

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

Diseño de una red de distribución de dos escalones, de un solo producto y multiperiodo con demanda estocástica, como un problema de optimización LIRP que se resuelve mediante una metaheurística híbrida.

Julio César Camacho Pinto

Trabajo de grado para optar por el título de Magíster en Ingeniería Industrial

Director
Javier Arias Osorio
Magíster en Administración

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de estudios Industriales y Empresariales
Maestría en Ingeniería Industrial
Bucaramanga
2018

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

Agradecimientos

A mis padres por heredarme el amor por la academia, a mis profesores por convertirse en mis modelos a seguir, a Cami por hacerme querer ser un mejor hombre, a Andrés y Adriana por su apoyo y a mis compañeros del grupo Opalo: Leonardo, Laura, Victor, David, Pedro y Elkin.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

Tabla de Contenido

Introducción	14
1. Justificación y planteamiento del problema	15
2. Hipótesis.....	16
2.1. Hipótesis 1:	16
2.2. Hipótesis 2:	16
3. Objetivos	17
3.1. Objetivo general.....	17
3.2. Objetivos específicos	17
4. Marco teórico	18
4.1. Logística.....	18
4.2. Cadena de suministro.....	18
4.3. Redes de distribución.....	18
4.4. EL problema de localización, ruteo e inventarios LIRP	20
4.5. Optimización matemática	22
5. Metodología	24
5.1. Fase 1: Definición del problema y recolección de datos	25
5.2. Fase 2: Formulación de un modelo matemático	25
5.3. Fase 3: Obtención de soluciones a partir del modelo	25
5.4. Fase 4: Prueba del modelo	26

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

6.	Revisión de la literatura.....	26
6.1.	Ecuación de búsqueda.....	27
6.2.	Análisis bibliométrico.....	28
6.3.	El problema de localización Ruteo e inventarios (LIRP)	30
6.4.	LIRP para una red de distribución de dos escalones.....	32
6.5.	LIRP para una red de distribución multiperiodo.....	34
6.6.	Discusión.....	35
7.	Formulación de los modelos matemáticos	36
7.1.	Características del modelo de red de distribución LIRP	36
7.2.	Modelo LIRP por fases	40
7.3.	Modelo LIRP integrado	45
8.	Obtención de soluciones a partir de los modelos	49
8.1.	Programación entera mixta (MIP)	50
8.2.	Algoritmo genético	53
8.3.	Algoritmo genético con vecino más cercano (LIRP por fases)	67
8.4.	Algoritmo genético con vecino más cercano (LIRP integrado).....	70
8.5.	Búsqueda tabú.....	71
8.6.	Metaheurística híbrida	79
9.	Prueba del modelo y resultados.....	84
9.1.	Prueba de la hipótesis 1.....	85

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

9.2.	Prueba de la hipótesis 2.....	89
10.	Discusión.....	94
11.	Conclusiones	95
	Bibliografía	98

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

Lista de Tablas

Tabla 1 Cantidad de citasiones por artículo.....	28
Tabla 2 Producción de artículos por países.....	29
Tabla 3 Cantidad de variables y restricciones para el conjunto Prodhon (2006).....	50
Tabla 4 Información contenida en los archivos .xls y .gdx.....	52
Tabla 5 Parámetros de ingreso al algoritmo.....	55
Tabla 6 Escenarios de parámetros del AG analizados	64
Tabla 7 Escenarios de parámetros de la BT analizados	76
Tabla 8 Tamaño de las instancias del conjunto Prodhon (2006)	85
Tabla 9 Resultados promedio de los modelos LIRP por fases e integrado.....	86
Tabla 10 Resultados experimento1	90
Tabla 11 Resultados promedio del experimento 2.....	91

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

Lista de Figuras

<i>Figura 1</i> Red de distribución de dos escalones	20
<i>Figura 2.</i> Etapas de un estudio de Investigación de Operaciones	25
<i>Figura 3</i> Fases de la revisión de literatura.....	26
<i>Figura 4</i> Artículos seleccionados de las bases de datos	27
<i>Figura 5</i> Aduna de trabajos colaborativos entre países.	30
<i>Figura 6.</i> Algoritmo MILP para modelo LIRP por fases	51
<i>Figura 7.</i> Algoritmo MILP para modelo LIRP integrado.....	52
<i>Figura 8.</i> Estructura del algoritmo genético	54
<i>Figura 9</i> Cromosoma de un individuo.....	56
<i>Figura 10</i> Estructura del cromosoma	57
<i>Figura 11</i> Cálculo de la función <i>fitness</i> de un individuo.....	58
<i>Figura 12</i> Costos de localización de un individuo	59
<i>Figura 13</i> Costos de ruteo en segundo escalón de un individuo, en un periodo	60
<i>Figura 14</i> Costos de inventarios de CD's de un individuo	61
<i>Figura 15</i> Generación de dos hijos a través del cruce de dos padres	63
<i>Figura 16.</i> Tabla resumen de regresión múltiple para el tiempo de cómputo del AG	65
<i>Figura 17</i> Tabla resumen de regresión múltiple para Z, del AG.....	66
<i>Figura 18</i> Estructura del algoritmo.....	67
<i>Figura 19</i> Cruce de sección de localización	68
<i>Figura 20</i> Cruce de sección de asignación	69
<i>Figura 21</i> Estructura del algoritmo.....	71

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

<i>Figura 22</i> Estructura del algoritmo de búsqueda tabú programado	72
<i>Figura 23</i> Búsqueda tabú 1	74
<i>Figura 24</i> Búsqueda tabú 2.....	75
<i>Figura 25</i> Tabla resumen de regresión múltiple para el tiempo de cómputo de la Búsqueda Tabú	77
<i>Figura 26</i> Tabla resumen de regresión múltiple para Z, de la Búsqueda Tabú.....	78
<i>Figura 27</i> Estructura de la metaheurística híbrida.....	79
<i>Figura 28</i> Tabla resumen de regresión múltiple para Z, del AH.....	82
<i>Figura 29</i> Tabla resumen de regresión múltiple para t, del AH	83
<i>Figura 30</i> Prueba t de 2 muestras para las medias de Z sin y con la BT2	84
<i>Figura 31</i> Gráfica de intervalos de Zfases y Zintegrado	88
<i>Figura 32</i> Tabla resumen de prueba t de 2 muestras para las medias de Zfases y Zintegrado.....	89
<i>Figura 33</i> ANOVA de un factor para zAG, zBT y ZMH.....	91
<i>Figura 34</i> Tabla resumen de prueba t de 2 muestras para las medias de zMH vs zAG y zBT ...	93

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

Lista de Apéndices

(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la

Biblioteca UIS)

Apéndice A. Código de programación de modelos LIRP por medio de MIP

Apéndice B. Algoritmo genético

Apéndice C. Algoritmo genético con vecino más cercano (LIRP por fases)

Apéndice D. Algoritmo genético con vecino más cercano (LIRP integrado)

Apéndice E. Búsqueda Tabú

Apéndice F. Metaheurística híbrida

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

RESUMEN

TÍTULO: Diseño de una red de distribución de dos escalones, de un solo producto y multiperiodo con demanda estocástica, como un problema de optimización LIRP que se resuelve mediante una metaheurística híbrida*

AUTOR: Julio César Camacho Pinto**

PALABRAS CLAVE: LIRP, localización, ruteo, inventarios.

DESCRIPCIÓN:

La organización de la cadena de suministro otorga a las empresas ventajas competitivas, ya que permite reducir costos logísticos y también aumentar el nivel de satisfacción del cliente. También puede buscar el cumplimiento de otros objetivos que la empresa considere interesantes; tales como reducciones en la huella de carbono, los riesgos de transporte, el número de vehículos, la distancia recorrida, la cantidad de inventarios, entre otros.

Organizar la cadena de suministro tomando decisiones por separado para los problemas de localización, ruteo e inventarios, lleva a soluciones subóptimas, debido a que se ignora la relación que tiene estos problemas entre sí. Para evitar eso, se plantea analizar la red de distribución de la cadena de suministro como un problema de localización, ruteo e inventarios LIRP (*location inventory routing problem*). En la presente investigación se diseña un modelo de red de distribución de dos escalones, de un solo producto y multiperiodo con demanda estocástica.

El problema LIRP tiene una complejidad computacional *np-hard*, por lo cual se proponen alternativas para instancias en las que los métodos exactos no puedan hallar la solución óptima. Se construye una metaheurística híbrida basada en Búsqueda Tabú, Algoritmo Genético y la heurística del Vecino Más Cercano, y se comparan los rendimientos de la metaheurística híbrida con las metaheurísticas clásicas que tiene como base.

* Trabajo de maestría

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y empresariales. Director: Javier Arias Osorio, Magíster en Administración.

ABSTRACT

TITLE: Design of a single product, multiperiod, two echelons distribution network with stochastic demand, as an LIRP optimization problem that is solved by a hybrid metaheuristic*

AUTHOR: Julio César Camacho Pinto**

KEYWORDS: LIRP, location, routing, inventory.

DESCRIPTION:

The supply chain configuration provides companies competitive advantages, since it can reduce logistics costs and also increase the level of customer satisfaction. You can also seek to accomplish other objectives interesting for the company; Such as reductions in: the carbon footprint, transport risks, the number of vehicles, the distance traveled, the inventory, among others objectives.

In the configuration of the supply chain, making decisions separately for the location, routing and inventory problems, leads companies to suboptimal solutions, as a result of ignoring the relationship between these problems. Alternatively, the problems can be taken into account simultaneously for the supply chain distribution network; this is the Location Inventory Routing Problem LIRP. In this research we present a single product, multi period, two echelons distribution network with stochastic demand.

The Location Inventory Routing Problem LIRP has an np-hard computational complexity, thus alternatives must be proposed for the instances in which the exact methods are not able to find the optimal solution. In that order, we constructed a hybrid metaheuristic which is based on Tabu Search and Genetic Algorithm metaheuristic, as well as the Nearest Neighbor heuristic, and the results of the metaheuristic hybrid are compared with the classical metaheuristics which is based on.

* Master of science thesis

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Industrial and Management Studies. Directed by: Javier Arias Osorio, Master in Administration.

Introducción

Las condiciones actuales del mercado y la presión que tiene las empresas por ser competitivas, las llevan a buscar estrategias de valor para cumplir este cometido. Ambrosino & Grazia Scutellà (2005) sostienen que las empresas que busquen ser competitivas deben prestar atención a la organización de su cadena de suministro, con el fin aumentar el nivel de servicio al cliente controlando los costos asociados.

Para esto es necesario prestar atención a los tres problemas logísticos principales del diseño de la red de distribución de la cadena de suministro, la localización de instalaciones, el ruteo entre actores y las políticas de inventarios. Debido a que la decisión de localización es de nivel estratégico suele subestimarse la importancia de la información de las decisiones de nivel táctico como lo son el ruteo y aún más los costos asociados a los inventarios; C. Wang, Ma, & Li (2008) señalan que teniendo en cuenta la correlación que existe entre las decisiones de localización, ruteo e inventarios, es necesario optimizar la red de distribución tomando estas decisiones de forma integrada; lo que da lugar al modelo de *location-inventory-routing-problem* (LIRP).

De acuerdo con S. C. Liu & Lin (2005) la complejidad computacional de optimizar un modelo LIRP es NP-Hard (no polinomial complejo), por lo cual se han utilizado en la literatura metaheurísticas clásicas e híbridas para encontrar soluciones las cuales no son necesariamente las óptimas, pero son buenas soluciones que se entregan en un tiempo prudente.

En el presente trabajo de investigación se busca diseñar un modelo LIRP para una red de distribución de dos escalones, de un solo producto y multiperiodo con demanda estocástica, a partir del análisis de metaheurísticas clásicas e híbridas.

1. Justificación y planteamiento del problema

En una industria cada vez más globalizada el objetivo de las empresas de sobresalir en el mercado se torna una tarea de mayor complejidad, forzándolas a buscar constantemente estrategias para ser más competitivas. Ambrosino & Grazia Scutellà (2005) sostienen que una de estas estrategias es la optimización de la cadena de suministro, ya que a través de esta se busca ofrecer un mejor servicio al cliente y reducir los costos operativos. De acuerdo con Lagos, Paredes, Niklander, & Cabrera (2015) para mejorar la eficiencia de la cadena de suministros es necesario que el diseño de la red de distribución busque la integración de las decisiones estratégicas de localización con las decisiones tácticas de ruteo e inventarios. Wang et al (2008) también sostienen que debido a la alta correlación que existe entre estas decisiones se debe optimizar el problema combinado de *location-inventory-routing-problem* (LIRP).

Sin embargo encontrar la solución óptima para un modelo LIRP tiene una complejidad computacional NP-hard (Liu & Lin, 2005). Por lo cual se han utilizado métodos heurísticos y metaheurísticos clásicos e híbridos para abordar el problema y encontrar soluciones factibles. Por lo cual se propone la construcción de una metaheurística híbrida que pueda ofrecer buenas soluciones factibles para la red de distribución planteada.

2. Hipótesis

2.1. Hipótesis 1:

Para el diseño de una red de distribución de dos escalones, un modelo LIRP que integre las decisiones de localización, ruteo e inventarios, brinda mejores soluciones que un modelo desarrollado por fases.

2.2. Hipótesis 2:

Una metaheurística híbrida puede generar mejores soluciones que las metaheurísticas clásicas, para un diseño red de distribución de dos escalones y multiperiodo con demanda estocástica.

3. Objetivos

3.1. *Objetivo general*

Diseñar una red de distribución de dos escalones, de un solo producto y multiperiodo con demanda estocástica, como un problema de optimización LIRP que se resuelve mediante una metaheurística híbrida.

3.2. *Objetivos específicos*

- Identificar los modelos de redes de distribución planteados en la literatura, que integren las decisiones de localización, ruteo e inventario, a partir de una revisión de literatura.
- Formular un modelo de red de distribución de dos escalones, multiperiodo con demanda estocástica.
- Analizar los resultados de la aplicación de un modelo LIRP que integre las decisiones de localización, ruteo e inventarios, frente a un modelo desarrollado por fases, para el modelo de red de distribución definido.
- Construir una metaheurística híbrida que permita encontrar mejores soluciones al modelo de red de distribución planteado frente a las metaheurísticas clásicas.

4. Marco teórico

4.1. Logística

Según el Consejo de Profesionales de la Gestión de la Cadena de Suministro (CSCMP, 2013) la logística puede entenderse como los procesos de planeación, implementación y control para llevar los productos o servicios a los clientes de la manera más efectiva, teniendo en consideración el flujo y almacenamiento de estos.

4.2. Cadena de suministro

De acuerdo con Meindl & Hopra (2008), la cadena de suministro es el conjunto de actores que de forma directa o indirecta permiten la distribución de los bienes hacia el cliente. La manera de interactuar de estos actores está relacionada por unas actividades logísticas enmarcadas principalmente en la localización de las instalaciones, la gestión de los inventarios y su transporte. De esta manera dentro de los actores se incluyen los fabricantes, proveedores, transportistas, almacenistas, vendedores y finalmente los clientes. Asimismo, la distribución hace referencia a las actividades por medio de las cuales se mueve y almacena un producto desde el proveedor hasta el cliente en la cadena de suministro. La distribución tiene un papel clave en la rentabilidad de la empresa debido a que afecta de manera directa los costos de la cadena de suministros y la experiencia del cliente.

4.3. Redes de distribución

Una red de distribución es un sistema que permite el movimiento y almacenamiento de los bienes entre diferentes etapas de la cadena de suministro. Esta distribución impacta directa y significativamente en la experiencia del cliente y en los costos asociados a la logística.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

4.3.1. Diseño de red de distribución. El diseño de la red de distribución está determinado por 3 grandes decisiones logísticas: localización de los almacenes, diseño de las rutas y manejo de inventarios (Perl & Sirisoponsilp, 1988). De esta manera comprende las funciones que tendrán las instalaciones (Fabricación, almacenaje, distribución), su ubicación, la asignación de la capacidad, así como el mercado y la oferta que atenderá. Estas decisiones de diseño de red se afectan mutuamente y determinan la configuración de la cadena de suministro, por lo tanto afectan directamente sus costos y capacidad de respuesta.

4.3.2. Red de distribución de dos escalones. Una red de distribución se define de dos escalones cuando la cadena de suministro está diseñada de manera igual o análoga a la red representada en la Figura 1, donde en el primer escalón las plantas de manufactura o almacenes (Para el caso de una empresa distribuidora) despachan sus productos a unos centros de distribución, el segundo escalón corresponde al envío de productos de los centros de distribución a tiendas minoristas o directamente a los clientes.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

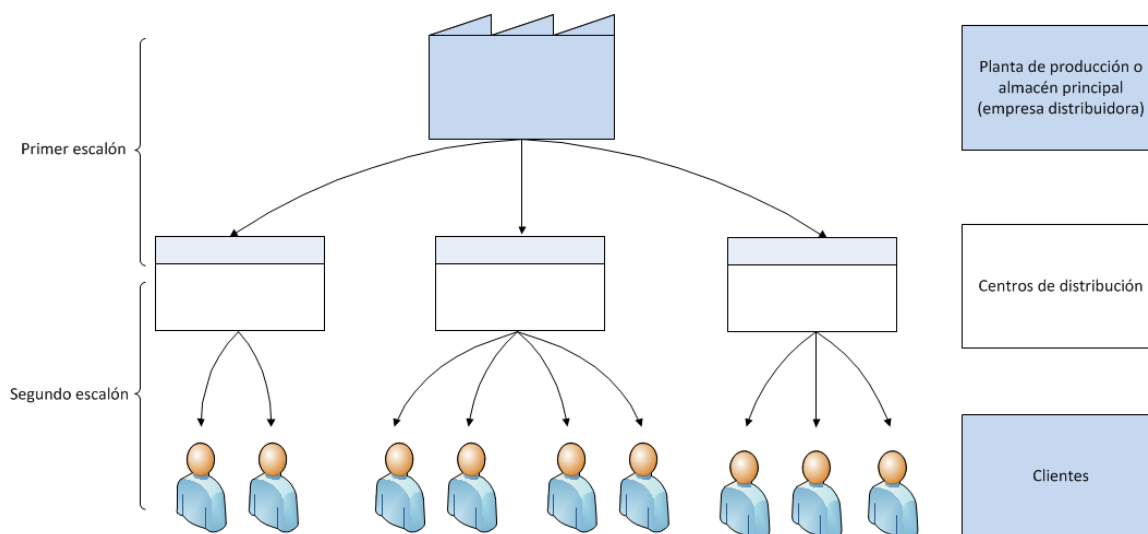


Figura 1 Red de distribución de dos escalones

4.3.3. Red de distribución multiperiodo. La característica de multiperiodo en un modelo de red de distribución permite analizar los pronósticos de demanda de periodos futuros y tomar decisiones sobre estos periodos. Meindl & Hopra (2008) sostienen que las compañías deben vincular su pronóstico de demanda a las actividades de la cadena de suministro, ya que estos pronósticos respaldan decisiones tales como cuánto producir, cuánto pedir y cuánto almacenar.

4.4. EL problema de localización, ruteo e inventarios LIRP

De acuerdo con Ambrosino & Grazia Scutellà (2005) las decisiones de la red de distribución se clasifican de la siguiente manera: el problema de localización hace referencia a las decisiones de ubicación de las diferentes instalaciones de la red de distribución; las decisiones de asignación que de los diferentes clientes internos o externos a las instalaciones encargadas de abastecer su demanda; las decisiones de ruteo son las concernientes a la asignación de vehículos para servir a los clientes de los diferentes niveles de la red de distribución; y las decisiones de inventario se relacionan con la cantidad de

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

bienes que se piden y el nivel de inventario que se debe mantener en las diferentes instalaciones para satisfacer la demanda.

Con frecuencia las decisiones de localización, ruteo e inventarios se abordan en diferentes niveles de decisión, con diferentes métodos para cada problema; de tal manera que la localización de los almacenes se toma como decisión estratégica, y el diseño de las rutas junto con el manejo de inventarios hace parte de las decisiones tácticas-operativas de la empresa (W.J. Guerrero, C. Prodhon, 2013).

La toma de decisiones por separado se ocasiona por la oportunidad con la que estas se presentan. En la fase de diseño de una cadena de suministro toman lugar las decisiones estratégicas como la localización de las instalaciones, basada en factores como la disponibilidad de lugares, sus características, costos, impuestos, y demás factores que se presenten en la oportunidad de elección de los diferentes lugares ofertados en el mercado; incluso en ocasiones se analiza junto con las posibles rutas (Location Routing Problem, LRP). Una vez se tiene organizada la distribución de las instalaciones de la red, toman lugar las decisiones de tipo táctico y operativo dentro de las que se incluyen los problemas de distribución e inventario (Inventory Routing Problem, IRP). Este manejo por separado de componentes de la red de distribución lleva a una pérdida importante en la oportunidad de buscar la optimización de la red; tal como lo explican Zuo-Jun & Shen (2007) “No tomar en consideración los costos asociados a inventarios y distribución cuando se determina la locación de las instalaciones puede llevar a suboptimización”.

El problema de localización, inventarios y ruteo (Inventory Location Routing Problem, LIRP) plantea unificar estas decisiones en un modelo que busque la optimización de la red de distribución integrando las variables del problema de localización y ruteo (LRP), con las

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

del problema de inventarios y distribución (IRP); Por supuesto eso aumenta la complejidad del modelo matemático, el cual según Granada & Wills (2012) se puede clasificar como un problema NP-Hard (no polinomial complejo), con un número exponencial de variables. Si bien es cierto que considerar el diseño de la red de distribución como un modelo LIRP implica una mayor complejidad se debe tener en cuenta que al diseñar en dos o más fases la red se obtienen tan sólo óptimos locales.

4.5. *Optimización matemática*

La optimización o programación matemática es un campo de las matemáticas aplicadas que busca diseñar metodologías para resolver desde un punto de vista práctico, problemas de optimización con recursos limitados (Salazar-González, 2001).

4.5.1. Optimización de redes de distribución. Los problemas relacionados con el diseño de red de distribución se caracterizan por tener una complejidad computacional del orden NP-Hard (no polinomial complejo); lo cual implica que para instancias pequeñas se pueden encontrar soluciones óptimas, pero a medida que el problema crece se hace necesario utilizar métodos no exactos para buscar buenas soluciones.

4.5.2. Métodos heurísticos. Los métodos heurísticos son técnicas de búsqueda que a partir de reglas localizan soluciones mejoradas. Son utilizados cuando los problemas no se pueden solucionar a través de los métodos de optimización disponibles o simplemente no es pertinente encontrar el óptimo debido al tiempo computacional que esto requeriría (Taha, 2004). Aunque las heurísticas proporcionan una buena solución factible en un tiempo corto, tienden a caer en óptimos locales.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

4.5.3. Métodos metaheurísticos. Las técnicas metaheurísticas están diseñadas con los mismos propósitos que la heurística, pero incorporan un sistema para escapar del entrampamiento de los óptimos locales y buscar nuevas soluciones en otras vecindades.

4.5.4. Métodos metaheurísticos para el LIRP. Debido a la complejidad computacional del problema LIRP sus modelos son comúnmente tratados con metaheurísticas clásicas o híbridas producto de mezcla entre diferentes heurísticas. Dentro de las metaheurísticas más utilizadas se encuentran:

- **Búsqueda tabú:** Como es característico de las metaheurísticas, este método busca a partir de iteraciones las mejores soluciones utilizando determinado procedimiento de búsqueda local; con la particularidad de ir creando una lista tabú de soluciones visitadas recientemente, esto con el fin de no volver a caer en un mismo óptimo local. Además, consta de criterios de intensificación (concentrarse en una región con mayor intensidad) y diversificación (buscar en áreas no exploradas anteriormente). Ha sido utilizado para un modelo LIRP por Liu & Lin (2005) y A. Ahmadi Javid & Azad (2010) dentro de metaheurísticas híbridas combinadas con recocido simulado.

- **Recocido simulado:** Además de las investigaciones anteriormente mencionadas A. Ghorbani & Akbari Jokar (2016) trabajó un modelo LIRP con otra heurística híbrida de recocido simulado, esta vez mezclada con algoritmo competitivo imperialista, a su vez Y. Li, Guo, Wang, & Fu (2013) y B. Liu, Chen, Li, & Liu (2015) lo mezclaron con algoritmos genéticos. La técnica de recocido simulado está basada en el proceso de recocido del acero que consiste en calentar el material y enfriar lentamente para modificar sus propiedades. Esta técnica utiliza un procedimiento de búsqueda local similar a la búsqueda tabú, con la diferencia en la que se selecciona una solución en el vecindario de la solución actual, a

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

partir de una función de probabilidad inspirada en el proceso mismo de recocido de metales.

