



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Optimización de la asignación de mercancías en un centro de distribución usando un modelo multiobjetivo para la minimización del costo, el tiempo de servicio y el área requerida**

**Luisa Fernanda Ortiz Vásquez**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería de la Organización  
Medellín, Colombia  
2019





UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Optimization of goods allocation in a distribution center using a multi- objective model to minimize cost, service time and the required area**

**Luisa Fernanda Ortiz Vásquez**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería de la Organización  
Medellín, Colombia  
2019



# **Optimización de la asignación de mercancías en un centro de distribución usando un modelo multiobjetivo para la minimización del costo, el tiempo de servicio y el área requerida**

**Luisa Fernanda Ortiz Vásquez**

Tesis presentada como requisito para optar al título de:

**Maestría en Ingeniería Industrial**

Director (a):

Julián Andrés Zapata Cortes Ph.D.

Codirector (a):

Martín Darío Arango Serna Ph.D.

Línea de Investigación:

Logística

Grupo de Investigación:

Grupo I+D+i Logística Industrial - Organizacional "GICO"

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería de la Organización

Medellín, Colombia

2019

*A mi madre Blanca Inés Vásquez Hoyos y mi padre Ramiro Ortiz Correa  
y hermanos, por siempre confiar y creer en mí, por los consejos  
y apoyo incondicional durante este proceso.*

*A la memoria de mi amigo Heriberto Orduz Bautista +*

## **Agradecimientos**

A toda mi familia porque con sus oraciones y palabras  
de aliento me acompañaron.

A Ely V. Niño por su apoyo  
y ser mi compañero de vida

A Leidy Marcela Dueñas amiga incondicional en todos mis proyectos

A Silvana Ruiz Moreno y Cristian Giovanny Gómez,  
compañeritos del grupo GICO, por sus aportes en este proceso

A Conrado Augusto Serna Uran por su apoyo y disposición

A mis directores Julián Andres Zapata Cotes y Martin  
Darío Arango Serna por las orientaciones dadas  
Y enseñanzas transmitidas



## Resumen

En la presente tesis de maestría se propone un modelo matemático que permite optimizar la asignación de mercancía, en un centro de distribución usando modelo multiobjetivo. De la revisión del estado del arte, se encontró que la mayor parte de los modelos citados en la bibliografía, consideraban como único objetivo la capacidad de almacenamiento o la ubicación de las instalaciones teniendo como objetivo principal optimizar la utilización de espacio de almacén y los costos operacionales.

Así mismo se realiza una búsqueda en la literatura de aquellas técnicas que permitan dar respuesta a los modelos multiobjetivos, encontrando: modelos genéticos y modelos multiobjetivos. Una vez analizadas estas técnicas se procede a seleccionar NSGA-II- Nondominated Sorting Genetic Algorithm.

Una vez identificada la literatura, se propone un modelo matemático que dé cuenta de la optimización del espacio de almacenamiento en el centro de distribución, el tiempo requerido para la manipulación de los productos y los costos operaciones incurridos durante el proceso.

Finalmente, se valida el modelo propuesto, a través de una simulación en Java, haciendo uso de NetBeans IDE 8.2. obteniendo un conjunto de solución óptimas del problema multiobjetivo analizado en esta tesis de maestría, permitieron dar cumplimiento a los objetivos de esta tesis de maestría.

**Palabras clave:** gestión de almacenamiento, centros de distribución, optimización multiobjetivo, modelo multiobjetivo, algoritmos genéticos.

## Abstract

In this master's thesis, a mathematical model for optimizing the allocation in a distribution center using stochastic models is proposed. According to the state of the art, it was found that most of the mathematical models for optimizing the allocation consider storage capacity or the location of the facilities as their sole objective, with the main objective of optimizing the use of storage space and Operational costs

This thesis, also carried out a literature search of those techniques that allow to respond to multi objective models, finding: genetic models and multi objective models. After analyzing those techniques, NSGA-II-Nondominated Sorting Genetic Algorithm is selected, which allows to respond to the objective of this master's thesis.

The mathematical model is proposed taking into account the optimization of the storage space in the distribution center, the time required for the handling of the products and the operating costs incurred during the process.

Finally, the proposed model is validated through a simulation in Java, using NetBeans IDE 8.2. obtaining significant results that allowed to fulfill the objectives of this master's thesis.

**Keywords:** storage management, distribution centers, multi-objective optimization, stochastic models, genetic algorithm

# Tabla de contenido

<b>1. Gestión de almacenamiento .....</b>	<b>5</b>
1.1 Principios del almacenamiento .....	5
1.2 Sistemas de almacenamiento .....	6
1.3 Clasificación de almacenamiento .....	12
1.4 Políticas de almacenamiento y asignación de mercancía.....	14
1.5 Manipulación y almacenamiento del material .....	16
1.5.1 Principios de la manipulación.....	16
1.5.2 Equipo manejo de materiales.....	18
1.6 Costos de almacenamiento .....	19
1.7 Indicadores de gestión de almacenes .....	20
<b>2. Optimización multiobjetivo.....</b>	<b>23</b>
2.1 Técnicas de solución a problemas multiobjetivo.....	25
2.2 Modelos multi-objetivo para la asignación de mercancía en almacenes.....	29
<b>3. Modelización de la asignación de mercancías en un centro de distribución ....</b>	<b>41</b>
3.1 Modelo conceptual para la asignación de mercancías en un centro de distribución .....	41
3.2 Modelo matemático multiobjetivo para la optimización simultanea de costos operacionales, tiempo y espacio para almacenar del centro de distribución .....	45
3.3 Formulación multiobjetivo para la optimización simultanea de costos operacionales, tiempo requerido para la manipulación del producto y espacio para el almacenamiento en el centro de distribución .....	49
3.3.1 Algoritmo NSGAI para la solución del modelo propuesto.....	50
3.3.1.1 Representación del individuo y generación de la población inicial .....	52
3.3.1.2 Operador de selección.....	55
3.3.1.3 Operador de cruce.....	56
3.3.1.4 Operador de Mutación .....	56
3.3.1.5 Evaluación de la aptitud - Fitness .....	57
<b>4. Aplicación del modelo de asignación de mercancías en un centro de distribución usando un modelo multiobjetivo .....</b>	<b>59</b>
4.1 Centro de distribución .....	59
4.1.1 Prueba de validación del modelo .....	61
4.2 Validación del modelo multiobjetivo de asignación de mercancía en un centro de distribución. ....	64
4.2.1 Mejores individuos .....	64
4.3 Asignación de mercancía en el centro de distribución de una empresa de alimentos. ....	77
4.3.1 Mejores individuos .....	77
<b>5. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>85</b>
5.1 Conclusiones.....	85
5.2 Recomendaciones.....	87
<b>6. Anexo .....</b>	<b>89</b>

---

6.1	Código de modelo de asignación de mercancías .....	89
6.2	resumen de resultados de todas las corridas .....	91
<b>Bibliografía .....</b>		<b>93</b>

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Procesos de la gestión de almacenamiento.....	5
Figura 2 Políticas de almacenamiento.....	14
Figura 4 Medidas de la calidad de soluciones multiobjetivo:.....	24
Figura 5. Modelo conceptual para la asignación de mercancía. ....	43
Figura 6. Esquemas del algoritmo NSGAI utilizado. ....	51
Figura 7 Cromosoma utilizado para el problema de asignación de mercancía .....	52
Figura 8 Representación de operador cruce.....	56
Figura 9 Representación de la mutación .....	57
Figura 10 Centro de distribución propuesto .....	60
Figura 11 Centro de distribución propuesto en 3D.....	61
Figura 12: Relación costos operacionales y tiempo requerido para la manipulación del producto .....	72
Figura 13 Relación entre los costos operacionales y el espacio para el almacenamiento en el centro de distribución.....	73
Figura 14 Relación entre espacio para el almacenamiento y tiempo requerido para la manipulación del producto en el centro de distribución.....	74
Figura 15 Superficie de la frontera de Pareto con los mejores individuos solución .....	75
Figura 16 Relación tiempo requerido para la manipulación del producto y costo operacional en el centro de distribución de una empresa de alimentos .....	80
Figura 17 Relación entre el espacio para el almacenamiento del centro de distribución y los costos operacionales en el centro de distribución de una empresa de alimentos.....	81
Figura 18 Relación entre tiempo requerido para la manipulación del producto y espacio para almacenar del centro de distribución en el centro de distribución de una empresa de alimentos.....	82

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Tipos de sistemas de almacenamiento.....	7
Tabla 2. Clasificación de almacenamiento y aplicación.....	12
Tabla 3: Descripción de tipos de costos de almacenamiento .....	19
Tabla 4. Indicadores de productividad en la gestión de almacenamiento.....	21
Tabla 5 Clasificación de las técnicas de toma de decisión multicriterio .....	26
Tabla 6 revisión de modelos propuestos para la asignación de mercancía. ....	31
Tabla 7 Asignación inicial no aleatoria .....	53
Tabla 8 Asignación inicial aleatoria .....	54
Tabla 9 Prueba de validación del modelo.....	62
Tabla 10 Resultados obtenidos del algoritmo NSGAI - Mejores individuos .....	65
Tabla 11: Individuo solución con mejor tiempo requerido para la manipulación del producto.....	66
Tabla 12 Individuo solución con mejor costo operacional.....	68
Tabla 13 individuo solución con menor espacio ocupado.....	70
Tabla 14: Información para asignación de mercancía en el centro de distribución. ....	77
Tabla 15 Resumen de resultados de todas las corridas en el centro de distribución de una empresa de alimentos.....	78

# Introducción

La logística es una técnica militar que se documenta desde los inicios de las guerras, donde los militares encargados de calcular las necesidades en las misiones eran llamados logistikos (Farahani, Rezapour, y Kardar, 2011). La definición de logística ha sido descrita por diferentes autores, Laporte, Ghiani, & Musmanno, (2004) definen la logística como la encargada de planificar y el controlar los flujos de materiales e información en las organizaciones, tanto en los sectores públicos y privados. Ballou (2004) describe la logística como la gerencia de todas las actividades que facilitan el movimiento y coordinación tanto de los bienes materiales, servicios y la información, desde un punto de origen hasta un punto de destino, considerando los tiempos y cantidades apropiadas, se puede afirmar que la logística es una de las actividades más importantes de las sociedades modernas. Gong, (2009)

La cadena de suministro se describe como una cadena que une cada elemento relacionado con el cliente y proveedor a través de la fabricación y servicios teniendo en cuenta que están involucrados en todo el ciclo de vida del producto, desde la adquisición de material para la fabricación hasta la distribución, servicio al cliente y finalmente, el reciclado y la eliminación del producto (Balfaqih, Nopiah, Saibani, & Al-Nory, 2016).

Un almacén se define como una unidad estructural con todos los recursos y las disposiciones organizativas necesarias para la ejecución de los procesos relacionados con el inventario y gestión de almacenes, (Kappauf, Lauterbach, & Koch, 2012). Gu, Goetschalckx, & McGinnis, (2007) describe los almacenes como un componente esencial de toda la cadena de suministro. Mencionando que sus

principales funciones son: amortiguar el flujo de material a lo largo de la cadena de suministro para adaptarse a la variabilidad causada por factores como la estacionalidad del producto y/o procesamiento por lotes en la producción y el transporte; consolidación de los productos de diversos proveedores para la entrega a los clientes; y el valor agregado de procesamiento, tales como, la fijación de precios, etiquetado, y la personalización del producto. Las investigaciones relacionadas con el desempeño logístico en almacén, se ha incrementado en los últimos años como resultado de factores como, (a) la separación más delgada de la cadena de suministros que requiere un inventario reducido y tiempo de respuesta del almacén más rápido (Agarwal, Shankar, & Tiwari, 2006 y Naim & Gosling, 2011); (b) mayor número de proveedores 3PL, múltiples clientes con diversas necesidades (Yu Tian, Alexander E. Ellinger, & Haozhe Chen, 2010).

El almacenamiento y manejo de la mercancía es el eslabón de la cadena de suministro que incurre en el 20% del costo de la distribución física de la mercancía en una empresa, por lo tanto es necesario que exista un control que permita asegurar un almacenamiento eficiente y con alto nivel de servicio (Ballou, 2004). Durante esta investigación se realiza un análisis de los modelos propuesto por autores como (Bartholdi y Hackman, 2005); (Accorsi, Manzini, y Bortolini, 2012); (Accorsi, Manzini, y Maranesi, 2014), donde los problemas de asignación de almacenamiento mencionados están compuesto por dos etapas, la primera clasificar el productos y la segunda asignar la ubicación dentro del almacén. (Yin y Rau, 2005), sin embargo, se identifica la falta de modelos que consideren aleatoriedad en la demanda y en la asignación de mercancía, de tal manera que se permitan optimizar espacio de almacenamiento, minimizar los costos de operación y disminuir tiempos requeridos para la manipulación de los productos.

Este documento de tesis tiene como objetivo presentar los hallazgos encontrados para cumplir el objetivo general de la propuesta de maestría, el cual fue Proponer un modelo multi-objetivo que permita minimizar los costos de operación y bodegaje,

minimizar tiempo de operación (asignación) y optimizar el espacio para el almacenamiento de mercancías en centros de distribución cuyos objetivos fueron:

- Revisar el estado del arte
- Identificar los modelos multi-objetivo para la asignación de mercancías que siguen un comportamiento aleatorio en la gestión de inventarios.
- Identificar las restricciones técnicas y operativas para el constructo del modelo multiobjetivo que permita optimizar la asignación de mercancías en un centro de distribución usando modelo multiobjetivo
- Proponer un modelo multi-objetivo que permita disminuir los costos de operación y almacenamiento, minimizar tiempo de operación (asignación) y la optimización del espacio para el almacenamiento de mercancías.
- Validar el modelo, usando la simulación como herramienta comportamental de los resultados empíricos obtenidos

Los anteriores objetivos implican desarrollar un modelo matemático en el cual se deben minimizar de manera simultánea 3 funciones matemáticas relacionadas con minimizar los costos de operación y bodegaje, disminuir tiempo de operación al momento de la asignación de la mercancía y optimizar el espacio para el almacenamiento.

Los problemas con múltiples objetivos como el que se plantean en esta tesis de maestría son frecuentes y se presenta en la mayoría de las disciplinas y su solución siempre ha presentado un reto para los investigadores. La principal motivación para el uso de métodos robustos como los algoritmos evolutivos, en la solución de problemas de este tipo es que, al estar basados en una población para realizar búsqueda de soluciones, estos pueden retornar un conjunto de soluciones de buena calidad, hecho que es importante en este tipo de enfoques.

La optimización multiobjetivo es una herramienta utilizada para la toma de decisiones que permite optimizar de forma simultánea los objetivos; sin embargo, se presenta que la mejora de uno de ellos dé lugar a un empeoramiento de algún

otro. En otras palabras, la mejor respuesta está a criterio de la persona encargada en la toma de decisiones, teniendo en cuenta otros criterios.

El aporte en esta tesis de maestría es la propuesta de un modelo multiobjetivo para la asignación de mercancías en un centro de distribución donde se consideraron tres variables: a) costo b) tiempo y c) área, dado que otros autores consideran estas variables de forma independiente.

Finalmente se valida el modelo usando la simulación como herramienta comportamental de los resultados empíricos obtenidos, y de esta forma generar conclusión y futuras posibles investigaciones.

# 1. Gestión de almacenamiento

Un sistema de gestión de almacenamiento se encarga de medir y controlar aquellas actividades relacionadas con los bienes almacenados, tales como la supervisión de flujo de material, equipo para el manejo de materiales y personal, desde la entrada de mercancías a través de todo el almacén y etapas de procesamiento, hasta la salida de mercancías que se desarrollan dentro del almacén con el fin de optimizar su funcionamiento. En este sentido, la mayoría de las empresas tienen que realizar los procesos que se presentan en la Figura 1, haciendo uso de un sistema de gestión de almacenes que les permita un mejor funcionamiento.

Figura 1. Procesos de la gestión de almacenamiento



Fuente: Elaboración propia

## 1.1 Principios del almacenamiento

Teóricamente el almacenamiento no fuera necesario si al momento de necesitar la mercancía, esta, llegara de inmediato y si se tuviera certeza de la demanda del producto. Adicionalmente se debe tener presente los costos de transporte y el

tiempo que este tarda en entregar la mercancía, ya que no se tiene seguridad de estos tampoco.

Según (Ronald Ballou, 2004) se tienen las siguientes razones para tener almacenamiento

- ✓ Reducir costos de transporte
- ✓ Coordinar oferta y demanda
- ✓ Proceso de producción
- ✓ Proceso de marketing

## 1.2 Sistemas de almacenamiento

Normalmente las compañías darían más atención a la forma en que se manejan sus artículos que la forma en que se almacenan. Es probable que la mejor utilización del espacio sea la razón principal para utilizar estanterías para el almacenamiento, hay otras dos razones muy importantes: a) el mejoramiento de la eficiencia de manejo y b) evitar daños en las mercancías almacenadas. En algunas condiciones de almacenamiento, cualquiera de estas dos razones puede ser más importante que la mejor utilización del espacio. En cualquier valoración de la utilización de estanterías para almacenamiento, es muy importante considerar los tres factores: la utilización del espacio, la eficiencia de manejo, y los daños a las mercancías (Mora, 2011). En algunos casos se afectarán favorablemente los tres factores, mientras que es posible que, en otro, solo uno o dos de ellos se afecten positivamente, y que el tercero se afecte negativamente. Por ejemplo, muchas veces habrá que sacrificar cierta eficiencia de manejo para lograr ahorros más significativos de espacio, para la reducción de daños en las mercancías. El almacenamiento en estantería debe basarse en el mejoramiento neto de las operaciones. En la Tabla 1 se mencionan los tipos de sistemas de almacenamiento, su descripción y aplicación.

Tabla 1. Tipos de sistemas de almacenamiento

Nombre	Descripción	Aplicación
Apilado a piso	Las estibas con producto se colocan unas encima de otras sin estantería, normalmente se operan con montacargas contrabalanceados para alta productividad	Cementeras – Embotelladoras – Materias primas importadas – Productos minerales.
Selectivo	Acceso directo y unitario a una estiba. Alta variedad de referencias y baja cantidad de estibas por referencia.	La más amplia gama de sectores productores y comercializadores, materias primas y productos terminados.
Doble profundidad	Acceso a dos estibas por cada frente de pasillo. Menor variedad de referencias que el anterior y mayor cantidad de estibas por referencia. Aumenta capacidad de almacenamiento a 33% con respecto a la anterior. Normalmente se requiere la primera viga de la estantería a nivel de piso para entrada inferior de las ruedas delanteras de un montacargas tipo doble reach.	Aplicaciones generalizadas para materias primas, productos terminados y artículos en comercialización. Empresas papeleras, cárnicos, fertilizantes.

Nombre	Descripción	Aplicación
Compacto	<p>Almacenaje por acumulación que facilita la máxima utilización del espacio disponible, tanto en superficie como en altura.</p> <p>Estanterías adecuadas para productos homogéneos con baja rotación y gran cantidad de estibas por referencia.</p> <p>Ventajas</p> <p>Rentabilidad máxima del espacio disponible (hasta un 85%).</p> <p>Eliminación de los pasillos entre las estanterías. Riguroso control de entradas y salidas. Admite tantas referencias como calles de carga haya.</p> <p>Existen dos sistemas de gestión de la carga: el sistema drive-in, con un único pasillo de acceso, y el sistema drive-thru con dos accesos a la carga, uno a cada lado de la estantería.</p>	<p>Productos masivos que entran a cuarentena, materias primas para empresas que trabajen con minerales. El sistema compacto es muy utilizado en cámaras frigoríficas, tanto de refrigeración como de congelación, que precisan aprovechar al máximo el espacio destinado al almacenaje de sus productos a temperatura controlada.</p>

Nombre	Descripción	Aplicación
Push back	<p>Sistema de almacenaje por acumulación que permite almacenar hasta cuatro estibas en fondo por cada nivel. Todas las estibas de un mismo nivel, a excepción de la última, se asientan sobre un conjunto de carros que se desplazan, por empuje, sobre los carriles de rodadura.</p> <p>Ideal para el almacenaje de productos de media rotación, con dos o más paletas por referencia (sistema LIFO, última paleta que entra, primera que sale)</p> <p>Ventajas  Óptimo aprovechamiento del espacio.  Mínima pérdida de espacio en altura.  Cada nivel puede almacenar una referencia distinta.</p>	Embotelladoras, cuartos fríos
Dinámico	<p>Las estanterías incorporan caminos de rodillos con una ligera pendiente que permite el deslizamiento de las estibas, por gravedad y a velocidad controlada, hasta el extremo contrario.</p> <p>Perfecta rotación de las paletas (sistema FIFO).</p> <p>Ahorro de espacio y tiempo en la manipulación de las estibas.</p> <p>Eliminación de interferencias en la preparación de pedidos. Excelente control del stock</p>	Es un sistema idóneo para almacenes de productos perecederos, aunque es aplicable a cualquier sector de la industria o la distribución (alimentación, automoción, industria farmacéutica, química, etc.).
Cantiléver	Sistema que permite almacenamiento de artículos largos y pesados. Tiene un frente libre para la facilidad del manejo	Ferreterías, Muebles.

