelaria																												0	0	
42	M	Manzana 12																												0	0	
43	N	CC calima																												0	0	
44	O	Jumbo CR 30																												0	0	
45	P	Leroy Jumbo 30																												0	0	
46	Q	Alkosto 30																												0	0	
47	R	Leroy Alk 30																												0	0	
48	S	Eds 30																												0	0	
49	T	Éxito villa mayor																												0	0	
50	U	Centro Mayor																												0	0	
51	V	Easy centro mayor																												0	0	
52	W	Éxito tunal																												0	0	
53	X	Éxito usme																												0	0	
54	Y	Metro 20 de julio																												0	0	
55			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	FO	0		
56			1=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	=	0

Nota: Elaboración Propia

OpenSolver - Model X

What is AutoModel? AutoModel

AutoModel is a feature of OpenSolver that tries to automatically determine the problem you are trying to optimise by observing the structure of the spreadsheet. It will turn its best guess into a Solver model, which you can then edit in this window.

Objective Cell: maximise minimise target value:

Variable Cells:

Constraints:

<Add new constraint>

\$AB\$56 = \$AC\$56

\$AC\$30:\$AC\$54 = 1

\$C\$30:\$AA\$54 bin

\$C\$30:\$AA\$54 int

\$C\$56:\$AA\$56 = 1

=

Add constraint Cancel

Delete selected constraint

Make unconstrained variable cells non-negative

Show named ranges in constraint list

Sensitivity Analysis List sensitivity analysis on the same sheet with top left cell:

Output sensitivity analysis: updating any previous output sheet on a new sheet

Solver Engine: Current Solver Engine: CBC Solver Engine...

Show model after saving Clear Model Options... Save Model Cancel

Figura 37 Modelo inicial presentado en OpenSolver.
Captura de programa Excel

Tabla 33.
Primera iteración para el modelo de la zona Centro.

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y			
		PLANTA	U nacional	Éxito Av Chile	U santo Tomas	Éxito 53 1	Éxito 53 2	Droguería 48	San martin	Uni Andes	Las aguas	Centro Dian	Candelaria	Manzana 12	CC calima	Jumbo CR 30	Leroy Jumbo 30	Alkosto 30	Leroy Alk 30	Eds 30	Éxito villa mayor	Centro Mayor	Easy centro mayor	Éxito tunai	Éxito usme	Metro 20 de julio			
29																													
30	A	PLANTA	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
31	B	Unacional	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
32	C	Éxito Av Chile	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
33	D	U santo Tomas	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
34	E	Éxito 53 1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
35	F	Éxito 53 2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
36	G	Droguería 48	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
37	H	San martin	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
38	I	Uni Andes	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
39	J	Las aguas	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
40	K	Centro Dian	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
41	L	Candelaria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
42	M	Manzana 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
43	N	CC calima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
44	O	Jumbo CR 30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
45	P	Leroy Jumbo 30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
46	Q	Alkosto 30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
47	R	Leroy Alk 30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
48	S	Eds 30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
49	T	Éxito villa mayor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
50	U	Centro Mayor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
51	V	Easy centro mayor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
52	W	Éxito tunai	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
53	X	Éxito usme	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
54	Y	Metro 20 de julio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
55			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	FO	46,793
56			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	25	25