- **Algoritmo genético:** Inspirado por la teoría biológica de la evolución, este método busca mejores soluciones a partir del cruce y mutación entre una población de soluciones (generación); si bien se van escogiendo las nuevas mejores soluciones, se adiciona un criterio de diversificación para evitar sesgos que lleven a óptimos locales. Los algoritmos genéticos son de las técnicas metaheurísticas más utilizadas para el problema LIRP, en algunos de manera directa como en los modelos de Forouzanfar & Tavakkoli-Moghaddam (2012), Hsieh, Liao, & Ho (2014), Guo & Li (2014) y Abdelhalim Hiassat, Diabat, & Rahwan (2017); o de manera combinada como Z. Ma & Dai (2010) quienes lo combinaron con reglas heurísticas y algoritmos Clarke & Wright, o C. F. Wang & Shuai (2013) quienes lo trabajaron en conjunto con métodos de enumeración implícita.

5. Metodología

La metodología del presente trabajo de investigación está basada en la propuesta por Hillier & Lieberman (2010), sobre las etapas más importantes en un estudio de Investigación de Operaciones. Teniendo en cuenta el alcance del proyecto, sólo se tomarán en consideración las 4 primeras fases presentadas en la Figura 2.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

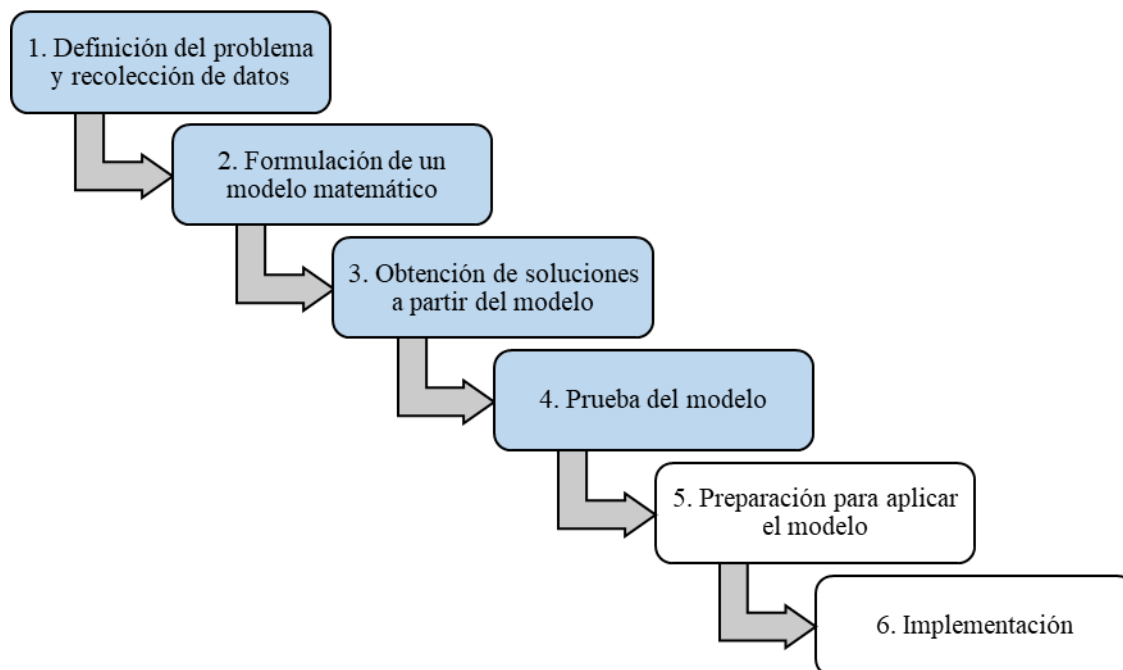


Figura 2. Etapas de un estudio de Investigación de Operaciones

5.1. Fase 1: Definición del problema y recolección de datos

Para la definición del problema y recolección de datos se realiza revisión de literatura en el capítulo 6, con el fin de identificar las características del problema LIRP, así como las investigaciones que se han realizado sobre el mismo.

5.2. Fase 2: Formulación de un modelo matemático

Una vez caracterizado el problema, en el capítulo 7 se presentan los modelos matemáticos necesarios para realizar la comprobación de las hipótesis planteadas en la investigación.

5.3. Fase 3: Obtención de soluciones a partir del modelo

En el capítulo 8 se exponen las diferentes técnicas utilizadas para la obtención de soluciones a partir de los modelos, así como una caracterización de las mismas.

5.4. Fase 4: Prueba del modelo

Teniendo presente que la investigación está enfocada en la comprobación de las hipótesis planteadas, en el capítulo 9 se analizan las experimentaciones realizadas con las técnicas seleccionadas y se presentan los resultados obtenidos.

6. Revisión de la literatura

La revisión de literatura se realiza en busca de artículos científicos, que hayan tratado la integración de las decisiones logísticas de localización, ruteo e inventarios; es decir el problema LIRP, publicados antes de junio de 2017. En la Figura 3 se aprecian las fases de la revisión de literatura.

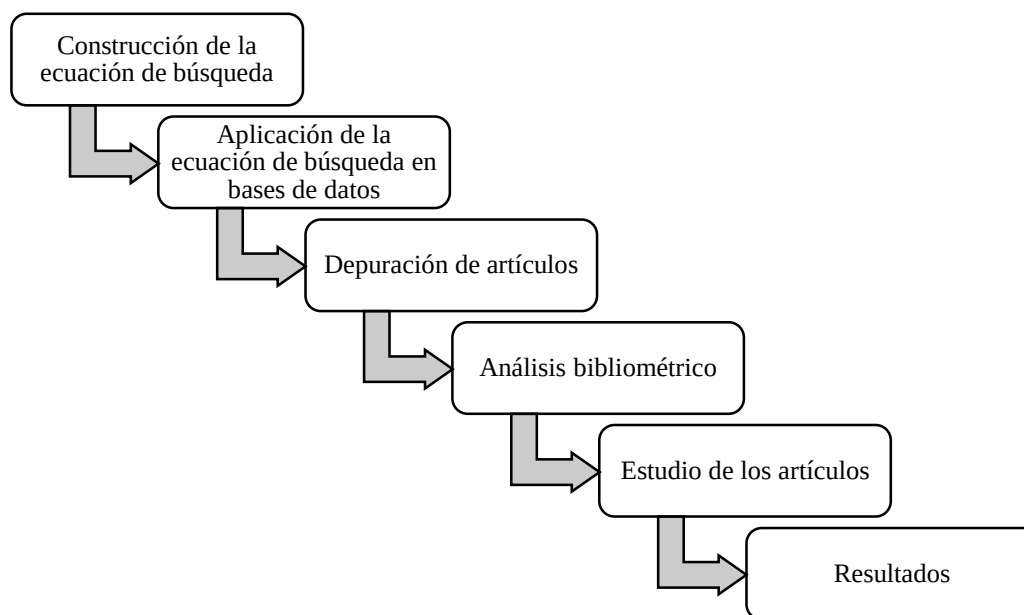


Figura 3 Fases de la revisión de literatura

Se inicia con la construcción de una ecuación de búsqueda y su aplicación en bases de datos de artículos científicos de ingeniería industrial. Posterior a una depuración se consolida una base de datos de artículos sobre el problema LIRP, sobre la cual se realiza un análisis bibliométrico y se estudian los artículos con el fin de entender el problema, analizar

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

su evolución, revisar qué se ha investigado sobre el diseño de redes de distribución, para finalmente plantear una discusión sobre posibles rutas de investigación.

6.1. Ecuación de búsqueda.

El problema de localización, ruteo e inventarios es denominado por sus siglas en inglés de diferentes maneras; tales como (*Location Inventory Routing Problem*, LIRP), (*Location Routing Inventory Problem*, LRIP), (*Inventory Location Routing Problem*, ILRP). Sin embargo pese al intercambio de sus siglas los autores coinciden en mencionar las palabras “inventory”; “location” o “allocation”, y “routing” o “transportation” en el título, en el resumen o en las palabras claves del artículo. A partir de esta información se construye la siguiente ecuación de búsqueda:

TITLE-ABS-KEY((inventor*) AND ((locatio*) OR (Allocatio*)) AND ((rout*) OR (transport*)))

Esta ecuación de búsqueda fue aplicada en las principales bases de datos que contienen artículos de ingeniería:

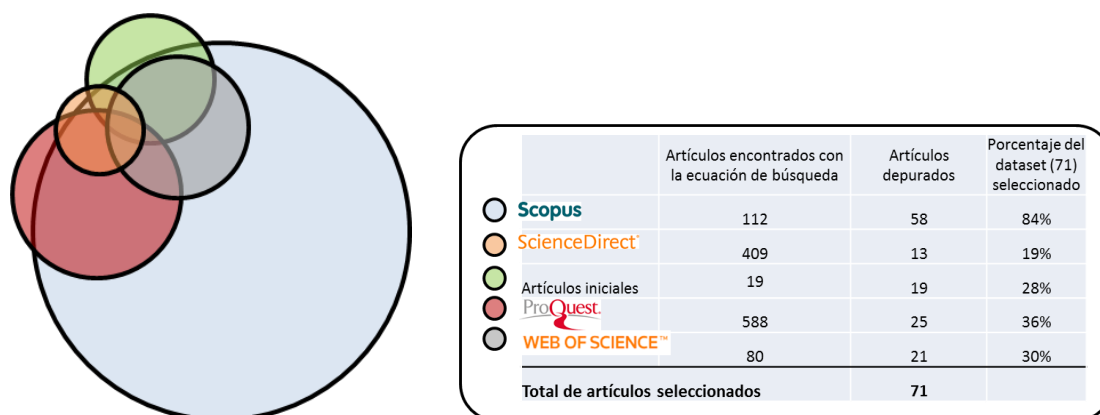


Figura 4 Artículos seleccionados de las bases de datos

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

Una vez aplicada la ecuación de búsqueda en las bases de datos relacionadas en la Figura 4, se depuran los resultados excluyendo los artículos en los cuales sus modelos no integran las tres decisiones logísticas (localización, ruteo e inventarios). Los artículos seleccionados se añaden a una base de datos de 19 artículos sugeridos por el director del proyecto en los primeros acercamientos al problema, obteniendo un total de 71 artículos sobre el problema LIRP. En la posterior lectura de los artículos seleccionados, se evidencia la eficacia de la ecuación de búsqueda planteada, ya que los resultados obtenidos coinciden con la identificación de los autores analizados a través de sus citaciones.

6.2. *Análisis bibliométrico.*

Con la ayuda del software Vantage Point versión 9, se realiza un análisis bibliométrico con el fin de identificar los artículos más relevantes en el tema, así como los países y Universidades que han presentado mayores aportes y las colaboraciones que han surgido entre ellos.

Tabla 1
Cantidad de citaciones por artículo

Título	Año	Citado por
An Integrated Inventory Allocation and Vehicle Routing Problem	1989	227
Consolidation strategy: inventory, vehicles and terminals.	1987	165
A literature survey on planning and control of warehousing systems	1999	156
Incorporating inventory and routing costs in strategic location models	2007	140
Integrated supply chain design models: A survey and future research directions	2007	134
Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design	2010	91
A two-phase heuristic method for the multi-depot location routing problem taking inventory control decisions into consideration	2003	79
A method for solving ship routing problems with inventory constraints	1998	62
Distribution networks: facility location, transportation and inventory	1988	50
A heuristic method for the combined location routing and inventory problem	2005	44
Configuration of physical distribution networks	1986	44
An evaluation of routing policies for order-picking operations in low-level picker-to-part system	2004	43
The multiple disposal facilities and multiple inventory locations rollon-rolloff vehicle routing problem	2006	33
Hybrid heuristic for the inventory location-routing problem with deterministic demand	2013	25
Multi-products location-routing problem integrated with inventory under stochastic demand	2011	21

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

A location-routing-inventory model for designing multisource distribution networks	2012	17
Solving a new bi-objective location-routing-inventory problem in a distribution network by meta-heuristics	2014	15
Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty	2016	14
Hybrid metaheuristic solutions to inventory location routing problem	2014	12

En la Tabla 1 se relacionan artículos más citados dentro de los cuales se destacan quienes empiezan a considerar la integración de la localización, ruteo e inventarios, cuando es su época estos problemas se abordaban por separado o cuando mucho integrando la localización con el ruteo (location-routing-problem, LRP) o el ruteo con la gestión de inventarios (inventory, routing problema, IRP).

Tabla 2

Producción de artículos por países

País	Cantidad de artículos
China	26
Estados Unidos	13
Irán	11
Taiwán	4
Colombia	3
Francia	3
Malasia	3
Canadá	2
Chile	2
Emiratos Árabes Unidos	2
Alemania	1
Austria	1
Corea del Sur	1
Holanda	1
India	1
Inglaterra	1
Italia	1
Noruega	1
Perú	1

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

Como se puede apreciar en la Tabla 2 el país que más artículos ha aportado a la literatura sobre LIRP es China con 26, seguido de Estados Unidos e Irán con 11 cada uno, y Colombia ha publicado 3 artículos. Adicionalmente en la Figura 5 se observa que se han realizado algunos trabajos colaborativos entre países, pero estos se han realizado en situaciones puntuales.

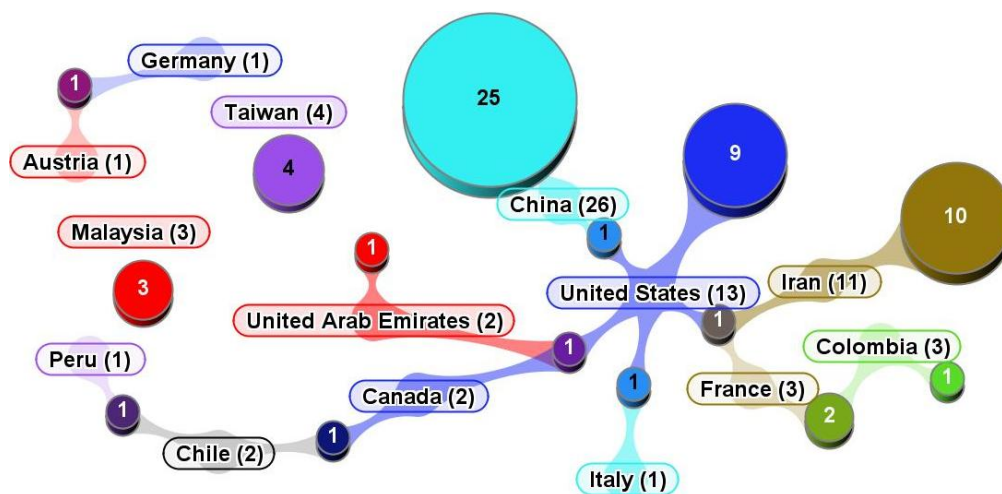


Figura 5 Aduna de trabajos colaborativos entre países.

6.3. El problema de localización Ruteo e inventarios (LIRP)

Los primeros modelos de optimización de la red de distribución que visualizan la interrelación de las decisiones de localización, ruteo e inventarios datan de finales de los años 80, cuando Hall (1987) busca estrategias de optimización de la cadena de suministros a través de la consolidación de ruteo, inventario y centros de distribución que denomina terminales. Por su parte Perl & Sirisoponsilp (1988) analizan la relación entre los problemas de localización, ruteo e inventarios y proponen un modelo de distribución de red que contempla las interdependencias entre los problemas. Chien, Balakrishnan, & Wong (1989) notando la estrecha relación entre las decisiones logísticas de ruteo de vehículos y localización de inventarios, buscan maximizar las utilidades a través de la integración de

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

estos problemas basados en una solución planteada a partir de un problema de programación entera mixta utilizando relajación lagrangiana. Nozick & Turnquist (1998) sugieren que para determinar el número óptimo y localización de centros de distribución (DC's), los costos de inventario deben ser considerados junto con los demás costos de localización y transporte; mientras en ese mismo año Jayaraman (1998) presenta su investigación sobre el impacto de la relación de los problemas de localización, ruteo e inventarios en el diseño de la red de distribución; tres años más tarde Nozick & Turnquist (2001) plantean un modelo de localización de centros de distribución considerando la información de costos de inventario y transporte, con el objetivo no solo de ahorrar costos sino de prestar un servicio de calidad enfocado en el tiempo de respuesta al cliente.

Liu & Lee (2003) son los primeros en presentar el problema LIRP, para el cual plantearon un modelo heurístico de dos fases en busca de una minimización de costos; sin embargo este modelo era muy propenso a quedar atrapado en óptimos locales. Por lo cual Liu & Lin (2005) proponen otro modelo heurístico, esta vez de optimización global combinando búsqueda tabú y recocido simulado; abordando el problema de LIRP como el conjunto entre el problema de localización (Facility Location Problem, FLP) y el problema de inventarios y ruteo (IRP).

Por su parte Max Shen & Qi (2007) plantean incorporar costos de ruteo e inventarios al problema de localización. A partir de este modelo Ahmadi Javid & Azad (2010) proponen abordar el LIRP desde una combinación heurística entre búsqueda tabú y recocido simulado.

W.J. Guerrero, C. Prodhon (2013) proponen dos contextos principales donde surgen aplicaciones reales del modelo LIRP: Cuando una cadena de suministro es flexible en

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

cuanto a la creación de una localización de almacenes; ya sea que los rente o en casos de proyectos temporales como misiones humanitarias de manejo de desastres (Whybark, 2007). El segundo caso es cuando los objetivos de largo plazo buscan un diseño de cadena de suministro con diferentes frecuencias de distribución por tienda y los vehículos pueden visitar más de una tienda por ruta. Adicionalmente Hiassat & Diabat (2010) resaltan el impacto que el LIRP puede tener en una red de distribución de productos perecederos, debido a la oportunidad que se genera buscar la optimización a través de toda la cadena de suministro, y años más tarde abordan este modelo mediante un algoritmo genético en Abdelhalim Hiassat et al. (2017).

Tradicionalmente el objetivo principal de la optimización de la red de distribución es la minimización de costos o maximización de utilidades, aunque algunos autores según el contexto de sus modelos plantean como objetivo secundario la disminución de tiempos e incluso se pueden proponer otros objetivos como J. Tang, Ji, & Jiang (2016), que plantea la minimización de la huella de carbono teniendo en cuenta que los consumidores con alta conciencia ambiental están dispuestos a pagar un precio más alto por productos cuya huella de carbono sea más baja (Conrad, 2005).

6.4. *LIRP para una red de distribución de dos escalones.*

En la literatura se encuentran diversos modelos que abordan el LIRP para una red de distribución de dos escalones. Shen et al. (2007) presentan un modelo multi-periodo con demanda estocástica, mientras que Ma & Dai (2007) diseñan una heurística de dos fases para un modelo de un solo producto con flota homogénea y demanda estocástica. Años después Ma & Dai (2010) diseñan un algoritmo genético híbrido combinado con reglas heurísticas y algoritmo Clarke & Wright, para una red de distribución multiproducto con

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

close-loop y demanda estocástica, y Xuefeng (2010) presenta un algoritmo en base a una relajación langragiana anidada partiendo en problema en dos, para un modelo que también cuenta con demanda estocástica. Más adelante Guerrero, Prodhon, Velasco, & Amaya (2013) incluyen múltiples depósitos y múltiples tiendas con capacidad de almacenamiento sobre un horizonte de tiempo discreto y Tavakkoli-Moghaddam, Forouzanfar, & Ebrahimnejad (2013) presentan un modelo multiobjetivo donde buscan optimizar la red de distribución en función no solo de los costos sino del tiempo de transporte para un modelo con demanda estocástica y *risk pooling*.

A su vez Nekooghadirli, Tavakkoli-Moghaddam, Ghezavati, & Javanmard (2014) y Tavakkoli-Moghaddam & Raziei (2016) presentan modelos para red de distribución de dos escalones multi- objetivos, multi-producto y multi-periodo; el primer modelo con una demanda estocástica de distribución normal y el segundo con una flota de vehículos heterogénea y demanda fuzzy. Adicionalmente Guerrero, Prodhon, Velasco, & Amaya (2015) proponen un nuevo modelo multiperiodo con demanda determinística, usando un híbrido entre generación de columnas, relajación langragiana y búsqueda local.

Por su parte Ghorbani & Akbari Jokar (2016) presentan un algoritmo heurístico híbrido basado en recocido simulado y algoritmo competitivo imperialista, para un modelo LIRP de dos escalones, multi-producto y multi-periodo y K. Li, Zheng, & Wu (2016) proponen abordar el problema LIRP a través de un algoritmo de enjambre de partículas en una cadena de logística en frío.

Los modelos de Hiassat & Diabat (2010) y Hiassat et al. (2017) que buscan el diseño de red de distribución de productos perecederos, también están establecidos en redes de distribución de dos escalones.

6.5. LIRP para una red de distribución multiperiodo.

Moin & Salhi (2006) manifiestan que un modelo de un solo periodo no refleja la planeación a largo plazo. Por lo cual muchos autores han considerado modelos LIRP con un horizonte de tiempo que incluye múltiples periodos; como es el caso de Y. Tang, Ma, & Zhao (2011) quienes proponen un modelo de optimización multiperiodo para un caso de recolección de llantas usadas, o Atiye Ghorbani & Akbari Jokar (2016) que utilizan una heurística híbrida entre recocido simulado y algoritmo competitivo imperialista para resolver un modelo multiperiodo, multiproducto.

En la sección 6.4 se mencionaron algunos modelos de redes de distribución de dos escalones que además comparten las características no sólo de ser multiperiodo sino de tener demanda determinística; tales modelos son los planteados por: Hiassat & Diabat (2010), Guerrero et al. (2013), Guerrero et al. (2015) y Hiassat et al. (2017).

Tavakkoli-Moghaddam & Raziei (2016) y Z. Ma, Dai, Li, & Wang (2008) presentan modelos LIRP multiperiodos con demanda fuzzy. El primero es un modelo de programación lineal entera mixta para instancias medianas y pequeñas, multiproducto, de flota heterogénea y con los objetivos de disminuir costos y faltantes en los clientes; El segundo modelo tiene flota de vehículos homogénea, un solo producto y lo resuelven mediante una heurística de dos fases.

En la literatura se encuentran diversos modelos LIRP multiperiodo con demanda estocástica, como el propuesto por Riquelme-Rodríguez, Gamache, & Langevin (2016), donde comparan dos métodos de localización de depósitos con el fin de mejorar la eficiencia de un sistema de riego de carreteras. Algunos autores han considerado que la demanda estocástica de sus modelos obedece una distribución Poisson como son los casos

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

de: Zhang, Ma, & Jiang (2008) quienes proponen un algoritmo genético mixto para resolver su modelo; C. Wang et al. (2008) que buscan optimizar un sistema logístico de ciclo cerrado a través de una heurística de dos fases; asimismo H. Li, Ma, & Wang (2008) también utilizan una heurística de dos fases para resolver su modelo de logística inversa para un sistema de recolección de desperdicios sólidos municipales; y por último Z. Ma & Dai (2010) proponen un algoritmo genético mixto para resolver su modelo. Otros autores por su parte consideran que la distribución normal es la que más se ajusta a las demandas de sus modelos, como es el caso de Max Shen & Qi (2007) quienes formulan su modelo con programación entera no lineal y proponen un algoritmo basado en relajación lagrangiana; también se encuentran los modelos multiobjetivos presentados por Martínez-Salazar, Molina, Ángel-Bello, Gómez, & Caballero (2014) quienes buscan soluciones a su modelo explorando 4 diferentes algoritmos metaheurísticos multiobjetivo, y Zhalechian, Tavakkoli-Moghaddam, Zahiri, & Mohammadi (2016) que proponen una metaheurística híbrida multiobjetivo.

6.6. Discusión

Mediante la integración de las tres grandes decisiones logísticas, el problema de localización, ruteo e inventarios LIRP presenta una buena oportunidad de generar valor para las empresas buscando la eficiencia en el diseño de la red de distribución, lo cual permite hallar mejores resultados a los objetivos buscados.

Debido a la complejidad computacional del problema, éste es abordado desde métodos no exactos como los algoritmos heurísticos o metaheurísticos, ya sea por los métodos clásicos como búsqueda tabú, algoritmos genéticos, recocido simulado, enjambre de partículas, entre otros; o también por métodos híbridos resultantes de combinaciones entre

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

diferentes metaheurísticas y/o heurísticas. En la revisión realizada se encontraron diferentes estrategias de hibridación de metaheurísticas, en el caso del recocido simulado fue fusionado con la búsqueda tabú por S. C. Liu & Lin (2005) y Amir Ahmadi Javid & Azad (2010), también con algoritmo genético por Amir Ahmadi Javid & Azad (2010) y Amir Ahmadi Javid & Azad (2010) lo hicieron con algoritmo competitivo imperialista. El algoritmo genético por su parte ha sido una estrategia por la cual optaron diversos autores, ya sea con un diseño clásico o con una hibridación; sin embargo para el problema LIRP no se encontró evidencia de estudios de una hibridación entre el algoritmo genético y la búsqueda tabú, los cuales a partir de sus cualidades pueden generar una metaheurística híbrida de características interesantes, que posiblemente genere mejores soluciones con respecto a sus enfoques clásicos.

7. Formulación de los modelos matemáticos

La segunda etapa de la metodología, consiste en la formulación del modelo matemático de red de distribución. Buscando la comprobación de la hipótesis 1, se plantean dos modelos LIRP; uno que integre las decisiones de localización, ruteo e inventarios, y otro desarrollado por fases. Por lo tanto, se definen inicialmente las características de la red de distribución y luego se presentan ambos modelos.