Nombre	Descripción	Aplicación
Entrepisos	<p>Sistemas en varios niveles para recorrido de los operadores de picking cuando se tienen una alta cantidad de referencias, de pedidos y baja cantidad de la referencia por pedido. Se combinan con transportadoras con carritos de transporte.</p>	<p>Comercializadores y Distribuidores. Ventas por catálogo, repuestos.</p>
Autoportante	<p>Grandes obras de ingeniería en las que las propias estanterías forman parte del sistema constructivo del edificio junto con los laterales y las cubiertas. Las estanterías soportan no sólo las cargas propias de las mercancías y de los diversos elementos de la construcción sino también los empujes de los medios de manipulación y los agentes externos: fuerza del viento, sobrecarga de la nieve, movimientos sísmicos, etc.</p> <p>Además, la altura de estos almacenes sólo está limitada por las normativas locales o por la altura de elevación de las carretillas o transelevadores. Se pueden construir almacenes de más de 30 m de altura.</p> <p>Posibilidad de utilizar sistemas convencionales o automáticos.</p>	<p>Almacenaje a gran altura, máximo aprovechamiento de la superficie disponible. Posibilitan el almacenaje de mercancía de diversa índole.</p>

Nombre	Descripción	Aplicación
Contenedores	Sistemas metálicos que permiten un volumen de almacenamiento para artículos que no están empacados en cajas. Pueden ser abatibles (apertura de una ventana), colapsables (mínimo volumen si no tienen carga), y autoapilables (aprovechamiento del espacio).	Para material en proceso, autopartes, plásticos
Estibas apilables	Con este sistema de almacenamiento se logra un correcto funcionamiento de los inventarios que poseen geometrías difíciles de almacenar mediante otros sistemas. Se diseñan especialmente para el tipo de carga que se requiera. Una de sus principales ventajas consiste en su práctico almacenamiento cuando no están siendo utilizadas, disminuyendo el espacio necesario para este fin.	Aplicable a llantas, material de empaque, rollos de tela.
Sistemas automáticos	Estos sistemas se caracterizan porque el producto va hacia los operadores de selección y preparación de pedidos con conducción a través de conveyors. Para movimiento de cajas se utilizan los mini load y cuando se trata de estibas los sistemas AS / RS	Empresas con alto grado de referencias, cantidad de pedidos y altas exigencias de nivel de entrega.

Nombre	Descripción	Aplicación
Sistemas Carruseles	Es decir, estanterías que rotan alrededor de un eje horizontal; tiene el acceso del operador desde el frente del carrusel y las unidades están cubiertas, suministrando un almacenamiento seguro, se caracterizan porque se almacenan las unidades sueltas que generalmente son pedidas en pequeñas cantidades y requieren de embalajes posterior y son gavetas rotativas con el fin de que los operarios puedan maniobrar su picking y maximizar las unidades a almacenar	Empresas con alto grado de referencias, cantidad de pedidos pequeños y unidades sueltas en su manejo y múltiples pedidos para su entrega.

Fuente: adaptado de Mora, (2011)

### 1.3 Clasificación de almacenamiento

Seleccionar la clasificación del almacenamiento en un centro de distribución es una decisión que no se debe tomar de forma precipitada, dado que Existen diversas clases de almacenamiento las cuales consideran otros factores, en la Tabla 2 se mencionan algunas clasificaciones y sus aplicaciones.

Tabla 2. Clasificación de almacenamiento y aplicación

Clasificación de almacenamiento	Aplicación
Según la naturaleza del producto	Almacén de materias primas Almacén de semielaborados Almacén de productos terminados Almacén de piezas de recambio Almacén de material auxiliar: embalajes
Según la función logística	Almacén regulador Almacén de delegación Almacén plataforma

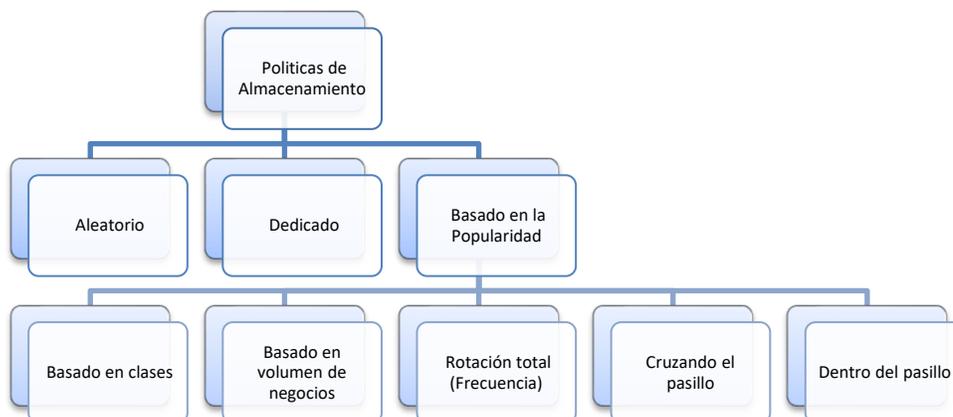
<b>Clasificación de almacenamiento</b>	<b>Aplicación</b>
	Almacén de depósito
Según las manipulaciones	Almacén en bloque Con estantería automáticos
Según el tipo de estanterías de palets	Estanterías convencionales Estanterías compactas o drive-in Estanterías dinámicas Estanterías móviles DIS Glide-Rail Estanterías especiales
Almacenamiento automático	De carga ligera Transelevadores autopartes
Según la naturaleza jurídica: propios o alquilados	Almacén propio Almacén en régimen de alquiler Almacenamiento en un operador logístico
Según el estado físico	Sólidos Líquidos Gaseoso
Según las propiedades	Duraderos Perecederos
Según la unidad de medida	Longitud Superficie Peso capacidad
Según la rotación de salida	De alta rotación De baja rotación De baja rotación

Fuente: adaptado de Mora, (2011)

## 1.4 Políticas de almacenamiento y asignación de mercancía

La asignación y ubicación de mercancía en el centro de distribución tiene un impacto significativo en la capacidad de almacenamiento, seguimiento de inventario, y la preparación de pedidos; además es el factor más importante que afecta el picking. Diversos factores influyen en la ubicación de los productos en el almacén; por ejemplo, el método de preparación de pedidos, el tamaño y el diseño del sistema de almacenamiento, sistema de manejo de materiales, las características del producto, tendencias de la demanda, las tasas de rotación y los requisitos de espacio. La selección de una política de asignación de almacenamiento adecuada ayuda a mejorar el rendimiento del picking. Chan & Chan, (2011), mencionan que el problema de asignación de almacenamiento implica decidir dónde y cómo almacenar un conjunto de elementos con el fin de garantizar un funcionamiento óptimo del sistema logístico. Varios autores abordan esta problemática los cuales proponen métodos para la asignación de productos en almacenamiento. Hausman, Schwarz, & Graves, (1976) y Graves, Hausman, & Schwarz, (1977)). En la Figura 2 se dan a conocer algunas políticas para la asignación de mercancía usadas en almacenes

Figura 2 Políticas de almacenamiento



Fuente: Adaptado de Hausman, Schwarz, & Graves, (1976) y Graves, Hausman, & Schwarz, (1977)).

Para el método de almacenamiento dedicado se asigna cada producto a una ubicación fija, es decir las reposiciones de ese producto siempre se producen en este mismo lugar. La principal desventaja del almacenamiento dedicado son sus altos requerimientos de espacio y la baja utilización del espacio, en estos casos la ocupación del centro de distribución es del 50% Bartholdi & Hackman, (2005). Esto debido al hecho de que los lugares están reservados para un producto en particular, incluso para productos que están fuera de stock. Para mejorar esto, se puede utilizar una estrategia de almacenamiento aleatorio. La idea es asignar un producto en cualquier ubicación, siempre y cuando se cumpla con la política de almacenamiento seleccionada. Cuando un lugar se libera, este, queda disponible para la reasignación de un producto, tal vez para un producto diferente al que estaba almacenado antes. Este espacio se puede llenar de nuevo, en lugar de esperar hasta que el producto original se reponga, teniendo en cuenta que todos los lugares tienen la misma probabilidad de ser utilizados. Por lo tanto, se espera una mejor utilización del espacio de almacenamiento del centro de distribución; sin embargo, el almacenamiento aleatorio presenta algunas desventajas, una de ellas es el tiempo que se debe dedicar para guardar el producto recibido ya que las ubicaciones de los productos cambiarán con el tiempo a medida que se liberen las ubicaciones y se reponen con otros productos. Generando además que los trabajadores no se pueden aprender la localización de los productos lo cual implica que deben recibir soporte de un sistema de gestión de almacenes (software).

La política de almacenamiento de rotación determina las ubicaciones de almacenamiento para cargas en función de la frecuencia de su demanda. Productos solicitados con frecuencia obtienen los lugares de acceso más fáciles, por lo general cerca al punto de embarque, Productos de lento movimiento se encuentran más lejos de este. Las frecuencias de rotación necesitan ser conocidas de antemano. Por otra parte, el almacenamiento basado en clases es un método de asignación que divide el almacén en un número de áreas. Cada producto es asignado a cada una de las áreas teniendo en cuenta la frecuencia de la demanda de dichos productos.

Caron, Marchet, & Perego, (2000) desarrolló un enfoque analítico para el diseño de la disposición de la zona de picking, basados en la política de almacenamiento aleatorio, dando como resultado de los análisis: que la preferencia de diseño de la disposición de la zona de picking es aparentemente influenciada por las decisiones relativas a la adopción de una política de almacenamiento.

## **1.5 Manipulación y almacenamiento del material**

Según R Ballou, (2004) se pueden considerar dos funciones importantes en el sistema de almacenamiento: a) La posesión del almacenamiento y b) La manipulación del almacenamiento

Según la American Society of Mechanical Engineers (ASME) define el manejo de materiales como el arte y la ciencia que involucra el movimiento, el empaque y el almacenamiento de sustancia en cualquier forma. Es importante resaltar que el manejo de materiales se puede establecer en cinco dimensiones: movimiento, cantidad, tiempo, espacio y control (Meyers & Stephens, 2006).

### **1.5.1 Principios de la manipulación**

En la literatura se encuentran diferentes conceptos sobre los que se dan lineamientos para el manejo y almacenamiento de materiales; sin embargo, 20 principios resumen las buenas prácticas para mejorar las operaciones y han sido propuestos por el College Industrial Committee on Material Handling Education. Estos principios se enfocan en la planeación, el uso de herramientas adecuadas, y en la utilización adecuada del espacio (Meyers & Stephens, 2006)

- 1) Principio de planeación. Debe centrarse en la obtención del máximo beneficio de la operación; para ello deben plantearse indicadores de gestión que permitan hacer seguimiento de ese beneficio obtenido.

- 2) Principio de los sistemas. Implementar sistemas integrados que permitan la toma de decisiones considerando variables de los diferentes actores que influyen sobre la operación de la empresa (desde los proveedores hasta el cliente)
- 3) Principio del flujo de materiales. La secuencia de operaciones y distribución del equipo debe facilitar el flujo del material al interior de las instalaciones.
- 4) Principio de simplificación. Se debe analizar los equipos para el manejo de materiales existentes y contrastarlos con los necesarios, así se eliminan o reducen estos equipos.
- 5) Principio de gravedad. Usar estanterías, equipos e instalaciones que permitan el uso de la gravedad a favor del flujo de los materiales.
- 6) Principio de la utilización del espacio. Hacer uso óptimo del volumen del inmueble.
- 7) Principio del tamaño unitario. Al incrementar la tasa de flujo a través del incremento del tamaño de los lotes o las cargas movilizadas, se mejora la eficiencia del almacén.
- 8) Principio de mecanización. Mecanizar las operaciones de manipulación.
- 9) Principio de automatización. Hacer que la automatización incluya las funciones de producción, manejo y almacenamiento.
- 10) Principio de selección del equipo. Al seleccionar el equipo de manejo, considerar todos los aspectos del material que se manipulará: movimiento y método que se usarán.
- 11) Principio de estandarización. Estandarizar los métodos de manejo, al igual que los tipos y los tamaños del equipo para el almacén.
- 12) Principio de adaptabilidad. Al seleccionar el método y los equipos a usar es importante identificar aquellos que realicen la mayor cantidad de tareas para que no se justifique los equipos de tareas específicas
- 13) Principio del peso muerto. Reducir la razón de peso muerto del equipo de manipulación a la carga que soportará.

- 14) Principio de utilización. Este principio está ligado con el de planeación, ya que debe asignarse de forma óptima los equipos con el fin de tener un alto indicador de utilización.
- 15) Principio de mantenimiento. Si no se cuentan con planes de mantenimiento en todos los niveles (preventivo, reactivo y predictivo), posiblemente habrá fallas que alteren la eficiencia del proceso de manejo y almacenamiento de los materiales.
- 16) Principio de obsolescencia. Almacenar y manejar material con equipos obsoletos, suele aumentar los tiempos de las operaciones e incrementar los riesgos de accidentes que causan sobre costos a la operación, en este sentido es necesario tener un control permanente del estado del equipo para manejo de materiales.
- 17) Principio de control. Las políticas de inventario que se propongan y demás principios que se hayan contemplado en la planeación, deben facilitar el control de los materiales almacenados para siempre conocer su estado y ubicación.
- 18) Principio de capacidad. Con la capacidad instalada y la capacidad esperada en los flujos de materiales, se deben tomar decisiones respecto al movimiento del material al interior de las instalaciones.
- 19) Principio del rendimiento. Por cada unidad que se gestione al interior de las instalaciones se debe conocer el rendimiento del proceso en términos de tiempo.
- 20) Principio de seguridad. Este último principio se enfoca en los equipos para el manejo de materiales, ya que éstos deben ser los idóneos para cada tipo de producto y cumplir con todos los estándares de seguridad

### **1.5.2 Equipo manejo de materiales**

Para determinar los equipos utilizados para la mover la mercancía, se establecen cuatro categorías, las cuales son mencionadas por Meyers & Stephens, (2006).

1. *Ruta fija o de punto a punto*: también llamada sistema de flujo continuo, esta clase tiene la tarea de dirigir el material a lo largo de una trayectoria establecida atendiendo cualquier lugar a lo largo de la ruta.
2. *Área fija*: esta categoría se encarga de transportar la mercancía en un área establecida X, Y y Z.
3. *Ruta variable y área variable*: este equipo se encarga de transportar el material en cualquier área del almacén.
4. *Herramientas y equipos auxiliares*: esta categoría está compuesta por plataformas, patines, sistemas automáticos de obtención de datos y contenedor.

## 1.6 Costos de almacenamiento

Los costos de almacenamiento incurren en el 20% del costo de la distribución física de la mercancía en una empresa (Ballou, 2004), por este motivo es importante Identificar los gastos derivados del almacenamiento permitiendo mantener el nivel de servicio de la empresa y una adecuada gestión de almacenamiento. Con base en lo anterior, en la Tabla 3 se da una descripción de los tipos de costos causado en el almacenamiento de mercancía.

Tabla 3: Descripción de tipos de costos de almacenamiento

Tipos	Descripción
Costo de adquisición	Precio de cada producto multiplicada por el numero artículos adquiridos
Costo de emisión de pedidos	Costo causado por poner la mercancía en el almacén se consideran costos de emisión el transporte, papelería, seguros, impuestos. Este valor será mayor cuanto mayor sea el número de pedidos que se realicen.
Costo de almacenaje	Costo de mantener existencias en el almacén. Este costo se suele medir por unidad física de artículos en el almacén; adicionalmente el costo de almacenaje debe considerar gastos como: mano de obra, seguros e impuestos, mantenimiento entre otros.

Tipos	Descripción
Costos de elementos de manipulación	Corresponde al recurso empleado tanto humanos como técnicos designados a realizar esa labor en almacén
Costos de administración	Los costos se encuentran relacionado con aquellos que se originan en el área administrativa de empresa.
Costo de instalaciones	Este costo se encuentra directamente relacionado al espacio. A medida que aumenta el grado de automatización de un almacén estos costes se hacen muy relevantes y complejos

Fuente: adaptado de Orjuela, Suárez, & Chinchilla, (2016)

En el costo de manipulación se debe considerar la influencia de unos factores:

- *Diversidad y número de referencias:* A mayor cantidad y diversidad de referencias, mayor será el costo de manipulación.
- *Infraestructura y equipos:* un almacén automatizado reduce los tiempos y costos de manipulación.
- *Estandarización de cargos:* Establecer unidades de carga estandarizadas disminuye el costo.
- *Estacionalidad:* Regula el trabajo en el almacén, menores serán los costos
- *Embalaje:* Un embalaje funcional y correctamente codificado facilita las labores de manipulación y reduce los costos.

## 1.7 Indicadores de gestión de almacenes

Conociendo la importancia de contar con indicadores para medir y aumentar la productividad de la gestión de almacenamiento. Chen, Huang, Yu, & Hung, (2017) proponen indicadores claves de rendimiento que se centran en la calidad, costos seguridad y exactitud en los sistemas de gestión de almacenamiento

Tabla 4.

Tabla 4. Indicadores de productividad en la gestión de almacenamiento

<b>Gestión de inventario</b>	<b>Indicadores de rendimiento del almacén</b>	<b>Indicadores de cumplimiento de la orden</b>
Inventario dañado= total dañado/valor inventario	Ordenes por horas=ordenes embaladas/mano de obra total del almacén	Orden de entrega a tiempo=órdenes a tiempo/total de ordenes enviadas
Días en inventario=inventario del mes/ventas diarias/mes	Artículos por hora=artículos recogidos-empacados/total de horas de mano de obra en almacén	Tasa de llenado de pedido=pedidos completos/pedidos totales
Utilización de almacén=ocupación metro/capacidad total del almacén	Costo por pedido=costo total del almacén/total de pedido enviados	Completar orden perfecta=entrega perfecta/total de pedidos enviados

Fuente:Liviu & Emil, (2009)



## 2. Optimización multiobjetivo

Un problema de optimización multiobjetivo (MOP – por sus siglas en Ingles “Multi-Objective Optimization Problem) plantea la optimización, ya sea, minimización ó maximización de un conjunto de funciones. Se separan de la optimización convencional de un único objetivo, ya que en la primera generalmente no entrega una única solución (Arango & Zapata, 2017). En vez de esto, la MOP genera un conjunto de posibles soluciones, sobre las cuales los decisores deben seleccionar cual adoptar, basado en una evaluación del desempeño de esta en todos los objetivos. Las soluciones de un problema de optimización multiobjetivo frecuentemente llevan a una familia de puntos óptimos de solución (conocidos como Frontera Pareto), en donde el mejoramiento de un objetivo puede resultar en el decremento de otro o más (Shenfield, Fleming, & Alkarouri, 2007).