Nota: Elaboración propia

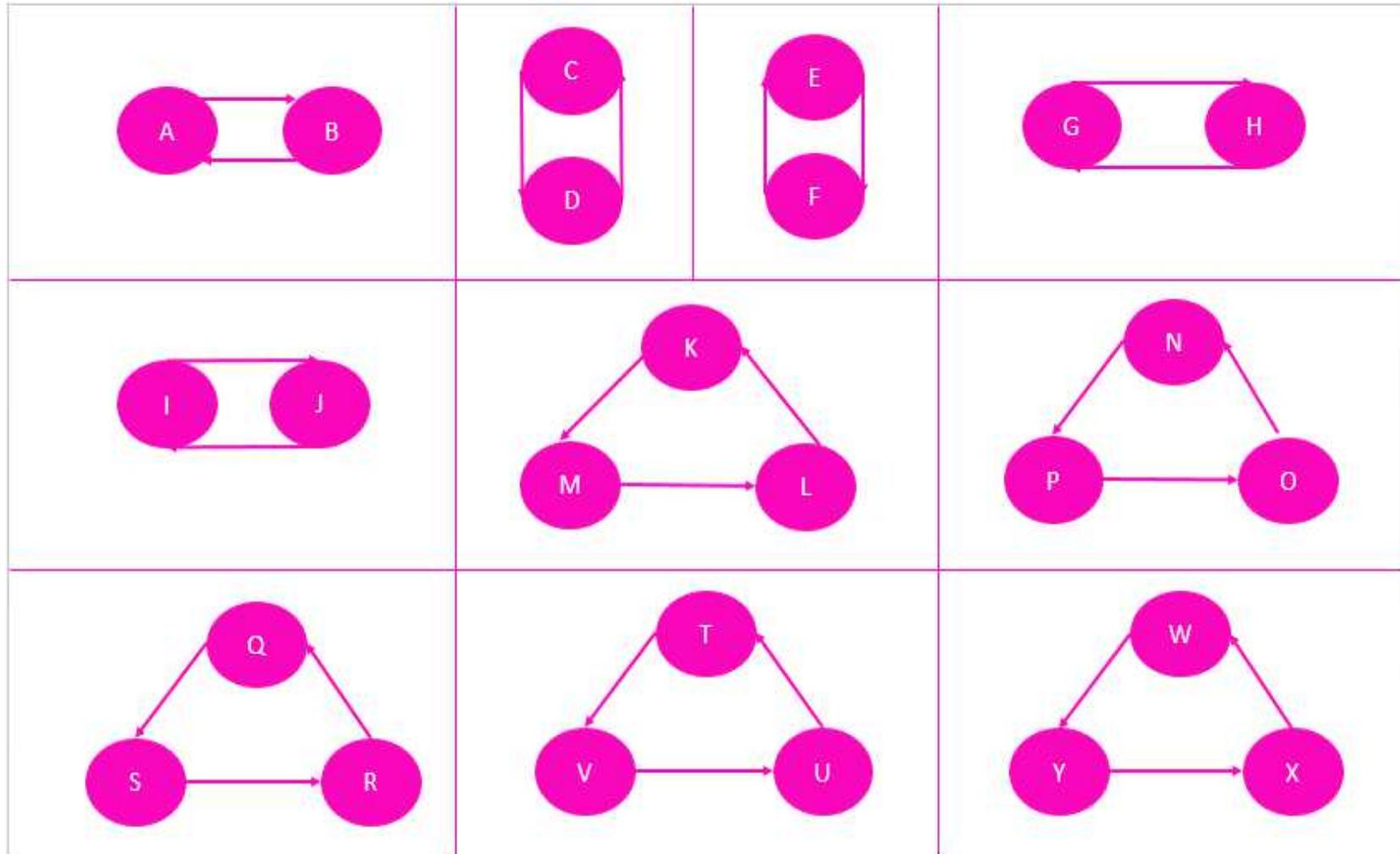


Figura 38 Sub tours luego de la primera iteración Zona Centro
Elaboración propia

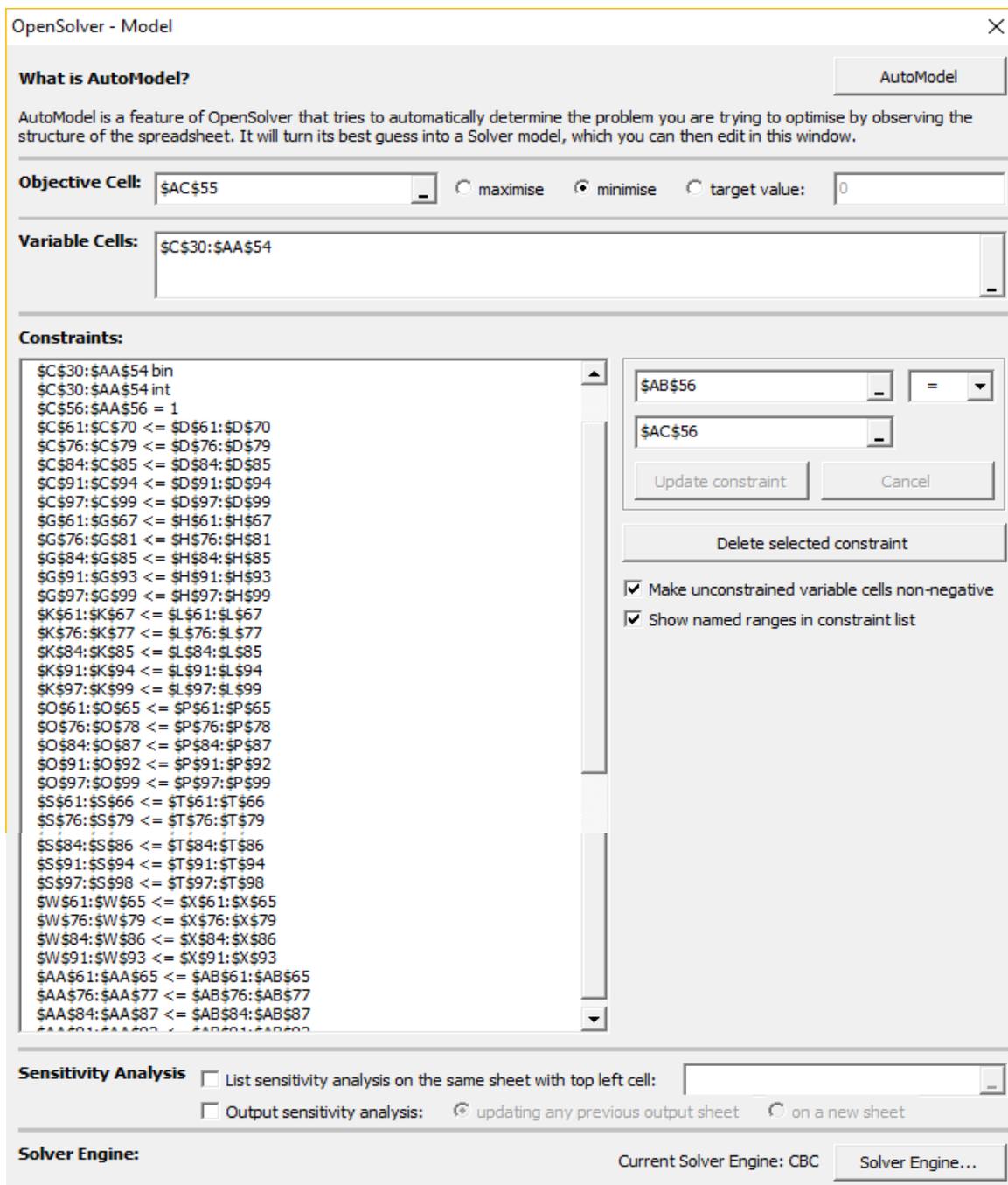


Figura 39 Modelo óptimo en Open Solver Zona Centro (iteración 34)
Imagen tomada del programa Excel

En la figura 40 se puede apreciar el resultado luego de las 34 iteraciones que requirió el problema para encontrar una solución óptima, cada nueva iteración requería que fuera agregada una restricción que evitara que estos sub tour volvieran a ser tomados dentro de la búsqueda de la solución. (Ver [anexos](#))