7.1. Características del modelo de red de distribución LIRP

A continuación, se definen las características de los modelos matemáticos de red de distribución de dos escalones y multiperiodo con demanda estocástica. Se especifican inicialmente los supuestos, parámetros conocidos; además de las notaciones de índices, parámetros y variables.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

7.1.1. Supuestos

1. Se trata de problema de localización, ruteo e inventarios de dos escalones, de un solo producto y multiperiodo con demanda estocástica.
2. El objetivo de minimizar los costos. Por una parte, los de localización relacionados con la apertura de los potenciales centros de distribución; los costos de mantener inventario, los cuales son diferentes tanto en cada centro de distribución, como en la planta; y los costos asociados al transporte del producto tanto de la planta a los centros de distribución (primer escalón), como de los centros de distribución a los clientes (segundo escalón).
3. La cantidad de unidades producidas en los periodos es constante.
4. No se tiene inventarios iniciales en el primer periodo.
5. La planta y los centros de distribución sirven como depósitos cuya capacidad es finita, conocida y puede ser diferente para cada uno de estos depósitos.
6. La demanda de los clientes se satisface al final del periodo correspondiente.
7. La distancia entre los nodos de la red es euclidiana.
8. La flota de vehículos es homogénea en el mismo escalón, pero los vehículos en el primer escalón tienen mayor capacidad que en el segundo.
9. Los centros de distribución pueden ser atendidos por más de un vehículo.
10. Los clientes son atendidos por sólo un vehículo.
11. Cada ruta es atendida por un vehículo.
12. Cada ruta inicia y termina en el mismo depósito.
13. La demanda de cada cliente en cada periodo es aleatoria con una función de densidad de probabilidad con distribución normal.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

7.1.2. Índices

i: Índice de clientes ($M+2 \leq i \leq M+N+1$).

j: Índice de centros de distribución ($2 \leq j \leq M+1$).

h: Índice de clientes o depósitos ($1 \leq h \leq N+M+1$).

g: Índice de clientes o depósitos ($1 \leq g \leq N+M+1$).

k: Índice de vehículos o rutas en primer escalón ($1 \leq k \leq K$).

l: Índice de vehículos o rutas en segundo escalón ($K+1 \leq l \leq K+L$).

t: Índice de periodo ($1 \leq t \leq T$).

7.1.3. Parámetros

M: Número de posibles centros de distribución.

N: Número de clientes.

K: Número de vehículos en primer escalón (o rutas).

L: Número de vehículos en segundo escalón (o rutas).

T: Número de periodos del horizonte de planeación.

V: Índice de vehículos o rutas de primer y segundo escalón ($1 \leq V \leq K+L$).

DF_{it} : Demanda del cliente i en el periodo t.

P_t : Unidades producidas en el periodo t.

cm_k : Costo de transporte por unidad de distancia, en el primer escalón.

cml : Costo de transporte por unidad de distancia, en el segundo escalón.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

Ch_h : Costo de mantener una unidad de producto en un periodo; ya sea en la planta (Ch_1) o los centros de distribución j (Ch_j).

Ch : Capacidad de almacenamiento de la planta (C_1) y los centros de distribución j (C_j).

CK : Capacidad de vehículos en primer escalón.

CL : Capacidad de vehículos en segundo escalón.

D_{hg} : Distancia de desplazamiento entre el nodo h y el nodo g (A partir de la ubicación de la planta, de los centros de distribución potenciales y de los clientes).

FC_j : Costo de apertura de centro de distribución j .

MM : Número muy grande.

XL_{gl} : Asignación de clientes a rutas. Utilizado únicamente en ruteo en segundo escalón del modelo por fases.

7.1.4. Variables

Z : Costos totales de localización, ruteo e inventarios.

X_{ijt} : 1, si el cliente i es asignado al sitio potencial j , en el periodo t ; 0, de lo contrario. (Modelo integrado).

YX_j : 1, si el centro de distribución j es habilitado; 0, de lo contrario.

YC_{jkt} : Unidades a enviar al centro de distribución j en el periodo t , en el vehículo k .

Y_{jkt} : 1, si se ordena producto al CD j en el periodo t por el vehículo k ; 0, de lo contrario.

INV_{ht} : Unidades en inventario en el depósito h , en el periodo t . En la planta (INV_{1t}) y los centros de distribución j (INV_{jt}).

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

W_{ghvt} : 1, si el nodo h es inmediatamente visitado desde el nodo g , por el vehículo v , en el periodo t ; 0, si no lo es.

U_{jt} : Variable auxiliar para eliminar subtour, en cada periodo en el primer escalón.

M_{it} : Variable auxiliar para eliminar subtour, en cada periodo en el segundo escalón.

7.2. Modelo LIRP por fases

7.2.1. Fase de localización y asignación. El objetivo de la primera fase es disminuir los costos de localización, correspondientes a habilitar diferentes centros de distribución potenciales; así como los costos de asignación, que están relacionados con la distancia existente entre los clientes y los centros de distribución a los que se les asignen.

$$\min Z = \sum_{j=2}^{M+1} FC_j * YX_j + cml \sum_{i=M+2}^{M+N+1} \sum_{j=2}^{M+1} D_{ij} * X_{ij} \quad (1)$$

S.A.

$$\sum_{j=2}^{M+1} X_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (2)$$

$$X_{ij} \leq YX_j \quad \forall i, \forall j \quad (3)$$

$$\sum_{i=M+2}^{M+N+1} DF_{it} * X_{ij} \leq C_j \quad \forall j, \forall t \quad (4)$$

La restricción (2) indica que el cliente i únicamente es atendido por el depósito j . (3) que si un centro de distribución tiene clientes asignados, se debe abrir. Y (4) restringe acorde a la capacidad de los depósitos.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

7.2.2. Fase de inventarios y ruteo en primer escalón. El objetivo de este modelo es minimizar los costos de inventarios derivados de las unidades a mantener en inventario multiplicadas por el precio de mantener inventario del depósito que se utilice; también se busca disminuir el costo de ruteo en el segundo escalón, el cual está relacionado con la distancia recorrida en las rutas y el costo de desplazamiento en el primer escalón.

$$\min Z = \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^{M+1} C_{hg} * INV_{gt} + cmk * \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{g=1}^{M+1} \sum_{h=1}^{M+1} D_{hg} * W_{hgkt} \quad (5)$$

El objetivo de este modelo es minimizar los costos de inventarios derivados de las unidades a mantener en inventario multiplicadas por el precio de mantener inventario del depósito que se utilice; también se busca disminuir el costo de ruteo en el segundo escalón, el cual está relacionado con la distancia recorrida en las rutas y el costo de desplazamiento en el primer escalón.

S.A.

7.2.2.1. Inventario

$$INV_{ht} \leq C_h, \forall t, \forall h / 1 \leq h \leq M + 1 \quad (6)$$

$$INV_{1(t-1)} + P_t - \sum_{k=1}^K \sum_{j=2}^{M+1} YC_{jkt} = INV_{1t} \quad \forall t / 2 \leq t \leq T \quad (7)$$

$$INV_{j(t-1)} + \sum_{k=1}^K YC_{jkt} - \sum_{i=M+1}^{M+N+1} DF_{it} * X_{ij} = INV_{jt} \quad \forall j, \forall t / 2 \leq t \leq T \quad (8)$$

$$YC_{jkt} \leq MM * Y_{jkt} \quad \forall j, \forall k, \forall t \quad (9)$$

$$YC_{jkt} \geq Y_{jkt} \quad \forall j, \forall k, \forall t \quad (10)$$

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

$$\sum_{j=2}^{M+1} YC_{jkt} \leq CK \quad \forall k, \forall t \quad (11)$$

De acuerdo a la restricción (6), las unidades almacenadas en el depósito h (planta y centros de distribución) en el periodo t , no pueden ser superiores a su capacidad. Las restricciones (7) y (8) se encargan del balance de los inventarios en la planta y centros de distribución, respectivamente. (9) y (10) soportan la decisión de crear una ruta o no, si el movimiento de productos así lo sugiere. Y (11) es la restricción de capacidad del vehículo.

7.2.2.2. Ruteo en primer escalón

$$\sum_{g=1}^{M+1} W_{hgkt} - \sum_{g=1}^{M+1} W_{ghkt} = 0, \quad k, \forall t, \forall h / 1 \leq h \leq M+1 \quad (12)$$

$$W_{hhkt} = 0, \quad k, \forall t, \forall h / 1 \leq h \leq M+1 \quad (13)$$

$$\sum_{h=1}^{M+1} W_{hjkt} = Y_{jkt} \quad \forall j, \forall k, \forall t \quad (14)$$

$$\sum_{g=1}^{M+1} W_{hgkt} \leq \sum_{g=1}^{M+1} W_{1gkt}, \quad \forall k, \forall t, \forall h / 1 \leq h \leq M+1 \quad (15)$$

$$\sum_{h=1}^{M+1} W_{hgkt} \leq \sum_{h=1}^{M+1} W_{h1kt}, \quad \forall k, \forall t, \forall g / 1 \leq h \leq M+1 \quad (16)$$

$$\sum_{g=1}^{M+1} W_{hgkt} \leq 1 \quad \forall k, \forall t, \forall h / 1 \leq h \leq M+1 \quad (17)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{v=1}^{K+L} \sum_{h=1}^{M+N+1} W_{hjkt} \leq MM * YX_j \quad \forall j \quad (18)$$

$$U_{jt} - U_{gt} + (M * W_{jgkt}) \leq M - 1 \quad \forall j \forall g / 2 \leq j \neq g \leq M+1, \forall k, \forall t \quad (19)$$

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

Las restricciones (12) y (13) dicen que si se visita un nodo, la ruta debe salir de él, y no puede dirigirse hacia el mismo. (14) menciona que si se toma la decisión de pedir inventario a CD j en el periodo t , entonces debe tener una ruta que llegue a él, de lo contrario no. (15) y (16) Hablan de que toda ruta debe empezar y terminar en la planta; (17) un CD sólo puede ser atendido en una ruta; (18) si un CD no se abre, no se debe visitar. Y (19) generan las restricciones de tipo Miller, Tucker, & Zemlin (1960) para eliminación de subtours en primer escalón.

7.2.3. Fase de ruteo en segundo escalón. La ecuación (20) Busca minimizar el costo de ruteo en el segundo escalón, relacionado con la distancia recorrida en las rutas y el costo de desplazamiento en este escalón.

$$\min Z = cml * \sum_{t=1}^T \sum_{l=K+1}^{K+L} \sum_{g=2}^{M+N+1} \sum_{h=2}^{M+N+1} D_{hg} * W_{hgl} \quad (20)$$

La ecuación (20) Busca minimizar el costo de ruteo en el segundo escalón, relacionado con la distancia recorrida en las rutas y el costo de desplazamiento en este escalón.

S.A

$$\sum_{g=2}^{M+N+1} W_{hglt} - \sum_{g=2}^{M+N+1} W_{ghlt} = 0, \quad \forall l, \forall t, \forall h / 2 \leq h \leq M + N + 1 \quad (21)$$

$$W_{hhlt} = 0, \quad \forall l, \forall t, \forall h / 2 \leq h \leq M + N + 1 \quad (22)$$

$$\sum_{g=2}^{M+N+1} W_{hglt} \leq \sum_{j=2}^{M+1} \sum_{g=2}^{M+N+1} W_{jglt} \quad \forall l, \forall t, \forall h / 2 \leq h \leq M + N + 1 \quad (23)$$

$$\sum_{h=2}^{M+N+1} W_{hglt} \leq \sum_{j=2}^{M+1} \sum_{h=2}^{M+N+1} W_{gjlt} \quad \forall l, \forall t, \forall g / 2 \leq h \leq M + N + 1 \quad (24)$$

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

$$\sum_{h=2}^{M+N+1} \sum_{l=K+1}^{K+L} W_{hilt} * DF_{it} = DF_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (25)$$

$$\sum_{h=2}^{M+N+1} \sum_{l=K+1}^{K+L} W_{hilt} \leq DF_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (26)$$

$$\sum_{h=2}^{M+N+1} \sum_{i=M+2}^{M+N+1} W_{hilt} * DF_{it} \leq CL \quad \forall l, \forall t \quad (27)$$

$$\sum_{h=2}^{M+N+1} \sum_{i=M+2}^{M+N+1} W_{hilt} \leq 1 \quad \forall l, \forall t \quad (28)$$

$$\sum_{h=2}^{M+N+1} W_{hglt} \leq XL_{gl} \quad \forall l, \forall t, \forall g / 2 \leq g \leq M + N + 1 \quad (29)$$

$$M_{it} - M_{gt} + (N * W_{iglt}) \leq N - 1, \quad \forall i \forall g / M + 2 \leq i \neq g \leq M + N + 1, \forall l, \forall t \quad (30)$$

Las restricciones (21) y (22) indican que si se visita un nodo, la ruta debe salir de él, y no puede dirigirse hacia el mismo. (23) y (24) que toda ruta del segundo escalón deberá iniciar y terminar en un CD. (25) y (26) se encargan de que si un cliente tiene demanda en el periodo t, sea visitado en ese periodo; si no tiene demanda, no debe ser visitado. La restricción (27) es la de capacidad del vehículo, (28) habla de que un cliente se visita por una única ruta. (29) indica que al cliente i solo se le entrega por una ruta asignada al CDj correspondiente y (30) son las restricciones de tipo Miller et al. (1960) para eliminación de subtoures en segundo escalón.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

7.3. Modelo LIRP integrado

7.3.1. Función objetivo. Tal como se puede observar en la ecuación (31), el modelo tiene el objetivo de minimizar los costos. Por una parte, los de localización relacionados con la apertura de los potenciales centros de distribución; los costos de mantener inventario, los cuales son diferentes tanto en cada centro de distribución, como en la planta; y los costos asociados al transporte del producto tanto de la planta a los centros de distribución (primer escalón), como de los centros de distribución a los clientes (segundo escalón).

$$\begin{aligned}
 \text{Min } & \sum_{j=2}^{M+1} FC_j * YX_j + \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^{M+1} Ch_g * INV_{gt} + cmk * \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{g=1}^{M+1} \sum_{h=1}^{M+1} D_{hg} * W_{hgkt} \\
 & + cml * \sum_{t=1}^T \sum_{l=K+1}^{K+L} \sum_{g=2}^{M+N+1} \sum_{h=2}^{M+N+1} D_{hg} * W_{hgl t}
 \end{aligned} \tag{31}$$

7.3.2. Restricciones

7.3.2.1. Localización y asignación

$$\sum_{l=K+1}^{K+L} W_{jilt} \leq X_{ijt} \quad \forall i, \forall j, \forall t \tag{32}$$

$$\sum_{i=M+2}^{M+N+1} \sum_{l=K+1}^{K+L} W_{ihlt} * X_{ijt} \leq X_{hjt} \quad \forall t, \forall j, \forall h / M+2 \leq h \leq M+N+1 \tag{33}$$

$$\sum_{j=2}^{M+1} X_{ijt} \leq 1 \quad \forall i, \forall t \tag{34}$$

$$\sum_{i=M+2}^{M+N+1} \sum_{t=1}^T X_{ijt} * \leq YX_j \quad \forall j \tag{35}$$

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

$$\sum_{i=M+2}^{M+N+1} DF_{it} * X_{ijt} \leq C_j \quad \forall j, \forall t \quad (36)$$

La restricción (32) indica que si el cliente es visitado desde el depósito j en el tiempo t , el cliente es asignado a ese depósito en ese periodo; (33) Por su parte, Si un cliente es visitado desde otro, compartirán asignación del depósito para ese periodo. (34) Un cliente será asignado a un solo depósito por periodo. (35) Indica que si el centro de distribución tiene asignado clientes en algún periodo, se debe abrir; y (36) restringe acorde a la capacidad de los centros de distribución.

7.3.2.2. Inventario

$$INV_{ht} \leq C_h \quad \forall t, \forall h / 1 \leq h \leq M + 1 \quad (37)$$

$$INV_{1(t-1)} + P_t - \sum_{k=1}^K \sum_{j=2}^{M+1} YC_{jkt} = INV_{1t} \quad \forall t \quad (38)$$

$$INV_{j(t-1)} + \sum_{k=1}^K YC_{jkt} - \sum_{i=M+1}^{M+N+1} DF_{it} * X_{ijt} = INV_{jt} \quad \forall j, \forall t \quad (39)$$

$$YC_{jkt} \leq MM * Y_{jkt} \quad \forall j, \forall k, \forall t \quad (40)$$

$$YC_{jkt} \geq Y_{jkt} \quad \forall j, \forall k, \forall t \quad (41)$$

$$\sum_{j=2}^{M+1} YC_{jkt} \leq CK \quad \forall k, \forall t \quad (42)$$

De acuerdo a la restricción (37), las unidades almacenadas en el depósito h (planta y centros de distribución) en el periodo t , no pueden ser superiores a su capacidad. Las restricciones (38) y (39) se encargan del balance de los inventarios en la planta y centros de distribución, respectivamente. (40) y (41) soportan la decisión de crear una ruta o no, si el

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

movimiento de productos así lo sugiere. Y (42) restringe las rutas de acuerdo a la capacidad del vehículo.

7.3.2.3. Ruteo en general

$$\sum_{g=1}^{M+N+1} W_{hgv} - \sum_{g=1}^{M+N+1} W_{ghv} = 0, \quad \forall h, \forall v, \forall t \quad (43)$$

$$W_{hhv} = 0, \quad \forall h, \forall v, \forall t \quad (44)$$

Las restricciones (43) y (44) aplican para todas las rutas y mencionan que si se visita un nodo, la ruta debe salir de él, y no puede dirigirse hacia el mismo.

7.3.2.4. Ruteo en primer escalón

$$\sum_{h=1}^{M+1} W_{hjk} = Y_{jk} \quad \forall j, \forall k, \forall t \quad (45)$$

$$\sum_{g=1}^{M+1} W_{hgk} \leq \sum_{g=1}^{M+1} W_{1gk}, \quad \forall k, \forall t, \forall h / 1 \leq h \leq M+1 \quad (46)$$

$$\sum_{h=1}^{M+1} W_{hgk} \leq \sum_{h=1}^{M+1} W_{h1k}, \quad \forall k, \forall t, \forall g / 1 \leq h \leq M+1 \quad (47)$$

$$\sum_{g=1}^{M+1} W_{hgk} \leq 1 \quad \forall k, \forall t, \forall h / 1 \leq h \leq M+1 \quad (48)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{v=1}^{K+L} \sum_{h=1}^{M+N+1} W_{hvj} \leq M * Y_{X_j} \quad \forall j \quad (49)$$

$$U_{jt} - U_{gt} + (M * W_{jgk}) \leq M - 1 \quad \forall j \forall g / 2 \leq j \neq g \leq M+1, \forall k, \forall t \quad (50)$$

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

En el ruteo de primer escalón (45) dice que si se toma la decisión de pedir inventario a CD j en el periodo t , entonces debe tener una ruta que llegue a él, de lo contrario no. (46) y (47) Hablan de que toda ruta debe empezar y terminar en la planta; (48) un CD sólo puede ser atendido en una ruta; (49) si un CD no se abre, no se debe visitar. Y (50) generan las restricciones de tipo Miller et al. (1960) para eliminación de subtours en primer escalón.

7.3.2.5. Ruteo en segundo escalón

$$\sum_{g=2}^{M+N+1} W_{hglt} \leq \sum_{j=2}^{M+1} \sum_{g=2}^{M+N+1} W_{jglt} \quad \forall l, \forall t, \forall h / 2 \leq h \leq M + N + 1 \quad (51)$$

$$\sum_{h=2}^{M+N+1} W_{ihlt} \leq \sum_{j=2}^{M+1} \sum_{h=2}^{M+N+1} W_{hjlt} \quad \forall i, \forall l, \forall t \quad (52)$$

$$\sum_{h=2}^{M+N+1} \sum_{l=K+1}^{K+L} W_{hilt} * DF_{it} = DF_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (53)$$

$$\sum_{h=2}^{M+N+1} \sum_{l=K+1}^{K+L} W_{hilt} \leq DF_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (54)$$

$$\sum_{h=2}^{M+N+1} \sum_{i=M+2}^{M+N+1} W_{hilt} * DF_{it} \leq CL \quad \forall l, \forall t \quad (55)$$

$$\sum_{j=2}^{M+1} \sum_{i=M+2}^{M+N+1} W_{jilt} \leq 1 \quad \forall l, \forall t \quad (56)$$

$$M_{it} - M_{gt} + (N * W_{iglt}) \leq N - 1, \quad \forall i \forall g / M + 2 \leq i \neq g \leq M + N + 1, \forall l, \forall t \quad (57)$$

Para el ruteo en el segundo escalón (51) y (52) restringen que toda ruta del segundo escalón deberá iniciar y terminar en un CD. (53) y (54) se encargan de que si un cliente tiene demanda en el periodo t , sea visitado en ese periodo; si no tiene demanda, no debe ser visitado. La restricción (55) es la de capacidad del vehículo, (56) habla de que un cliente se

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

visita por una única ruta y (57) son las restricciones de tipo Miller et al. (1960) para eliminación de subtours en segundo escalón.

8. Obtención de soluciones a partir de los modelos

Debido a la complejidad computacional del problema (*np-hard*), los modelos de programación entera mixta (MIP) tienden fácilmente a requerir tiempos de solución muy extensos o incluso saturar la memoria del computador; por lo cual se proponen alternativamente algoritmos metaheurísticos para resolver problemas en estos escenarios.

La cantidad de variables y restricciones de los modelos presentados en capítulo 7, dependen de los parámetros de entrada T,K,L,M y N. De tal forma que para el modelo LIRP por fases, la cantidad de variables generadas es igual a:

$$T*(K(((M+1)^2)+2*M) + L*((M+N)^2)+2M+N+1) + M(N+1) + 1$$

Y el número de restricciones es:

$$T*[K((M^2)+5(M+1)+3M+1) + L*((M+N)((M+N)+4)+2) + (M+1)+2N+M] + M((T-1)+N+1) + N + T - 1$$

Mientras que para el modelo LIRP integrado, la cantidad de variables es:

$$T(K(((M+1)^2)+2*M)+L((M+N)^2)+M(N+2)+N+1)+M+1$$

Y el número de restricciones es de la forma:

$$T[2*(M+N+1)*(K+L)+(M+N)*L*((M+N)+2)+(M+1)*(T-1)+(M*K)*(M+3)+(3K+1)*(M+1)+N*(M+3)+2L+M+K]+M+N$$

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

Para ilustrar la cantidad de variables y restricciones que se pueden generar en un problema LIRP, en la **Tabla 3** se calculan los valores asociados a las instancias del conjunto Prodhon (2006), para 3, 12 y 60 periodos.

Tabla 3

Cantidad de variables y restricciones para el conjunto Prodhon (2006)

Tamaño de la instancia						LIRP por fases		LIRP integrado	
	K	L	M	N	T	Variables	Restricciones	Variables	Restricciones
1	5	20	5	20	3	38.389	44.975	38.589	45.589
2	5	50	5	50	3	454.879	488.765	455.379	490.669
3	5	100	5	100	3	3.309.029	3.436.415	3.310.029	3.440.469
4	10	100	10	100	3	3.635.604	3.769.975	3.637.604	3.777.329
5	10	200	10	200	3	26.466.904	26.974.275	26.470.904	26.989.929
1	5	20	5	20	12	153.238	179.543	154.338	182.929
2	5	50	5	50	12	1.818.748	1.954.163	1.821.498	1.963.159
3	5	100	5	100	12	13.234.598	13.743.863	13.240.098	13.762.209
4	10	100	10	100	12	14.539.383	15.076.603	14.550.383	15.110.174
5	10	200	10	200	12	105.861.583	107.890.503	105.883.583	107.960.274
1	5	20	5	20	60	765.766	897.239	771.666	931.825
2	5	50	5	50	60	9.092.716	9.769.619	9.107.466	9.832.855
3	5	100	5	100	60	66.170.966	68.716.919	66.200.466	68.827.905
4	10	100	10	100	60	72.692.871	75.378.619	72.751.871	75.582.110
5	10	200	10	200	60	529.299.871	539.443.719	529.417.871	539.832.210

8.1. Programación entera mixta (MIP)

Los modelos descritos en el capítulo 7 se programaron en el software de optimización GAMS 24.0, donde con la ayuda de los *solvers* CPLEX y SCIP se buscan soluciones a través de programación entera mixta (MIP).

Teniendo en cuenta que el modelo LIRP por fases está compuesto por tres modelos matemáticos que dependen entre sí, se programó un algoritmo en el software MATLAB2017a, con el objetivo de gestionar la información y ejecutar los modelos en el *solver* CPLEX de GAMS de manera secuencial. Así mismo el algoritmo se encarga de

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

simular los escenarios de demanda estocástica, basado en una distribución normal. En la

Figura 6 se puede observar el diseño del algoritmo en MATLAB.