Según Marler y Arora (2004), el problema de optimización multiobjetivo se puede formular de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } F(x) = [F_1(x), F_2(x), \dots, F_k(x)] \\ & \text{sujeto a } g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m \\ & \quad h_l(x) = 0, l = 1, 2, \dots, e \\ & \quad x \in R^n \end{aligned}$$

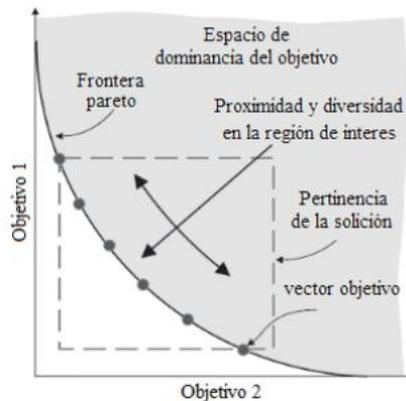
La solución a los problemas multiobjetivo se realiza desde dos tipos de enfoques: el enfoque unidimensional y el enfoque de alta dimensión (Arango-Serna, Zapata-Cortes, & Serna-Uran, 2018). El enfoque unidimensional se basa en consolidar (agregar) las funciones objetivo para convertir el problema del tipo mono-objetivo, el cual es resuelto obteniéndose una única solución. Esta agregación se da mediante la ponderación de los diferentes objetivos y presentando una función

objetivo que incluye los objetivos de forma ponderada. El enfoque de alta dimensión se basa en dos fases: en la primera fase se encuentran las soluciones no dominadas, encontradas obteniendo la Frontera Pareto del problema y en la segunda, a partir de las preferencias del tomador de decisiones, se selecciona cual es la mejor decisión para el problema en específico. Según Shenfield et al.(2007) las métricas más comunes para medir la calidad de la aproximación de la solución en un problema multiobjetivo, tal y como se muestra en la Figura 3, son:

- Proximidad: Hace referencia a que tan cerca la solución está de la frontera de Pareto.
- Diversidad: Es la medida de que tan extenso y uniforme es la distribución del conjunto de soluciones.
- Pertinencia: Mide la pertinencia de las soluciones para el tomador de la decisión.

Valledor (2015) menciona otras técnicas para medir la calidad de las soluciones, las cuales son: Métricas de espaciado, relación de soluciones no dominadas, Métrica C, Contribución, entropía, Hipervolumen, unary Epsilon, empirical attainment Function y calidad media.

Figura 3 Medidas de la calidad de soluciones multiobjetivo:



- Fuente: (Shenfield et al., 2007)

## 2.1 Técnicas de solución a problemas multiobjetivo

Los modelos de optimización multiobjetivo pueden ser resueltos utilizando técnicas convencionales (clásicas) o por técnicas heurísticas (López et al., 2009). Los métodos clásicos operan en dos fases: la primera es la generación de un problema individual a partir del problema multiobjetivo, resolviendo un objetivo a la vez (problema individual), mediante un método de optimización tradicional (Galeano y Montoya, 2008) y la segunda encontrando la solución de los demás objetivos a partir de la hallada en la fase inicial.

Las técnicas Heurísticas más comunes para la solución de problemas de optimización multiobjetivo son (Villalobos, 2005):

- Simulated annealing.
- Genetic algorithms.
- Evolution strategies.
- Evolutionary programming.
- Artificial immune system algorithm.
- Particle swarm optimization.

López et al. (2009) Clasifican las técnicas para resolver los problemas multiobjetivo en dos categorías: técnicas de toma de decisión multicriterio (que incluyen las técnicas clásicas) y las técnicas de optimización multiobjetivo evolutivas: Las primeras se caracterizan por solucionar el problema en dos etapas interrelacionadas: la utilización de una técnica de programación matemática para encontrar el conjunto de soluciones y un método para la toma de decisión de la mejor alternativa. Los métodos evolutivos requieren que después de encontrar el conjunto de soluciones se realice un proceso de selección de las mejores alternativas con base en las preferencias del tomador de decisiones (López et al., 2009). Las técnicas de toma de decisión multicriterio para solución de problemas multiobjetivo se clasifican de acuerdo con el procedimiento (cómo) y al momento en que el tomador de decisiones incorpora sus preferencias para seleccionar la

decisión que mejor le represente dentro del conjunto de soluciones óptimas (López et al., 2009). En Tabla 5 se presentan los métodos de solución de problemas multiobjetivo de acuerdo con la clasificación propuesta por López et al. (2009).

Tabla 5 Clasificación de las técnicas de toma de decisión multicriterio

Clasificación	Técnicas
Técnicas en que las preferencias se indican antes de la búsqueda de las soluciones	Goal Programming
	Goal-Attainment Method
	Lexicographic Method
Técnicas en que las preferencias se indican durante la búsqueda de las soluciones	Linear Combination of Weights
	Normal Boundary Intersection
	$\epsilon$ -Constraint Method
	Method of Weighted Metrics
Técnicas en que las preferencias se indican durante la búsqueda de las soluciones	Method of Geoffrion-Dyer-Feinberg (GDF)
	Tchebycheff Method
	Reference Point Methods
	Light Beam Search

Fuente López et al., (2009)

López et al. (2009) establecen que varios autores han identificado inconvenientes en los métodos convencionales para resolver problemas de optimización multiobjetivo, tales como:

- Requieren un alto número de corridas (iteraciones) para encontrar un elemento de la frontera de Pareto.
- Muchos de estos métodos requieren conocimiento del dominio del problema para ser solucionado.
- Algunos de estos métodos son sensitivos (la solución se ve afectada) por la forma o la continuidad de la frontera de Pareto.
- A medida que aumenta el número de objetivos y la complejidad de las funciones que los representan, el problema de encontrar una solución satisfactoria de forma rápida se vuelve incrementalmente complejo (Fonseca y Fleming, 1995).

Estos problemas pueden ser resueltos utilizando algoritmos evolutivos (Zapata, 2017). Por su parte, los Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo (MOEAs) combinan técnicas de computación evolutiva con la teoría de optimización multiobjetivo, y por lo tanto brindan la posibilidad de realizar búsquedas en espacios ilimitados y complejos. Igualmente, permiten mantener toda una población de soluciones óptimas, por lo que se han planteado como una buena herramienta algorítmica para resolver diversos problemas de optimización de objetivos múltiples.

Los algoritmos evolutivos son métodos de búsqueda estocásticos que permiten encontrar soluciones a problemas matemáticos, trabajando con una población de individuos que representan un conjunto de soluciones candidatas. Esta población es sometida a diferentes transformaciones y después a un proceso de selección que favorece a los mejores. Cada ciclo de transformación y selección constituye una generación. Después de determinado número de generaciones se espera que el mejor individuo de la población esté cerca a la solución óptima del problema. En los algoritmos evolutivos se producen cambios en nuevas generaciones a través de la mutación, pero estas generaciones pueden darse por mecanismos de recombinación o sobre-cruzamiento, como es el caso en los algoritmos genéticos. La optimización multiobjetivo con algoritmos evolutivos no garantiza que se encuentre la verdadera frontera de Pareto óptima, sin embargo, en vez de esto se encuentra una solución razonablemente aproximada en un tiempo de búsqueda (tiempo de computo) aceptable (López et al., 2009).

En optimización multiobjetivo, los algoritmos evolutivos son especialmente adecuados debido a que operan sobre un grupo de posibles soluciones (la población de individuos), permitiendo generar varios elementos del conjunto óptimo de Pareto (al menos una buena aproximación de estos). Además, los algoritmos genéticos para la optimización multiobjetivo, en comparación con los métodos tradicionales de programación matemática, son menos susceptibles a la forma y continuidad de la frontera de Pareto, requieren poca información del dominio y son relativamente fáciles de usar e implementar (López et al., 2009).

Para Fonseca y Fleming (1995) y Tiwari et al. (2002) los algoritmos y las técnicas evolutivas han demostrado ser una herramienta que se ajusta bien a la solución de problemas multiobjetivo, dado la habilidad de manejar problemas complejos, involucrando características tales como discontinuidades, multimodalidad, espacios factibles discontinuos y funciones de evaluación ruidosas. Vergidis et al. (2012) argumentan que estos algoritmos son aplicados exitosamente para resolver varios problemas combinatorios. Moon y Seo (2005) mencionan que el atributo más atractivo de los algoritmos evolutivos es la flexibilidad de trabajar múltiples funciones utilizando pocos requerimientos matemáticos. Por su parte Wang et al. (2004) argumentan la capacidad de estos algoritmos para resolver las dificultades de cómputo en procesos de optimización no lineal, no convexa y discontinua.

Los principales algoritmos evolutivos que permiten resolver problemas multiobjetivo son (López et al., 2009):

- MOGA - Multi-Objective Genetic Algorithm.
- NSGA y NSGA-II- Nondominated Sorting Genetic Algorithm.
- SPEA y SPEA2 - Strength Pareto Evolutionary Algorithm.
- PAES - Pareto Archived Evolution Strategy.
- PESA - Pareto Envelope-based Selection Algorithm.

Además de los métodos tradicionales y evolutivos mencionados anteriormente, existe otro conjunto de técnicas metaheurísticas que pueden ser utilizados para resolver problemas de optimización multiobjetivo. González (2013) realizó una descripción de las técnicas metaheurísticas utilizados exitosamente para optimización multiobjetivo, encontrando algunas que no corresponden a los algoritmos evolutivos, las cuales son:

- Búsqueda de Entorno Variable Multiobjetivo (Multiobjective Variable Neighbourhood Search - MO-VNS).
- Evolución Diferencial con Torneos de Pareto (Differential Evolution with Pareto Tournaments - DEPT).

- Algoritmo Multiobjetivo de Enseñanza-Aprendizaje (Multiobjective Teaching-LearningBased Optimization - MO-TLBO).
- Colonia Artificial de Abejas Multiobjetivo (Multiobjective Artificial Bee Colony - MOABC).
- Algoritmo Multiobjetivo de Búsqueda Gravitacional (Multiobjective Gravitational Search Algorithm - MO-GSA).
- Algoritmo Multiobjetivo de las Luciérnagas (Multiobjective Firefly Algorithm - MO-FA).
- Algoritmo Multiobjetivo de las Ranas Saltarinas (Multiobjective Shuffled Frog Leaping Algorithm - MO-SFLA).
- Colonia Artificial de Abejas Multiobjetivo con evolución.

Debido a que el modelo propuesto se basa en lograr el mejor desempeño en tres objetivos conflictivos entre sí, se utiliza la heurística NSGA II que permite encontrar soluciones que logren resultados óptimos en cuanto a costos, área y tiempo, de los cuales el tomador de decisiones según su criterio elegirá el mejor para el momento de la toma de la decisión, asimismo que los beneficios mencionados sobre el uso de algoritmos genéticos para la solución de problemas de optimización multiobjetivo, para el modelo de optimización que será presentado en el capítulo 3. Se utiliza el algoritmo NonDominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGAI), el cual ha sido probado exitosamente en problemas de optimización de este tipo (Arango et al., 2015; Iopéz et al., 2009; Li y Zhang 2009; Köppen y Yoshida, 2007).

## **2.2 Modelos multi-objetivo para la asignación de mercancía en almacenes**

Con el objetivo de establecer la estrategia que permita optimizar la asignación de mercancías en un centro de distribución, inicialmente se deben identificar aquellos elementos que intervienen en el proceso. Por tal motivo se realiza una búsqueda en las bases de datos de aquellos modelos que aborden temas relacionados con la asignación de mercancía en almacenes, la cual es presentada en la Tabla 6 que

permitirá identificar las funciones y elementos de optimización utilizadas por los autores en este tipo de problemas.

Tabla 6 revisión de modelos propuestos para la asignación de mercancía.

N°	Autor	Multiobjetivo	Modelo	Objetivo	Variables	Resultados
1	Sanei, Nasiri, Marjani, & Moattar H., (2011)	NO	Modelo matemático lineal y una heurística basada en el método branch and bound, para el problema de asignación de producto con restricciones operacionales	Disminuir tiempo de viajes	Cantidad de flujo del producto en un día, distancia entre la ubicación del almacenamiento a la puerta	Simplifica la gestión del inventario y el uso de equipos de transporte minimizando el costo de flujo.
2	Guerriero, Pisacane, & Rende, (2015)	No	heurística y cluster - heurística	Comparar un modelo de programación lineal entera mixta. - con una heurística y cluster que asignan el espacio de almacén y costos de manipulación del producto	Clase de productos, capacidad de la ranura (Carga),	la programación matemática es muy compleja para el uso cotidiano de la empresa, mientras que las heurísticas arrojan resultados más acertados y en menor tiempo
3	(Guerriero, Musmanno, Pisacane, & Rende, 2013)	SI	Modelado lineal y una heurística de búsqueda local iterativa para resolver los escenarios de gran escala	Reducir los plazos de entrega, los inventarios, los costos totales garantizando los niveles de servicio	Clase de productos, capacidad de la ranura (Carga),	Se evidencia que la heurística encuentra soluciones de buena calidad con un esfuerzo computacional inferior al del modelo matemático
4	Bortolini et al., (2015)	SI	Modelo de programación lineal entero	Mejora la asignación de carga unitaria busca reducir el tiempo de viaje de	Unidad de carga en cada bahía, tiempo de ciclo de los productos	Reducir al mínimo el tiempo de viaje incluyendo el problema de estabilidad

N°	Autor	Multiobjetivo	Modelo	Objetivo	Variables	Resultados
				almacenamiento y de recuperación		
5	Christofides & Colloff, (1973)	SI	Heurística de dos etapas	Reordenar elementos de un almacén, reduciendo costos y tiempo de recuperación		
6	Muralidharan, Linn, & Pandit, (1995)	SI	Heurística shuffling con el método del vecino más cercano y el método de inserción	Minimizar costo y tiempo de AS/RS combinando almacenamiento aleatorio y almacenamiento basado en clases.	Beneficio (distancia ahorrada al colocar el artículo cerca de E/S ) y una variable binaria	La asignación de almacenamiento en clases y aleatorio representa dos puntos extremos del almacenamiento; sin embargo, la heurística shuffling permite combinarlas dando cumplimiento a los objetivos
7	Sadiq, Landers, & Taylor, (1996)	NO	Heurística de la asignación dinámica de la ubicación algoritmo.	Reasignar artículos para optimizar el alistamiento.	Capacidad de la ranura, cantidad de mercancía a reasignar	Mejora el tiempo de alistamiento de la mercancía.
8	Pan, Shih, Wu, & Lin, (2015)	NO	Heurística basada en algoritmo genético y simulado en Flexsim.	Mejorar el problema de asignación de mercancía, y determinar el espacio de almacenamiento adecuado para cada producto y equilibrar la carga de trabajo de cada zona para		El método heurístico propuesto es estadísticamente mejor que los de la política al azar, reduciendo significativamente el tiempo y costo de recoger.

N°	Autor	Multiobjetivo	Modelo	Objetivo	Variables	Resultados
				mejorar el rendimiento del sistema.		
9	Gagliardi, Renaud, & Ruiz, (2010)	NO	Heurística de asignación de espacio y un algoritmo iterativo de mejora	Mejora la eficiencia de la gestión del almacén.	Columnas y filas asignadas para almacenar.	El sistema se desvía de las expectativas teóricas cuando se somete a las condiciones reales, sin embargo, las políticas de almacenamiento propuestas mejoran la eficiencia de la gestión del almacén.
10	(Ramtin & Pazour, 2015)	NO	Modelos matemáticos	Minimizar el tiempo de viaje de asignación y recuperación de mercancía, teniendo en cuenta diferentes políticas operativas	Tiempo de viaje previsto, ubicación de recogida	
11	Quintanilla, Pérez, Ballestín, & Lino, (2015)	SI	Algoritmos de búsqueda local, algoritmo de iteración greedy, algoritmo poblacional basado en iteración greedy.	Resolver el problema de asignación de ubicación en almacenes para disminuir los costos de operación y Maximizar la disponibilidad de espacio de almacén dentro de las restricciones.	La ubicación de la mercancía, tipo del producto, tamaño del palet. Todas las variables son binarias	Mejora un 40% en tiempo y costos.
12	Hou, Wu, & Yang, (2010)	NO	Algoritmo heurístico	Reasignación del almacén para optimizar el espacio.	Estantería (área de luz, área pesada,	Mejora la calidad y la eficiencia de la gestión del almacén, reduciendo

N°	Autor	Multiobjetivo	Modelo	Objetivo	Variables	Resultados
					área media área de re-asignación)	el tiempo y el recurso humano para la toma de decisiones.
13	Hu, Wang, & Zheng, (2012)	SI	optimización de enjambre de partículas (PSO), Algoritmo artificial de abeja	Resuelve el problema de asignación, optimizando tiempo y espacio.		Mejora la asignación y reasignación de la mercancía, optimizando espacio del almacén.
14	Fumi, Scarabotti, & Schiraldi, (2013)	NO	Modelo matemático para la asignación multi-producto con base a las políticas de almacenamiento. (Dedicada)	Reduce el espacio total requerido para almacenamiento	Tiempo y espacio necesario para la asignación del elemento	Minimiza el espacio de almacén necesario
15	Kovács, (2011)	NO	Modelo matemático, programación entera mixta	Minimizar el tiempo de servicio.	Variable binaria que indica si el ítem está asignado en una zona, Probabilidad de acceder a una zona determinado, número de elementos a recoger en la zona, tiempo de picking, tiempo de ciclo del pedido	Disminución de 36-38% del tiempo de ciclo de pedido. Se demostró que el sistema Milkrun conduce a una correlación entre las probabilidades de petición de artículos que pueden ser explotadas en un modelo de programación matemática.
16	Bortolini, Faccio, Ferrari, Gamberi, & Pilati, (2016)	SI	Modelo matemático de optimización bi-objetivo	Minimiza tiempo de viaje y energía consumida por las grúas.	Distancias recorridas, producto, ubicación en almacén	Los resultados demuestran la posibilidad de reducir el requerimiento de energía AS/RS en un 12.66% con un aumento

N°	Autor	Multiobjetivo	Modelo	Objetivo	Variables	Resultados
						promedio del tiempo de ciclo de aproximadamente 2.52%.
17	Chan & Chan, (2011)	SI	Modelo simulado en el software ARENA	Mejorar el rendimiento del problema de asignación de almacenamiento en términos de distancia recorrida y tiempo de alistamiento	Políticas de enrutamiento, tiempo de recuperación del pedido, distancia recorrida	Mediante la simulación con ARENA, los resultados muestran que las combinaciones de políticas de enrutamiento tienen resultados diferente bajo otros indicadores de desempeño.
18	Ross, Khajehnezhad, Otieno, & Aydas, (2017)	SI	modelado de ubicación de inventario	Minimizar costos anuales totales (costos de localización de instalaciones, costos de transporte, costos de inventario, costo de ventas perdidas)	Demanda del producto, radio de cobertura, tipo de productos.	El modelo propuesto determina el número de centros de distribución (CD) a abrir la ubicación y las asignaciones de los minoristas a los DCs abiertos para tipos de productos particulares
19	(Shahabi, Unnikrishnan, Jafari-Shirazi, & Boyles, 2014)	si	Aproximaciones exteriores (outer Approximation)	Minimizar simultáneamente la ubicación de la instalación, el transporte y los costos de inventarios incurridos por la red en presencia de correlación entre la demanda de los inventarios	Demanda diaria media en un almacén, variación de la demanda diaria en almacén, cantidad óptima de pedido en el almacén, tiempo de entrega del pedido en el almacén, nivel de stock de seguridad en almacén, costo de	primero en mostrar la eficiencia del enfoque OA con respecto a los solucionadores de optimización comerciales como BARON y CPLEX en el manejo de programas enteros mixtos no lineales enteros mixtos y mixtos. En segundo lugar, demostrar el valor

N°	Autor	Multiobjetivo	Modelo	Objetivo	Variables	Resultados
					inventario óptimo en el almacén.	de considerar la correlación mediante el estudio de la suboptimalidad de las soluciones obtenidas al descuidar el impacto de las correlaciones. En tercer lugar, investigar el rendimiento del marco OA con respecto al aumento de tamaño de las redes y también proporcionar información sobre el efecto de parámetros como el coeficiente de correlación y la capacidad de los almacenes en el tiempo total de solución del algoritmo.
20	(Wutthisirisart, Sir, & Noble, 2015)	No	Los modelos se codificaron en C ++ con la biblioteca Qt y se resolvieron utilizando el solucionador comercial GUROBI 4.5	Minimizar los costos de alquiler de espacio de almacenamiento y costo de transporte de trasladar los palés desde la ubicación externa al sitio	m= (Número de m palets) en movimiento en un tiempo t. -Desde el almacén de producción hasta el almacén alquilado.  -Desde el almacén alquilado al almacén de producción.	Se puede evidenciar una oportunidad de ahorro entre el 20% y 40% dado la asignación de materiales entre los almacenes alquilado y de propiedad.