Tabla 34.
Tabla de variables de decisión para a solución óptima.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	
	PLANTA	Unacional	Éxito Av chile	U santo Tomas	Éxito 53 1	Éxito 53 2	Droguería 48	San martin	Uní Andes	Las aguas	Centro Dian	Candelaria	Manzana 12	CC calima	Jumbo CR 30	Leroy Jumbo 30	Alkocto 30	Leroy Alk 30	Eds 30	Éxito villa mayor	Centro Mayor	Easy centro	Éxito tunal	Éxito usme	Metro 20 de julio	
A	PLANTA	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
B	Unacional	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
C	Éxito Av chile	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
D	U santo Tomas	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
E	Éxito 53 1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
F	Éxito 53 2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
G	Droguería 48	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
H	San martin	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
I	Uní Andes	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
J	Las aguas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
K	Centro Dian	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
L	Candelaria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M	Manzana 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
N	CC calima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
O	Jumbo CR 30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
P	Leroy Jumbo 30	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Q	Alkocto 30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
R	Leroy Alk 30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S	Eds 30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
T	Éxito villa mayor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
U	Centro Mayor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
V	Easy centro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
W	Éxito tunal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
X	Éxito usme	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Y	Metro 20 de julio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	FO
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	59,643
	PLANTA	SANTO TOMAS	EX AV CHILE	ÉXITO 51-1	ÉXITO 53-2	DROGUE RIA 48	SAN MARTÍN	CANDELA RIA	CENTRO DIAN	LAS AGUAS	UNI ANDES	MANZANA 12	METRO 20 JULIO	EX USME	EX TUNAL	CENTRO MAYOR	EASY C MAYOR	EX VILLAMA YOR	EDS 30	ALK 30	LEROY ALK 30	JUMBO 30	LEROY JUMBO 30	CC CALIMA	UNACIONAL	PLANTA

Nota: Elaboración Propia

Cuando en un problema de TSP se obtiene una solución óptima se procede a marcar la única ruta que se deberá seguir con el fin de alcanzar las distancias relacionados en la función objetivo del problema, en la zona centro se obtuvo una solución óptima en la iteración 34, en donde se logró obtener una única ruta con origen principal y con destino final de llegada a la Planta de Natural Food SAS, además de cumplir con las restricciones fundamentales del problema, una única visita a cada punto de venta dentro del recorrido planteado, dando como resultado un recorrido total de 59,64 Km para dicha zona.

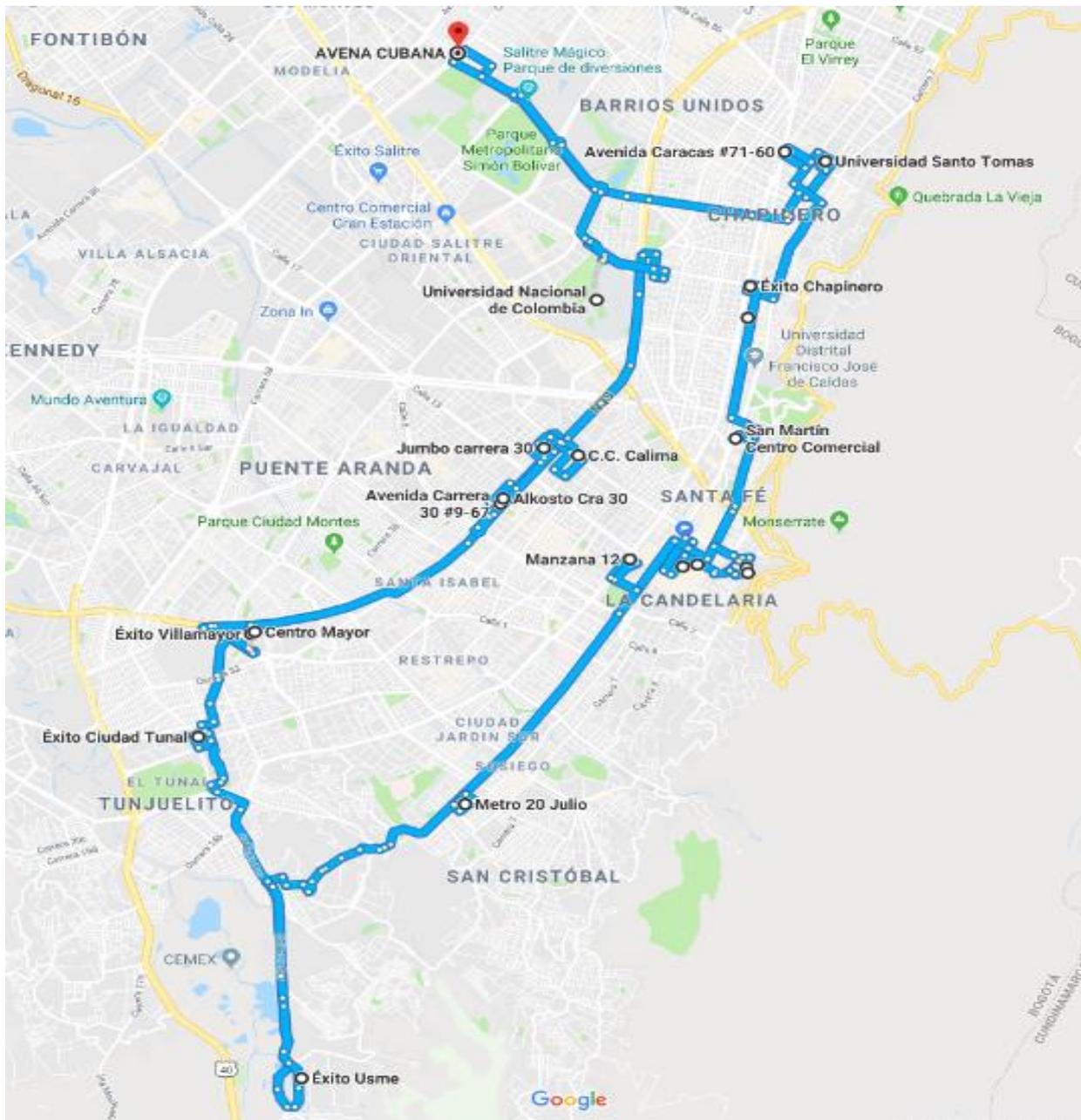


Figura 40 Recorrido arrojado por el modelo matemático Zona Centro
Nota Elaboración propia utilizando la herramienta de Google Maps