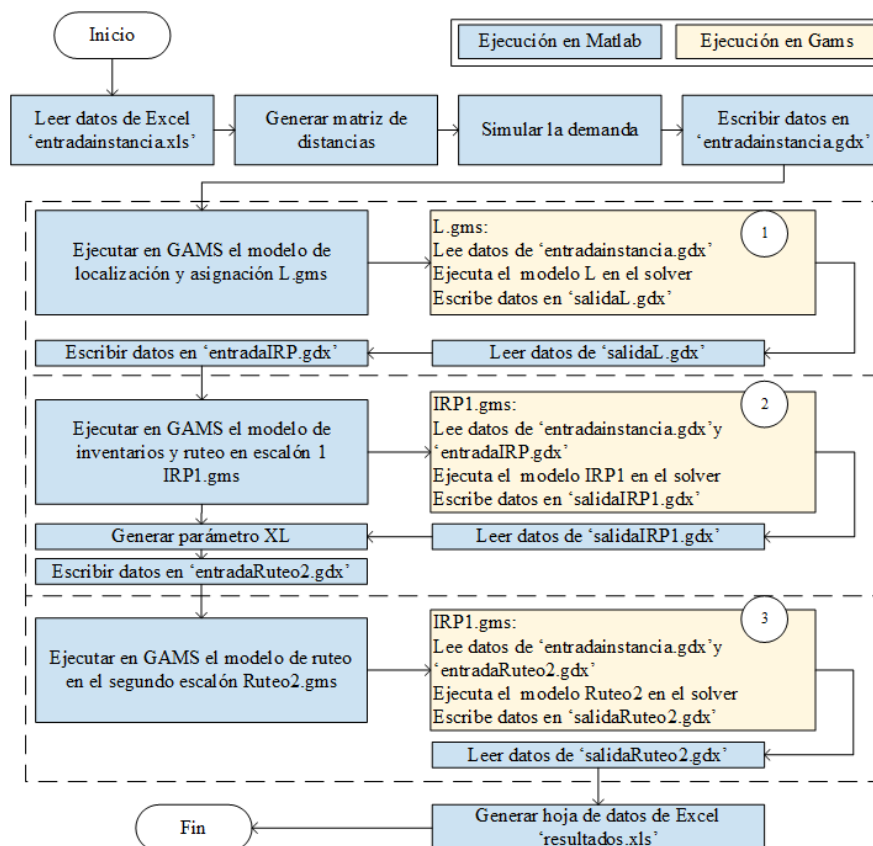


Figura 6. Algoritmo MILP para modelo LIRP por fases

Así mismo el modelo LIRP integrado se programó en GAMS 24.0 para ser solucionado en el *solver* SCIP (para programación no lineal entera mixta MINLP), y se ejecuta con la ayuda de MATLAB2017a, cómo se muestra en la *Figura 7*.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

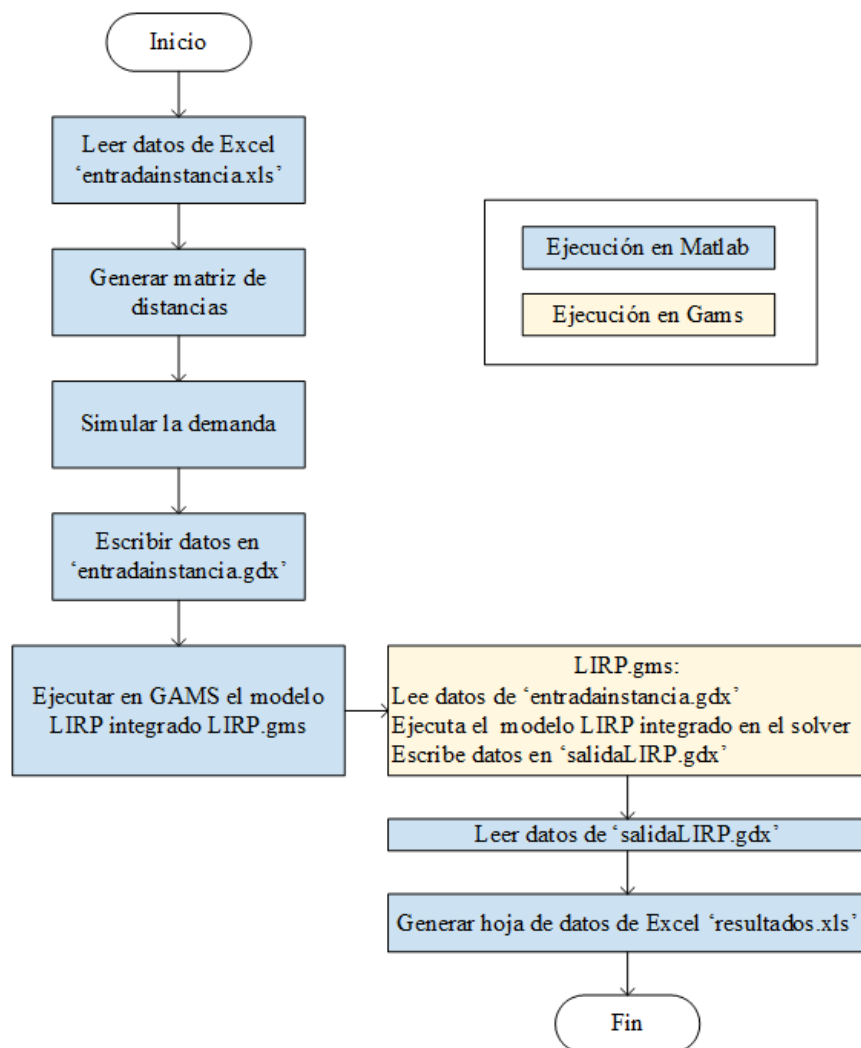


Figura 7. Algoritmo MILP para modelo LIRP integrado

En la Tabla 4 se relaciona la información contenida en los archivos con extensión .xls y .gdx que pertenecen a hojas de cálculo de Microsoft Excel y archivos resultados de GAMS respectivamente. Estos archivos permiten el intercambio de datos ya sea para entrada de los modelos o para registrar los resultados de su ejecución.

Tabla 4

Información contenida en los archivos .xls y .gdx

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

	<i>Índices</i>	<i>Parámetros</i>	<i>Variables</i>
entradainstancia.xls	M, N, K, L, T	dit (Media), cmk, cml, CK, CL, FCj, coordenadas , Pt, C0, Cj, Chj, Ch0	
entradainstancia.gdx	M, N, K, L, T	dit (Media), cmk, cml, CK, CL, FCj, coordenadas , Pt, C0, Cj, Chj, Ch0	
salidaL.gdx			Z, Xij, YXj, Tiempo ejecución solver
entradaIRP.gdx			
salidaIRP1.gdx			Z, INV0t, INVjt, Wghvt, YCjkt, Tiempo ejecución solver
entradaRuteo2.gdx		XLgl	
salidaRuteo2.gdx			Z, Wghvt, Tiempo ejecución solver
salidaLIRP.gdx			Z, INV0t, INVjt, Wghvt, YCjkt, Tiempo ejecución solver
resultados.xls			Z, INV0t, INVjt, Wghvt, YCjkt, Tiempo ejecución solver
Generado en MATLAB		Dhg, XLgl	

Los códigos tanto de MATLAB como de GAMS utilizados se encuentran en el apéndice A.

8.2. Algoritmo genético

El algoritmo genético utilizado se programó en MATLAB2017a, y tiene la característica de generar soluciones factibles; desde la creación de la población inicial hasta los cruces y mutaciones se generan de manera que respetan este principio. El diseño del algoritmo obedece a la estructura mostrada en la *Figura 8*. Los códigos de los scripts y funciones de MATLAB se ubican en el apéndice B.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

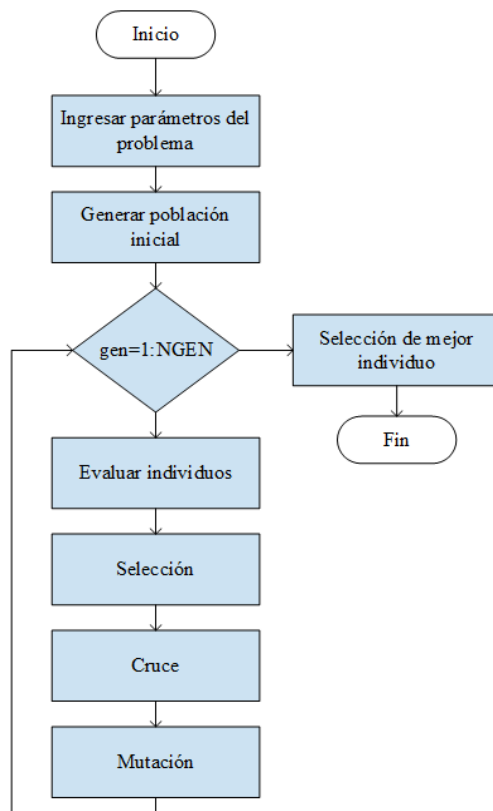


Figura 8. Estructura del algoritmo genético

8.2.1. Ingreso parámetros del problema. Se ingresan en una hoja de cálculo de Microsoft Excel los parámetros que caracterizan la red de distribución y el algoritmo genético en sí. Esta información es obtenida por un script de MATLAB “entrada.m”, que lee los datos mediante funciones y en algunos casos genera más parámetros a partir de dicha información; como en el caso de la matriz de distancias, generada a partir de las coordenadas de los nodos; la demanda en cada periodo, generada sobre una media y desviación de la misma; y la cantidad de centros de distribución a abrir, que se calcula estimando la demanda en cada periodo y la capacidad promedio de los centros de distribución. Los parámetros requeridos se relacionan en la Tabla 5.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

Tabla 5 Parámetros de ingreso al algoritmo

Parámetros de ingreso al algoritmo

Parámetros de ingreso de la red de distribución

M: Número de posibles centros de distribución.

N: Número de clientes.

T: Número de periodos a planear.

cmk: Costo de transporte por unidad de distancia, en el primer escalón.

cml: Costo de transporte por unidad de distancia, en el segundo escalón.

CK: Capacidad de vehículos en primer escalón.

CL: Capacidad de vehículos en segundo escalón.

P: Unidades producidas en el periodo t.

Ch: Costo de mantener inventarios de un producto en un periodo.

FC: Costo de abrir el CD.

CA: Capacidad de almacenamiento.

Demanda: Media de la demanda de cada cliente en un periodo

DEM: Demanda de los clientes en cada periodo.*

Coord: Coordenadas de los nodos de la red de distribución

Di: Matriz de distancia entre los nodos*

MA: Número de centros de distribución que se abrirán*

Pena_Inv: Penalización por sugerir inventarios negativos , que equivaldría a contratar mano de obra externa

Parámetros de ingreso del algoritmo genético

Probabilidad de mutación

Número de generaciones

Tamaño de la población

***Parámetros generados en MATLAB**

8.2.2. Generación de la población inicial. A través de la función “generador,m” programada en MATLAB, se genera de manera aleatoria la primera población de individuos, la cual es de tamaño previamente seleccionado y se mueven dentro del conjunto de soluciones factibles. Para efectos de la programación cada individuo constituye una fila de la matriz de población, en la cual se consigna la información de sus características en un cromosoma, que se presenta como se ilustra en la *Figura 9*.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP



Figura 9 Cromosoma de un individuo

La primera parte del cromosoma indica la decisión de los centros de distribución habilitados y la secuencia del ruteo en el primer escalón, de ahí en adelante se caracterizan por periodos, cómo se toman las decisiones de asignación de clientes a los centros de distribución, los periodos en que se lleva producto a estos últimos, y el ruteo en el segundo escalón.

La decisión de localización está consignada en la primera parte del cromosoma (color azul) y se toma eligiendo aleatoriamente MA centros de distribución, de entre los potenciales. Cómo se mencionó en la sección 8.2.1 MA es generado en el script de recolección de datos, calculado con el entero mayor de la división entre las demandas promedio por periodo, sobre la capacidad promedio de los centros de distribución. El orden de aparición en esta sección indica a su vez la secuencia del ruteo en el primer escalón, sin embargo, la sección de distribución de producto indica si este ruteo contempla visitar en determinado periodo al centro de distribución.

Las otras partes del cromosoma caracterizan por periodos, cómo se toman las decisiones de asignación de clientes a los centros de distribución, los periodos en que se lleva producto a estos últimos, y el ruteo en el segundo escalón. En la Figura 10 se describe la estructura del cromosoma en un periodo.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

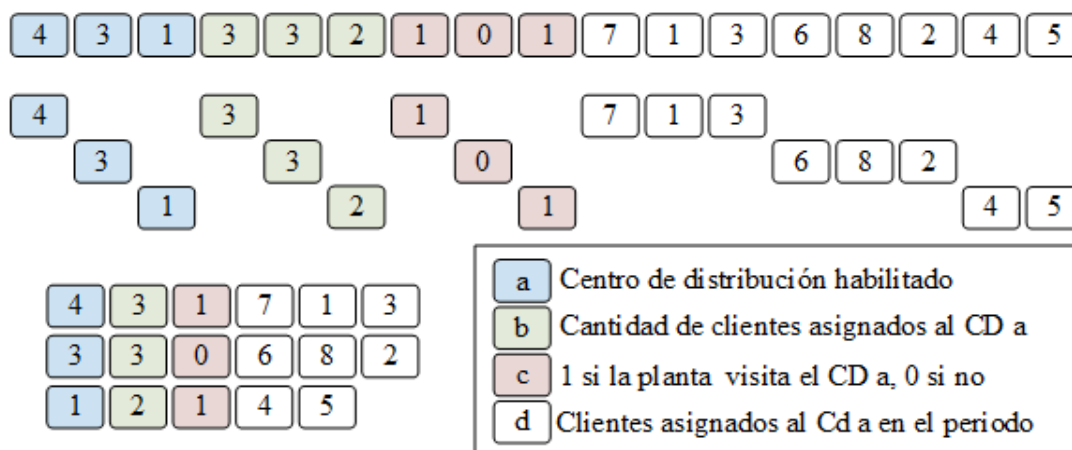


Figura 10 Estructura del cromosoma

La sección en verde indica la cantidad de clientes asignados al centro de distribución correspondiente según su orden en el cromosoma. Esta información, junto con el orden de los clientes consignado en el cromosoma (color blanco), constituye la secuencia del ruteo en segundo escalón para el centro de distribución; La capacidad del vehículo determinará en la función de evaluación si esta secuencia se puede hacer sin requerir reabastecimiento, o debe haber más de una ruta en el periodo para ese centro de distribución. Esta estructura de asignación de clientes es similar a la utilizada por Abdelhalim Hiassat et al. (2017).

La sección en color rojo indica si al centro de distribución correspondiente se llevan productos en el periodo. Como se mencionó anteriormente junto con el orden de la sección de CD habilitados, conforman el ruteo en el primer escalón; A su vez, teniendo en cuenta el supuesto que no se permiten faltantes para los clientes y que la demanda de los periodos ya fue estimada, este flujo de producto a los centros de distribución junto con la información antes mencionada, permite hacer el balance de inventarios, que determina cuánto producto se deposita como inventario para los siguientes periodos, tanto en los centros de distribución, como en la planta si se analiza la cantidad de productos producida en cada periodo.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

8.2.3. Evaluación de los individuos. La evaluación de los individuos se realiza calculando una función *fitness* para cada uno de ellos, y determinando cuales son los más fuertes (aquellos cuya función *fitness* sea menor). La función *fitness* está constituida por la función objetivo del modelo LIRP integrado, más una penalización por sugerir inventarios negativos en la planta. El escenario de inventario negativo, se presenta si el movimiento de producto que sale de la planta supera la cantidad de este producto disponible para despacho; llevado a un contexto real esta cantidad de producto podría ser elaborado por un tercero, pero tendría consecuencias económicas, por eso su penalización. El algoritmo para calcular la función *fitness* de los individuos contiene 6 etapas principales tal como la *Figura 11* lo ilustra.

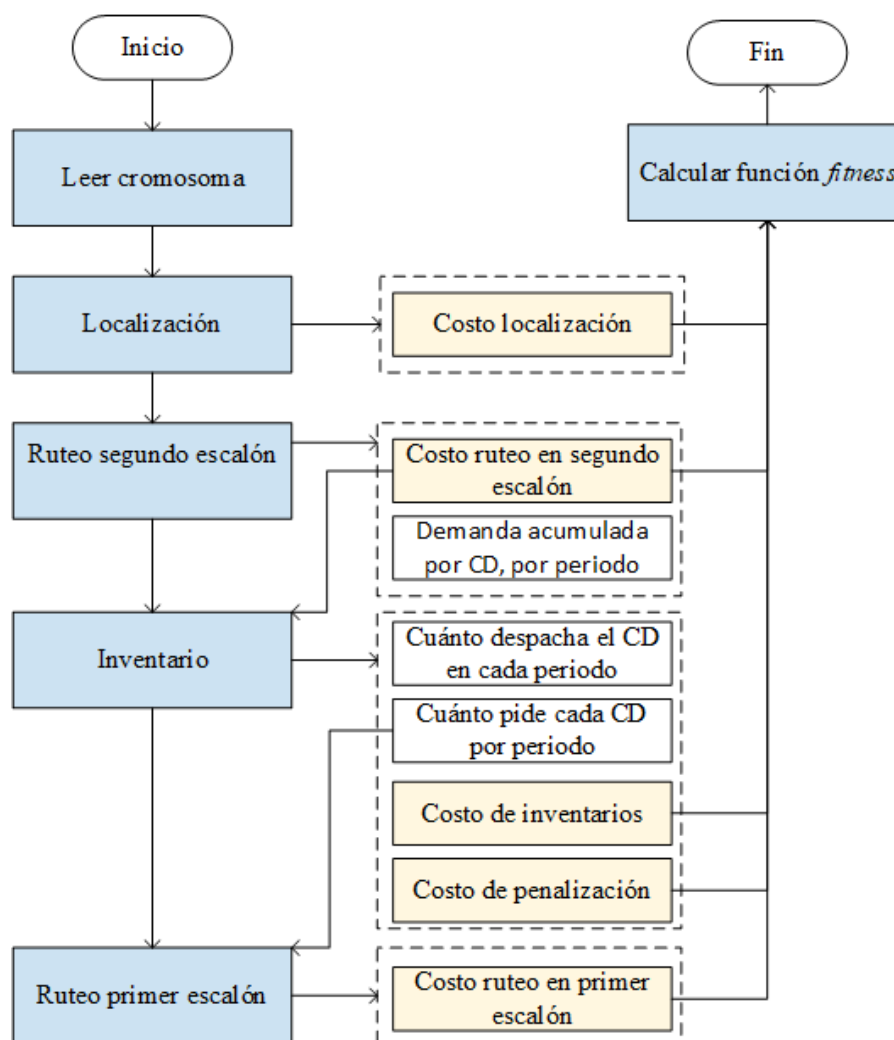


Figura 11 Cálculo de la función *fitness* de un individuo

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

8.2.3.1. Leer cromosoma. Se recoge la información del individuo consignada en el cromosoma correspondiente.

8.2.3.2. Localización. Tal como se muestra en la *Figura 12*, se identifica en la primera sección del cromosoma, qué centros de distribución se decidió habilitar, y se indaga por sus costos correspondientes. De tal manera que los costos de localización obedecen a la sumatoria de los costos asociados a habilitar los centros de distribución relacionados en el cromosoma.

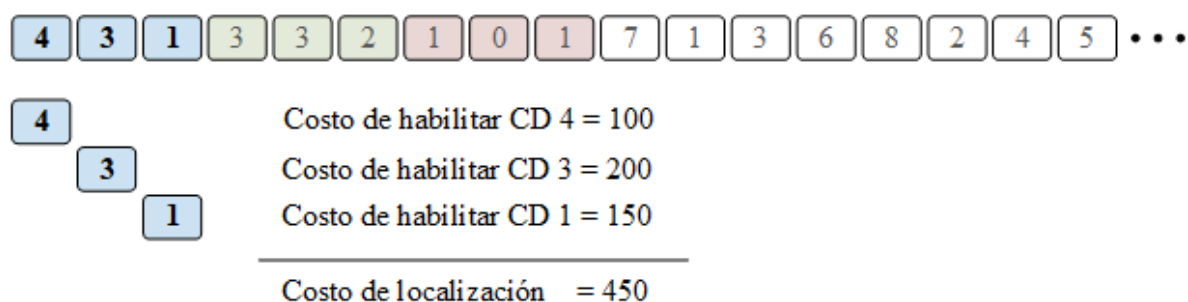


Figura 12 Costos de localización de un individuo

Tal como se muestra en la *Figura 12*, se identifica en la primera sección del cromosoma, qué centros de distribución se decidió habilitar, y se indaga por sus costos correspondientes. De tal manera que los costos de localización obedecen a la sumatoria de los costos asociados a habilitar los centros de distribución relacionados en el cromosoma.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

8.2.3.3. Ruteo en segundo escalón. Para hallar los costos del ruteo en el segundo escalón, primero se hallan las rutas. Para ello se asignan los clientes a su respectivo centro de distribución, tomando para cada CD (celdas azules), la cantidad de clientes indicada en la celda verde correspondiente, recorriendo el cromosoma de izquierda a derecha. Una vez asignados los clientes se recorre el vector de clientes de manera secuencial, teniendo en cuenta que la ruta no puede superar la capacidad del vehículo; si esto sucediera debería iniciarse una nueva ruta, tal como se muestra en el segundo CD del ejemplo de la Figura 13. Las rutas inician y terminan en su respectivo centro de distribución.

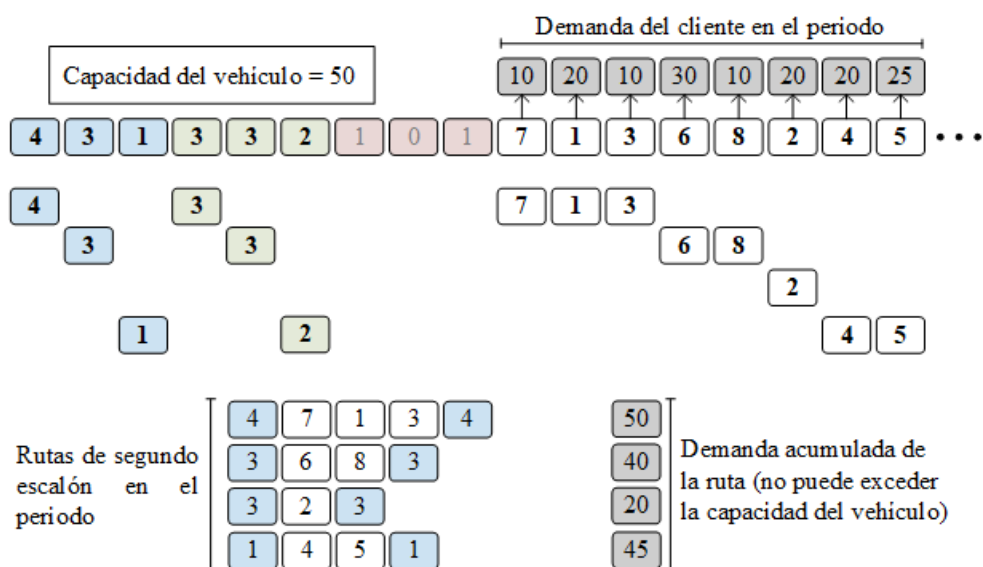


Figura 13 Costos de ruteo en segundo escalón de un individuo, en un periodo

Una vez determinadas las rutas se calcula su distancia equivalente, la cual da lugar al costo de ruteo en el segundo escalón, al ser multiplicada por el costo de recorrer esa distancia para los vehículos. Adicionalmente como en esta etapa se indagó por la demanda acumulada de cada ruta, se guarda esta información para la etapa de cálculo de costos de inventarios.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

8.2.3.4. Inventarios. Para ilustrar el cálculo de los costos de inventarios en los centros de distribución, se utiliza el ejemplo de la Figura 14. Donde a partir de la información consignada en el cromosoma en las casillas en rojo, se obtiene un vector **b)** que indica si el CD se visita en ese periodo; esta información junto con la demanda acumulada **a)** obtenida en la etapa de ruteo en segundo escalón, dan lugar al vector **c)** que indica la cantidad de productos que se deben tener disponibles para distribuir en ese periodo y los periodos siguientes hasta que se vuelva a visitar el CD. Teniendo en cuenta que el flujo de entrada de producto al CD está determinado por **c)**, y el flujo de salida por **a)**, se puede hacer un balance de productos para determinar cuál es la cantidad de inventarios en el CD en cada periodo **d)**.