N°	Autor	Multiobjetivo	Modelo	Objetivo	Variables	Resultados
					<p>-desde el almacén de producción a la planta de producción.</p> <p>-Desde el almacén alquilado a la planta de producción.</p> <p>-Desde la plata de producción al almacén de producción.</p> <p>- Desde la plata de producción al almacén alquilado.</p> <p>m enviados desde el almacén de producción.</p> <p>m enviados desde el almacén alquilado.</p> <p>m en el sitio final.</p> <p>m afuera del sitio.</p>	
21	(Trab et al., 2015)	si	Modelo multi-agentes para la asignación del producto con restricciones	Reducir el tamaño de las ubicaciones flotantes en WMS. Minimizar costos	Tamaño de la ubicación. capacidad de las ranuras compatibilidad de	Mediante el uso de mecanismos de negociación basados en el interne de las cosas se resolvió el problema

N°	Autor	Multiobjetivo	Modelo	Objetivo	Variables	Resultados
			compatibles (PAP/CC)	logísticos totales. garantizar los niveles de servicio.	productos política de asignación tiempo de almacenamiento	de almacenamiento de productos peligrosos y productos con restricción de almacenamiento.
22	(van Wijk, Adan, & van Houtum, 2013)	NO	modelo de inventario de ubicaciones múltiples con control de inventario de stock base	Reducir costos mediante el uso de la política de asignación óptima dinámica comparada con la política de asignación estática.	Nivel de stock Demanda	Se compara tres políticas. 1) política óptima. 2) política ingenua, es decir, que satisface todas las demandas y 3) política de nivel crítico óptimo. Se concluye que una política ingenua se puede considerar peor que una política óptima

Fuente: elaboración propia

Después de analizar la Tabla 6, se pudo encontrar que la función objetivo más frecuente trabajada por los autores es aquella que busca disminuir los costos totales, ya sean por alquiler de almacenes o aquellos incurrido en la operación. La segunda y tercera función más común son aquellas que buscan minimizar el espacio del almacén y el tiempo requerido para la manipulación del producto. Muy pocos artículos trabajan tres funciones objetivo o más.

Teniendo en cuenta lo anterior en el modelo propuesto de la presente tesis se considerarán tres objetivos:

- ✓ Optimizar el espacio para el almacenamiento del centro de distribución
- ✓ Minimizar los costos operacionales en la asignación de la mercancía
- ✓ Disminuir el tiempo destinado para la manipulación del producto (asignación).

En este capítulo se realizó una revisión de la literatura de la optimización multiobjetivo, identificando herramientas y técnicas que permiten dar solución a problemas complejos, los cuales contemplan múltiples objetivos. Así mismo se identificaron las variables y objetivos de los modelos que se ha utilizado en la asignación de mercancías. dando así cumplimientos al primero, segundo y tercer objetivo de esta tesis de maestría



## **3. Modelización de la asignación de mercancías en un centro de distribución**

En este capítulo se estructura en tres subcapítulos: el primero presenta un modelo conceptual para la asignación de mercancías en un centro de distribución, el segundo el modelo matemático para la asignación de mercancías en un centro de distribución y el tercero la formulación multiobjetivo NSGAI para la optimización de las funciones objetivo propuestas.

### **3.1 Modelo conceptual para la asignación de mercancías en un centro de distribución**

En el modelo conceptual propuesto se da a conocer el proceso que se lleva a cabo para la asignación de mercancías en un centro de distribución. Siendo este modelo, uno de los objetivos propuesto en esta tesis de maestría. A continuación, se describe cada una de las fases propuestas en el modelo conceptual Figura 4:

#### **✓ FASE 1- Información inicial**

Durante esta fase se establecen las características del producto y del centro de distribución. Con relación al tipo de producto, para este ejercicio se consideran tres tipos de productos, tipo 1, tipo 2 y tipo 3, correspondientes a las tres tipologías más relevantes a ser almacenados en la empresa, de acuerdo con su demanda y necesidades de almacenamiento. Estos productos son tomados como elementos de análisis en la presente tesis. De cada producto se analiza su demanda y peso.

Por otra parte, la primera fase también analiza las características del centro de distribución, siendo estas relacionadas a continuación: a) tamaño del centro de

distribución (definido como el número de espacios de almacenamiento), b) Capacidad de cada espacio del centro de distribución y c) el diseño del centro de distribución.

✓ FASE 2- Aplicación del NSGAI en las funciones objetivo

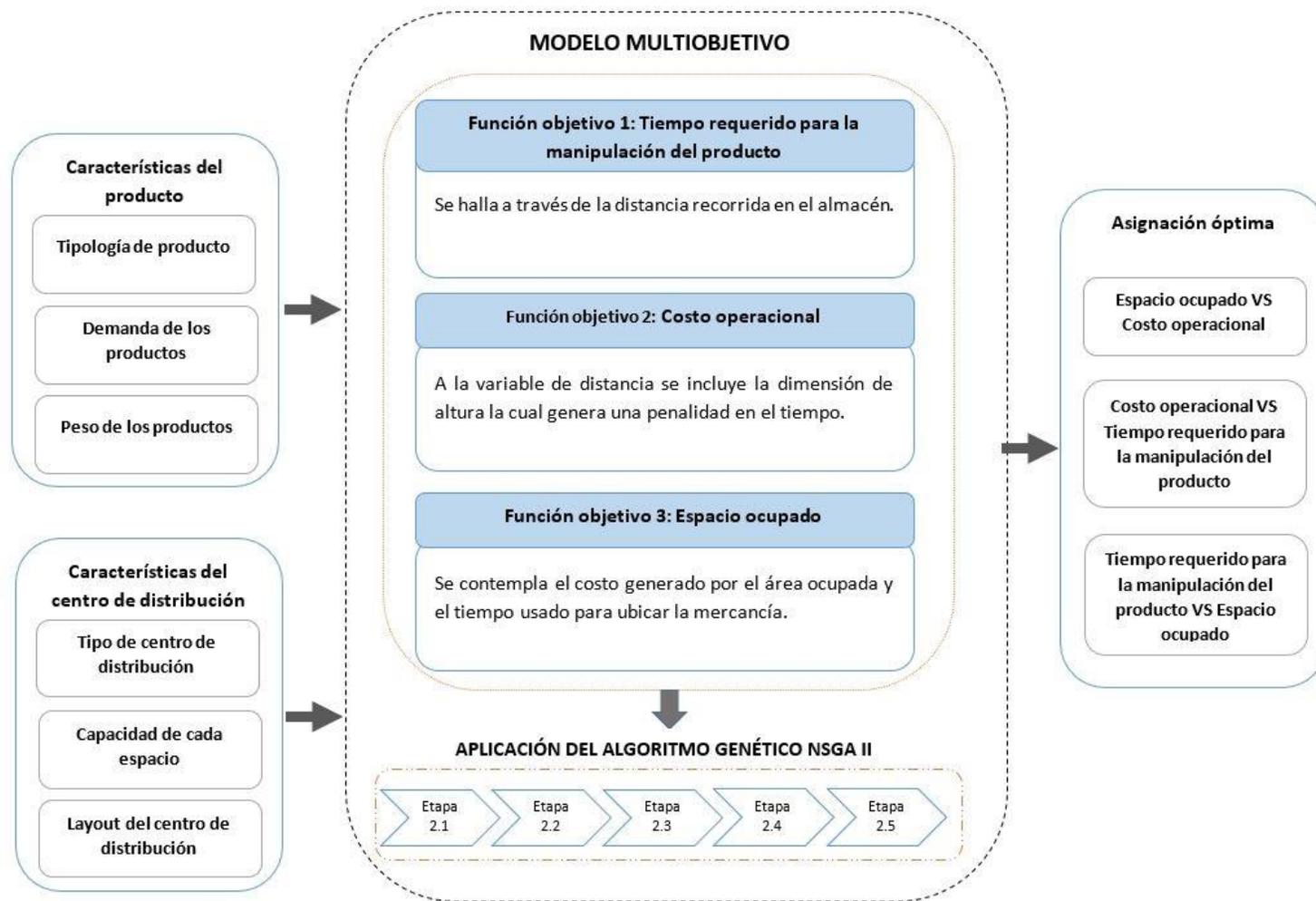
Durante esta fase 2 se establecen las tres funciones objetivo, donde la primera busca optimiza el espacio para el almacenamiento en el centro de distribución, la segunda busca disminuir el tiempo de operación en la asignación de la mercancía y la tercera busca minimizar los costos operacionales causados por la asignación de la mercancía en el centro de distribución.

Una vez definidas las tres funciones objetivo, se formaliza el modelo matemático a resolver y para su solución se corre el algoritmo genético NSGAI, siguiendo el esquemas del algoritmo propuesto por Zapata C., (2016) el cual se puede observar en la Figura 5, y se realiza a través de las siguientes etapas

- Etapa 2.1: Semilla, Corrida no aleatoria
- Etapa 2.2: Identificación de cromosoma
- Etapa 2.3: Operación selección
- Etapa 2.4: Operación cruce y mutación
- Etapa 2.5: Validación de resultados

La asignación de la mercancía se realiza de forma aleatoria; sin embargo, para efectos de generar la semilla solución se establece un individuo no aleatorio con el objetivo de establecer el menor espacio para almacenar, como una de las posibles soluciones del algoritmo y con ello ayudar a la convergencia del mismo

Figura 4. Modelo conceptual para la asignación de mercancía.



Fuente: elaboración propia



✓ FASE 3- Resultados

Durante esta etapa se encuentran las soluciones generadas por el algoritmo NSGAI. El resultado obtenido corresponde a un conjunto de soluciones debido a la naturaleza multiobjetivo del problema, es decir que no se tiene una única solución de cada una de las funciones objetivo. Como solución se tiene una frontera de Pareto, en la cual se encuentran todos los objetivos dominantes que representan una solución óptima al modelo matemático multiobjetivo. Para la selección del plan de asignación por parte del tomador de decisión, este puede seleccionar cualquier solución de forma que puede estar seguro de estar utilizando una combinación óptima de los tres objetivos, esto significa que el tomador de decisión escoge de acuerdo con su preferencia, a partir del conjunto de soluciones óptimas entregadas por el algoritmo.

### **3.2 Modelo matemático multiobjetivo para la optimización simultánea de costos operacionales, tiempo y espacio para almacenar del centro de distribución**

La asignación de mercancía en el centro de distribución se realiza con base en cada una de las políticas mencionadas anteriormente, puede realizarse mediante métodos heurísticos y metaheurísticos que buscan optimizar los costos, los tiempos requeridos para la manipulación de los productos o la distancia, entre otros objetivos (Bortolini et al., 2015), tal y como se puede verificar en la revisión hecha por (Pan & Wu, 2009) y los trabajos de (Roodbergen, Vis, & Jr, 2015), (Bortolini et al., 2015) y (Gu et al., 2007).

(Tompkins, Tanchoco, White, & Bozer, 2011) presentaron un modelo para la minimización de las distancias (o tiempos) para un problema de asignación del almacenamiento bajo la política de almacenamiento dedicado, en el que existen múltiples productos y varios puntos de recogida y entrega de la mercancía, cuya función objetivo a optimizar se presenta en la ecuación (1).

$$\text{minimizar } \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^q \frac{T_j}{S_j} \sum_{i=1}^m p_i d_{ik} x_{jk} \quad (1)$$

La variable de decisión es  $x_{jk}$ , la cual es del tipo binario tomando valor de 1 si el producto  $j$  es asignado a la posición  $k$  o cero en caso contrario. La descripción de cada uno de los parámetros de la función objetivo representada por la ecuación (1) son:

- $n$  cantidad de los productos a almacenar (equivalente a las necesidades de almacenamiento en los diferentes tipos de productos).
- $q$  es el número de posiciones de almacenamiento.
- $m$  el número de puntos de origen-destino de la mercancía.
- $T_j$  el número de viajes de almacenamiento (entrada-salida) para el producto  $J$  durante el tiempo requerido para la manipulación de los productos.
- $S_j$  el número de posiciones de almacenamiento requerido para el producto  $j$ .
- $p_i$  Porcentajes de viaje de entrada y salida desde y hacia puntos  $i$ .
- $d_{ik}$  distancia (o tiempo) requerido para ir del punto  $i$  a la posición de almacenamiento  $k$ .
- $x_{jk}$  Variable binaria con valor de 1 si el producto  $j$  es asignado a la posición  $k$ , cero de otra forma.
- $m$  es el número posiciones a lo largo del eje X
- $w$  es el número posiciones a lo largo del eje Y

De esta forma, el modelo contempla las distancias esperadas de desplazamiento para todos los productos  $j$  desde cada punto de origen hasta la posición de almacenamiento  $k$ , representado por el término  $p_i d_{ik} x_{jk}$ . Además, la función objetivo contempla la intensidad o cantidad de movimientos, en términos de posiciones de almacenamiento, mediante el término  $\frac{T_j}{S_j}$ , requeridas para cada producto  $j$ . El costo total del movimiento de materiales puede ser calculado

multiplicando la distancia total calculada en la ecuación 1 por un factor de costo ponderado de las distancias, tanto en posición horizontal como vertical (este costo será el producto del uso de recursos de mano de obra, maquinaria, energía y demás costos administrativos involucrados en la manipulación de productos en el centro de distribución). La probabilidad que cada ítem viaje del punto  $i$  a cada posición  $k$  para la asignación del producto  $j$  es igual para todos los productos.

La función objetivo (ver ecuación (1)), está sujeta a las siguientes restricciones representadas por la ecuación (2) y ecuación (3).

$$\sum_{j=1}^n x_{jk} = 1 \quad k = a, \dots, q \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^q x_{jk} = S_j \quad j = a, \dots, n \quad (3)$$

La restricción presentada en la ecuación (2) indica que solamente un producto  $j$  puede ser asignado a una posición  $k$ ; y por su parte la restricción representada por la ecuación (3), indica que la cantidad de producto  $j$  asignado a la posición  $k$  debe ser igual al requerimiento de almacenamiento (espacios requeridos) para el producto  $j$ .

La función objetivo 2 (ecuación (4)), minimiza los tiempos requeridos para la manipulación de los productos; este tiempo incluye los componentes de desplazamiento en alturas y piso, así con tiempos estándares para recoger y ubicar los pales.

$$\text{minimizar} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^q \frac{T_j}{S_j} \sum_{i=1}^m p_i t_{ik} x_{jk} \quad (4)$$

La función objetivo 3 (ecuación (5)), disminuye el espacio del almacenamiento como una medida del espacio requerido para almacenar los productos. Para esto se propone una función objetivo por escalones, en el cual se determinen la cantidad de estantes ocupados a lo largo  $Z_{iSL}^x$  (posición X) y ancho  $Z_{iSL}^y$  (posición Y). De esta

forma, el área se define como la multiplicación de dichos espacios ocupados, como se muestra en la ecuación 5.

$$\text{minimizar } Z_{iSL}^x * Z_{iSL}^y \quad (5)$$

En donde:

$$Z_{iSL}^x \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ si al menos } 1 x_{iSL} \in m = 1 \\ 2 \text{ si al menos } 1 x_{iSL} \in m = 2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \alpha \text{ si al menos } 1 x_{iSL} \in m = \alpha \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} \text{tal que } \alpha \text{ es igual al} \\ \text{número de racks en } x \end{array} \right\} \quad (6)$$

$$Z_{iSL}^y \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ si al menos } 1 x_{iSL} \in w = 1 \\ 2 \text{ si al menos } 1 x_{iSL} \in w = 2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \theta \text{ si al menos } 1 x_{iSL} \in w = \theta \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} \text{tal que } \theta \text{ es igual al} \\ \text{número de racks en } y \end{array} \right\} \quad (7)$$

Además de lo mencionado en las funciones objetivo, el presente modelo considera los siguientes elementos:

- ✓ cada posición almacena solo una tipología de producto.
- ✓ la demanda de los productos es aleatoria.
- ✓ Las distancias son calculadas utilizando la distancia de Chebyshev (o métrica máxima) ya que las distancias euclidianas no representan el movimiento requerido en el área de almacenamiento, toda vez que ni la distancia, ni los tiempos pueden ser calculado considerando líneas rectas entre dos puntos.

### 3.3 Formulación multiobjetivo para la optimización simultanea de costos operacionales, tiempo requerido para la manipulación del producto y espacio para el almacenamiento en el centro de distribución

Según (Marler & Arora, 2004), el problema de la optimización multiobjetivo se puede expresar mediante la ecuación (8):

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } F(x) &= [F_1(x), F_2(x), \dots, F_k(x)] \\ \text{Sujeto a } g_j(x) &\leq 0, j = 1, 2, \dots, m \\ h_l(x) &= 0, l = 1, 2, \dots, e \\ X &\in R^n \end{aligned} \quad (8)$$

A continuación, se presenta el modelo matemático desarrollado para resolver el modelo de asignación de mercancías en un centro de distribución que permita la optimización simultanea de los costos operacionales, el tiempo requerido para la manipulación de los productos y el espacio para el almacenamiento, funciones objetivo propuestas en esta tesis de maestría.

$$\text{Minimizar } F(x) = [F_1(x), F_2(x), \dots, F_k(x)] \quad (9)$$

Donde:

$$F_1 = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^q \frac{T_j}{S_j} \sum_{i=1}^m p_i d_{ik} x_{jk} \quad (1)$$

$$F_2 = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^q \frac{T_j}{S_j} \sum_{i=1}^m p_i t_{ik} x_{jk} \quad (4)$$

$$F_3 = Z_{iSL}^x * Z_{iSL}^y \quad (5)$$

Estas ecuaciones están sujetas a las restricciones presentadas por las ecuaciones (6) y (7), tal y cómo se presentó en el apartado 3.2.

Debido a la complejidad del modelo, el cual implica múltiples objetivos, se requieren técnicas de solución avanzadas. Para esto se desarrolla un algoritmo genético NSGAI, como el presentado en el siguiente apartado.

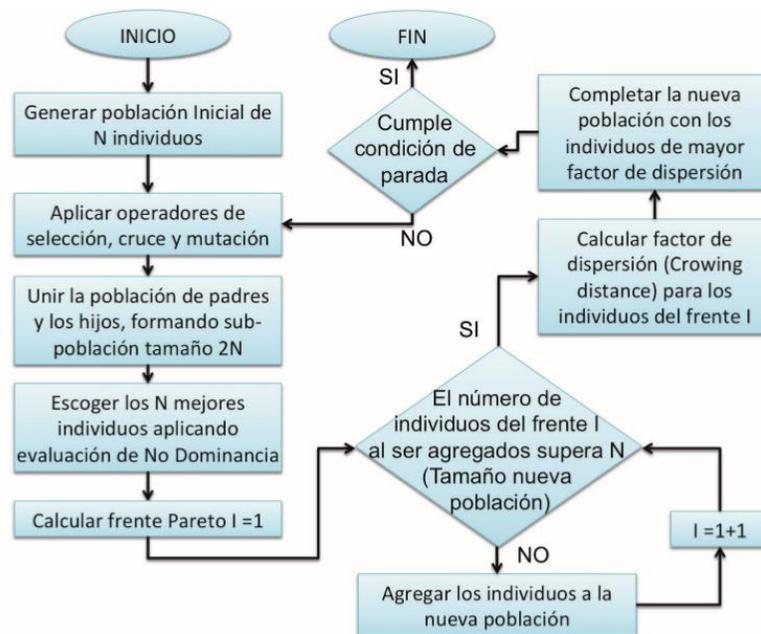
### 3.3.1 Algoritmo NSGAI para la solución del modelo propuesto

El algoritmo NonDominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGAI) es uno de los algoritmos evolutivos de optimización multiobjetivo más relevantes encontrados en la literatura científica, el cual fue propuesto por Deb et al. (2002), y se basa en el Algoritmo Genético de Sorteo de No-Dominancia (NSGA) desarrollado por Srinivas y Deb (1994). El algoritmo NSGAI mejora los inconvenientes encontrados en el NSGA, el cual requiere un número elevado de repeticiones de clasificación. El algoritmo NSGAI utiliza el concepto de NO-dominancia y el concepto de distancia de agrupamiento (Crowing Distance), mediante la cual permite comparar los individuos no dominados mediante una función de su dispersión en el espacio de solución. Así mismo, el algoritmo también requiere de elementos específicos para la formulación de los algoritmos genéticos, como lo son los cromosomas, los operadores de selección, cruce y mutación, la evaluación de las funciones de aptitud y la condición de terminación del algoritmo.