En la figura 40 se representa gráficamente el recorrido el cual cumple con las condiciones de:

- El vehículo debe pasar por todos los nodos una sola vez
- El vehículo debe regresar al punto A que en este caso es la planta
- Una única ruta
- La ruta que represente menor distancia

12. Validación y resultados

Se llegó a una de las soluciones óptimas en cada una de las zonas; luego realizar las iteraciones, (ver tabla 35) se muestran el total de iteraciones presentadas por cada una de las zonas. Cabe resaltar que los resultados obtenidos con la aplicación del modelo del agente viajero (TSP) disminuyeron las distancias por recorrido en cada una de las zonas.

Tabla 35.

Iteraciones realizadas en cada una de las zonas

Zona	# Iteraciones
Norte	21
Noroccidente	18
Sur	6
Centro	34
Occidente	46
Total	125

Nota: Elaboración propia

Luego de la ejecución del modelo y de su posterior validación; es posible afirmar que este se adapta a las necesidades de la empresa Natural Food SAS, por ello se presentan los siguientes resultados:

12.1. Resultados en función de la distancia

En todos los recorridos se obtuvieron resultados positivos, algunos son más representativos que otros. Se construyó una tabla en donde se especifican los resultados por zona; entre el método utilizado actualmente y el modelo matemático. Conviene subrayar que los recorridos Noroccidente y Occidente obtuvieron mayor peso porcentual, en vista de que fueron las rutas donde se disminuyó mayor distancia, dado que la reducción fue entre 15 y 22 kilómetros. (Ver tabla 35)

Tabla 36.

Relación de distancias totales entre el método utilizado y el modelo

RESUMEN DE DISTANCIAS				
RECORRIDO	DISTANCIA (KM)	DISTANCIA - MODELO (KM)	REDUCCIÓN (KM)	%
NORTE	128	111,85	16,15	12,6%
OCCIDENTE	53,4	37,44	15,96	29,9%
SUR	65,5	63,65	1,85	2,8%
CENTRO	71,5	59,64	11,86	16,6%
NOROCCIDENTE	55,2	43,53	22,37	33,9%
TOTAL	384,3	316,11	68,19	

Nota: Elaboración propia con información obtenida de Natural Food SAS

La reducción de 68,19 kilómetros puede ser expresada como una reducción diaria (los recorridos se realizan de lunes a sábado). Por lo tanto, la reducción mensual es de 1636 kilómetros. Cabe señalar que dicha reducción es favorable, teniendo en cuenta que son rutas rurales; en donde las distancias a recorrer no son considerablemente extensas.

El recorrido total por las 5 rutas en un día normal es de 384,3 kilómetros, con el modelo matemático este se reduce a 316,11 kilómetros, llegando a tener una reducción del 17,7 % diario.

Para simplificar lo dicho anteriormente, en la figura 41 se representa gráficamente la disminución por zona.

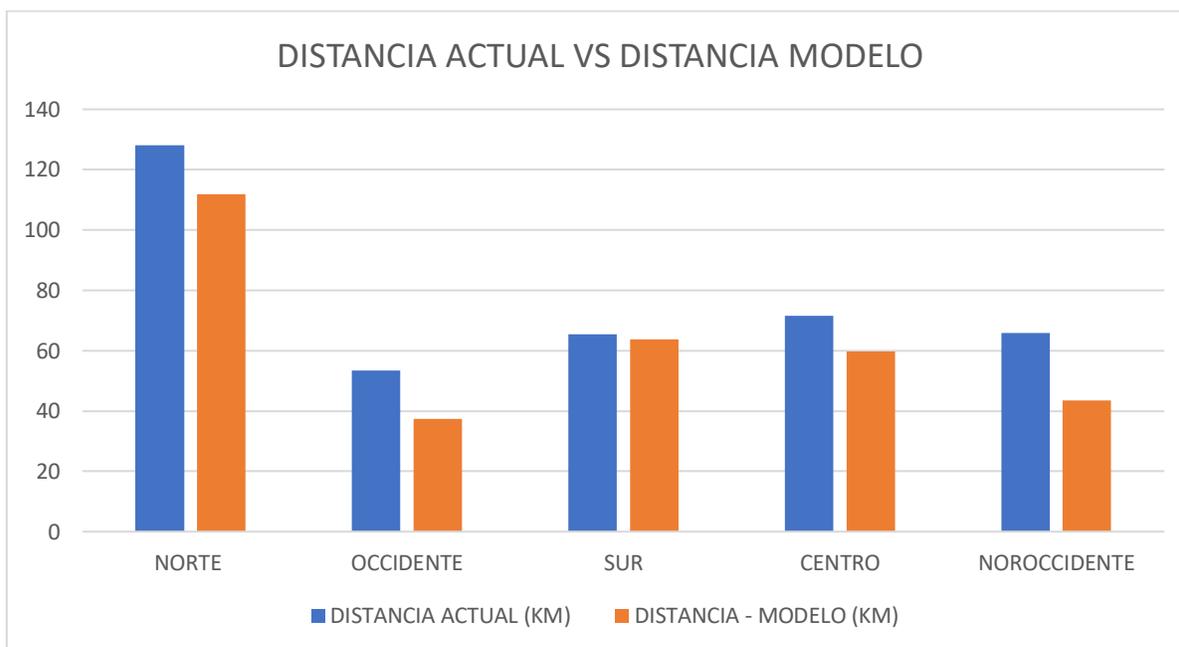


Figura 41 Reducciones obtenidas en función de la distancia luego de la aplicación del modelo TSP.