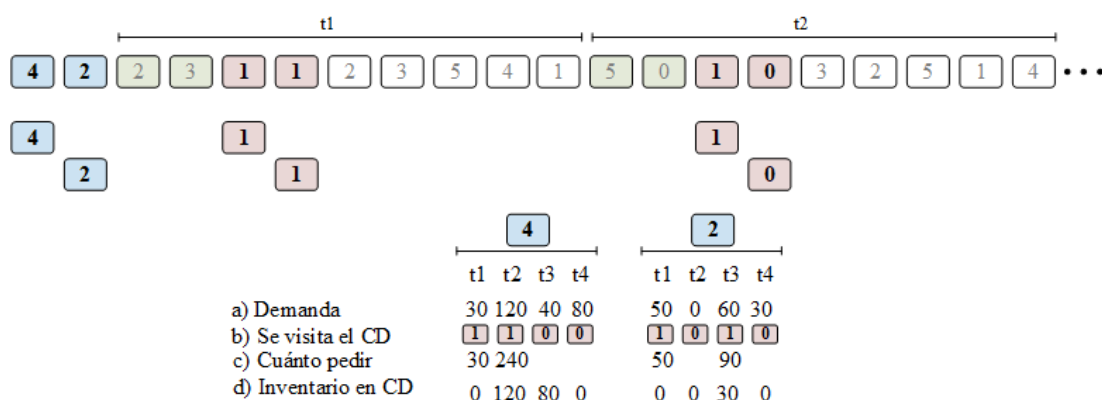


Figura 14 Costos de inventarios de CD's de un individuo

Por otra parte, el flujo de entrada de productos a todos los centros de distribución, es igual al flujo de salida de la planta; el cual junto con la producción del periodo permite conocer el inventario de la planta en cada periodo. Debido a que no se tiene restringida la demanda de productos a la capacidad de la planta, puede darse el escenario que el balanceo de inventarios en la planta resulte un número negativo; esto en el algoritmo será penalizado, y en un contexto real podría equivaler a subcontratar parte de la producción. La

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

configuración de la información de los inventarios en el cromosoma, fue basada en la utilizada por Moin, Salhi, & Aziz (2011).

Una vez se tiene la cantidad de inventarios, estos se multiplican con el costo asociado a mantener productos en cada depósito correspondiente, para encontrar los costos de inventarios.

8.2.3.5. Ruteo en primer escalón. El algoritmo evalúa cuántas rutas se debe hacer para entregar los productos requeridos por cada centro de distribución a lo largo de los periodos y teniendo en cuenta la capacidad del vehículo en el primer escalón, determina cuántas veces debe visitar a cada CD en el periodo. Esta información se transforma a distancia desde la planta al CD y de vuelta a la planta, para finalmente multiplicar esta distancia por el costo asociado al desplazamiento de los vehículos, para generar los costos de ruteo en el primer escalón.

8.2.3.6. Calcular función fitness. Finalmente, la función *fitness* de un individuo es la sumatoria de sus costos asociados a localización, ruteo en primer y segundo escalón, inventarios y la penalización si da lugar. Los individuos con menor función *fitness* son considerados lo más fuertes.

8.2.4. Selección. A partir de la evaluación de los individuos se selecciona la mitad de la población más fuerte como los padres de la siguiente generación, por lo cual serán parte de la misma. La otra mitad de la siguiente generación, será conformada por los hijos producto del cruce entre los padres, de los cuales una fracción mutará.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

8.2.5. Cruce. El cruce de dos padres genera a su vez dos hijos, que comparten características de ambos padres. Se diseñó un cruce donde un hijo conserva la información de localización de un padre y la información referente a cada periodo es compartida con la de ambos padres de forma intercalada, tal como se observa en la *Figura 15*.

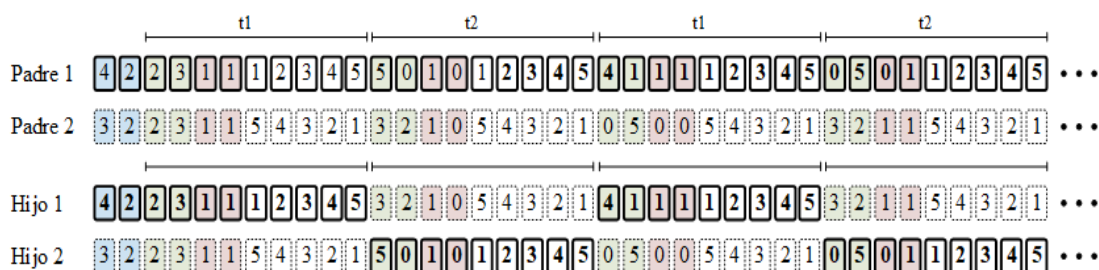


Figura 15 Generación de dos hijos a través del cruce de dos padres

8.2.6. Mutación. Teniendo en cuenta que el cruce conserva la decisión de localización de los padres, se diseña una mutación sobre esta decisión que permite explorar otros conjuntos de soluciones y evitar caer en óptimos locales. Al realizarse el cruce existe una probabilidad de mutación predefinida en los datos de entrada, y si esta mutación se da entonces un centro de distribución no habilitado reemplazará a uno habilitado en la solución anterior.

8.2.7. Selección del mejor individuo. El mejor individuo será aquel con menor función *fitness* en la última generación. Esta solución no es necesariamente la óptima, pero es la mejor encontrada por el algoritmo.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

8.2.8. Selección de parámetros del algoritmo genético. Los objetivos principales del Algoritmo Genético diseñado son encontrar una solución con un bajo costo y hacerlo en un corto tiempo, por lo tanto se analiza la incidencia que tiene sobre estas variables, el número de generaciones a realizar y el tamaño de la población de las mismas. Para ello se plantean dos niveles de cada factor, generando los 4 escenarios relacionados en la Tabla 6 que se aplican a las 30 instancias del conjunto Prodhon (2006), a las cuales se les realizan 30 corridas del algoritmo por escenario, para un total de 3600 muestras. El algoritmo fue ejecutado en MATLAB2017a en un procesador Intel® Core™ i7-4790 CPU 3.60GHz, memoria RAM 7,91 gigas.

Tabla 6

Escenarios de parámetros del AG analizados

Escenario	Número de generaciones	Tamaño de la población
1	500	100
2	1000	100
3	500	200
4	1000	200

Con la ayuda del software de análisis estadístico MINITAB18 se realizan modelos de regresión múltiple en el que los factores de número de generaciones y tamaño de la población buscan predecir el comportamiento de las variables valor del costo de la solución y tiempo de cómputo; Adicionalmente se considera el tamaño de la instancia como variable categórica en los modelos.

En el caso de la variable de tiempo de cómputo; tal como se aprecia en la Figura 6, se encontró que hay una relación estadísticamente significativa con los factores analizados. Con un R cuadrado de 97,36%.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

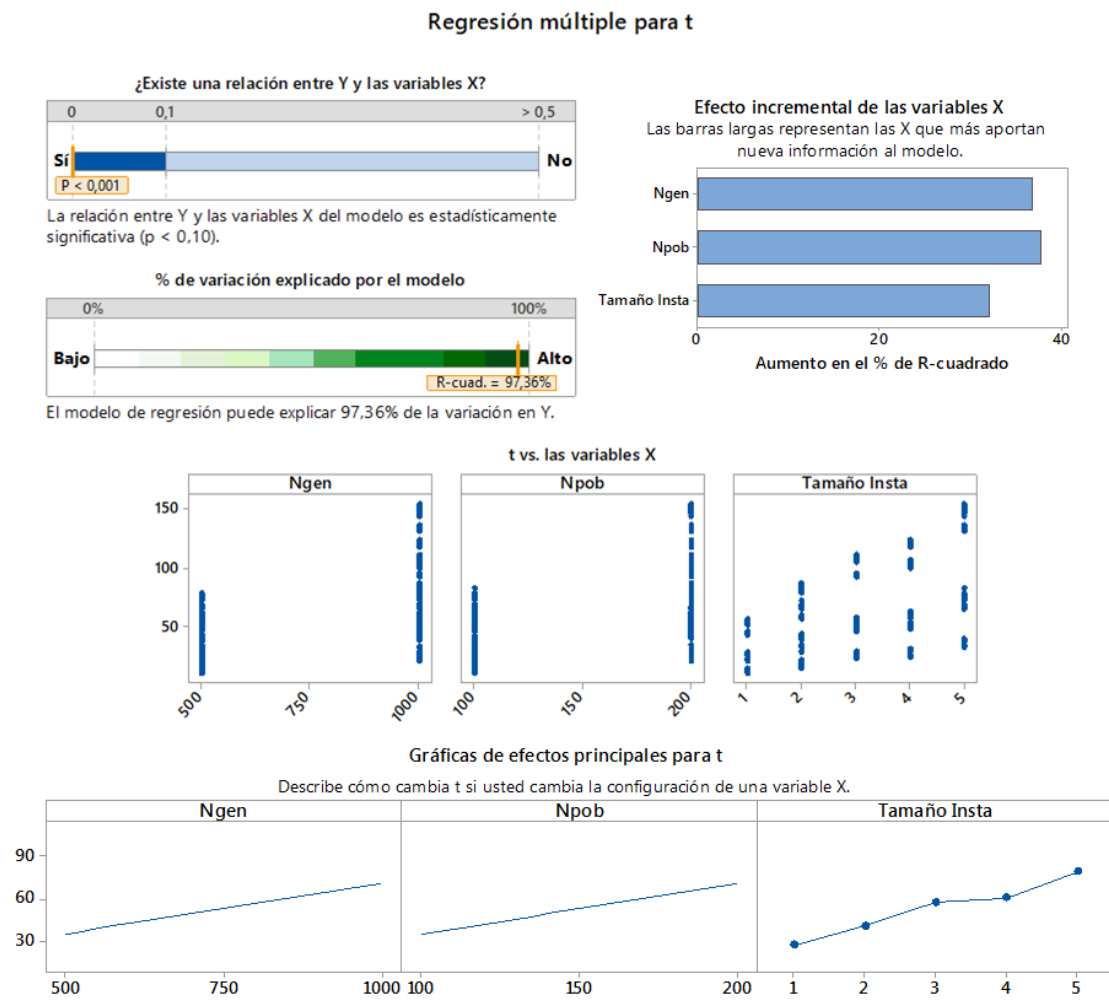


Figura 16. Tabla resumen de regresión múltiple para el tiempo de cómputo del AG

En la Figura 17, se observa como para la variable de costos "Z", se encontró un modelo de regresión que ignora el factor de número de generaciones. Esta regresión, con un R cuadrado de 82,66%, halla una relación estadísticamente significativa entre Z y los factores tamaño de población y tamaño de la instancia; este último siendo el que más aporta información al modelo, lo que es de esperarse, ya que la complejidad de la red de distribución determina la escala del costo hallado por la solución.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

Regresión múltiple para Z

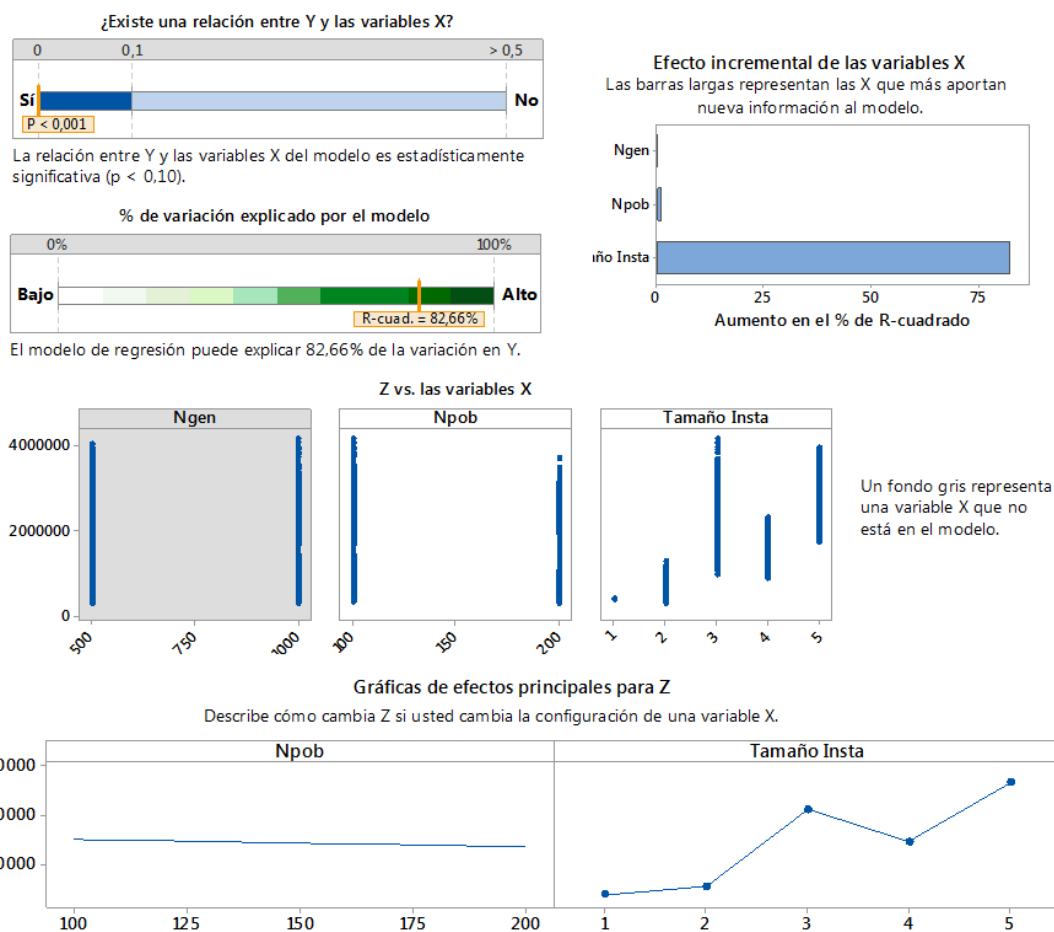


Figura 17 Tabla resumen de regresión múltiple para Z, del AG

Teniendo en cuenta la información analizada en los modelos de regresión, la cual indica que el tamaño de la población impacta sobre el tiempo computacional, pero también sobre la minimización del costo final, se toma el nivel máximo analizado como parámetro del algoritmo (Población de 200 individuos). Por otra parte, el número de generaciones tiene efecto sobre el tiempo computacional y no tanto sobre la función de costos; por tanto, se decide solamente 500 generaciones, con el fin de ahorrar tiempo computacional.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

8.3. Algoritmo genético con vecino más cercano (LIRP por fases)

Teniendo en cuenta que la hipótesis 1 implica una comparación de los modelos LIRP por fases e integrado, se diseña en MATLAB2017a un algoritmo genético híbrido que resuelve el problema LIRP basado en el modelo LIRP por fases del numeral 7.2. buscando soluciones en una región factible. El código de programación del algoritmo se encuentra en el apéndice C y su estructura es descrita en la Figura 18.

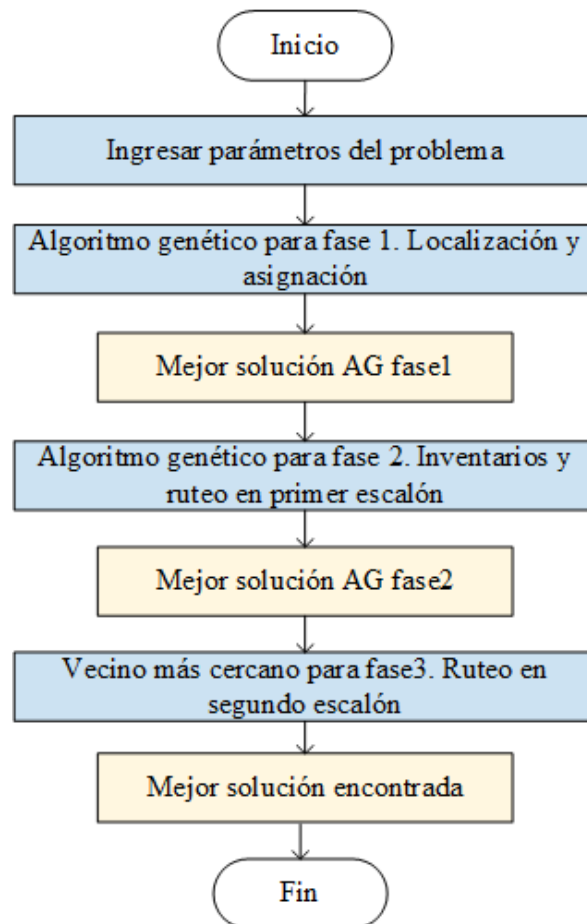


Figura 18 Estructura del algoritmo

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

8.3.1. Fase 1: Localización y asignación. Para buscar la mejor solución de la fase de localización y asignación, se utilizó un algoritmo genético con estructura similar al del numeral 8.2, pero con variaciones en su cromosoma y cruce del mismo. El cromosoma únicamente describe las decisiones de localización y asignación de centros de distribución, que es la parte inicial del planteado en el numeral 8.2.2. Mientras que el cruce se realiza tanto en la sección de localización, como de asignación.

Para el cruce de la decisión de localización se realiza nuevamente a partir de dos padres. El hijo 1 contiene la primera mitad del padre 1 y el resto de información está con el padre 2, tomando de este su segunda mitad y luego la primera y eligiendo los primeros CD's que no hayan sido tomados previamente, ya que no puede haber repeticiones. Para el hijo 2 se cumple el mismo procedimiento con los roles de padre 1 y 2 invertidos; en la Figura 19 se muestra un ejemplo del cruce.

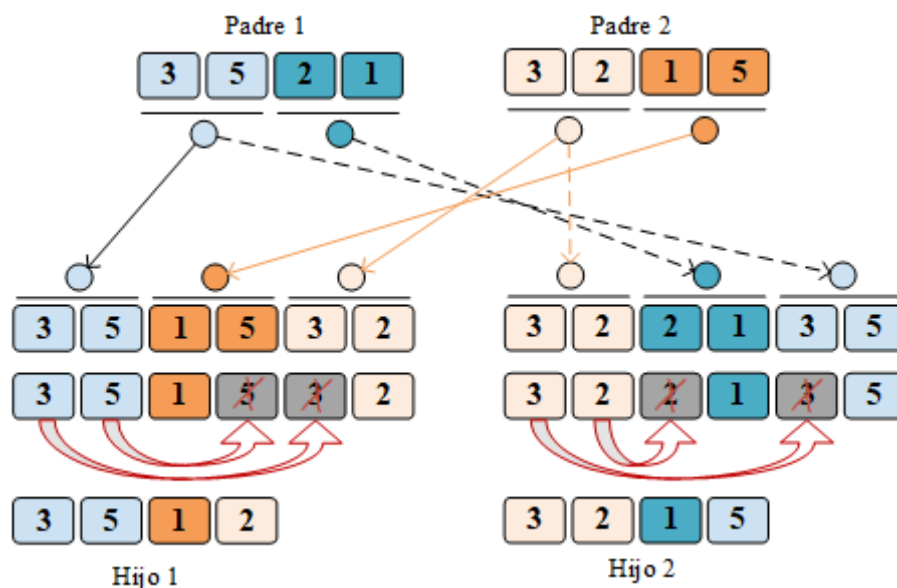


Figura 19 Cruce de sección de localización

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

Para el cruce de asignación se debe tener presente que la sumatoria de los elementos de esta sección debe ser igual al número de clientes. A partir de esto el hijo 1 comparte la primera mitad de información del padre 1; la segunda parte corresponde al padre 2, exceptuando la última asignación que está determinada por la cantidad de clientes que faltan para cubrirlos a todos. Para el hijo dos se cumple el mismo proceso, pero con los padres invertidos. Este cruce puede generar un error si la información aportada por los padres es superior a la cantidad de clientes, por ello se debe hacer una rectificación, tal como se puede apreciar en el hijo 2 del ejemplo de la Figura 20.

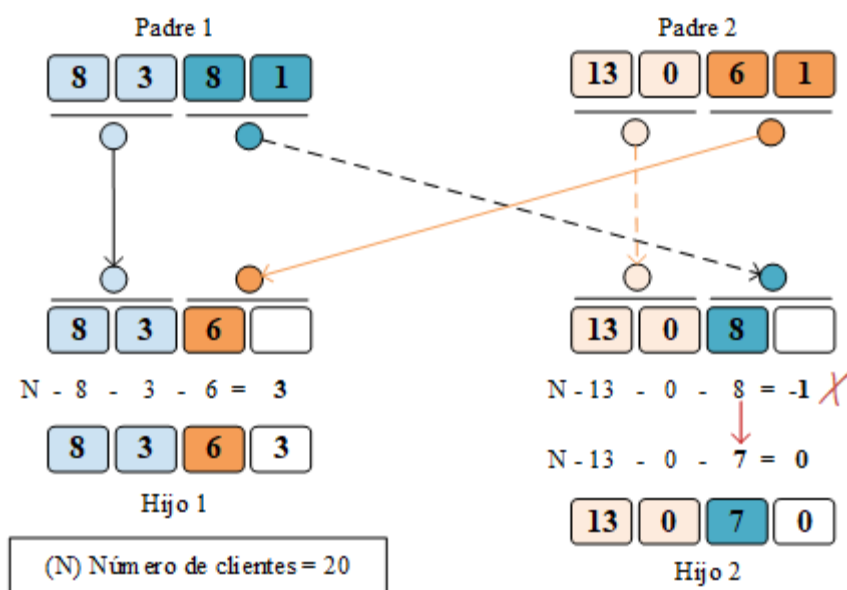


Figura 20 Cruce de sección de asignación

La mutación consiste en elegir un centro de distribución diferente a los tomados en cuenta en el cromosoma, y tiene una probabilidad asociada del evento (asignada previamente).

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

8.3.2. Fase 2: Inventarios y ruteo en primer escalón. Nuevamente un algoritmo genético es usado. La población inicial es generada a partir de individuos que contienen las decisiones de localización y asignación tomadas en la fase anterior, pero sus decisiones de inventario y ruteo son generadas aleatoriamente; por lo demás a excepción de la mutación (la cual no se lleva a cabo), el algoritmo se comporta como el presentado en el numeral 8.2.

8.3.3. Fase 3: Ruteo en segundo escalón. La solución encontrada en la fase 2 es mejorada a través de la aplicación de la heurística del vecino más cercano, la cual afecta únicamente al ruteo en el segundo escalón.

8.4. *Algoritmo genético con vecino más cercano (LIRP integrado)*

Este algoritmo híbrido está diseñado con la misma estructura del presentado en la sección 8.2, con la única variación que las soluciones tanto iniciales como creadas en cada generación, obtienen una mejora con la heurística Vecino Más Cercano, aplicado a las decisiones de asignación y ruteo en segundo escalón. El código utilizado se encuentra en el apéndice D, y la estructura del diseño está descrita en la Figura 21.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

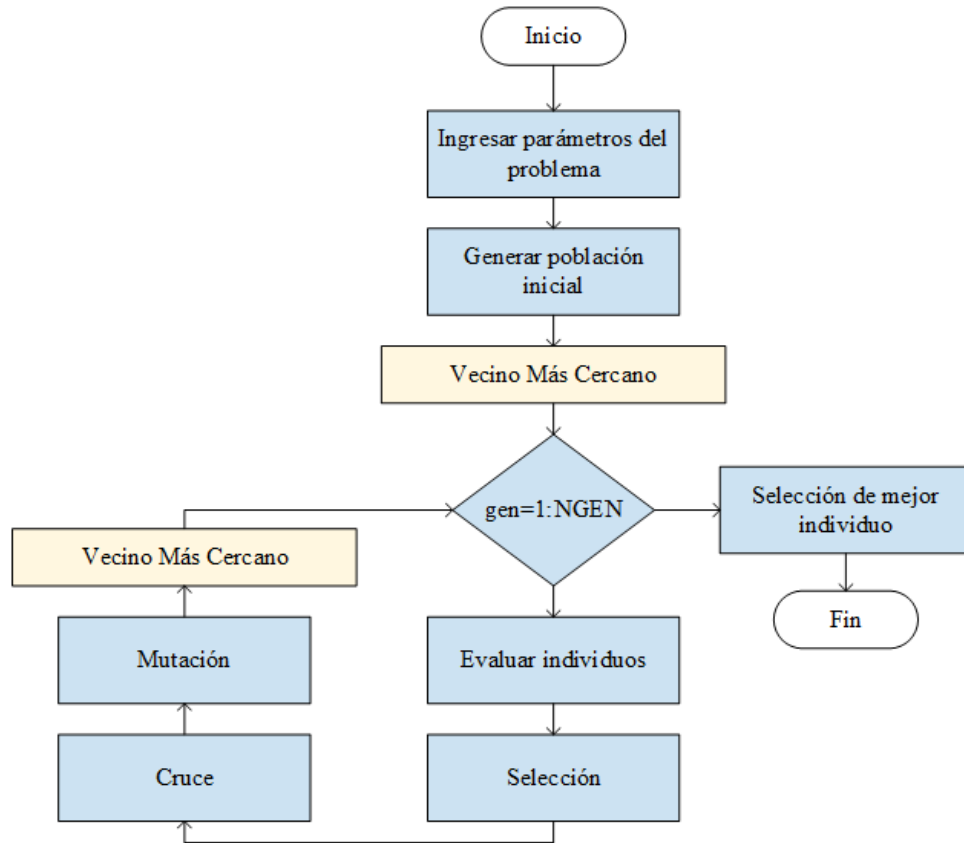


Figura 21 Estructura del algoritmo

8.5. Búsqueda tabú

El algoritmo de búsqueda tabú programado está conformado por una búsqueda tabú inicial mejorada con una heurística, que permiten mejorar una solución inicial enfocándose en disminuir los costos de localización, asignación y ruteos en ambos escalones; posteriormente se realiza otra búsqueda tabú cuyo objetivo es mejorar la solución encontrada a través de intercambiar las decisiones de inventario; el conjunto de soluciones que explora se encuentra en una región factible.