El esquema general del funcionamiento del algoritmo NSGAI se presenta en la Figura 5. En el algoritmo NSGAI primero se crea una población inicial  $P_t=0$  de tamaño  $N$  de forma aleatoria, la cual es organizada de acuerdo con la no dominancia de las soluciones, proceso realizado mediante un procedimiento iterativo en el cual diferentes niveles de no-dominancia son determinados (Fronteras de Pareto obtenidas al separar las soluciones no dominadas del resto y volver a realizar el proceso de determinación de no dominancia con las restantes) (Correa F, Bolaños, & Molina C., 2008). A partir de esta población se origina una población temporal  $Q_0$  de tamaño  $N$  (Offspring) mediante el uso de los operadores de selección, cruce y mutación del algoritmo genético. Estas poblaciones son combinadas para formar una población  $R_t$  de tamaño  $2N$  ( $P_t + Q_t$ ) la cual es

ordenada de acuerdo a los niveles de no-dominancia, asegurando de esta forma el elitismo en el algoritmo. A partir de los diferentes niveles de no-dominancia (fronteras Pareto) de la población  $R_t$ , la población  $P_{t+1}$  para la nueva generación se construye incluyendo (acomodando) los individuos en los mejores niveles de no-dominancia (Primeras fronteras Pareto).

Figura 5. Esquemas del algoritmo NSGAI utilizado.

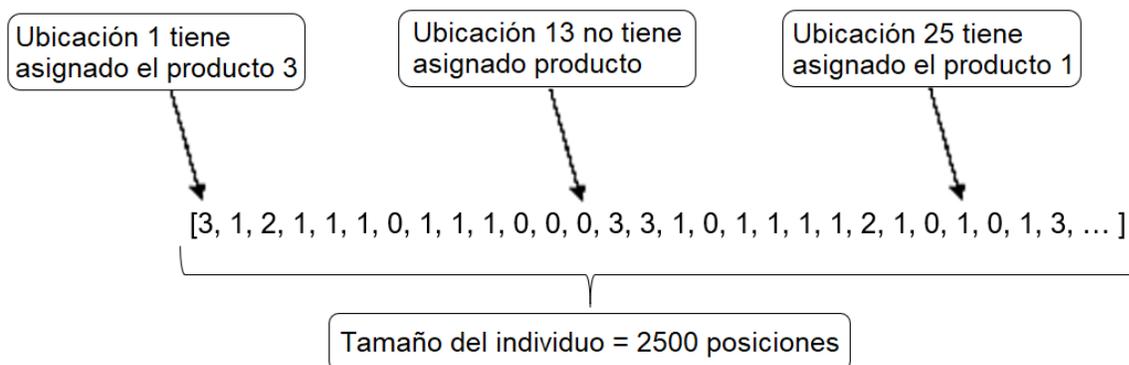


Fuente: Zapata C., (2016)

### 3.3.1.1 Representación del individuo y generación de la población inicial

En la Figura 6 se representa el individuo (o cromosoma) utilizado en el algoritmo NSGAll para el problema multiobjetivo propuesto en esta tesis de maestría. Se presenta un individuo en el que se muestra la asignación de las primeras 28 posiciones del centro de distribución, donde se observa la asignación de algunos productos. No se presenta el individuo completo en esta parte para mejorar la explicación del cromosoma, el cual será mostrado completamente más adelante. Un valor de cero en el cromosoma, indica que esa posición no tiene producto asignado.

Figura 6 Cromosoma utilizado para el problema de asignación de mercancía



Fuente: Elaboración propia

Para el desarrollo de la solución del modelo propuesto, se genera un individuo inicial en el cual la asignación de la mercancía no se realiza de manera aleatoria, con el propósito de crear una semilla con el objetivo de ayudarle al algoritmo a encontrar la solución que genere el menor espacio para el almacenamiento, lo cual ayuda a la convergencia del mismo.





<p>1, 1, 3, 1, 0, 3, 1, 2, 1, 0, 3, 1, 1, 1, 3, 3, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 3, 2, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 2, 0, 3, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 0, 2, 1, 1, 1, 3, 2, 0, 3, 0, 0, 0, 0, 3, 0, 1, 0, 3, 0, 3, 3, 3, 3, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 3, 0, 0, 3, 1, 3, 1, 3, 1, 0, 0, 3, 1, 0, 1, 1, 2, 0, 3, 0, 0, 2, 3, 3, 2, 1, 1, 3, 1, 3, 0, 2, 1, 1, 0, 2, 0, 1, 0, 3, 1, 3, 1, 0, 1, 0, 2, 0, 1, 0, 1, 0, 3, 0, 1, 1, 1, 3, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 2, 2, 2, 1, 0, 0, 3, 0, 0, 0, 2, 0, 1, 2, 2, 3, 0, 0, 2, 0, 1, 1, 1, 0, 2, 1, 3, 1, 0, 2, 1, 3, 1, 1, 3, 3, 0, 0, 1, 3, 2, 1, 3, 3, 0, 2, 0, 0, 1, 3, 3, 1, 2, 1, 0, 3, 0, 3, 3, 1, 3, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 3, 1, 3, 3, 3, 0, 1, 1, 1, 3, 3, 0, 1, 3, 1, 0, 2, 2, 0, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 1, 3, 3, 1, 0, 3, 2, 2, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 3, 0, 2, 0, 2, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 2, 0, 3, 0, 2, 2, 3, 1, 3, 0, 2, 2, 2, 0, 2, 0, 0, 1, 3, 1, 1, 0, 3, 1, 2, 0, 3, 1, 0, 2, 3, 0, 0, 3, 2, 2, 0, 2, 3, 1, 1, 1, 3, 3, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 3, 1, 2, 3, 1, 1, 0, 0, 1, 2, 2, 0, 2, 0, 0, 0, 3, 1, 3, 1, 3, 2, 3, 3, 2, 2, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 2, 1, 1, 1, 0, 0, 2, 1, 3, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 3, 1, 3, 1, 0, 1, 3, 0, 0, 3, 1, 2, 2, 1, 1, 3, 0, 0, 3, 1, 2, 0, 1, 0, 2, 0, 1, 2, 1, 1, 3, 0, 1, 3, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 3, 0, 2, 3, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 3, 0, 1, 1, 0, 3, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 2, 0, 1, 0, 0, 2, 0, 1, 2, 1, 0, 2, 0, 1, 1, 2, 3, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 3, 1, 0, 3, 2, 0, 0, 2, 1, 2, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 3, 3, 0, 0, 1, 2, 1, 0, 0, 0, 0, 3, 1, 1, 3, 0, 0, 1, 3, 0, 3, 1, 2, 2, 1, 0, 1, 3, 2, 0, 0, 0, 2, 3, 2, 2, 3, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 3, 1, 0, 0, 0, 0, 2, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 3, 3, 1, 2, 0, 3, 0, 0, 1, 3, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 3, 1, 1, 1, 3, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 3, 0, 0, 2, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 0, 1, 1, 2, 2, 0, 1, 0, 1, 2, 0, 3, 2, 1, 0, 3, 0, 1, 1, 3, 1, 0, 3, 2, 1, 3, 3, 0, 1, 1, 2, 0, 3, 2, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 3, 1, 3, 3, 0, 1, 1, 0, 1, 3, 3, 2, 3, 0, 2, 1, 1, 3, 0, 0, 1, 0, 3, 3, 1, 0, 3, 3, 1, 1, 0, 2, 3, 0, 0, 1, 1, 0, 3, 0, 0, 1, 1, 3, 3, 1, 3, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 3, 3, 2, 2, 2, 1, 3, 0, 0, 3, 3, 3, 0, 1, 0, 3, 3, 1, 1, 0, 3, 3, 1, 1, 0, 3, 0, 2, 0, 0, 1, 1, 3, 0, 1, 0, 1, 3, 2, 0, 0, 1, 0, 2, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 2, 0, 1, 1, 3, 0, 1, 0, 1, 3, 0, 1, 0, 1, 3, 2, 0, 0, 3, 0, 1, 1, 2, 1, 3, 1, 3, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 2, 0, 1, 1, 3, 0, 1, 0, 1, 3, 2, 0, 0, 3, 0, 1, 1, 2, 1, 3, 1, 3, 1, 0, 0, 1, 1, 2, 1, 3, 1, 3, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 2, 3, 2, 0, 2, 3, 3, 3, 0, 0, 2, 1, 1, 3, 0, 1, 1, 1, 2, 0, 0, 1, 2, 1, 0, 3, 1, 1, 0, 0, 3, 1, 2, 2, 3, 2, 1, 2, 0, 0, 3, 2, 1, 0, 2, 0, 0, 1, 2, 2, 0, 1, 0, 0, 3, 2, 3, 1, 1, 1, 0, 2, 1, 1, 3, 0, 3, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 3, 0, 0, 1, 0, 3, 2, 1, 0, 2, 0, 0, 3, 0, 2, 0, 1, 1, 2, 1, 1, 3, 0, 3, 1, 0, 2, 0, 0, 1, 2, 1, 2, 0, 0, 1, 2, 3, 2, 3, 3, 1, 0, 2, 0, 3, 1, 1, 0, 0, 3, 1, 3, 3, 3, 1, 1, 0, 0, 3, 3, 3, 1, 1, 3, 3, 3, 1, 3, 0, 0, 3, 1, 2, ]</p>
---

Fuente: Elaboración propia

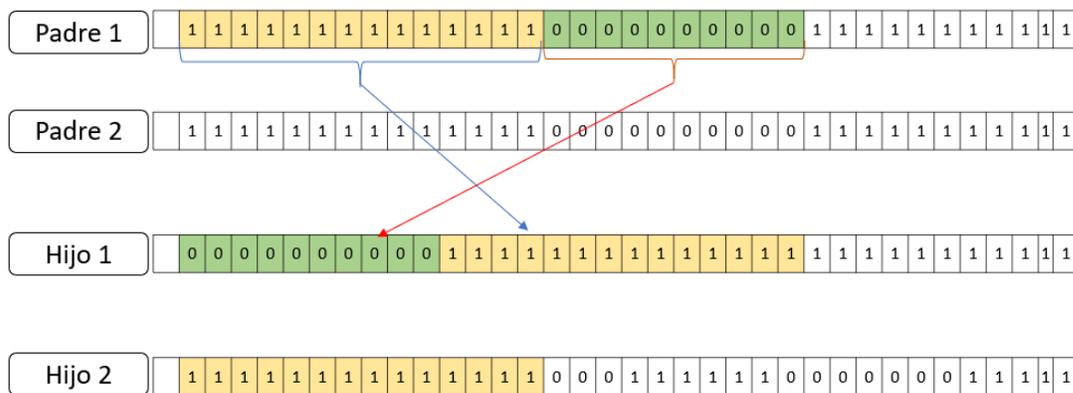
### 3.3.1.2 Operador de selección

El operador de selección de los individuos a combinar en la operación de cruce para generar poblaciones nuevas se realiza mediante la técnica de torneo que consiste en hacer la selección de dos individuos aleatoriamente, los cuales son comparados y seleccionados de acuerdo con el fitness y la no dominancia de los individuos (Gestal, Rivero, Rabuñal, Dorado, & Pazos, 2010). Si se comparan elementos dominantes, el criterio de selección es la dispersión. El tamaño del torneo corresponde al 5% de los individuos de la población. De esta manera se seleccionan los individuos para las operaciones de cruce. En caso de que la aptitud sea igual para las soluciones, es decir, que ambos sean dominantes y con igual dispersión, se selecciona una al azar.

### 3.3.1.3 Operador de cruce

El cruce entre individuos se realiza utilizando cruce de dos puntos. Para esto aleatoriamente se determinan dos puntos en los que se intercambia la información genética de los padres a los hijos, tal como se presenta en la Figura 7. Se presenta un ejemplo para un individuo con 35 posiciones, donde se observan los puntos de cruce 14 y 24, información que es intercambiada con los hijos.

Figura 7 Representación de operador cruce



Fuente: Elaboración propia

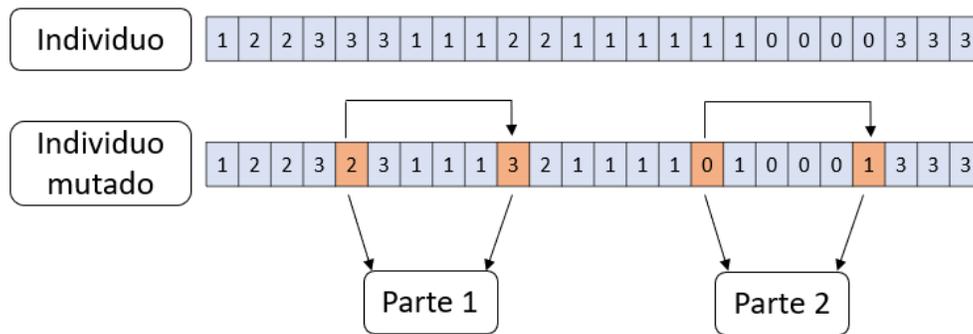
Una vez realizado el cruce de los individuos, un procedimiento se encargará de organizar la asignación de la mercancía, de tal forma que la asignación en el centro de distribución se realice adecuadamente para asegurar la viabilidad del individuo, conservando la cantidad de mercancía a almacenar, tal y como ocurre en el hijo número 2 de la Figura 7.

### 3.3.1.4 Operador de Mutación

La mutación se realiza seleccionando un individuo aleatoriamente con base en la probabilidad de mutación establecida en el algoritmo. Para este individuo se seleccionan dos posiciones del cromosoma (genes) aleatoriamente y estos son intercambiados; si los valores de los genes son iguales se realiza una nueva

búsqueda aleatoria hasta encontrar dos diferentes. La mutación se realiza en dos partes tal y como se observa en la Figura 9. En la primera se realiza el intercambio de posiciones de dos genes que tengan asignados diferentes tipos de producto. En la parte 2, el intercambio de información genética se realiza seleccionando uno de los puntos (genes) que corresponda a un espacio no ocupado. Al realizar la mutación en estas dos partes y al asegurar que uno y sólo un gen corresponde a una posición vacía, se aumenta la capacidad de búsqueda de nuevas soluciones por parte del algoritmo.

Figura 8 Representación de la mutación



Fuente: Elaboración propia

### 3.3.1.5 Evaluación de la aptitud - Fitness

El fitness para cada una de las funciones objetivo se obtiene mediante la evaluación directa de los costos operacionales, tiempo requerido para la manipulación de los productos y espacio de almacenamiento para la asignación de mercancía, basado en las funciones objetivo presentadas en la sección 3.2. Esta evaluación del fitness se calcula simultáneamente para cada individuo y se compara con el resto de los individuos de la población para seleccionar aquellas soluciones óptimas, correspondientes a los individuos dominantes que conforman la frontera Pareto. Los mejores individuos de cada generación son guardados e incluidos en

evoluciones futuras, lo cual asegura la conservación del elitismo durante todo el proceso evolutivo.

Con el desarrollo de este capítulo se da cumplimiento al cuarto objetivo específico de esta tesis de maestría, dado que se propone un modelo multiobjetivo donde busca disminuir los costos de operación y almacenamiento, minimizar tiempo de operación (asignación) y la optimización de la distancia recorrida para el almacenamiento de mercancías, cuya validación se presenta en el siguiente capítulo.

## **4. Aplicación del modelo de asignación de mercancías en un centro de distribución usando un modelo multiobjetivo**

Para la validación y aplicación del modelo multiobjetivo presentado en el capítulo anterior, se tomó como caso de estudio un centro de distribución en una empresa en la cual la demanda de los productos que almacena es aleatoria. Con las características de esta empresa se evalúan las funciones objetivo del modelo que son: optimizar el área ocupada en el centro de distribución, minimizar los costos operacionales y el tiempo de asignación.

### **4.1 Centro de distribución**

Para analizar el modelo propuesto, se utiliza la información suministrada por una empresa comercializadora de alimentos, en donde los principales productos demandados son de tres tipos: galletas en tacos; seguido de refrescos en botella de vidrio y productos enlatados. Estos tres tipos de productos representativos serán analizados en el proceso de validación y prueba del modelo.

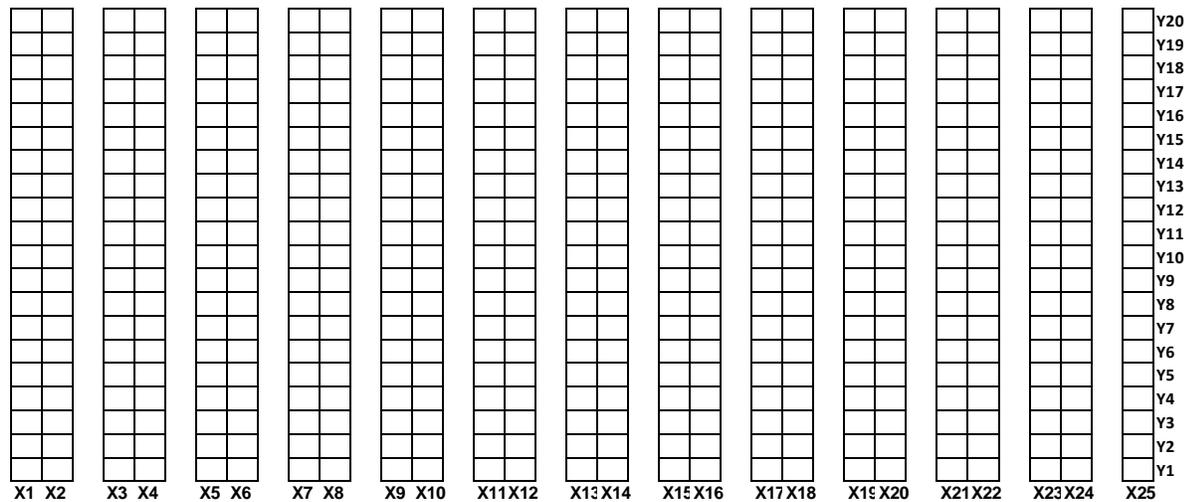
El centro de distribución cuenta con dos muelles de carga y descarga, donde los contenedores que llegan con los alimentos se descargan; posteriormente a través de plataformas rodantes son llevados al área de facturación donde se etiqueta cada producto para posteriormente ser almacenados. A partir de allí la mercancía es transportada a su lugar de almacenamiento por personal manipulando montacargas del tipo retráctil. El principal problema de la empresa es que almacenan los productos según los espacios que visualmente se encuentran disponibles; por lo cual la distancia que se recorre para encontrar una ubicación

para la mercancía entrante es elevada; lo que aumenta directamente el tiempo requerido para almacenar y los costos operativos.