Elaboración propia

12.2. Resultados en función de costos

El costo variable fue calculado teniendo en cuenta todos los costos que varían según el uso que se le dé al vehículo. Estos costos fueron calculados en función de la distancia recorrida por vehículo.

El costo promedio por kilómetro que implica la utilización de los vehículos fue calculado en \$635,22 pesos, por lo tanto, la reducción en distancia se representa directamente en el costo. (Ver tabla 37). El costo mensual que se logra reducir según los resultados del modelo, sumando todas las zonas es de \$1.169.517 pesos es decir que anualmente se reducirían alrededor de \$14.034.204 millones.

Tabla 37.
Costos variables por mes- reducción

RUTA	Costo actual	Costo propuesto	Reducción (\$)	%
Norte	\$ 2.195.310	\$ 1.918.324	\$ 276.986	12,6%
Occidente	\$ 915.856	\$ 642.128	\$ 273.728	29,9%
Sur	\$ 1.123.381	\$ 1.091.652	\$ 31.729	2,8%
Centro	\$ 1.226.287	\$ 1.022.877	\$ 203.409	16,6%
Noroccidente	\$ 1.130.242	\$ 746.577	\$ 383.665	33,9%
Total	\$ 6.591.076	\$ 5.421.559	\$ 1.169.517	95,9%

Nota: Elaboración propia con información de Natural Food SAS

En el periodo de un mes se propone la disminución de los costos logísticos en \$1.169.517 pesos, lo cual puede representar de igual forma una reducción del 16%, agregando a esto mejor administración de los procesos de distribución y permitiendo un transporte eficiente y eficaz.

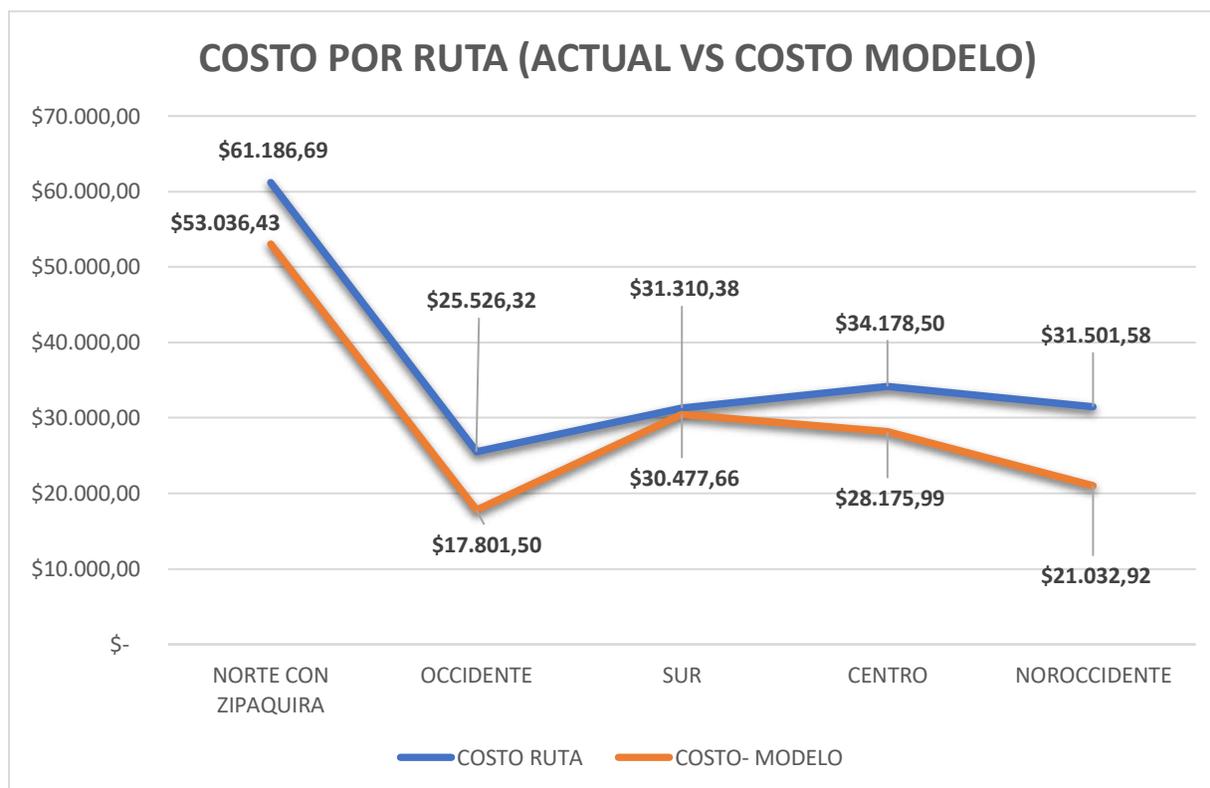


Figura 42 Reducción obtenida en función del costo variable un recorrido realizado.
Elaboración propia

La figura 42 resume en una gráfica de los costos variables reducidos con respecto al modelo utilizado actualmente; en donde la zona noroccidente logra reducir más de diez mil pesos por un solo recorrido, en cambio la zona sur, tiene un buen funcionamiento actual y se logra bajar a un monto de \$884 pesos por cada recorrido, pero es muy importante decir que no solo es beneficioso

el margen de ahorro que se está proponiendo implica menor distancia recorrida por los vehículos, un buen manejo permitirá que su vida útil se prolongue y den un mejor servicio a la empresa. Se está hablando de un ahorro en kilómetros recorridos por los vehículos de la compañía que llega a ser de más de 110.000 kilómetros / años, siendo esto en un promedio de más de 20.000 kilómetros por cada vehículo al año.

12.3. Cambios presentados en el flujo de los recorridos

A continuación, se mostrará por medio de los mapas de cada zona, cómo cambió el curso y flujo de las rutas, todo esto luego de la aplicación del modelo.