El algoritmo fue programado en MATLAB2017a, y las soluciones conservan el diseño del cromosoma utilizado en el algoritmo genético descrito en la sección 8.2; asimismo comparte la característica de buscar soluciones en una región factible. A continuación se

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

describen las principales etapas del algoritmo, las cuales se pueden apreciar en la Figura 22, y el código de su programación en el apéndice E.

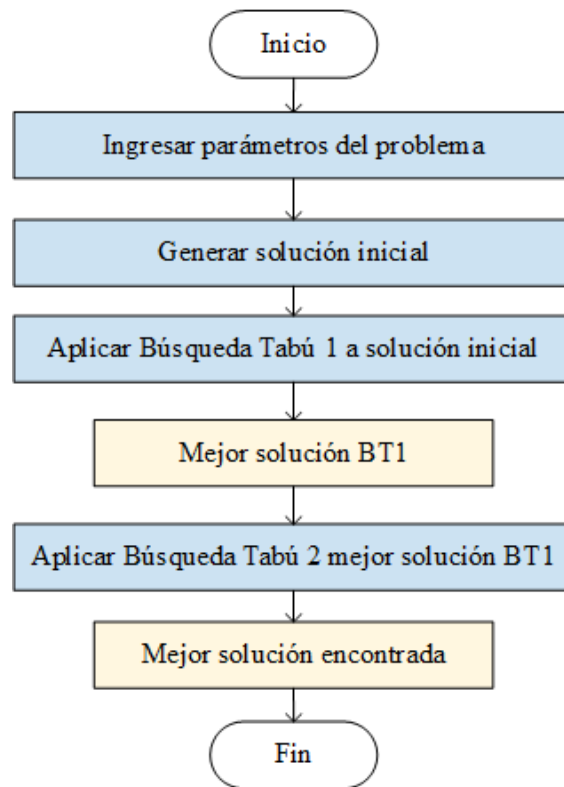


Figura 22 Estructura del algoritmo de búsqueda tabú programado

8.5.1. Ingresar parámetros del problema. Se utiliza el mismo script de entrada de datos “entrada.m”. En el cual se leen los parámetros de la red de distribución y de la metaheurística (número de iteraciones y tamaño de la lista tabú), y se generan la matriz de distancia, la cantidad de centros de distribución a habilitar y se simula la demanda estocástica.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

8.5.2. Generar solución inicial. Debido a que la metaheurística requiere partir de una solución inicial, se genera una solución factible de manera aleatoria mediante la función “generador.m”.

8.5.3. Aplicar Búsqueda Tabú 1 a solución inicial. La primera búsqueda tabú que realiza el algoritmo, tiene el objetivo de mejorar la solución inicial cambiando los centros de distribución que se habilitarán, o su orden en el vector solución que implica cambio de asignación de clientes y manejo de inventarios. A partir de esta decisión se aplica el algoritmo de Vecino Más Cercano para realizar la asignación de clientes a los centros de distribución y también el ruteo en segundo escalón. El movimiento que origine el menor costo es guardado en una lista tabú, donde se veta por un número de iteraciones previamente definido, y la solución asociada a este movimiento es guardada para ser la solución inicial de la siguiente iteración.

Este proceso de búsqueda se realiza un número de iteraciones predefinido, en los que de forma paralela se va guardando la mejor solución encontrada hasta el momento, para ser la solución final una vez terminen las iteraciones. En la Figura 23 se ilustra el diseño del algoritmo de búsqueda tabú 1.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

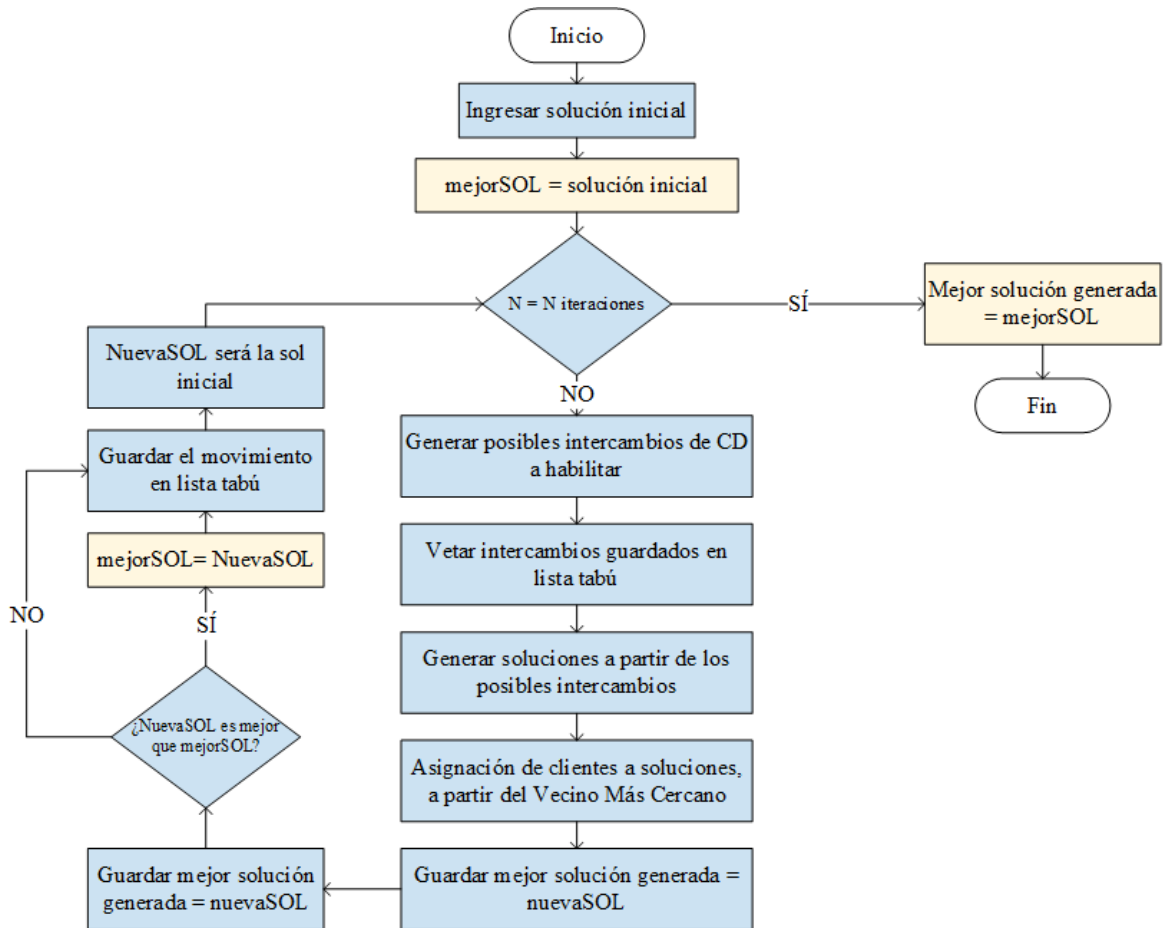


Figura 23 Búsqueda tabú 1

8.5.4. Aplicar Búsqueda Tabú 2 mejor solución BT1. El algoritmo toma como solución inicial, la solución final de la búsqueda tabú 1. A partir de ella busca nuevas soluciones intercambiando la configuración del vector solución, específicamente la sección que influye en los inventarios. Su estructura es similar a la de la búsqueda tabú 1: genera soluciones partiendo de intercambios en el vector solución, toma la mejor solución y la hace la solución inicial de la siguiente iteración. El movimiento asociado a la mejor solución es vetado en una lista tabú por algunos periodos.

Este procedimiento es repetido un número de iteraciones predeterminado y la solución final será la mejor encontrada durante todas las iteraciones, y también será la solución final

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

del algoritmo de búsqueda tabú diseñado. La estructura del algoritmo de búsqueda tabú 2 se puede apreciar en la Figura 24.

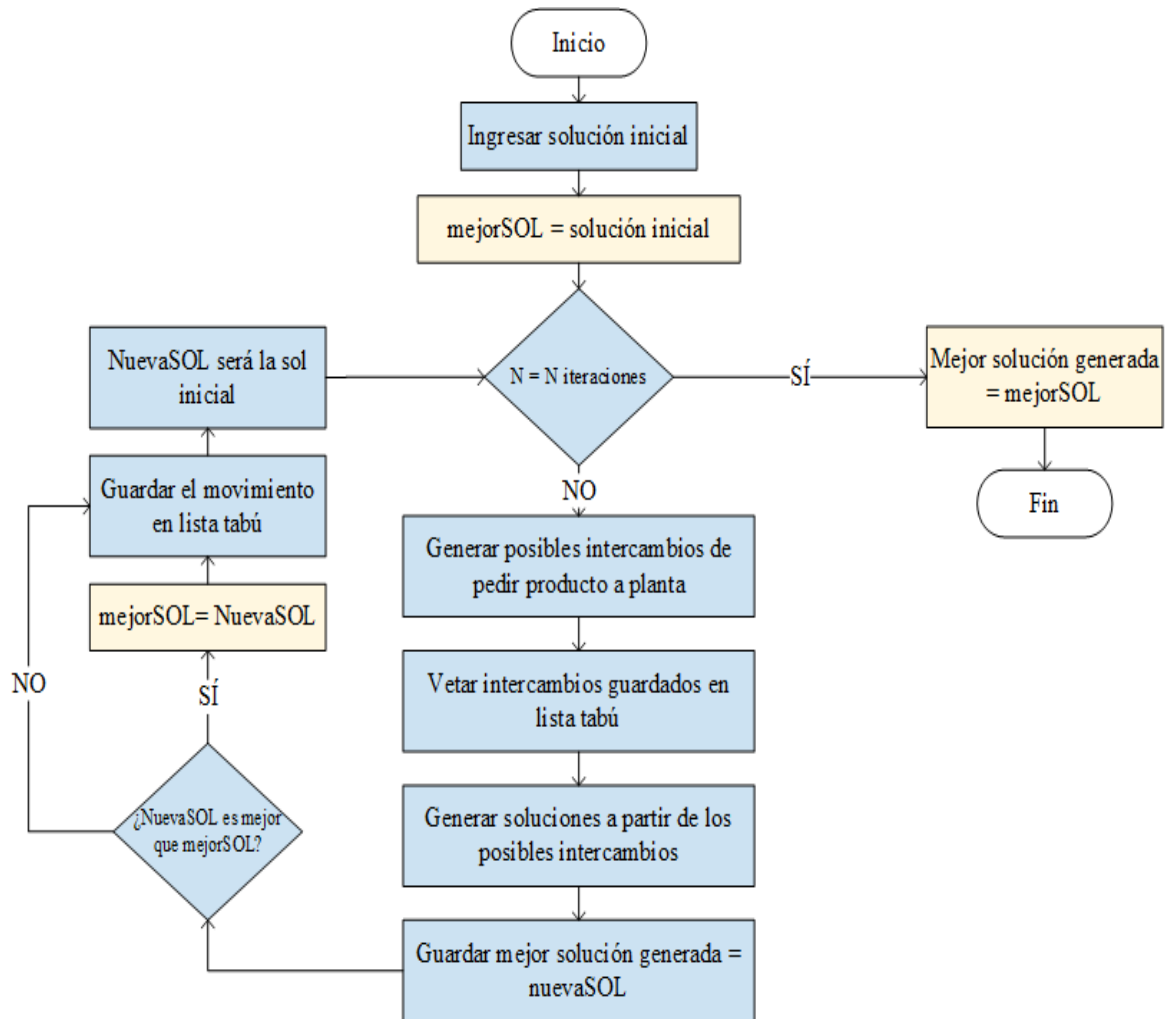


Figura 24 Búsqueda tabú 2

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

8.5.5. Selección de parámetros del algoritmo de búsqueda tabú. El algoritmo diseñado tiene como propósito encontrar buenas soluciones en un corto tiempo; por lo tanto, se analiza el efecto que tienen tanto el número de iteraciones realizadas por el algoritmo y los periodos que se guardan los movimientos en la lista tabú, sobre el costo de la solución encontrada por el algoritmo y el tiempo de cómputo. Se propusieron 4 escenarios relacionados en la **Tabla 7**, dos niveles de cada factor, de los cuales se tomaron 30 muestras a las 30 instancias del conjunto Prodhon (2006); obteniendo un total de 3600 muestras. Las muestras fueron obtenidas gracias al software MATLAB2017a, con un procesador Intel® Core™ i7-4790 CPU 3.60GHz, memoria RAM 7,91 gigas.

Tabla 7 Escenarios de parámetros del AG analizados

Escenario	Iteraciones en que se restringe un movimiento tabú	Número de iteraciones algoritmo
1	Posibles CD's a habilitar (M) / 2	500
2	Posibles CD's a habilitar (M) / 2	1000
3	Posibles CD's a habilitar (M) / 3	500
4	Posibles CD's a habilitar (M) / 3	1000

Se realizó inicialmente un análisis de regresión múltiple en el software MINITAB18, donde la variable respuesta fue el tiempo de cómputo del algoritmo, y las variables de entrada: el número de iteraciones realizadas por el algoritmo, los periodos que se guardan los movimientos en la lista tabú y como variable categórica el tamaño de la red de distribución propuesta en la instancia. Como se puede apreciar en la Figura 25, un modelo de regresión múltiple que excluya los periodos en que se guarden los movimientos tabú, pero contemple el número de iteraciones y el tamaño de la red de distribución, encuentra relación estadísticamente significativa entre las variables mencionadas, con un R cuadrado de 88,61%.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

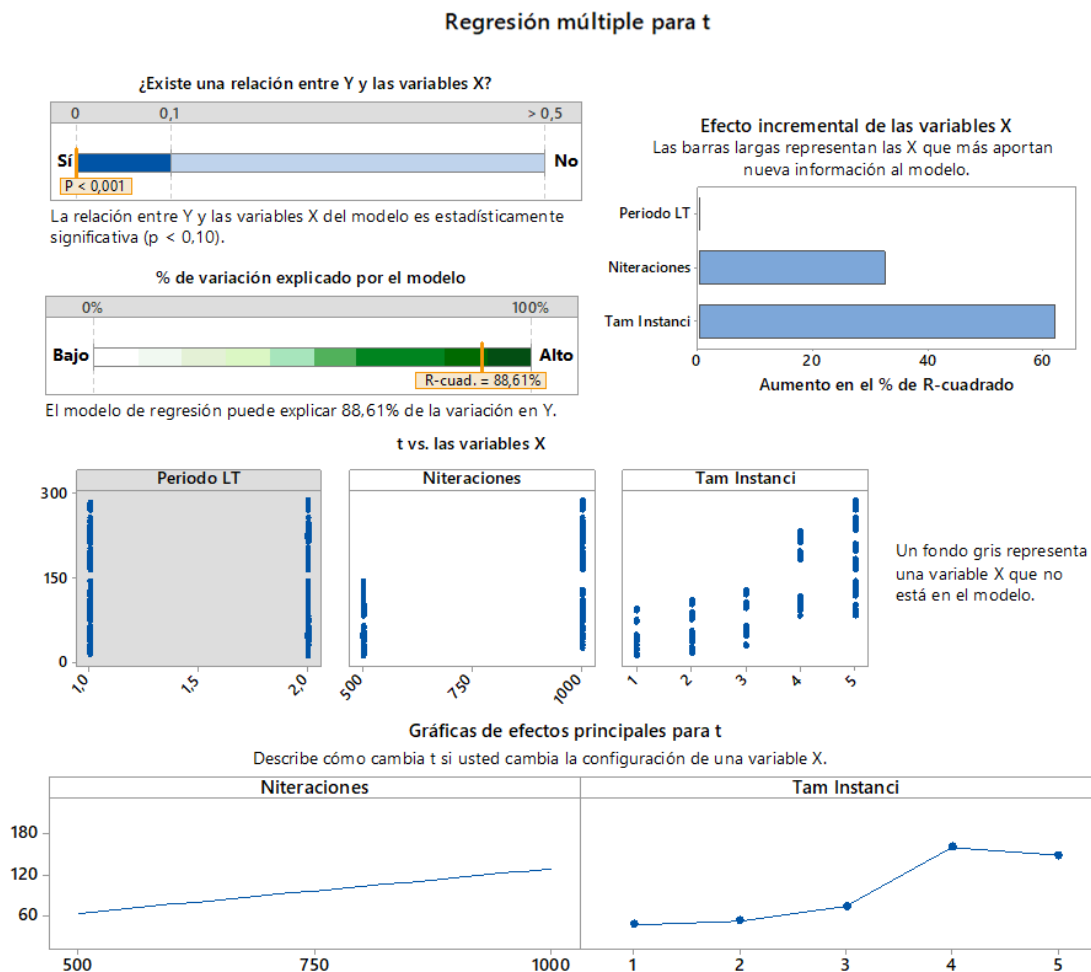


Figura 25 Tabla resumen de regresión múltiple para el tiempo de cómputo de la Búsqueda Tabú

Se realiza otra regresión múltiple en MINITAB18, con las mismas variables de entrada, pero con el costo asociado a la solución encontrada “Z” como variable respuesta. En esta se indica nuevamente que la variable de los periodos en que se guardan los movimientos tabúes se excluye de la regresión mientras las demás variables tienen una relación estadísticamente significativa. El modelo posee un R cuadrado de 88,03%, en la Figura 26 se muestra la tabla resumen de la regresión múltiple.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

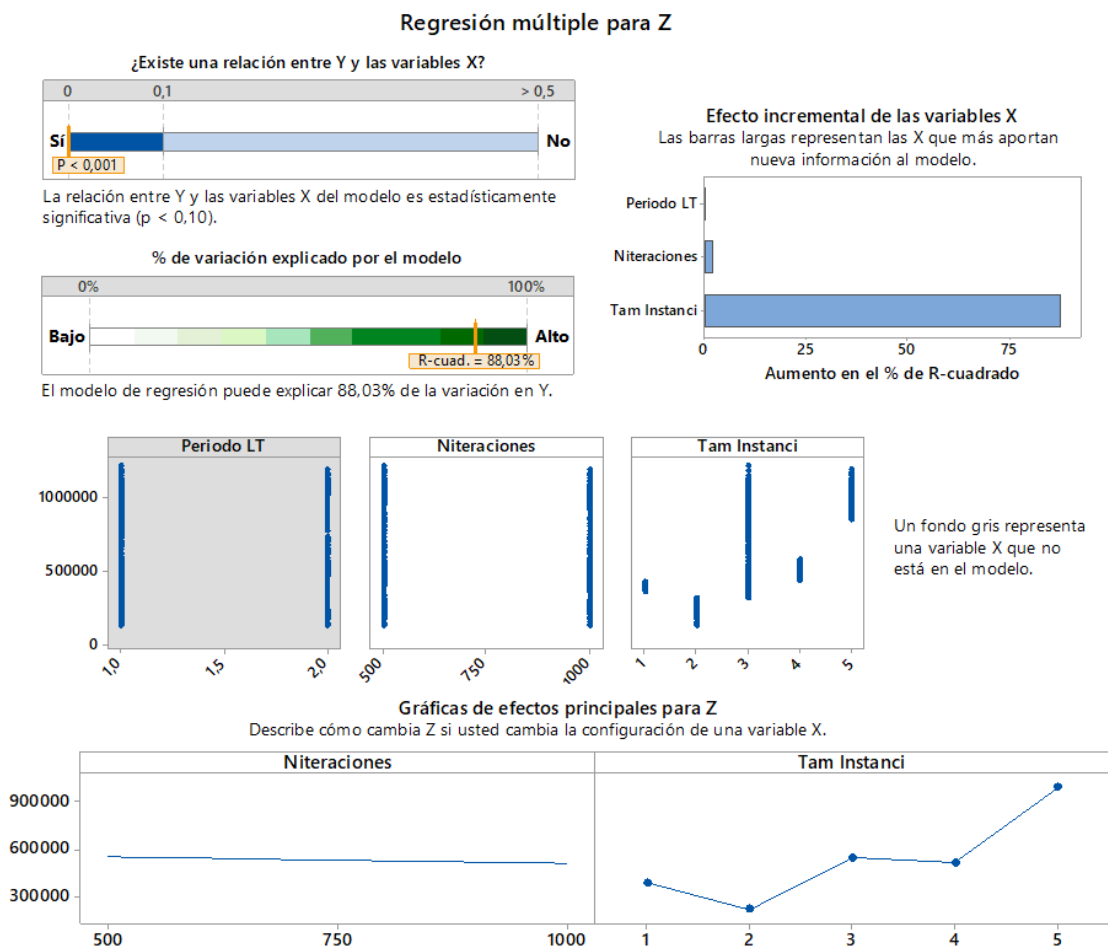


Figura 26 Tabla resumen de regresión múltiple para Z, de la Búsqueda Tabú

A partir de la información de los modelos de regresión, se decide tomar el mayor número de iteraciones analizado (1000), con el fin de generar soluciones con un menor costo, aunque el tiempo computacional aumenta, no es significativo para las características del problema. Por otra parte las iteraciones en que se mantenga restringida un movimiento en la lista tabú, no parece tener efecto en la función de costos ni el tiempo computacional, por lo cual se decide tomar el primer nivel (Posibles centros de distribución a habilitar / 2).

8.6. Metaheurística híbrida

Se propone una metaheurística híbrida programada en MATLAB2017a, que combina propiedades de las metaheurísticas propuestas en las secciones 8.2 y 8.3.1. Esta consiste en un algoritmo genético cuya población inicial es aportada en parte por una búsqueda tabú inicial; dentro de la generación de nuevos individuos contiene una heurística de Vecino Más Cercano; y por último la mejor solución encontrada es mejorada con una segunda búsqueda tabú enfocada en la decisión de inventarios. Igual que las anteriores metaheurísticas que usa de base, esta busca soluciones dentro de una región factible. A continuación se describe el diseño de la metaheurística híbrida, cuya estructura se muestra en la Figura 27. El código de programación de la metaheurística se encuentra en el apéndice F.

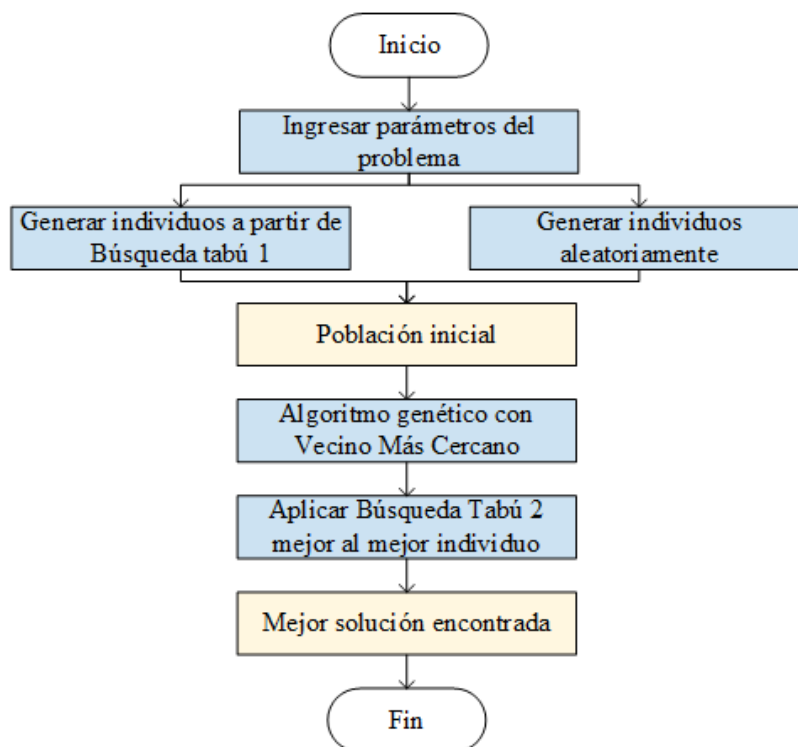


Figura 27 Estructura de la metaheurística híbrida

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

8.6.1. Ingresar parámetros del problema. Nuevamente se utiliza la función “entrada.m” creada en MATLAB, la cual permite leer los parámetros de la instancia y de los algoritmos metaheurísticos.

8.6.2. Generar individuos a partir de Búsqueda tabú 1. A partir de una solución aleatoria inicial se aplica la búsqueda tabú 1 descrita en la sección 8.5.3. Esta búsqueda tabú tiene el objetivo de disminuir el costo de una solución, proponiendo variaciones de esta, que surgen a través de intercambiar la ubicación de los centros de distribución en el cromosoma o vector solución; este intercambio genera variaciones en la decisión no sólo de localización y ruteo en primer escalón, sino que al variar el orden del cromosoma se influye en las decisiones de asignación de clientes y ruteo en el segundo escalón. Esta búsqueda tabú 1, contiene a su vez la heurística del Vecino Más Cercano, que busca mejorar las decisiones de asignación y ruteo en segundo escalón.

Las mejores soluciones de la búsqueda tabú 1 serán parte de la población inicial para el algoritmo genético, en una proporción definida en los parámetros de entrada.

8.6.3. Generar individuos de aleatoriamente. Con la función de MATLAB “generador.m” se crean cromosomas de manera aleatoria, que representan los demás individuos que conformarán la población inicial.