El centro de distribución tiene 2500 espacios (posiciones) de almacenamiento. Cada uno de los espacios de almacenamiento cuenta con capacidad de soportar hasta 1 tonelada de peso. El centro de distribución está conformado por 12 estanterías dobles y una sencilla al final del almacén, cada una de las estanterías cuenta con 20 líneas de almacenamiento denominadas Y y 5 niveles de altura que se denominarán Z; así las dimensiones del centro de distribución son:  $X=25$ ;  $Y=20$  y  $Z=5$ . Las especificaciones de la zona del almacenamiento del centro de distribución analizado se presentan en las Figura 10 y

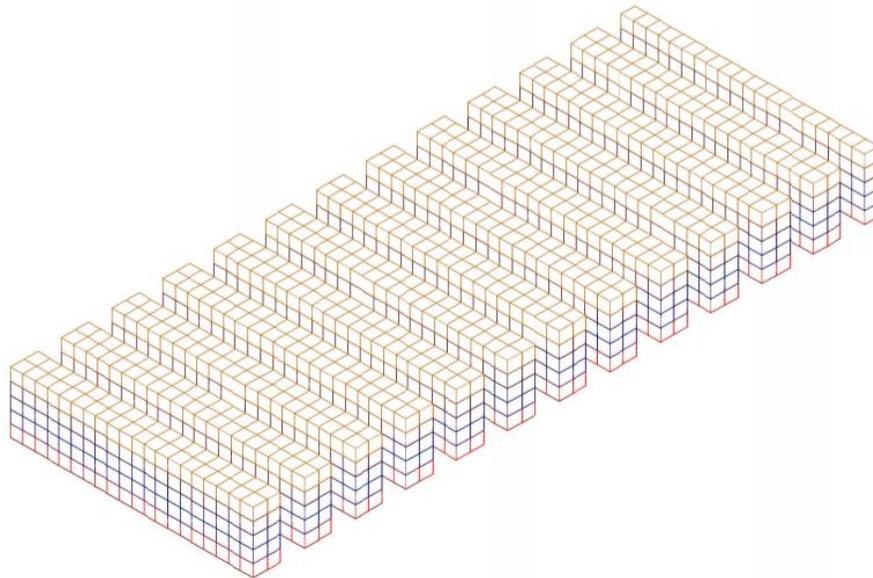
Figura 9.

Figura 9 Centro de distribución propuesto



Fuente: Elaboración propia

Figura 10 Centro de distribución propuesto en 3D



Fuente: elaboración propia

Con el objetivo de validar el modelo propuesto en el centro de distribución de la empresa comercializadora de alimentos, se propone una prueba de validación del modelo que permita validar la respuesta del modelo en términos de tiempo requerido para la manipulación del producto, costo operacional y espacio ocupado con tres tipologías de productos seleccionados.

#### 4.1.1 Prueba de validación del modelo

Con el ánimo de conocer el resultado del modelo con diferentes niveles de demanda para los tres productos analizados, se realizaron 8 ensayos que permitieron relacionar el espacio ocupado, el costo y el tiempo requerido para la manipulación del producto; la prueba de validación del modelo de los 8 ensayos se presenta en la Tabla 9 y se realiza de la siguiente manera:

Para la prueba de validación del modelo se define, que el centro de distribución almacenará 3 tipologías de productos con diferentes características, los cuales no puedan ser almacenados en la misma ubicación. posteriormente se procede a determinar la capacidad de ocupación del centro de distribución, en este caso se

determinó una ocupación del 100% 90%, 80%, 70% y 60%. Para cada uno de los ensayos propuestos se realizaron 3 corridas del algoritmo genético con el fin de observar los resultados teniendo en cuenta: (a) espacio para el almacenamiento (b) costos operacionales y (c) tiempo requerido para la manipulación de los productos.

Tabla 9 Prueba de validación del modelo

Ensayo	Porcentaje de ocupación almacén	%producto 1	%producto 2	%producto 3
0	100%	33,3%	33,3%	33,3%
		<b>832500</b>	<b>832500</b>	<b>832500</b>
0	100%	50%	20%	30%
		<b>1250000</b>	<b>500000</b>	<b>750000</b>
1	90%	33,3%	33,3%	33,3%
		<b>749250</b>	<b>749250</b>	<b>749250</b>
2	90%	50%	20%	30%
		<b>1125000</b>	<b>450000</b>	<b>675000</b>
3	80%	33,3%	33,3%	33,3%
		<b>666000</b>	<b>666000</b>	<b>666000</b>
4	80%	50%	20%	30%
		<b>1000000</b>	<b>400000</b>	<b>600000</b>
5	70%	33,3%	33,3%	33,3%
		<b>582750</b>	<b>582750</b>	<b>582750</b>
6	70%	50%	20%	30%
		<b>875000</b>	<b>350000</b>	<b>525000</b>
7	60%	33,3%	33,3%	33,3%
		<b>499500</b>	<b>499500</b>	<b>499500</b>
8	60%	50%	20%	30%
		<b>750000</b>	<b>300000</b>	<b>450000</b>

Fuente: elaboración propia

Para la solución del modelo de optimización multiobjetivo de asignación de mercancía en centros de distribución, desarrollado en la presente tesis se utilizó el algoritmo genético multiobjetivo NSGAI (NonDominated sorting Genetic Algorithm II) presentado en el capítulo 3. El uso del algoritmo genético permitió resolver el modelo propuesto y optimizar las tres funciones objetivo asociadas al espacio para el almacenamiento, tiempo requerido para la manipulación y costo operacional. Es necesario considerar también la información ingresada al modelo sobre las características de los productos, el centro de distribución y condiciones iniciales del algoritmo genético, las cuales se indican a continuación:

Número de productos a Almacenar: 3 tipologías de productos

Cantidad Producto 1: Galletas en caja, expresado en Kilogramos

Cantidad Producto 2: Refrescos en botella de vidrio, expresado Kilogramos

Cantidad Producto 3: Productos enlatados, expresado en Kilogramos

capacidad de la Bodega: 2500 espacios (posiciones) de almacenamiento

capacidad de cada espacio: 1000 Kilogramos

Número de evoluciones del algoritmo: 100 generaciones

Tamaño de la población: 100 Individuos

El algoritmo genético tiene dos parámetros que se deben fijar para cada ejecución, para esta tesis se tiene los siguientes: primero (evaluación) el tamaño de la población es de 100 individuos para garantizar la diversidad de las soluciones y segundo (condición de terminación) el número de iteraciones a ejecutar, en nuestro algoritmo es de 100 generaciones teniendo en cuenta que con más iteraciones no se evidencian mejoras significativas en el conjunto de individuos solución obtenidos, Según la experiencia de corrida del algoritmo, el criterio más utilizado es el del número de evoluciones, ya que las variaciones en el número de individuos y los valores de los mismos no son relevantes y por el contrario aumentan considerablemente el tiempo de procesamiento. Es importante mencionar que para efectos de generar una semilla solución se establece un individuo no aleatorio con el objetivo de establecer el menor espacio ocupado, como una de las posibles

soluciones del algoritmo y con ello ayudar a la convergencia de este para cada uno de los ensayos de la prueba de validación del modelo se realizaron 3 corridas, evidenciando resultados estables para el modelo en la optimización simultánea de las tres funciones objetivo.

Para la aplicación del modelo de asignación de mercancías en el centro de distribución, se corrió el algoritmo genético bajo el lenguaje JAVA utilizando el entorno de programación NetBeans®. Para efectos de presentación en este documento se analiza detalladamente los resultados obtenidos en el ensayo 6, donde se tiene un nivel de ocupación del centro de distribución del 70%, que corresponde al índice de ocupación actual que tiene la empresa de alimentos. En el anexo 6.2 se presentan los resultados del resto de los ensayos de la prueba de validación del modelo, los cuales no se presentan aquí por motivos de síntesis, ya que las tablas y el tamaño de los individuos solución son de gran tamaño.

## **4.2 Validación del modelo multiobjetivo de asignación de mercancía en un centro de distribución.**

Todas las corridas se realizaron en un computador con procesador Core i7 de séptima generación, con 2.9 GHz y con capacidad RAM de 16GB, el modelo corrió en un tiempo promedio de 28 minutos, denotando la complejidad computacional del problema y del modelo multiobjetivo propuesto.

### **4.2.1 Mejores individuos**

Después de las 3 corridas, el mejor conjunto de soluciones encontrado por el algoritmo está compuesto por 26 individuos, que corresponden a la frontera de Pareto del problema multiobjetivo analizado. En la Tabla 10 se presenta el valor de los tres objetivos optimizados de manera simultánea para cada uno de los individuos solución del problema.

Tabla 10 Resultados obtenidos del algoritmo NSGAI - Mejores individuos

<b>INDIVIDUO</b>	<b>COSTO</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>ESPACIO</b>
Individuo 0	38210.0	21394.0	420.0
Individuo 1	38241.0	21548.0	400.0
Individuo 2	38198.0	21554.0	400.0
Individuo 3	38746.0	22120.0	360.0
Individuo 4	38088.0	21449.0	420.0
Individuo 5	38771.0	22001.0	360.0
Individuo 6	38147.0	21425.0	420.0
Individuo 7	38243.0	21545.0	400.0
Individuo 8	38549.0	21713.0	380.0
Individuo 9	38009.0	21269.0	440.0
Individuo 10	38242.0	21547.0	400.0
Individuo 11	38008.0	21572.0	420.0
Individuo 12	38307.0	21714.0	380.0
Individuo 13	37922.0	21154.0	460.0
Individuo 14	38257.0	21517.0	400.0
Individuo 15	38269.0	21771.0	380.0
Individuo 16	38108.0	21428.0	420.0
Individuo 17	38160.0	21409.0	420.0
Individuo 18	38758.0	22072.0	360.0
Individuo 19	37955.0	21470.0	440.0
Individuo 20	37814.0	21192.0	460.0
Individuo 21	38241.0	21548.0	400.0
Individuo 22	37799.0	21270.0	460.0
Individuo 23	38200.0	21550.0	400.0
Individuo 24	37982.0	21349.0	440.0
Individuo 25	38175.0	21561.0	400.0
Individuo 26	38166.0	21399.0	420.0

Fuente: Elaboración propia









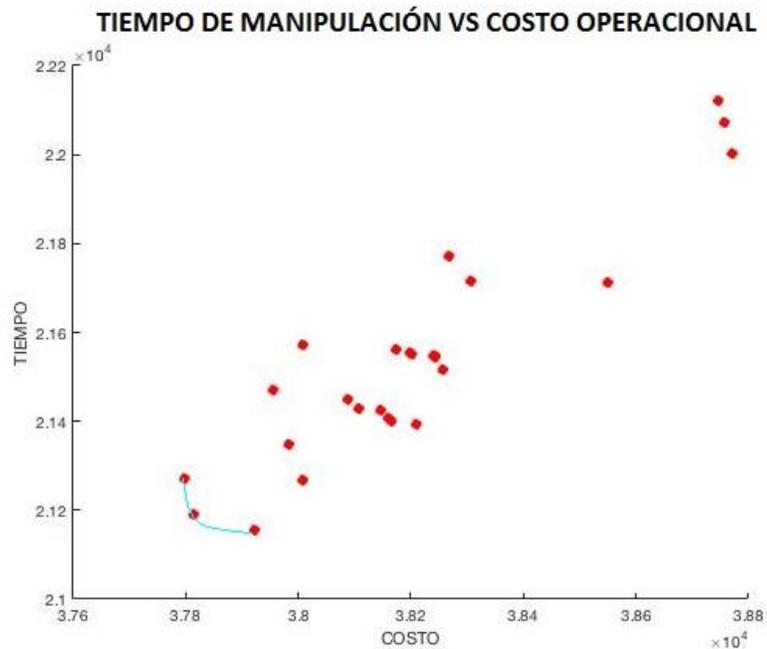




asigna el almacenamiento de los productos en niveles de la estantería más bajos para disminuir el costo operacional, pero genera recorridos más largos aumentando el tiempo requerido para la manipulación del producto y viceversa.

En esta grafica cada punto representa un individuo solución de la Tabla 10. Aquellos sobre la línea turquesa representan las combinaciones optimas simultaneas para las funciones de costo operacional y tiempo requerido para la manipulación de los productos. Aquellos puntos que no están en la línea turquesa no son óptimos en el análisis del costo operacional y tiempo requerido de manipulación del producto, pero lo son para otras combinaciones de las funciones objetivo.

Figura 11: Relación costos operacionales y tiempo requerido para la manipulación del producto



Fuente: Elaboración propia

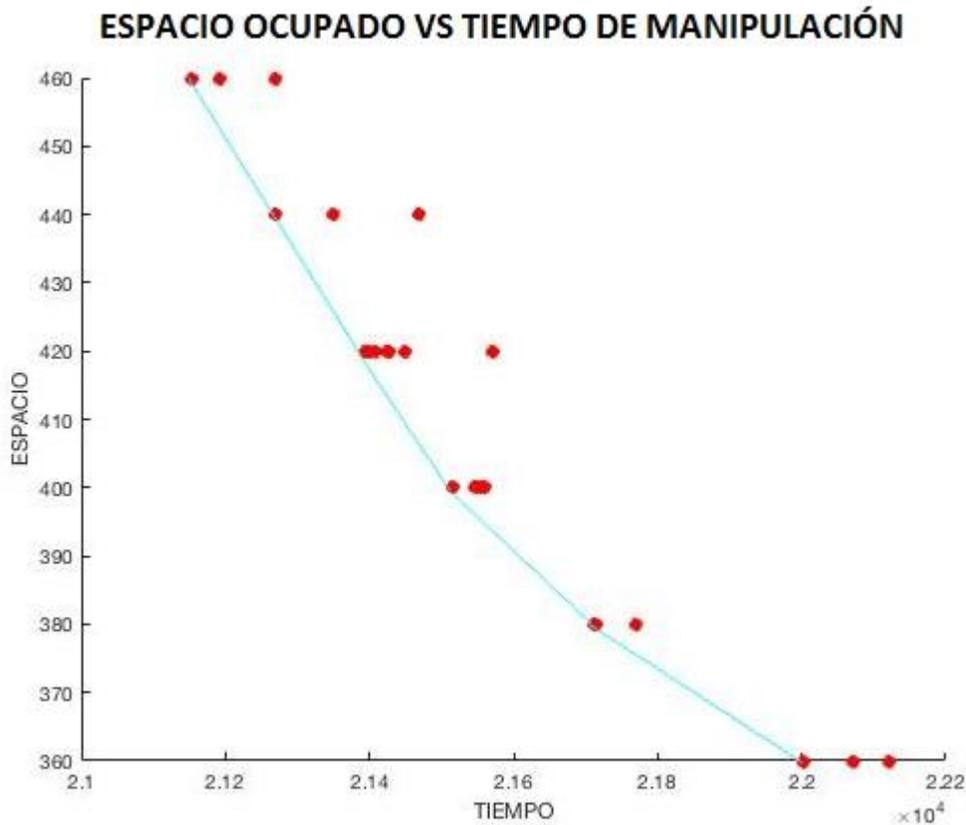
Por otra parte, en la Figura 12 se presentan gráficamente los individuos solución que conforman la frontera de Pareto evaluando las funciones objetivo de espacio



generando recorridos más largos y por tanto aumentando el tiempo requerido para la manipulación de los productos.

Nuevamente, en esta figura se observan otros puntos, que para el análisis de estas dos funciones objetivo no son dominantes en cuanto a tiempo requerido para la manipulación del producto y el espacio ocupado. Sin embargo, hacen parte del conjunto de soluciones óptimas de las tres funciones objetivo.

Figura 13 Relación entre espacio para el almacenamiento y tiempo requerido para la manipulación del producto en el centro de distribución



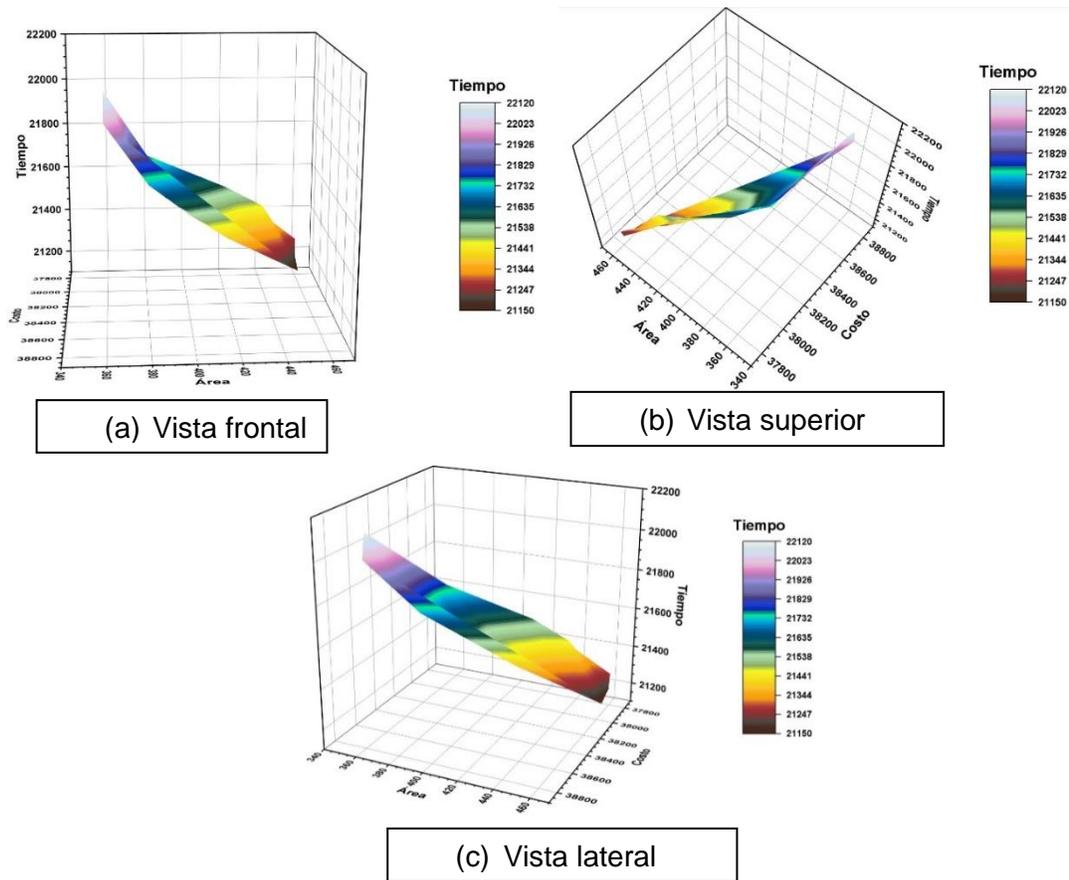
Fuente: Elaboración propia

En las figuras (12), (13) y (14), se presentan las comparaciones entre la minimización de los costos de operación con la minimización del tiempo requerido para la manipulación del producto y la optimización del espacio para el

almacenamiento, en un almacenamiento de mercancías. Se puede observar que en los resultados obtenidos por el algoritmo genético NSGAI, los individuos solución están ubicados entre los 360 m<sup>2</sup> y 460 m<sup>2</sup>, con intervalos de 20 m<sup>2</sup>. Esto se debe, a que el espacio mínimo requerida para el almacenamiento de los productos es 360 m<sup>2</sup> y va ascendiendo cada 20 m<sup>2</sup> al ir aumentando la estantería requerida para su almacenamiento.

Por su parte en la Figura 14 se observa la superficie de la frontera de Pareto que conforman los individuos solución en una gráfica 3D, en la cual se dibujan las tres funciones objetivo.

Figura 14 Superficie de la frontera de Pareto con los mejores individuos solución



Fuente: elaboración propia

En esta grafica se observa que la frontera Pareto de las tres funciones objetivo se conforma según lo esperado, generando una superficie cóncava propia de la minimización de tres funciones objetivo.

El resto de los resultados para los 8 ensayos de la prueba de validación del modelo se resumen en el anexo 6.2; para cada uno la respuesta del algoritmo es similar y se encontró un conjunto de individuos solución que minimizan las tres funciones objetivo, lo que permite validar el funcionamiento del algoritmo y del modelo propuesto.

### 4.3 Asignación de mercancía en el centro de distribución de una empresa de alimentos.

El modelo propuesto para la asignación de mercancía se validó en la sección anterior mediante el análisis de la prueba de validación. En esta sección se presenta el resultado de la asignación de mercancía de los productos en el centro de distribución, para un periodo determinado en la empresa comercializadora de alimentos, según la información entregada por la empresa, la cual se presenta en la Tabla 14.