La visualización de estos mapas permite identificar de una forma fácil y rápida cómo cambia cada recorrido, y además muestra al lector la necesidad de la aplicación del ya evaluado modelo diseñado para la empresa Natural Food SAS.

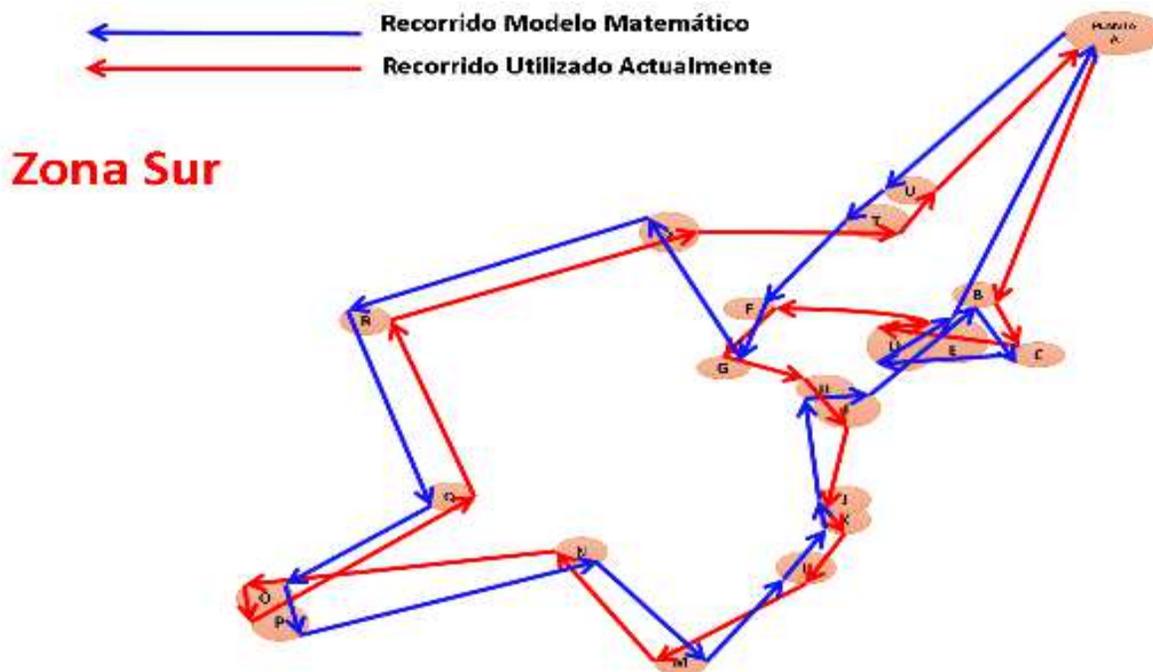


Figura 43 Gráfico comparativo entre el método utilizado actualmente en la empresa y resultado del modelo matemático (Zona Sur)

Elaboración propia

Zona Occidente

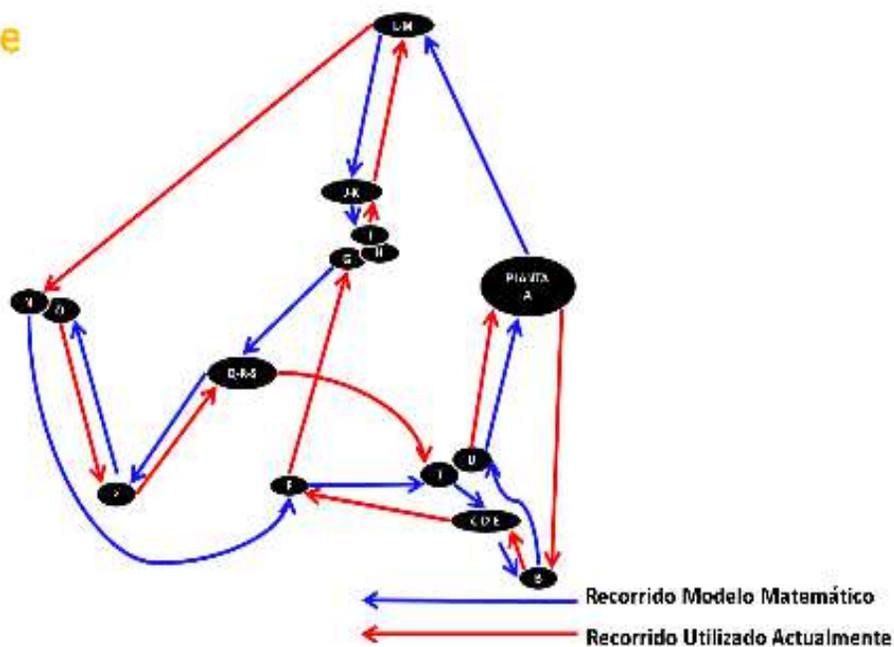


Figura 44 Gráfico comparativo entre el método utilizado actualmente en la empresa y resultado del modelo matemático (Zona Occidente)