8.6.4. Algoritmo genético con Vecino Más Cercano. El algoritmo genético tiene como base el mismo diseño del descrito en la sección 8.2, con la variación que después de generar los hijos sean generados por cruce, y sean mutados o no, se modifican sus códigos de asignación de clientes y sus clientes con la heurística del Vecino Más Cercano.

8.6.5. Aplicar Búsqueda Tabú 2 mejor al mejor individuo. La mejor solución encontrada por el algoritmo genético es mejorada con la búsqueda tabú 2, descrita en la sección 8.5.4. Esta búsqueda tabú modifica las decisiones de pedir productos de los centros de distribución a la planta en cada periodo, con el fin de bajar el costo de los inventarios.

La solución encontrada por esta búsqueda tabú 2, es la mejor solución hallada por la metaheurística híbrida.

8.6.6. Selección de parámetros del algoritmo metaheurístico híbrido. En los numerales 8.2.8 y 8.5.5 se analizó la conveniencia de los valores de los parámetros propios del algoritmo genético y la búsqueda tabú respectivamente; sin embargo en el algoritmo metaheurístico híbrido propuesto existe una cantidad de soluciones que la búsqueda tabú aporta a la población inicial del algoritmo genético, por lo que se analiza el nivel más conveniente de esta variable. Posteriormente se estudia la conveniencia de aplicar la segunda búsqueda tabú del algoritmo. Para realizar estos análisis se tomaron 3 niveles del parámetro, que se replicaron 30 veces en las 30 instancias del conjunto Prodhon (2006); obteniendo un total de 2700 muestras. Las muestras fueron obtenidas ejecutando el algoritmo en MATLAB2017a, con un procesador Intel® Core™ i7-4790 CPU 3.60GHz, memoria RAM 7,91 gigas.

El parámetro de cuántos individuos de la población inicial del algoritmo genético son aportados por la búsqueda tabú inicial (PI BT), se analiza a través de un modelo de regresión múltiple, en el cual se plantea como variable respuesta el costo de la solución encontrada por el algoritmo, analizando el efecto de tres diferentes niveles del parámetro PI BT, y tomando el tamaño de la instancia como variable categórica. El modelo de regresión encontrado describe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un R

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

cuadrado de 82,71%. El efecto que tiene la variable PI BT sobre el costo, tal como se aprecia en la Figura 28, es aumentar a medida que aumenta la variable.

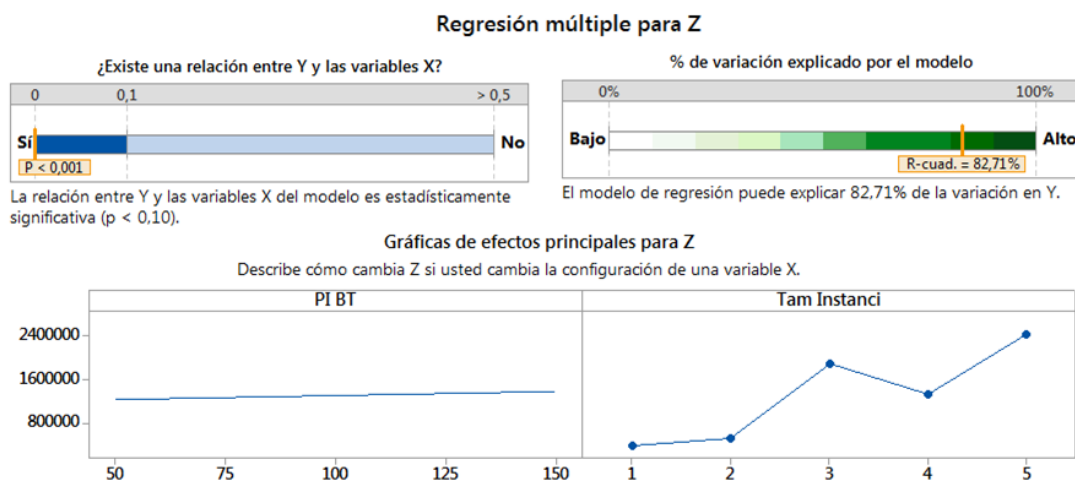


Figura 28 Tabla resumen de regresión múltiple para Z, del AH

Adicionalmente se realiza una regresión múltiple con las mismas variables de entrada PI BT y tamaño de la instancia (como variable categórica), pero con el tiempo de ejecución del algoritmo como variable respuesta. Se encuentra un modelo con un R cuadrado de 82,71%, que determina significancia estadística entre las variables; y en el cual se observa tal como se ilustra en la Figura 29, que a medida que aumenta PI BT aumenta el tiempo de cómputo.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

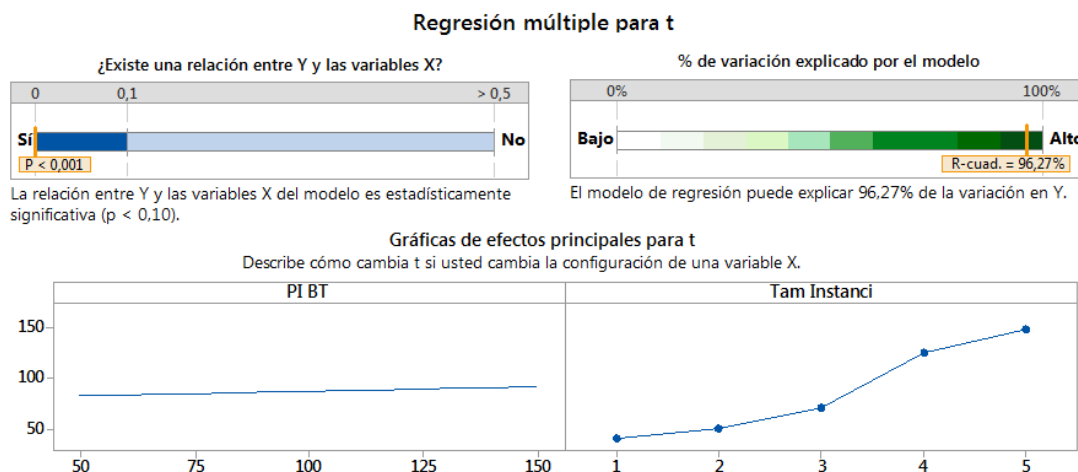


Figura 29 Tabla resumen de regresión múltiple para t, del AH

Teniendo presente los resultados de los modelos de regresión, en los cuales al aumentar PI BT, aumenta a su vez el costo de la solución hallada por el algoritmo y su tiempo de computo; se elige el menor nivel del parámetro PI BT como el adecuado para el algoritmo.

También se analiza la pertinencia de agregar la segunda búsqueda tabú al algoritmo. Para ello se contrastan 1800 muestras provenientes de ejecutar el algoritmo híbrido con y sin la búsqueda tabú 2, 30 veces en las 30 instancias del conjunto Prodhon (2006), en MATLAB2017a con un procesador Intel® Core™ i7-4790 CPU 3.60GHz, memoria RAM 7,91 gigas.

Aplicando una prueba t de dos muestras para las medias de los costos de la mejor solución hallada con y sin utilizar la segunda búsqueda tabú en el algoritmo, se puede concluir que la media de Z sin BT2 es mayor que Z con BT2 en el nivel de significancia de 0,05. Teniendo en cuenta el aporte de la búsqueda tabú 2 a la disminución del costo final y que el mayor tiempo de cómputo del algoritmo no supera los siete minutos, se considera

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

pertinente ejecutar la metaheurística híbrida con la búsqueda tabú 2 incluida. En la Figura 30 se encuentran los resultados de la prueba.

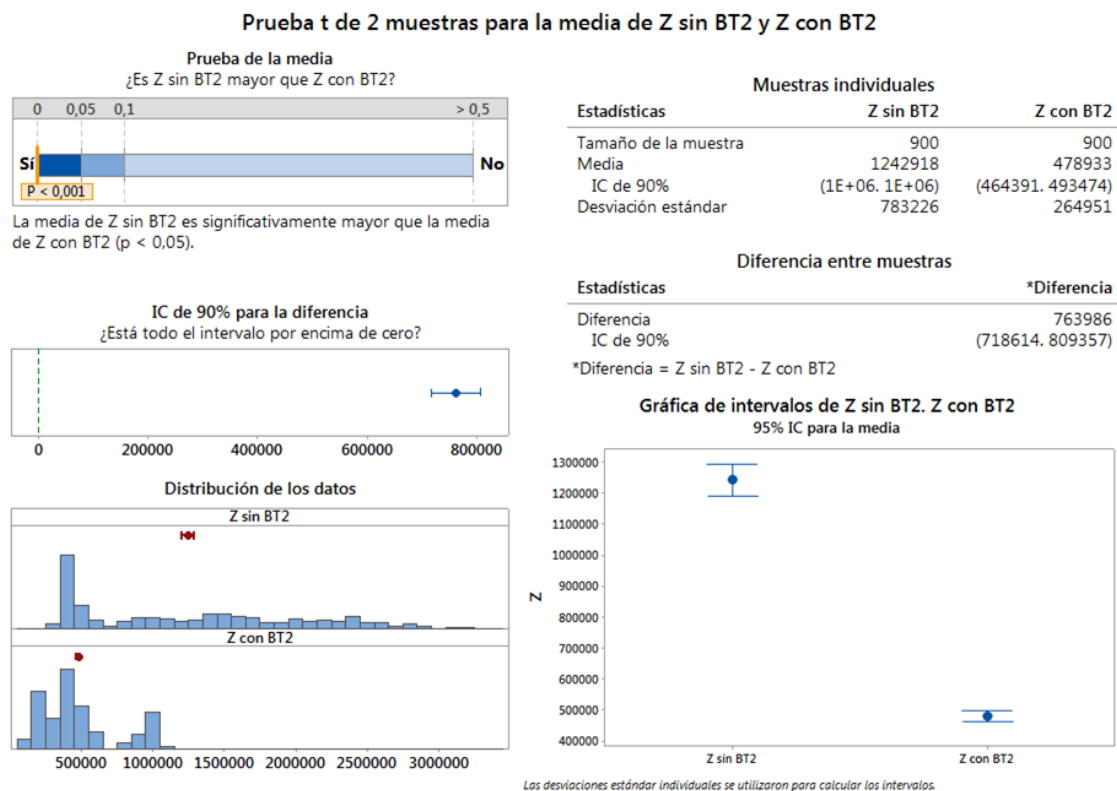


Figura 30 Prueba t de 2 muestras para las medias de Z sin y con la BT2

9. Prueba del modelo y resultados

A partir de los modelos diseñados y los métodos de solución seleccionados, se busca probar las dos hipótesis planteadas en el presente trabajo de investigación. Las experimentaciones se desarrollaron en MATALB2017a, con un procesador Intel® Core™ i7-4790 CPU 3.60GHz, memoria RAM 7,91 gigas; tomando las instancias del conjunto Prodhon (2006), que presenta cinco tamaños diferentes de red de distribución, tal como se aprecia en la Tabla 8. La demanda estocástica de los clientes en cada periodo, fue simulada generando

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

números aleatorios con una distribución normal, cuya media y desviación se estimó a partir de los valores de las demandas discretas relacionada en la instancia; siendo esta desviación equivalente a la del total de las demandas de los clientes en la instancia, mientras que para cada cliente la media de la distribución se determinó por la demanda discreta del cliente en la instancia.

Tabla 8

Tamaño de las instancias del conjunto Prodhon (2006)

Tamaño instancia	Instancia	N (clientes)	M(possibles CD's)
1	1-4	20	5
2	5-12	50	5
3	13-18	100	5
4	19-24	100	10
5	25-30	200	10

9.1. Prueba de la hipótesis 1

La primera hipótesis afirma que “Para el diseño de una red de distribución de dos escalones, un modelo LIRP que integre las decisiones de localización, ruteo e inventarios, brinda mejores soluciones que un modelo desarrollado por fases”.

Para probar esta hipótesis, se planteó inicialmente resolver 20 instancias del conjunto Prodhon (2006) reducidas en su número de clientes a 10 y con 3 periodos; mediante programación lineal entera mixta (MILP), utilizando el algoritmo descrito en el numeral 8.1, el cual a través de MATLAB2017a gestiona los diferentes modelos matemáticos en GAMS; sin embargo, debido a la complejidad de los modelos sólo 7 instancias arrojaron resultados, las demás saturaron la memoria del computador o no se encontró soluciones factibles, en la mayoría de veces a causa del modelo de ruteo en segundo escalón del LIRP por fases. Teniendo en cuenta que la muestra es muy pequeña para realizar inferencias estadísticas, se propone abordar el experimento a través de métodos de solución

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

metaheurísticos, de tal manera que en la sección 8.3 se desarrolla un algoritmo genético híbrido, basado en el modelo LIRP por fases del numeral 7.2; así mismo, en la sección 8.4 se presenta un algoritmo genético híbrido basado en el modelo LIRP integrado del numeral 7.3. Los algoritmos poseen características similares en cuanto a tamaño de las poblaciones, número de generaciones y diseño de la hibridación, siendo algoritmos genéticos que se mejoran específicamente en el ruteo de segundo escalón con la heurística del Vecino Más Cercano.

Para verificar el cumplimiento de la hipótesis, se contrastan los resultados de las soluciones de ambos algoritmos, tomando 30 muestras de cada una de las 30 instancias del conjunto de Prodhon (2006), para un total de 900 muestras.

En la Tabla 9 se presentan los resultados promedios de los costos asociados a la mejor solución encontrada (Z) y los tiempos de ejecución de los algoritmos (t).

Tabla 9

Resultados promedio de los modelos LIRP por fases e integrado

Tamaño Instancia	Instancia	Modelo LIRP por fases		Modelo LIRP integrado	
		Z	t	Z	t
1	1	397.280,26	12,91	386.685,02	37,17
	2	398.974,76	11,68	388.419,83	27,36
	3	417.611,87	13,40	404.058,83	39,75
	4	408.610,29	11,36	401.622,29	28,06
2	5	543.905,41	15,15	416.013,14	35,21
	6	466.282,21	14,92	382.858,15	35,42
	7	638.107,97	16,74	517.589,99	45,16
	8	787.179,77	17,14	622.109,15	45,02
	9	934.843,09	17,75	802.636,19	42,17
	10	642.429,30	17,44	508.840,61	42,71
	11	471.765,53	14,57	405.634,53	35,40
	12	446.444,00	14,78	368.474,46	35,07
3	13	2.866.397,70	22,76	2.539.066,90	57,15
	14	3.979.665,75	21,76	3.327.702,43	56,61
	15	1.748.724,91	21,94	1.541.588,46	55,92
	16	1.650.832,84	21,63	1.309.917,37	55,23
	17	1.699.622,70	19,39	1.470.303,81	46,16
	18	1.833.078,08	19,01	1.624.715,09	45,41

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

Tamaño Instancia	Instancia	Modelo LIRP por fases		Modelo LIRP integrado	
		Z	t	Z	t
4	19	2.266.390,04	24,00	2.026.099,03	68,87
	20	2.144.068,39	27,06	1.798.184,01	70,84
	21	1.397.017,61	25,42	1.111.813,44	68,36
	22	1.351.999,35	25,71	998.090,63	67,94
	23	1.607.053,02	25,51	1.349.196,45	70,83
	24	1.504.332,73	25,29	1.232.558,63	70,75
5	25	3.024.875,37	33,86	2.272.563,15	82,67
	26	3.062.843,01	33,15	2.512.119,13	81,80
	27	3.124.403,17	36,53	2.273.113,31	91,06
	28	3.312.638,04	36,39	2.601.238,96	89,48
	29	2.830.606,78	33,82	2.272.846,47	82,25
	30	2.344.008,56	34,02	1.924.537,19	81,40

Para todas las instancias utilizadas, el modelo LIRP desarrollado de forma integral, encuentra soluciones con menores costos promedios; indicando que la hipótesis 1 es correcta, sin embargo, posteriormente se realizará una prueba t de dos muestras para aceptar o rechazar esta hipótesis. En cuanto a los tiempos de ejecución de los algoritmos, en todas las instancias ejecutadas se observa que el algoritmo del modelo LIRP por fases encuentra soluciones en menor tiempo; esto debido a que a pesar que ambos algoritmos genéticos poseen igual cantidad de generaciones e igual tamaño de sus poblaciones, la función *fitness* del Algoritmo genético fase 1 es menos compleja computacionalmente, puesto que calcula únicamente los costos de localización y asignación, mientras que en el modelo LIRP integrado todos los individuos son evaluados con la función *fitness* que incluye la totalidad de los costos.

En la Figura 31 se observan los intervalos de las medias (con un 95% de intervalo de confianza) de los costos asociados a las soluciones finales obtenidas de los modelos LIRP por fases (Zfases), y LIRP integrado (Zintegrado); en los cuales se aprecia la media de los costos para los cinco diferentes tamaños de instancias, se observa nuevamente que las

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

soluciones provenientes del modelo integrado tienen menor costos que las del modelo por fases.

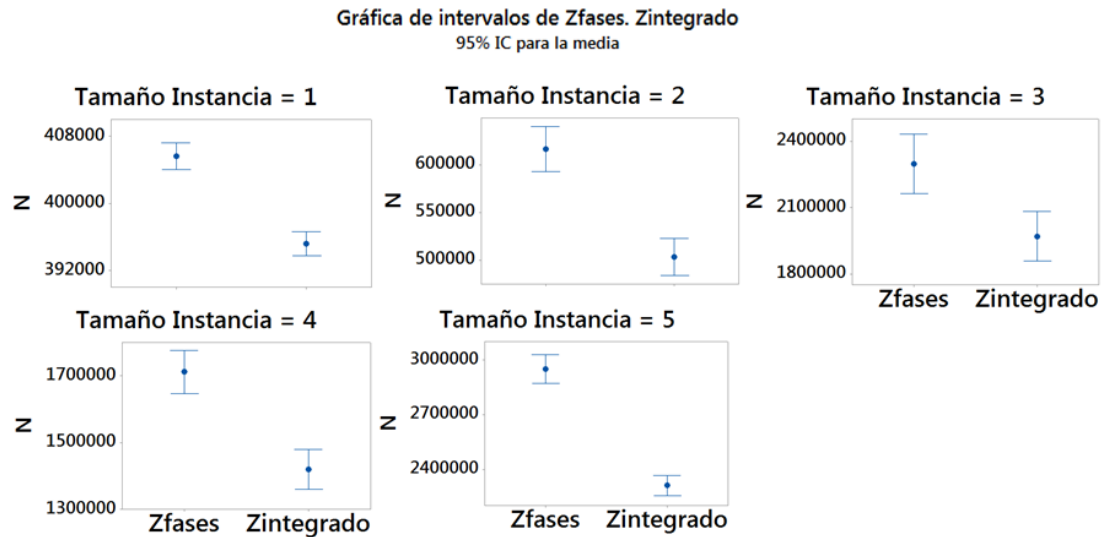


Figura 31 Gráfica de intervalos de Zfases y Zintegrado

Finalmente, aplicando una prueba t de dos muestras se obtiene con un nivel de significancia de 0,05 que la media de los costos obtenidos con el modelo LIRP por fases es mayor que la media de los costos obtenidos por el modelo LIRP integrado; por lo cual se acepta la hipótesis 1. En la Figura 32 se encuentra la tabla resumen de la prueba realizada.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

Prueba t de 2 muestras para la media de Zfases y Zintegrado

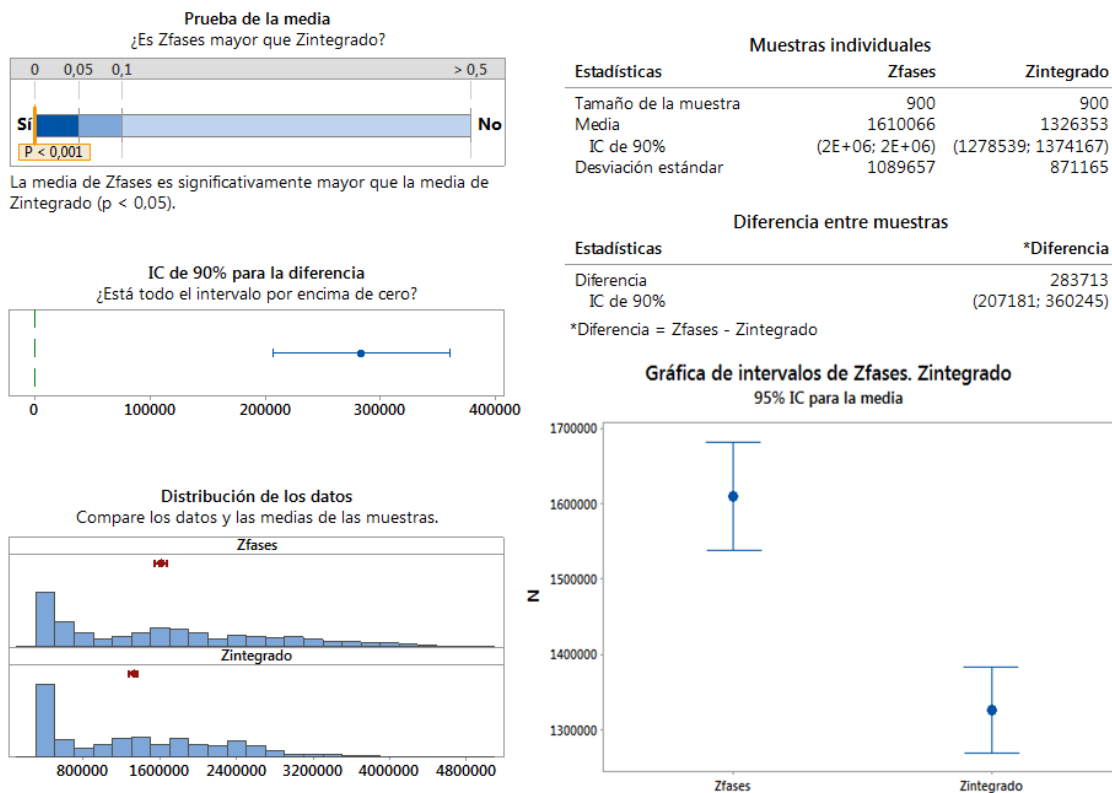


Figura 32 Tabla resumen de prueba t de 2 muestras para las medias de Zfases y Zintegrado

9.2. Prueba de la hipótesis 2

La hipótesis 2 plantea que “una metaheurística híbrida puede generar mejores soluciones que las metaheurísticas clásicas, para un diseño red de distribución de dos escalones y multiperiodo con demanda estocástica”. Para validar esta hipótesis se plantean dos experimentos; el primero consiste en contrastar en instancias de tamaño pequeño, los resultados obtenidos por las metaheurísticas programadas, entre sí y con resultados obtenidos por el modelo LIRP integrado en GAMS a través de programación entera mixta (MIP); el segundo experimento compara nuevamente las metaheurísticas en instancias de cinco diferentes tamaños.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

9.2.1. Experimento 1. Se plantea contrastar las soluciones encontradas por la metaheurísticas, en una instancia en la que el método exacto pueda encontrar una solución sin saturar la memoria del equipo de cómputo. Se toman las cuatro instancias de menor tamaño del conjunto Prodhon (2006), se reduce su número de clientes de 20 a 5, y se simulan las demandas de 5 periodos.

La solución del método exacto es hallada a través del modelo de la sección 7.3 con el *solver* SCIP de GAMS 24.0, que encuentra una solución y también indica cuál sería la mejor solución posible. Las metaheurísticas se ejecutan 250 veces por cada instancia, los resultados promedio se relacionan en la Tabla 10.

Tabla 10

Resultados experimento1.