Tabla 14: Información para asignación de mercancía en el centro de distribución.

Ensayo	Ocupación almacén	%producto 1	%producto 2	%producto 3
1	61%	890000	450000	190000

Fuente: Elaboración propia

Para la aplicación del modelo de asignación de mercancía en el centro de distribución de la empresa de alimentos, con una ocupación del 61%, se realizaron tres corridas del algoritmo genético del ensayo propuesto. En consecuencia, los resultados se presentarán conservando la misma estructura realizada en la sección 4.2.1.

#### 4.3.1 Mejores individuos

Después de realizar las tres corridas, el mejor conjunto de soluciones encontrado por el algoritmo está compuesto por 31 individuos, que corresponden a la frontera de Pareto del problema multiobjetivo analizado. En la Tabla 15 se presenta el valor de los tres objetivos optimizados de manera simultánea para cada uno de los individuos solución del problema.

Tabla 15 Resumen de resultados de todas las corridas en el centro de distribución de una empresa de alimentos

<b>INDIVIDUO</b>	<b>COSTO</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>ÁREA</b>
Individuo 1	45387,0	25234,0	340,0
Individuo 2	45215,0	25304,0	340,0
Individuo 3	44323,0	24897,0	460,0
Individuo 4	45375,0	25240,0	340,0
Individuo 5	44350,0	24887,0	500,0
Individuo 6	44464,0	24701,0	460,0
Individuo 7	45967,0	25657,0	320,0
Individuo 8	44761,0	24630,0	420,0
Individuo 9	46165,0	25583,0	320,0
Individuo 10	44841,0	24951,0	380,0
Individuo 11	44573,0	24500,0	500,0
Individuo 12	44339,0	24891,0	460,0
Individuo 13	44836,0	24637,0	400,0
Individuo 14	44704,0	24841,0	400,0
Individuo 15	44554,0	24597,0	460,0
Individuo 16	44764,0	24592,0	420,0
Individuo 17	45056,0	24918,0	360,0
Individuo 18	44689,0	24660,0	440,0
Individuo 19	44977,0	24995,0	360,0
Individuo 20	44362,0	24817,0	420,0
Individuo 21	45371,0	25277,0	340,0
Individuo 22	44803,0	24659,0	400,0
Individuo 23	45153,0	25341,0	340,0
Individuo 24	45704,0	25673,0	320,0
Individuo 25	45697,0	25803,0	320,0
Individuo 26	45227,0	25298,0	340,0
Individuo 27	45971,0	25627,0	320,0
Individuo 28	44546,0	24971,0	380,0
Individuo 29	45957,0	25663,0	320,0
Individuo 30	44617,0	24672,0	420,0
Individuo 31	44843,0	25007,0	360,0

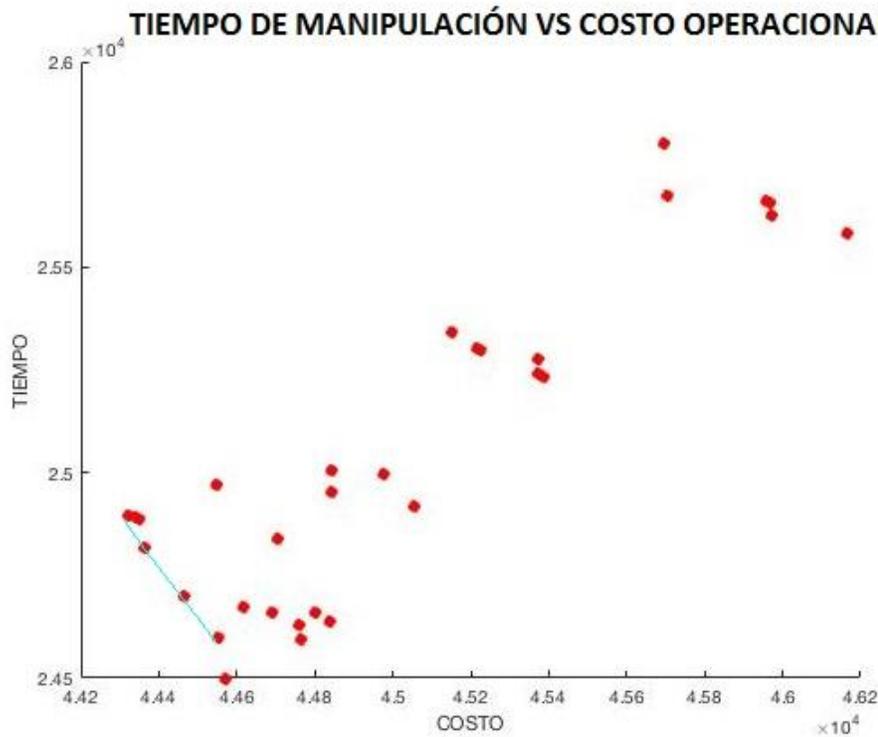
Fuente: elaboración propia

Cada una de estas soluciones también hace parte del conjunto de individuos No dominados y puede ser utilizado por el tomador de decisiones para ejecutar la asignación de mercancía en el centro de distribución de la empresa de alimentos. Como se mencionó en la sección anterior, el tomador de decisiones puede tomar indistintamente cualquiera de las soluciones, de acuerdo con sus preferencias y tener la seguridad que ninguna de las soluciones es mejor o peor que otra.

En la Figura 15 se presentan gráficamente los individuos solución que conforman la frontera de Pareto evaluando las funciones objetivo de costo operacional y tiempo requerido para la manipulación del producto. En esta gráfica se puede observar que a menor costo operacional mayor será el tiempo requerido para la manipulación del producto. Esto se presenta porque el algoritmo genético asigna el almacenamiento de los productos en niveles inferiores de las estanterías generando una disminución en los costos operacionales, pero los recorridos dentro del centro de distribución son más largos, ocasionando un incremento en el tiempo de manipulación del producto y viceversa.

En esta grafica cada punto representa un individuo solución de la Tabla 15. Aquellos sobre la línea turquesa representan las combinaciones optimas simultaneas para las funciones de tiempo de manipulación del producto y costo operacional. Aquellos puntos que no están en la línea turquesa no son óptimos en el análisis del costo operacional y tiempo de manipulación del producto, pero lo son para otras combinaciones de las funciones objetivo.

Figura 15 Relación tiempo requerido para la manipulación del producto y costo operacional en el centro de distribución de una empresa de alimentos

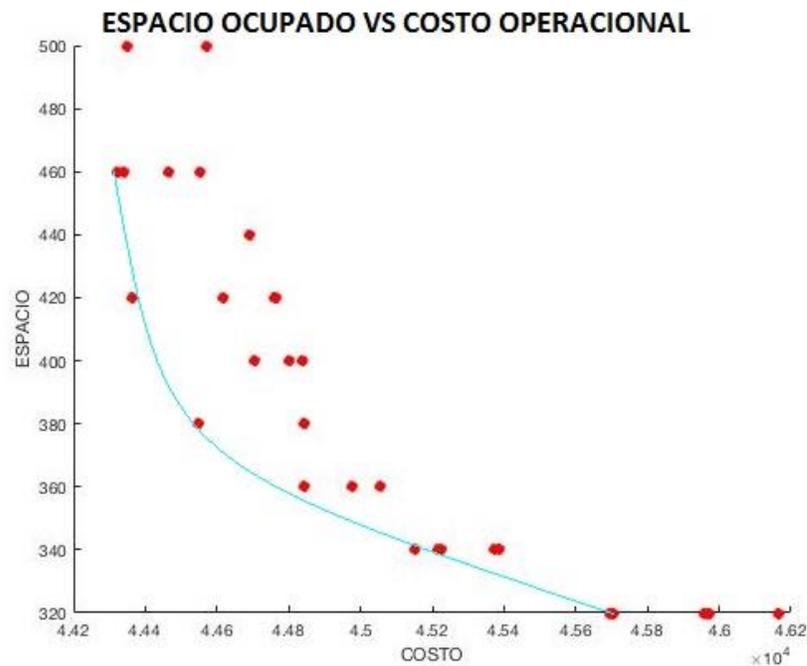


Fuente: elaboración propia

Por otra parte, en la Figura 16 se presentan los resultados obtenidos gráficamente de los individuos solución que conforman la frontera de Pareto evaluando las funciones objetivo de espacio ocupado para el almacenamiento y de costo operacional. En esta gráfica se puede observar que a mayor espacio ocupada para el almacenamiento de mercancía menor será el costo operacional y a mayor costo operacional menor será el espacio ocupado. Esto se presenta, por ejemplo, porque el algoritmo asigna los productos en niveles altos de la estantería, reduciendo el espacio requerido, pero generando un aumento en el costo operacional en la asignación de la mercancía del centro de distribución de la empresa.

Nuevamente, en esta figura se observan otros puntos rojos, que para el análisis de estas dos funciones objetivo no son dominantes en cuanto al espacio ocupado y costo operacional. Sin embargo, hacen parte del conjunto de soluciones óptimas de las tres funciones objetivo propuestas.

Figura 16 Relación entre el espacio para el almacenamiento del centro de distribución y los costos operacionales en el centro de distribución de una empresa de alimentos



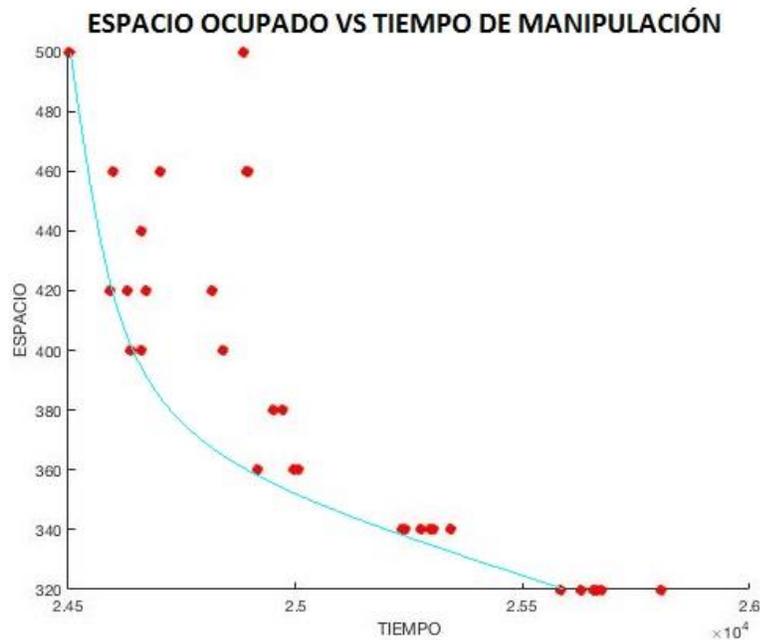
Fuente: elaboración propia

Además, en la Figura 17 se presentan los resultados de la función objetivo tiempo requerido para la manipulación del producto y espacio ocupado. En esta figura se observa la frontera de Pareto nuevamente identificada con una línea turquesa. De esta gráfica se observa que, a mayor espacio ocupado para la asignación de mercancía, menor es el tiempo de manipulación de los productos. Esto se da toda vez que los productos son asignados en los niveles inferiores de la estantería

recorriendo todo el eje X del centro de distribución de la empresa de alimentos, lo que disminuye los tiempos de manipulación, pero aumenta el espacio ocupado.

De nuevo, en esta figura se observan otros puntos rojos, que para el análisis de estas dos funciones objetivo no son dominantes en cuanto al espacio ocupado y tiempo de manipulación. Sin embargo, hacen parte del conjunto de soluciones óptimas de las tres funciones objetivo propuestas.

Figura 17 Relación entre tiempo requerido para la manipulación del producto y espacio para almacenar del centro de distribución en el centro de distribución de una empresa de alimentos



Fuente: elaboración propia

Finalmente, se puede concluir que el algoritmo genético del modelo propuesto en esta tesis de maestría presenta un conjunto de individuos que conforman un conjunto de posibles soluciones para la asignación de mercancías en el centro de distribución de la empresa de alimentos. Por consiguiente, como se mencionó anteriormente, el tomador de decisión puede seleccionar cualquier individuo (que

corresponde a un plan de asignación) de acuerdo con sus preferencias y teniendo la seguridad que dicha solución no es mejor ni peor que cualquier otra.



## **5. Conclusiones y recomendaciones**

### **5.1 Conclusiones**

A partir del trabajo desarrollado en esta tesis de maestría, es posible concluir que se da cumplimiento al objetivo general de la tesis, ya que se propuso un modelo multiobjetivo para la optimización de la asignación de mercancías en un centro de distribución que contempla tres objetivos de minimización: Costos operacionales, tiempo requerido para la manipulación del producto y espacio de almacenamiento; contemplando no solo la aleatoriedad de la demanda, sino también restricciones de capacidad y características de los. Para lograr la optimización, se incorpora además un algoritmo NSGAI (NonDominated Sorting Genetic Algorithm - II) que permite generar una frontera de Pareto con posibles soluciones; brindando así un conjunto de soluciones óptimas para la toma de decisiones asociadas a la asignación de mercancía en centros de distribución.

Los modelos encontrados en la literatura científica que buscan optimizar la asignación de mercancía en almacenes consideran como principales funciones objetivo la minimización de costos operacionales, el tiempo requerido para la manipulación del producto y el espacio de almacenamiento, pero esos son optimizados de manera independiente. Después de revisar los modelos multiobjetivo que se han propuesto para la asignación de mercancía bajo condiciones de aleatoriedad encontrados en la revisión de literatura, es posible concluir que la integración de las tres variables para la toma de decisiones relacionada a la asignación de mercancía en almacenes y centros de distribución no ha sido contemplada en trabajos anteriores; más aún, es muy relevante el trabajo realizado en esta tesis, ya que el modelo y el algoritmo de optimización

permiten comparar el desempeño de las tres funciones objetivo propuestas, siendo este un aporte inédito.

El modelo propuesto, permite incorporar información asociada a los productos como su tipología, demanda y peso; al igual que información relacionada con el centro de distribución y sus condiciones logísticas, como las capacidades de los estantes y el tipo de distribución o layout del centro. Esta información de ingreso se analiza a la luz de las tres funciones objetivo que buscan la minimización del espacio requerido para el almacenamiento, el tiempo empleado para la manipulación del producto y el costo operacional de la asignación resultante. Estas funciones son a su vez optimizadas mediante un algoritmo de optimización NSGAI1 que más allá de encontrar un óptimo local, sino un conjunto de soluciones que combinan de forma óptima las tres funciones objetivo del modelo. Dadas estas características; las posibilidades que se ofertan al tomador de decisiones son variadas y pueden responder a diferentes necesidades según la realidad operativa de las empresas.

Finalmente, se realizó la validación del modelo haciendo uso del código de programación JAVA, mediante un análisis de experimentos que permitió evaluar el modelo y el algoritmo en diferentes niveles de demanda para los productos que requieren ser almacenados en la empresa. Esto permite concluir que el modelo responde a la operatividad en centros de distribución y obtener resultados útiles para la toma de decisiones

El algoritmo de solución para el modelo multiobjetivo propuesto es complejo debido a la dificultad computacional que se requiere para optimizar de manera simultánea las tres funciones objetivo. Esta complejidad generó que el algoritmo tardara un tiempo considerable para encontrar el mejor conjunto de soluciones Pareto, ya que con un computador con procesador Core i7 de séptima generación, con 2.9 GHz y con capacidad RAM de 16GB, el modelo corrió en un tiempo promedio de 28 minutos para cada corrida.

## **5.2 Recomendaciones**

Si bien el modelo propuesto permite identificar los costos asociados a una asignación de mercancía en centros de distribución; se sugiere como trabajo futuro la desagregación de estos costos en diferentes factores como son: el personal, equipos para manejo de materiales y uso de instalación; permitiendo una ampliación de los resultados para tomar decisiones más detalladas con respecto a los recursos operacionales que apoyan las actividades de los centros de distribución..

En cuanto a la heterogeneidad de los productos; aunque el modelo contempla tres tipologías de productos; sería propicio proponer modelos que contemplen características adicionales como el volumen y la forma de los productos a ser almacenados. En correspondencia con la recomendación anterior; dada la multiplicidad de productos que ingresan a los centros de distribución; se visualiza una oportunidad investigativa en el desarrollo de modelos que permitan contemplar estanterías no estáticas y distribuciones de centros de distribución dinámicos para la asignación de mercancías.

Finalmente, se recomienda analizar la posibilidad de no solo integrar tecnologías para la gestión de almacenes y centros de distribución basado en información en tiempo real; sino que contemplen la posibilidad de incluir la colaboración entre centros de distribución para optimizar costos, tiempos y recursos logísticos.



## 6.Anexo

### 6.1 Código de modelo de asignación de mercancías

```
package NSGAll;

public class MAIN {

    private static final double MUTATION_PROBABILITY = 0.2;
    public static final double CROSSOVER_PROBABILITY = 1;
    private static final int POPULATION_SIZE = 100; // DIVISIBLE POR 4
    private static final int NUMBER_OF_GENERATIONS = 100;
    public static int[][] distancias;

    public static int capacidad_bodega =2500;
    public static int capacidad_espacio =1000

    Parametros internos del algoritmo

    static Evaluacion fitnessFunction1 = new Evaluacion(Evaluacion.Objective.OBJECTIVE_1);
    static Evaluacion fitnessFunction2 = new Evaluacion(Evaluacion.Objective.OBJECTIVE_2);
    static Evaluacion fitnessFunction3 = new Evaluacion(Evaluacion.Objective.OBJECTIVE_3);

    static Evaluacion[] fitnessFunctions = new Evaluacion[3];
    private static Individual ruta;

    private NSGAll nsgall;
    static LinkedList<Individual> mejores;

    public static void main (String[] args) throws Exception {
        distancias= MOIRP.DistanciasXY.calcular_distacias();
        System.out.println("PARAMETROS \n");
        System.out.println(" Número de productos a Almacenar : "+necesidad_almacenamient.length );
        for (int i = 0; i < necesidad_almacenamient.length; i++) {
            System.out.println("Cantidad Producto "+(i+1)+" es: "+necesidad_almacenamient[i]
+"Kilogramos");
        }

        fitnessFunctions[0] = fitnessFunction1;
        fitnessFunctions[1] = fitnessFunction2;
        fitnessFunctions[2] = fitnessFunction3;

    NSGAllConfiguration conf = new
    NSGAllConfiguration(fitnessFunctions,MUTATION_PROBABILITY,CROSSOVER_PROBABILITY,
    POPULATION_SIZE, NUMBER_OF_GENERATIONS);
```

```
NSGAll correr = new NSGAll(conf);

LinkedList<Individual> startPopulation = new LinkedList<Individual>();
System.out.println(startPopulation);

ruta= INDIVIDUOIRP.generatelngividuo_NO_Aleatorio(correr);
startPopulation.add(ruta);
for (int i=1; i<POPULATION_SIZE; i++){
    ruta= INDIVIDUOIRP.generatelngividuoAleatorio(correr);
    startPopulation.add(ruta);
}

System.out.println("\n Se creo la poblacion Inicial");
System.out.println("*** POBLACIÓN INICIAL ***");
for (int i=0; i<startPopulation.size(); i++){
    System.out.println("Individuo "+(i+1)+" "+startPopulation.get(i));
}
mejores = correr.evolve(startPopulation);

// GRAFICA
new graficaTest();
new graficaTest2();
new graficaTest3();
}

public static LinkedList<Individual> getMejores(){
    return mejores;
}

public static String implIndividual (ArrayList u){
    String imp ="|";
    for (int i = 0; i < u.size(); i++) {
        imp += u.get(i)+"|";
    }
    return imp;
}

public static int get_tamanopoblacion(){
    return POPULATION_SIZE;
}

} // fin clase
```