Elaboración propia

Zona Noroccidente

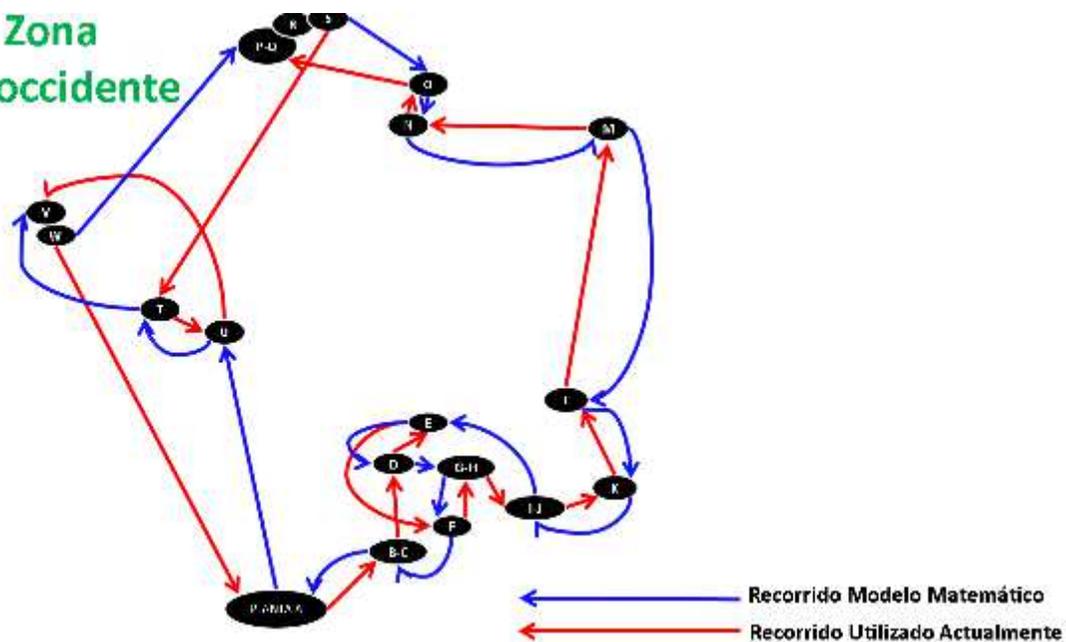


Figura 45 Gráfico comparativo entre el método utilizado actualmente en la empresa y resultado del modelo matemático (Zona Noroccidente)

Elaboración propia

Zona Norte

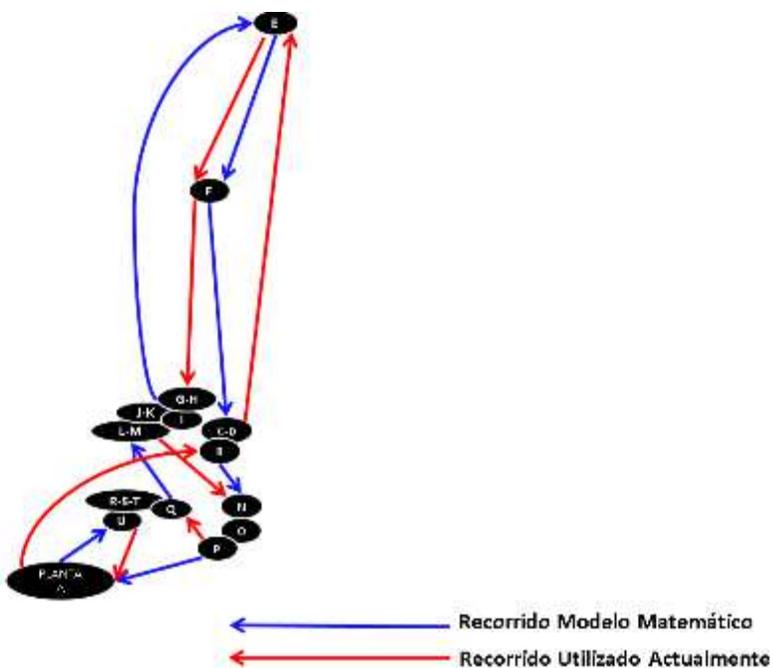


Figura 46 Gráfico comparativo entre el método utilizado actualmente en la empresa y resultado del modelo matemático (Zona Norte)
Elaboración propia

Zona Centro

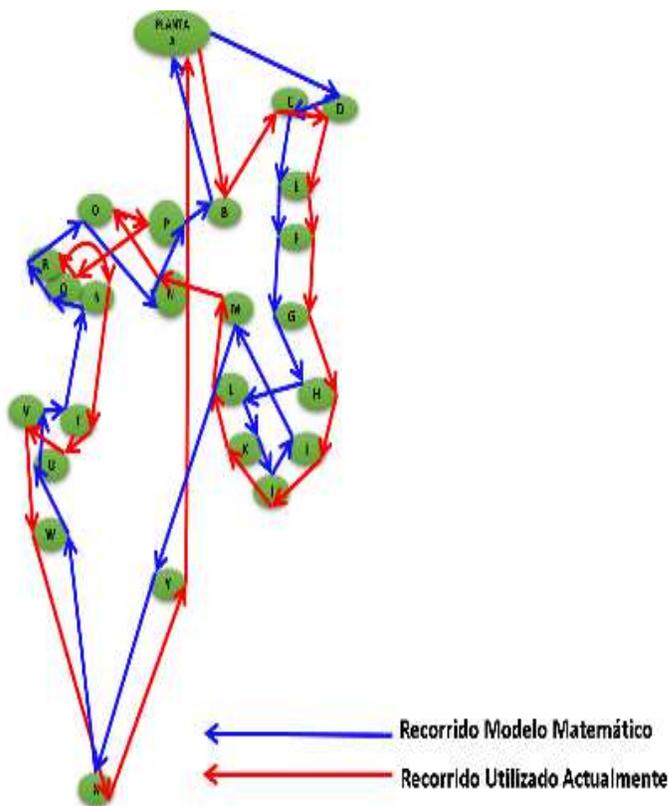


Figura 47 Gráfico comparativo entre el método utilizado actualmente en la empresa y resultado del modelo matemático (Zona Centro)

Elaboración propia

Cada zona tuvo cambios particulares en el recorrido, algunos de los cambios más evidentes; fue el sentido en el que se realiza, ya que en zonas como la sur, noroccidente y occidente el primer punto en ser visitado pasó a ser el último del recorrido debido a que el modelo determinó que cambiar el sentido de recorrido de la ruta permite una reducción en las distancias.

Otro cambio que fue determinante en la minimización de las distancias fue el cambio en la secuencia de las visitas, en todas las zonas se cambió este orden creando la necesidad de una reestructuración de los recorridos que fue planteada en los resultados anteriormente expuestos.