Instancia	LIRP integrado (MINLP)			Algoritmo genético		Búsqueda tabú		Metaheurística híbrida	
	Mejor posible	Encontrado	t	Z	t	Z	t	Z	t
1	8193,5	8050,5	24,47	11996,4	1,44	12730,6	0,25	10732,7	1,81
2	8860,7	8807,9	23,99	12905,1	1,43	14730,5	0,25	11399,8	1,80
3	8786,9	8566,0	24,59	12565,4	1,45	13419,2	0,25	11118,2	1,81
4	7824,6	7769,7	24,26	11759,5	1,44	12989,7	0,25	10035,2	1,81

Se observa que los costos asociados a las soluciones aportadas por la metaheurística híbrida, tienen resultado promedio menor a las metaheurísticas clásicas. A través de un análisis de varianza se concluye que existen diferencias entre las medias en el nivel de significancia de 0.05. En la Figura 33 se observan los resultados de la ANOVA de un factor para los costos asociados a las tres metaheurísticas.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

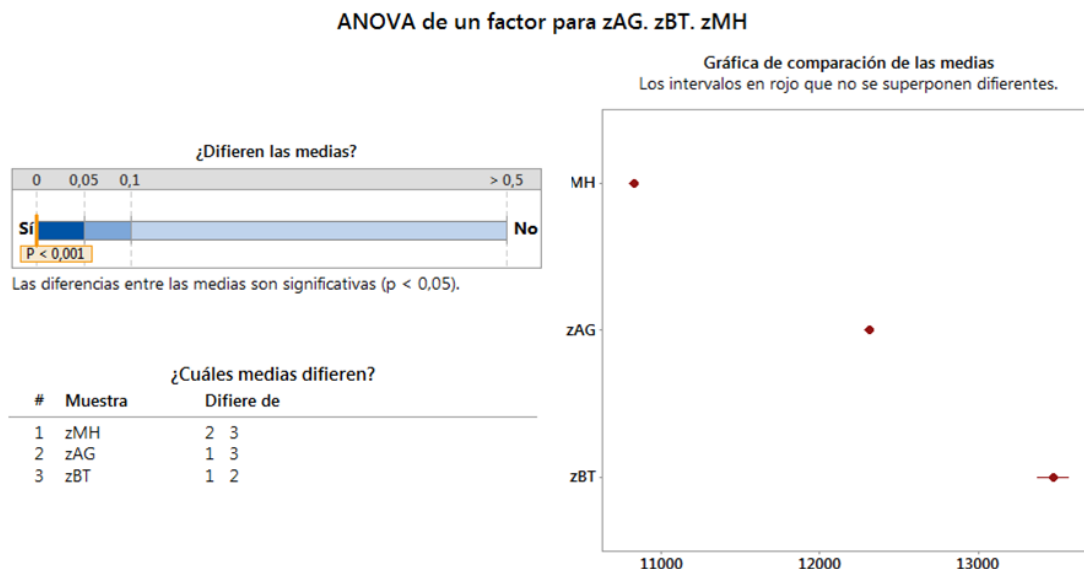


Figura 33 ANOVA de un factor para zAG, zBT y ZMH

9.2.2. Experimento 2. En este experimento se comparan el algoritmo genético y la búsqueda tabú, relacionados en las secciones 8.2 y 8.5, con la metaheurística híbrida del numeral 8.6. Se utilizaron las 30 instancias del conjunto Prodhon (2006), para las cuales se simularon 30 escenarios diferentes, con demandas para 60 periodos. Los resultados promedio de los escenarios por instancia se observan en la Tabla 11, en donde se aprecia que los costos de las soluciones obtenidas por la metaheurística híbrida son menores en 29 de las 30 instancias.

Tabla 11

Resultados promedio del experimento 2

Tamaño Instancia	Instancia	Algoritmo genético		Búsqueda tabú		Metaheurística híbrida	
		Z	t	Z	t	Z	t
1	1	402.044,14	27,32	384.584,66	87,11	378.775,62	117,46
	2	396.089,10	22,43	383.806,51	40,08	378.874,25	73,42
	3	393.671,49	27,50	374.603,97	98,71	372.876,95	141,49
	4	415.737,22	22,32	402.853,83	41,55	401.914,14	74,42
2	5	460.212,04	28,95	268.169,43	53,56	262.311,76	89,14
	6	388.935,77	28,74	266.667,52	52,82	255.907,95	88,37
	7	489.001,50	35,05	226.369,97	108,14	223.096,52	155,71
	8	780.712,43	33,93	170.228,23	103,96	166.041,85	146,69

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

Tamaño Instancia	Instancia	Algoritmo genético		Búsqueda tabú		Metaheurística híbrida	
		Z	t	Z	t	Z	t
3	9	795.889,98	34,19	137.804,55	93,59	134.096,41	139,77
	10	565.185,17	35,02	202.198,81	96,80	201.135,90	146,18
	11	468.755,26	28,28	238.195,76	51,76	235.194,77	89,03
	12	400.958,51	28,43	231.381,02	51,35	226.108,82	88,76
	13	2.976.903,16	46,15	387.422,62	131,89	387.323,53	191,12
	14	3.239.278,14	46,25	330.388,60	130,71	331.162,50	190,28
	15	1.548.538,22	46,35	468.941,87	125,07	461.324,95	186,59
	16	1.435.329,25	46,14	426.592,54	123,30	419.754,41	186,59
	17	1.318.146,15	38,84	514.114,98	67,50	392.788,78	115,94
	18	1.553.915,51	38,08	497.145,97	66,20	336.212,24	113,70
	19	1.710.906,78	52,07	538.123,66	235,65	505.266,37	310,49
	20	1.673.531,99	51,84	508.333,45	236,36	474.016,63	308,94
4	21	1.359.731,80	52,54	552.657,18	223,35	532.658,31	289,72
	22	1.273.420,96	51,72	524.838,89	218,60	510.739,32	286,39
	23	1.070.359,51	52,44	597.999,34	241,22	571.081,16	315,48
	24	1.139.161,01	50,67	545.683,47	233,21	519.750,91	303,85
	25	2.805.891,37	64,93	978.124,36	194,31	952.931,57	275,32
	26	3.015.700,31	66,50	855.291,30	195,50	830.255,00	278,42
5	27	2.897.440,97	74,26	1.049.756,22	279,60	982.245,56	376,33
	28	2.931.654,37	72,91	977.811,76	276,71	927.874,24	366,72
	29	2.178.882,23	66,93	1.044.371,15	199,15	991.801,14	282,16
	30	2.135.176,83	66,25	985.699,94	196,29	938.599,59	278,56

Se realiza una prueba t de dos muestras para cada metaheurística clásica contrastándola con la metaheurística híbrida, con el fin de analizar si las soluciones encontradas por esta última tienen menor costo. En la Figura 34 se presenta la tabla resumen de las pruebas t, donde se observa que, con un nivel de significancia de 0.05 se puede concluir que la media de los costos de la metaheurística híbrida es menor la metaheurística clásica, en ambos casos.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

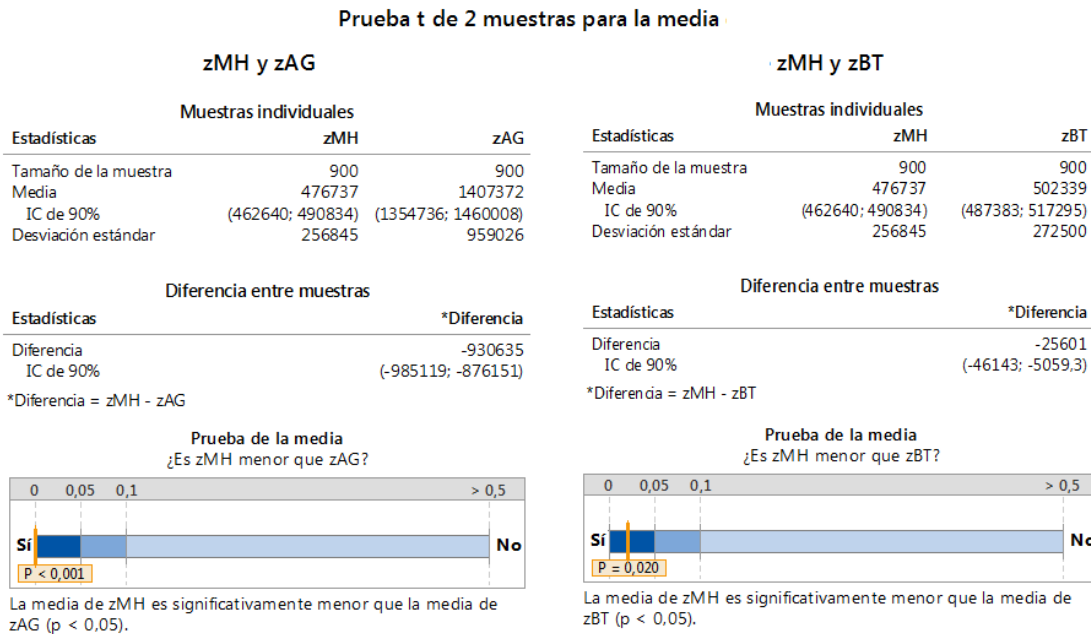


Figura 34 Tabla resumen de prueba t de 2 muestras para las medias de zMH vs zAG y zBT

9.2.3. Conclusión de la hipótesis 2. En los experimentos 1 y 2, se encuentra con un nivel de significancia de 0.05, que las medias del costo asociado a las soluciones proporcionadas por las metaheurísticas son diferentes, donde los resultados de la metaheurística híbrida encuentran un costo menor que las demás metaheurísticas. En cuanto a los tiempos de cómputo se observa que, si bien la metaheurística híbrida no es más rápida que las clásicas, la diferencia no es significativa para el problema LIRP, ya que tiene decisiones de tipo estratégico e incluso en instancias grandes se hallan tiempos menores a cinco minutos.

Teniendo en cuenta lo anterior se acepta la hipótesis 2; ya que la metaheurística híbrida encuentra soluciones con un menor costo que las metaheurísticas clásicas, en tiempos de cómputo apropiados.

10. Discusión

El problema *inventory-routing-problem* (LIRP), busca integrar las decisiones logísticas de localización, ruteo e inventarios para la toma de decisiones asociadas al diseño y funcionamiento de las redes de distribución. Integrar estas decisiones aumenta la complejidad del problema, pero permite explorar soluciones que analizando las decisiones por separado no darían lugar.

Por lo tanto, plantear el diseño de una red de distribución como un problema LIRP, bien sea para la planeación inicial de la red o una reestructuración de la misma, puede permitir hallar mejores soluciones al escapar de los óptimos locales derivados de analizar las decisiones logísticas por separado.

Asimismo, incluso para una red de distribución constituida, analizarla mediante un modelo LIRP, permite evaluar su desempeño al contrastarla con soluciones alternativas que el modelo LIRP pueda ofrecer, dando lugar a una evaluación de costo de oportunidad para la toma de decisiones.

De manera particular cuando la decisión de localización sea estratégica, realizar la planeación de la red de distribución en un escenario de múltiples periodos permite involucrar estrategias complementarias de ruteo y gestión de inventarios. Por otra parte, en los escenarios del problema LIRP donde la localización es una decisión de corto plazo, como por ejemplo en logística humanitaria; la planeación implica un mayor dinamismo donde el multiperiodo va a estar asociado a la evolución de la atención y la variabilidad de damnificados en el post-desastre al principio aumenta, pero luego se estabiliza, para comenzar a disminuir a medida que las personas se movilizan de los albergues temporales a otros sitios. En estos escenarios es necesario utilizar métodos de solución que resuelvan el

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

problema en tiempos cortos para tener oportunidad en la respuesta, lo que además permite una mayor frecuencia de evaluación de las decisiones, para eventuales escenarios cambiantes.

Tanto para el LIRP como para cualquier otro problema que justifique el uso de algoritmos metaheurísticos, las metaheurísticas híbridas presentan oportunidades derivadas de propiedades de sus algoritmos base y por lo tanto ofrecen una buena oportunidad de exploración de métodos de solución con diferentes ventajas.

Teniendo en cuenta las ventajas que ofrece integrar las decisiones de localización, ruteo e inventarios como un LIRP, es oportuno realizar investigaciones del problema para diferentes diseños de red de distribución, por ejemplo con varios escalones, múltiples objetivos, multiproducto, redes de recolección o con logística inversa; además en diversos contextos tales como productos perecederos, logística humanitaria, entre otros; Asimismo, propender por la implementación de dichas investigaciones.

11. Conclusiones

En la presente investigación se realizaron esfuerzos importantes con el fin de validar dos hipótesis asociadas al problema LIRP; la primera hipótesis relacionada con la pertinencia e importancia del problema y la segunda referente a la exploración de un método de solución satisfactorio. Para probar estas hipótesis la investigación inicia con una revisión de literatura con la cual se analizaron las principales características del problema LIRP y su evolución, así como una caracterización de las propiedades del diseño de red de distribución propuesto.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

La primera hipótesis sostiene que “para el diseño de una red de distribución de dos escalones, un modelo LIRP que integre las decisiones de localización, ruteo e inventarios, brinda mejores soluciones que un modelo desarrollado por fases”. Para probar este argumento, se construyeron dos modelos matemáticos de programación entera mixta (LIRP por fases y LIRP integrado); y se programó para cada modelo un algoritmo genético, los cuales permitieron aceptar la hipótesis al analizar las soluciones encontradas.

La principal ventaja de analizar el diseño de una red de distribución teniendo en cuenta de manera conjunta las decisiones de localización ruteo e inventario (LIRP), es que tiene un espacio de soluciones factibles más amplio, ya que tomando las decisiones logísticas mencionadas de manera independiente entre sí (LIRP por fases), se llega a óptimos locales en las primeras decisiones y sobre estos se toman las demás, ignorando la importancia de la información que las nuevas fases aportan sobre las primeras. Por ejemplo para el modelo LIRP por fases planteado en la presente investigación, las decisiones de localización y asignación se tomaban en la primera fase, ruteo en el primer escalón e inventarios en una segunda fase, y finalmente en una tercera fase se decidía sobre el ruteo en el segundo escalón; al tomar las decisiones en ese orden, una vez resuelto la primera fase se definía la localización de centros de distribución y se asignaban los clientes a estos, a partir de esta información se resolvían los problemas de inventarios y ruteos, sin permitir que la información de estos últimos problemas influyera en la localización o asignación.

La segunda hipótesis consiste en que “una metaheurística híbrida puede generar mejores soluciones que las metaheurísticas clásicas, para un diseño red de distribución de dos escalones y multiperiodo con demanda estocástica”. Por lo tanto, se programaron como metaheurísticas clásicas un algoritmo genético y búsqueda tabú y se compararon sus

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

resultados con los de una metaheurística híbrida cuyo diseño incorporó características de las clásicas; encontrando mejores resultados en esta última y concluyendo que la hipótesis es afirmativa.

Bibliografía

- Ahmadi Javid, A., & Azad, N. (2010). Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(5). <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.06.005>
- Ahmadi Javid, A., & Azad, N. (2010). Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(5), 582–597. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.06.005>
- Ambrosino, D., & Grazia Scutellà, M. (2005). Distribution network design: New problems and related models. *European Journal of Operational Research*, 165(3), 610–624. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.04.009>
- Chien, T. W., Balakrishnan, A., & Wong, R. T. (1989). An Integrated Inventory Allocation and Vehicle Routing Problem. *Transportation Science*, 23(2), 67–76.
- Conrad, K. (2005). Price competition and product differentiation when consumers care for the environment. *Environmental and Resource Economics*, 31(1), 1–19.
- CSCMP. (2013). CSCMP Supply Chain Management Definitions and Glossary.
- Departamento Nacional De Planeación. (2004). Análisis de cadena productiva Farmacéutica y medicamentos.
- Forouzanfar, F., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2012). Using a genetic algorithm to optimize the total cost for a location-routing-inventory problem in a supply chain with risk pooling. *Journal of Applied Operational Research*, 4(1), 2–13.
- Ghorbani, A., & Akbari Jokar, M. R. (2016). A hybrid imperialist competitive-simulated

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

annealing algorithm for a multisource multi-product location-routing-inventory problem. *Computers and Industrial Engineering*, 101. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.08.027>

Ghorbani, A., & Akbari Jokar, M. R. (2016). A hybrid imperialist competitive-simulated annealing algorithm for a multisource multi-product location-routing-inventory problem. *Computers & Industrial Engineering*, 101, 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.08.027>

Granada, M. G., & Wills, S. C. (2012). Inventory Location Routing Problem: A Column Generation Approach. In *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Istanbul, Turkey.

Guerrero, W. J., Prodhon, C., Velasco, N., & Amaya, C. A. (2013). Hybrid heuristic for the inventory location-routing problem with deterministic demand. *International Journal of Production Economics*, 146(1), 359–370. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.07.025>

Guerrero, W. J., Prodhon, C., Velasco, N., & Amaya, C. A. (2015a). A relax-and-price heuristic for the inventory-location-routing problem. *International Transactions in Operational Research*, 22(1). <https://doi.org/10.1111/itor.12091>

Guerrero, W. J., Prodhon, C., Velasco, N., & Amaya, C. A. (2015b). A relax-and-price heuristic for the inventory-location-routing problem. *International Transactions in Operational Research*, 22(1), 129–148.

Guo, H., & Li, Y. (2014). *Multiobjective location-inventory-routing problem taking returns into consideration*. *Lecture Notes in Electrical Engineering* (Vol. 271 LNEE). https://doi.org/10.1007/978-3-642-40630-0_3

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

- Hall, R. W. (1987). Consolidation strategy: inventory, vehicles and terminals. *Journal of Business Logistics*, 8(2), 57–73.
- Hiassat, A., & Diabat, A. (2010). A location-inventory-routing-problem with perishable products. In *41st International Conference on Computers & Industrial Engineering*.
- Hiassat, A., Diabat, A., & Rahwan, I. (2017). A genetic algorithm approach for location-inventory-routing problem with perishable products. *Journal of Manufacturing Systems*, 42, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.10.004>
- Hiassat, A., Diabat, A., & Rahwan, I. (2017). A genetic algorithm approach for location-inventory-routing problem with perishable products. *Journal of Manufacturing Systems*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.10.004>
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Investigación de operaciones/(No. 001.424 H5.)*. (Novena edi). México: McGraw-Hill.
- Hsieh, C.-L., Liao, S.-H., & Ho, W.-C. (2014). Incorporating location, routing and inventory decisions in dual sales channel - A hybrid genetic approach. In *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2013.6962452>
- Jayaraman, V. (1998). Transportation, facility location and inventory issues in distribution network design: An investigation. *International Journal of Operations & Production Management*, 19(5), 471–494.
- Lagos, C., Paredes, F., Niklander, S., & Cabrera, E. (2015). Solving a distribution network design problem by combining ant colony systems and Lagrangian relaxation. *Studies in Informatics and Control*, 24(3).

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

- Li, H., Ma, Z., & Wang, C. (2008). The stochastic location-routing-inventory problem in reverse logistics systems for municipal solid waste. In *Proceedings of the 8th International Conference of Chinese Logistics and Transportation Professionals - Logistics: The Emerging Frontiers of Transportation and Development in China*. [https://doi.org/10.1061/40996\(330\)523](https://doi.org/10.1061/40996(330)523)
- Li, K., Zheng, J., & Wu, D. (2016). A new discrete particle swarm optimization for location inventory routing problem in cold logistics. *Revista de La Facultad de Ingenieria*, 31(5). <https://doi.org/10.21311/002.31.5.10>
- Li, Y., Guo, H., Wang, L., & Fu, J. (2013). A hybrid genetic-simulated annealing algorithm for the location-inventory- routing problem considering returns under E-supply chain environment. *The Scientific World Journal*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/125893>
- Liu, B., Chen, H., Li, Y., & Liu, X. (2015). A pseudo-parallel genetic algorithm integrating simulated annealing for stochastic location-inventory-routing problem with consideration of returns in e-commerce. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/586581>
- Liu, S. C., & Lee, S. B. (2003). A two-phase heuristic method for the multi-depot location routing problem taking inventory control decisions into consideration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 22(11–12), 941–950.
- Liu, S. C., & Lin, C. C. (2005a). A heuristic method for the combined location routing and inventory problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(4), 372–381.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

- Liu, S. C., & Lin, C. C. (2005b). A heuristic method for the combined location routing and inventory problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(4). <https://doi.org/10.1007/s00170-003-2005-3>
- Ma, Z., & Dai, Y. (2010a). Stochastic dynamic location-routing-inventory problem in two-echelon multi-product distribution systems. In *ICLEM 2010: Logistics For Sustained Economic Development: Infrastructure, Information, Integration* (pp. 2559–2565).
- Ma, Z., & Dai, Y. (2010b). Stochastic dynamic location-routing-inventory problem in two-echelon multi-product distribution systems. In *ICLEM 2010: Logistics for Sustained Economic Development - Infrastructure, Information, Integration - Proceedings of the 2010 International Conference of Logistics Engineering and Management* (Vol. 387). [https://doi.org/10.1061/41139\(387\)357](https://doi.org/10.1061/41139(387)357)
- Ma, Z., Dai, Y., Li, H., & Wang, C. (2008). A fuzzy location-routing-inventory problem in logistics distribution systems. In *Proceedings of the 8th International Conference of Chinese Logistics and Transportation Professionals - Logistics: The Emerging Frontiers of Transportation and Development in China*. [https://doi.org/10.1061/40996\(330\)403](https://doi.org/10.1061/40996(330)403)
- Ma, Z. J., & Dai, Y. (2007). A Stochastic Location-Routing-Inventory Problem in Logistics Distribution Systems. In *International Conference on Transportation Engineering 2007* (pp. 1433–1438).
- Martínez-Salazar, I. A., Molina, J., Ángel-Bello, F., Gómez, T., & Caballero, R. (2014). Solving a bi-objective transportation location routing problem by metaheuristic algorithms. *European Journal of Operational Research*, 234(1).

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.008>

Max Shen, Z.-J., & Qi, L. (2007). Incorporating inventory and routing costs in strategic location models. *European Journal of Operational Research*, 179(2).

<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.03.032>

Meindl, P. C., & Hopra, S. (2008). *Administración de la cadena de suministro. Estrategia, planeación y operación*. (3rd ed.). PETER PEARSON EDUCACIÓN.

Miller, C. E., Tucker, A. W., & Zemlin, R. A. (1960). Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems. *Journal of the ACM*, 7(4), 326–329.

<https://doi.org/10.1145/321043.321046>

Moin, N. H., & Salhi, S. (2006). Inventory routing problems: a logistical overview. *Journal of the Operational Research Society*, 58(9), 1185–1194.

Moin, N. H., Salhi, S., & Aziz, N. A. B. (2011). An efficient hybrid genetic algorithm for the multi-product multi-period inventory routing problem. *International Journal of Production Economics*, 133(1), 334–343. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2010.06.012>

Nekooghadirli, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Ghezavati, V. R., & Javanmard, S. (2014). Solving a new bi-objective location-routing-inventory problem in a distribution network by meta-heuristics. *Computers and Industrial Engineering*, 76(1). <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.08.004>

Nozick, L. K., & Turnquist, M. A. (1998). Integrating inventory impacts into a fixed-charge model for locating distribution centers. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 34(3), 173–186.

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

- Nozick, L. K., & Turnquist, M. A. (2001). Inventory, transportation, service quality and the location of distribution centers. *European Journal of Operational Research*, 192(2), 362–371.
- Perl, J., & Sirisoponsilp, S. (1988). Distribution networks: facility location, transportation and inventory. *International Journal of Physical Distribution & Materials Management*, 18(6), 18–26.
- Prodhon, C. (2006). *Le Problème de Localisation-Routage (The location-routing problem)*. Troyes University of Technology, Troyes, France (in French).
- Riquelme-Rodríguez, J.-P., Gamache, M., & Langevin, A. (2016). Location arc routing problem with inventory constraints. *Computers and Operations Research*, 76. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.06.012>
- Salazar-González, J.-J. (2001). *Programación matemática*. (Díaz de Santos, Ed.).
- Shen, M., Zuo-Jun, & Qi, L. (2007). Incorporating inventory and routing costs in strategic location models. *European Journal of Operational Research*, 179(2), 372–389. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.03.032>
- Taha, H. A. (2004). *Investigación de operaciones*. (Pearson Educación., Ed.).
- Tang, J., Ji, S., & Jiang, L. (2016). The design of a sustainable location-routing-inventory model considering consumer environmental behavior. *Sustainability (Switzerland)*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/su8030211>
- Tang, Y., Ma, Z.-J., & Zhao, J.-J. (2011). Multi-period location-routing-inventory problem based on collector managed inventory in scrap tires recycling systems. *Jisuanji*

- Tavakkoli-Moghaddam, R., Forouzanfar, F., & Ebrahimnejad, S. (2013). Incorporating location, routing, and inventory decisions in a bi-objective supply chain design problem with risk-pooling. *Journal of Industrial Engineering International*, 9(1), 19.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., & Raziei, Z. (2016). A New Bi-Objective Location-Routing-Inventory Problem with Fuzzy Demands. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 1116–1121. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.646>
- W.J. Guerrero, C. Prodhon, N. V. y C. A. A. (2013). Hybrid heuristic for the inventory location-routing problem with deterministic demand. *Int. J. Production Economics*, 146, 359–370.
- Wang, C. F., & Shuai, B. (2013). Location-inventory-routing problem of maintenance spare parts logistics system with lateral transshipment. *Computer Engineering and Applications*, 49(14), 10–14.
- Wang, C., Ma, Z., & Li, H. (2008). Stochastic dynamic location-routing-inventory problem in closed-loop logistics system for reusing end-of-use products. In *Proceedings - International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, ICICTA 2008* (Vol. 2). <https://doi.org/10.1109/ICICTA.2008.181>
- Whybark, D. C. (2007). Issues in managing disaster relief inventories. *International Journal of Production Economics*, 108(12), 228–235.
- Xuefeng, W. (2010). An integrated multi-depot location-inventory-routing problem for logistics distribution system planning of a chain enterprise. In *In Logistics Systems and Intelligent Management, International Conference on* (Vol. 3) (pp. 1427–1431).

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN, RUTEO E INVENTARIOS LIRP

Zhalechian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., & Mohammadi, M. (2016).

Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 89, 182–214. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.02.011>

Zhang, B., Ma, Z., & Jiang, S. (2008). Location-routing-inventory problem with stochastic demand in logistics distribution systems. In *2008 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM 2008*. <https://doi.org/10.1109/WiCom.2008.1547>

Zuo-Jun, & Shen, M. (2007). Integrated supply chain design models: a survey and future research. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 3(1), 1–27.