13. Análisis de sensibilidad

En el momento en que se identifica un problema, y posteriormente se le da solución, se puede llegar a pensar que se ha terminado, pero falta una etapa fundamental del proceso, esta es la validación del modelo, este proceso permitirá afirmar que el modelo utilizado es el correcto, que los resultados obtenidos son fiables y que la alteración en sus variables de entrada no desacreditaran el modelo sino por el contrario este hallará una nueva solución óptima, (Taha, 2012, pág. 10) Afirma que es “un aspecto importante de la fase de solución del modelo”, esta actividad obliga a obtener información y modificarla para identificar el comportamiento de la solución óptima.

Se realizó un análisis de sensibilidad para el modelo TSP el cual permite evaluar la factibilidad del mismo. En la empresa Natural Food SAS se tomaron en cuenta posibles situaciones que en el día a día pueden llegar a afectar la operación de los vehículos, estas situaciones son:

- Cuando un punto no requiere producto o es cerrado de forma definitiva; debe ser eliminado del recorrido actual con el fin de que no se haga parte de la ruta.
- Si un punto de venta tiene una venta irregularmente alta puede llegar a amanecer con muy poca materia prima para el siguiente día, por lo tanto, se debe dar prioridad de visitar a este punto en primer lugar.
- En algunas ocasiones se requiere llevar algún producto de un punto a otro específicamente, por lo que es necesario restringir el modelo para que la ruta salga de un punto X a un punto Y sin tener en cuenta la distancia.

Todos estos escenarios presentados anteriormente son situaciones comunes en el entorno de la compañía; por tal motivo se decidió realizar el análisis de sensibilidad tratando de mantener el modelo aterrizado y que siga siendo de utilidad para la empresa.

Para la ejecución del análisis de sensibilidad se utilizó una sola zona dado que el tamaño del modelo y la similitud en las zonas permiten que los resultados positivos o negativos se repliquen, en esta oportunidad la zona noroccidente, será utilizada para validar el funcionamiento bajo los parámetros de funcionamiento en la empresa.

13.1. Aplicación del análisis de sensibilidad

La zona noroccidente está compuesta por 22 puntos de venta, por lo tanto, tiene 23 nodos incluyendo la planta. Luego de ejecutar el modelo esta zona presentó una solución óptima donde

visitaba todos los puntos una vez, además de cumplir con la restricción que obliga a que sea un solo recorrido y que este inicie en la planta y finalice en la misma (Ver figura 48).



Figura 48 Ruta óptima Zona Noroccidente

Nota Elaboración propia

Con el fin de hacer la validación se procederá a aplicar algunas novedades habituales, dichas novedades son:

- Dos puntos de ventas han cerrado, y por lo tanto dejarán de hacer parte del recorrido de la zona noroccidente.
- El punto de Éxito Occidente amanece con muy poco producto y por lo tanto se requiere que el carro de reparto visite este punto en primer lugar.
- El vehículo de reparto debe visitar primero el punto de centro suba y luego el punto de centro histórico, esto se debe a que el conductor debe entregar producto horneado de un punto a otro

13.2. Modelado de las nuevas restricciones

A continuación, se dará una restricción nueva para cada una de situaciones que se expusieron anteriormente:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = A, B, \dots, W, \quad i \neq E, U \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = A, B, \dots, W, \quad j \neq E, U \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{Ej} = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{Uj} = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{iE} = 0 \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{iU} = 0 \quad (6)$$

$$X_{A,W} = 1 \quad (7)$$

$$X_{N,O} = 1 \quad (8)$$

En las restricciones (1) y (2) se restringe al modelo para que cada punto de venta sea visitado una sola vez, pero se exceptúan los 2 puntos de venta los cuales se determinaron como cerrados (E: Fruvar Pontevedra y U: Éxito Quiriguá).

En las restricciones (3), (4), (5) y (6) se restringe a los puntos de Fruvar Pontevedra y Éxito Quiriguá para evitar que alguno de estos PDV sea tomado como un origen o destino.

Finalmente, en la restricción (7) se obliga a que el primer punto en ser recorrido sea el éxito occidente sin importar la distancia, al igual que la restricción (8) que obliga a que sea tomada la ruta de Centro Suba hacia Centro Histórico de forma arbitraria.

13.3. Resultados del análisis de sensibilidad

Luego de ejecutar el modelo con las nuevas restricciones propuestas se obtiene el siguiente recorrido:

RECORRIDO FINAL	PLANTA	ÉXITO OCCIDENTE	PORTAL 80	EASY 80	ÉXITO 80	JUMBO SUBA	HOME SUBA	ÉXITO SUBA 2	ÉXITO SUBA 1	CENTRO SUBA	
CENTRO HISTORICO	ÉXITO COLINA	ILARCO	ISERAA 100	FLORESTA 2	FLORESTA 1	LEROY JUMBO 80	JUMBO 80	FRUVER 80	LEROY ALK 68	ALKOSTO 68	PLANTA

Figura 49 Nuevo recorrido zona Noroccidente – Post óptimo

En la figura 49 se puede apreciar el nuevo recorrido para la zona noroccidente, en el cual se identifica que no se visitan los puntos de Fruvar Pontevedra y Éxito Quiriguá, el primer punto en ser visitado es el punto Éxito occidente y del punto de centro suba el vehículo sale directamente al punto Centro Histórico. Todo esto gracias a la aplicación de las restricciones anteriormente señaladas. Esto quiere decir que el modelo está cumpliendo con las restricciones propuestas. Los cambios aplicados arrojaron un recorrido con un total de 44,15 km, logrando una reducción en 0.22 km.

Un detalle importante es que, aunque la reducción fue muy poca puesto que son dos puntos menos que se deben visitar, cabe recalcar que el primer punto a visitar (Éxito Occidente) es un punto intermedio de todos los posibles recorridos óptimos, por lo tanto, esta restricción fuerza al modelo a rediseñar la ruta desde cero.