## 6.2 resumen de resultados de todas las corridas

Ensayo	1			2			3			4			5			6			7			8		
	90%			90%			80%			80%			70%			70%			60%			60%		
Occupación almacén	33,3%	749250	50%	1125000	33,3%	666000	50%	1000000	33,3%	582750	50%	875000	33,3%	499500	50%	750000	33,3%	499500	50%	750000	33,3%	499500	50%	750000
%producto 2	33,3%	749250	20%	450000	33,3%	666000	20%	400000	33,3%	582750	20%	350000	33,3%	499500	20%	300000	33,3%	499500	20%	300000	33,3%	499500	20%	300000
%producto 3	33,3%	749250	30%	675000	33,3%	666000	30%	600000	33,3%	582750	30%	525000	33,3%	499500	30%	450000	33,3%	499500	30%	450000	33,3%	499500	30%	450000
	COSTO	TIEMPO	ÁREA	COSTO	TIEMPO	ÁREA	COSTO	TIEMPO	ÁREA	COSTO	TIEMPO	ÁREA	COSTO	TIEMPO	ÁREA	COSTO	TIEMPO	ÁREA	COSTO	TIEMPO	ÁREA	COSTO	TIEMPO	ÁREA
Individuo 0	36007.0	20956.0	480.0	24623.0	13738.0	460.0	32309.0	18964.0	400.0	27915.0	15644.0	400.0	37432.0	21603.0	360.0	38210.0	21394.0	420.0	40000.0	23122.0	300.0	44417.0	24912.0	340.0
Individuo 1	35861.0	20783.0	500.0	23722.0	13131.0	500.0	31606.0	18277.0	500.0	27207.0	14793.0	480.0	37031.0	21216.0	380.0	38241.0	21548.0	400.0	39252.0	22266.0	380.0	44582.0	25137.0	320.0
Individuo 2	36196.0	21189.0	460.0	24197.0	13527.0	480.0	31681.0	18093.0	500.0	27461.0	15205.0	440.0	36659.0	20798.0	420.0	38198.0	21554.0	400.0	39224.0	22093.0	400.0	45085.0	25398.0	300.0
Individuo 3	n/a	n/a	n/a	24542.0	13796.0	460.0	31680.0	18098.0	500.0	27208.0	14937.0	460.0	36653.0	20194.0	500.0	38746.0	22120.0	360.0	39365.0	22227.0	360.0	43679.0	24321.0	480.0
Individuo 4	n/a	n/a	n/a	24625.0	13641.0	460.0	32309.0	18964.0	400.0	27339.0	14846.0	460.0	37019.0	21277.0	380.0	38088.0	21449.0	420.0	39014.0	21783.0	420.0	43654.0	24583.0	480.0
Individuo 5	n/a	n/a	n/a	24199.0	13374.0	480.0	32113.0	18692.0	420.0	27340.0	15232.0	440.0	36239.0	20221.0	500.0	38771.0	22001.0	360.0	39533.0	22464.0	340.0	44629.0	25030.0	320.0
Individuo 6	n/a	n/a	n/a	23730.0	13105.0	500.0	31961.0	18482.0	440.0	27104.0	14876.0	480.0	36866.0	21040.0	400.0	38147.0	21425.0	420.0	40027.0	23115.0	300.0	44584.0	24977.0	320.0
Individuo 7	n/a	n/a	n/a	24708.0	13622.0	460.0	31797.0	18316.0	460.0	27104.0	14870.0	480.0	36882.0	21022.0	400.0	38243.0	21545.0	400.0	39372.0	22201.0	360.0	44684.0	24977.0	320.0
Individuo 8	n/a	n/a	n/a	23775.0	13075.0	500.0	31961.0	18482.0	440.0	27098.0	14732.0	500.0	36653.0	20873.0	420.0	38549.0	21713.0	360.0	39355.0	22457.0	340.0	44202.0	24501.0	480.0
Individuo 9	n/a	n/a	n/a	24627.0	13639.0	460.0	31858.0	18283.0	460.0	27436.0	14839.0	460.0	37408.0	21640.0	360.0	38009.0	21269.0	440.0	39323.0	22442.0	360.0	44413.0	24917.0	340.0
Individuo 10	n/a	n/a	n/a	23737.0	13077.0	500.0	31781.0	18192.0	480.0	27513.0	15345.0	420.0	36877.0	21023.0	400.0	38242.0	21547.0	400.0	39556.0	22454.0	340.0	43818.0	24152.0	480.0
Individuo 11	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	31715.0	18214.0	480.0	27207.0	14793.0	480.0	36542.0	21040.0	440.0	38008.0	21572.0	420.0	39491.0	22480.0	340.0	44584.0	24809.0	340.0
Individuo 12	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	31652.0	18218.0	500.0	27202.0	14858.0	480.0	36214.0	20441.0	500.0	38307.0	21714.0	380.0	39263.0	22257.0	380.0	44447.0	24832.0	340.0
Individuo 13	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	31606.0	18277.0	500.0	27202.0	14911.0	440.0	36331.0	20425.0	420.0	37922.0	21154.0	460.0	39255.0	22084.0	380.0	43681.0	24168.0	480.0
Individuo 14	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	31652.0	18218.0	500.0	27458.0	15221.0	440.0	37048.0	21212.0	380.0	38257.0	21517.0	400.0	39412.0	22193.0	360.0	44438.0	24891.0	340.0
Individuo 15	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	31680.0	18098.0	500.0	27924.0	15643.0	400.0	37025.0	21224.0	380.0	38269.0	21771.0	380.0	39656.0	22698.0	320.0	43817.0	24118.0	500.0
Individuo 16	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	27293.0	14730.0	500.0	36827.0	21040.0	400.0	38108.0	21428.0	420.0	39685.0	22678.0	320.0	44398.0	24968.0	340.0
Individuo 17	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	27965.0	15584.0	400.0	36220.0	20237.0	500.0	38160.0	21409.0	420.0	39697.0	22673.0	320.0	44398.0	24968.0	340.0
Individuo 18	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	27069.0	14743.0	500.0	36331.0	20425.0	480.0	38758.0	22072.0	360.0	39365.0	22227.0	360.0	44581.0	25141.0	320.0
Individuo 19	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	36341.0	20394.0	460.0	37955.0	21470.0	440.0	38981.0	21751.0	440.0	43884.0	24436.0	380.0
Individuo 20	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	36686.0	20579.0	440.0	37814.0	21192.0	460.0	39971.0	23157.0	300.0	43802.0	24271.0	420.0
Individuo 21	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	36271.0	20188.0	500.0	38241.0	21548.0	400.0	39713.0	22621.0	320.0	43947.0	24270.0	380.0
Individuo 22	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	36554.0	20618.0	440.0	37799.0	21270.0	460.0	39060.0	21780.0	420.0	44570.0	25221.0	320.0
Individuo 23	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	36596.0	20607.0	400.0	38200.0	21550.0	400.0	39250.0	22276.0	380.0	43861.0	24123.0	420.0
Individuo 24	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	36601.0	20590.0	440.0	37982.0	21349.0	440.0	39976.0	23139.0	300.0	43865.0	23951.0	420.0
Individuo 25	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	38175.0	21561.0	400.0	39303.0	22017.0	380.0	n/a	n/a	n/a
Individuo 26	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	38166.0	21399.0	420.0	39701.0	22659.0	320.0	n/a	n/a	n/a
Individuo 27	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	39257.0	22260.0	380.0	n/a	n/a	n/a
Individuo 28	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	39345.0	22320.0	360.0	n/a	n/a	n/a
Individuo 29	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Individuo 30	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Individuo 31	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Individuo 32	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Individuo 33	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Individuo 34	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Individuo 35	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Individuo 36	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Individuo 37	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Individuo 38	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Individuo 39	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Individuo 40	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Individuo 41	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Individuo 42	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Individuo 43	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Individuo 44	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Individuo 45	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Individuo 46	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Individuo 47	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Individuo 48	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Individuo 49	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0	18964.0	400.0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Individuo 50	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	32309.0</																	



## Bibliografía

- Accorsi, R., Manzini, R., & Bortolini, M. (2012). A hierarchical procedure for storage allocation and assignment within an order-picking system. A case study. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 15(6), 351-364. <https://doi.org/10.1080/13675567.2012.742877>
- Accorsi, R., Manzini, R., & Maranesi, F. (2014). A decision-support system for the design and management of warehousing systems. *Computers in Industry*, 65(1), 175-186. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.08.007>
- Agarwal, A., Shankar, R., & Tiwari, M. K. (2006). Modeling the metrics of lean, agile and leagile supply chain: An ANP-based approach. *European Journal of Operational Research*, 173(1), 211-225. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.12.005>
- Arango, M. D., & Zapata, J. A. (2017). Multiobjective Model For The Simultaneous Optimization Of Transportation Costs, Inventory Costs And Service Level In Goods Distribution. *IEEE Latin America Transactions*, 15(1), 129-136. <https://doi.org/10.1109/TLA.2017.7827916>
- Arango-Serna, M. D., Zapata-Cortes, J. A., & Serna-Uran, C. A. (2018). Collaborative Multiobjective Model for Urban Goods Distribution Optimization. En J. L. García-Alcaraz, G. Alor-Hernández, A. A. Maldonado-Macías, & C. Sánchez-Ramírez (Eds.), *New Perspectives on Applied Industrial Tools and Techniques* (pp. 47-70). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56871-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56871-3_3)

- Balfaqih, H., Nopiah, Z. Mohd., Saibani, N., & Al-Nory, M. T. (2016). Review of supply chain performance measurement systems: 1998–2015. *Computers in Industry*, 82, 135-150. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.07.002>
- Ballou, R. (2004). *Logística: Administración de la cadena de suministros* (Quinta edición). Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=ii5xqLQ5VLgC&printsec=frontcover&dq=administracion+de+la+cadena+de+suministro#v=onepage&q&f=false>
- Ballou, Ronald. (2004). *Logística: Administración de la cadena de suministro* (5.ª ed.). Prentice-Hall International.
- Bartholdi, J. J., & Hackman, S. T. (2005). *WAREHOUSE & DISTRIBUTION SCIENCE*. Recuperado de <http://www2.isye.gatech.edu/~jjb/wh/book/editions/wh-sci-0.96.pdf>
- Bortolini, M., Botti, L., Cascini, A., Gamberi, M., Mora, C., & Pilati, F. (2015). Unit-load storage assignment strategy for warehouses in seismic areas. *Computers & Industrial Engineering*, 87, 481-490. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.05.023>
- Bortolini, M., Faccio, M., Ferrari, E., Gamberi, M., & Pilati, F. (2016). Time and energy optimal unit-load assignment for automatic S/R warehouses. *International Journal of Production Economics*. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.07.024>
- Caron, F., Marchet, G., & Perego, A. (2000). Optimal layout in low-level picker-to-part systems. *International Journal of Production Research*, 38(1), 101-117. <https://doi.org/10.1080/002075400189608>
- Chan, F. T. S., & Chan, H. K. (2011). Improving the productivity of order picking of a manual-pick and multi-level rack distribution warehouse through the implementation of class-based storage. *Expert Systems with Applications*, 38(3), 2686-2700. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.08.058>

- Chen, P.-S., Huang, C.-Y., Yu, C.-C., & Hung, C.-C. (2017). The examination of key performance indicators of warehouse operation systems based on detailed case studies. *Journal of Information and Optimization Sciences*, 38(2), 367-389. <https://doi.org/10.1080/02522667.2016.1224465>
- Christofides, N., & Colloff, I. (1973). The Rearrangement of Items in a Warehouse. *Operations Research*, 21(2), 577-589. <https://doi.org/10.1287/opre.21.2.577>
- Correa F, C. A., Bolaños, R. A., & Molina C., A. (2008). *Algoritmo multiobjetivo NSGA-II aplicado al problema de la mochila. 2*. Recuperado de <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/3205/1837>
- Farahani, R. Z., Rezapour, S., & Kardar, L. (Eds.). (2011). Copyright. En *Logistics Operations and Management* (p. iv). Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123852021000244>
- Fumi, A., Scarabotti, L., & Schiraldi, M. M. (2013). Minimizing Warehouse Space with a Dedicated Storage Policy. *International Journal of Engineering Business Management*, 5, 21. <https://doi.org/10.5772/56756>
- Gagliardi, J.-P., Renaud, J., & Ruiz, A. (2010). *On storage assignment policies for unit load automated storage and retrieval systems*. Recuperado de <https://www.cirrelt.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2010-25.pdf>
- Gestal, M., Rivero, D., Rabuñal, J., Dorado, J., & Pazos, A. (2010). *Introducción a los Algoritmos Genéticos y la Programación Genética*. Recuperado de <http://www.galeon.com/dantethedestroyer/algoritmos.pdf>
- Gong, Y. (2009). *Stochastic Modelling and Analysis of Warehouse Operations*. Netherlands TRAIL Research School.
- Graves, S. C., Hausman, W. H., & Schwarz, L. B. (1977). STORAGE-RETRIEVAL INTERLEAVING IN AUTOMATIC WAREHOUSING SYSTEMS. Recuperado 27

de julio de 2016, de <http://connection.ebscohost.com/c/articles/7160505/storage-retrieval-interleaving-automatic-warehousing-systems>

Gu, J., Goetschalckx, M., & McGinnis, L. F. (2007). Research on warehouse operation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 177(1), 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.02.025>

Guerriero, F., Musmanno, R., Pisacane, O., & Rende, F. (2013). A mathematical model for the Multi-Levels Product Allocation Problem in a warehouse with compatibility constraints. *Applied Mathematical Modelling*, 37(6), 4385-4398. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.09.015>

Guerriero, F., Pisacane, O., & Rende, F. (2015). *Comparing heuristics for the product allocation problem in multi-level warehouses under compatibility constraints*.

Recuperado de

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X15001407>

Hausman, W. H., Schwarz, L. B., & Graves, S. C. (1976). Optimal Storage Assignment in Automatic Warehousing Systems. *Management Science*, 22(6), 629-638. <https://doi.org/10.1287/mnsc.22.6.629>

Hou, J.-L., Wu, Y.-J., & Yang, Y.-J. (2010). A model for storage arrangement and re-allocation for storage management operations. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23(4), 369-390. <https://doi.org/10.1080/09511921003642154>

Hu, W., Wang, Y., & Zheng, J. (2012). Research on Warehouse Allocation Problem Based on the Artificial Bee Colony Inspired Particle Swarm Optimization (ABC-PSO) Algorithm. *2012 Fifth International Symposium on Computational Intelligence and Design*, 1, 173-176. <https://doi.org/10.1109/ISCID.2012.51>

- Kappauf, J., Lauterbach, B., & Koch, M. (2012). Warehouse Logistics and Inventory Management. En *Logistic Core Operations with SAP* (pp. 99-213).  
[https://doi.org/10.1007/978-3-642-18202-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-18202-0_3)
- Kovács, A. (2011). Optimizing the storage assignment in a warehouse served by milkrun logistics. *International Journal of Production Economics*, 133(1), 312-318.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.10.028>
- Laporte, G., Ghiani, G., & Musmanno, R. (2004). *Introduction to Logistic Systems Planning & control*. Recuperado de [http://www.pcfreak.net/international\\_university\\_college\\_files/Introduction%20to%20Logistic%20Systems%20Planning%20&%20control.pdf](http://www.pcfreak.net/international_university_college_files/Introduction%20to%20Logistic%20Systems%20Planning%20&%20control.pdf)
- Liviu, I., & Emil, C. (2009). *WAREHOUSE PERFORMANCE MEASUREMENT – A CASE STUDY*. 9.
- López, J., Zapotecas, S., & Coello, C. A. (2009). An introduction to multiobjective optimization techniques. *SpringerVerlag, London*, 7-32.
- Marler, R. T., & Arora, J. S. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(6), 369-395.  
<https://doi.org/10.1007/s00158-003-0368-6>
- Meyers, F. E., & Stephens, M. P. (2006). *Diseño de instalaciones de manufactura y manejo de materiales* (Tercera). Recuperado de <https://ulisesmv1.files.wordpress.com/2015/01/disec3b1o-de-instalaciones-de-manufactura.pdf>
- Mora, L. A. (2011). *Gestión logística en centros de distribución, bodegas y almacenes— 1ra Edición*. Ecoe Ediciones.

- Muralidharan, B., Linn, R. J., & Pandit, R. (1995). Shuffling heuristics for the storage location assignment in an AS/RS. *International Journal of Production Research*, 33(6), 1661-1672. <https://doi.org/10.1080/00207549508930234>
- Orjuela, J. A., Suárez, N., & Chinchilla, Y. I. (2016). Logistic Costs and Methodologies for Supply Chain Costing: A Literature Review. *Cuadernos de Contabilidad*, 17(44), 377-420. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cc17-44.clmc>
- Pan, J. C.-H., Shih, P.-H., Wu, M.-H., & Lin, J.-H. (2015). A storage assignment heuristic method based on genetic algorithm for a pick-and-pass warehousing system. *Computers & Industrial Engineering*, 81, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.12.010>
- Pan, J. C.-H., & Wu, M.-H. (2009). A study of storage assignment problem for an order picking line in a pick-and-pass warehousing system. *Computers & Industrial Engineering*, 57(1), 261-268. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.11.026>
- Quintanilla, S., Pérez, Á., Ballestín, F., & Lino, P. (2015). Heuristic algorithms for a storage location assignment problem in a chaotic warehouse. *Engineering Optimization*, 47(10), 1405-1422. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2014.969727>
- Ramtin, F., & Pazour, J. A. (2015). Product allocation problem for an AS/RS with multiple in-the-aisle pick positions. *IIE Transactions*, 47(12), 1379-1396. <https://doi.org/10.1080/0740817X.2015.1027458>
- Rios, F., Martínez, A., Palomo, T., Cáceres, S., & Diaz, M. (2008). Inventarios probabilísticos con demanda. *Economía, Sociedad y Territorio*.

- Roodbergen, K. J., Vis, I. F. A., & Jr, G. D. T. (2015). Simultaneous determination of warehouse layout and control policies. *International Journal of Production Research*, 53(11), 3306-3326. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.978029>
- Ross, A., Khajehnezhad, M., Otieno, W., & Aydas, O. (2017). Integrated location-inventory modelling under forward and reverse product flows in the used merchandise retail sector: A multi-echelon formulation. *European Journal of Operational Research*, 259(2), 664-676. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.10.036>
- Sadiq, M., Landers, T. L., & Taylor, G. D. (1996). An assignment algorithm for dynamic picking systems. *IIE Transactions*. Recuperado de <https://www.highbeam.com/doc/1G1-18781726.html>
- Sanei, O., Nasiri, V., Marjani, M. R., & Moattar H., S. M. (2011). *A heuristic algorithm for the warehouse space assignment problem considering operational constraints: With application in a case study*. 258-264.
- Shahabi, M., Unnikrishnan, A., Jafari-Shirazi, E., & Boyles, S. D. (2014). A three level location-inventory problem with correlated demand. *Transportation Research Part B: Methodological*, 69, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.07.005>
- Shenfield, A., Fleming, P. J., & Alkarouri, M. (2007). Computational steering of a multi-objective evolutionary algorithm for engineering design. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 20(8), 1047-1057. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2007.01.005>
- Tompkins, J. A., Tanchoco, J., White, J. A., & Bozer, Y. A. (2011). *Planeación de instalaciones*. Cuarta.
- Trab, S., Bajic, E., Zouinkhi, A., Abdelkrim, M. N., Chekir, H., & Ltaief, R. H. (2015). Product Allocation Planning with Safety Compatibility Constraints in IoT-based

Warehouse. *Procedia Computer Science*, 73, 290-297.

<https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.033>

van Wijk, A. C. C., Adan, I. J. B. F., & van Houtum, G. J. (2013). Optimal allocation policy for a multi-location inventory system with a quick response warehouse. *Operations Research Letters*, 41(3), 305-310. <https://doi.org/10.1016/j.orl.2013.03.002>

Wutthisirisart, P., Sir, M. Y., & Noble, J. S. (2015). The two-warehouse material location selection problem. *International Journal of Production Economics*, 170, Part C, 780-789. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.07.008>

Yin, Y.-L., & Rau, H. (2005). Dynamic selection of sequencing rules for a class-based unit-load automated storage and retrieval system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29(11-12), 1259-1266. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0005-1>

Yu Tian, Alexander E. Ellinger, & Haozhe Chen. (2010). Third-party logistics provider customer orientation and customer firm logistics improvement in China. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 40(5), 356-376. <https://doi.org/10.1108/09600031011052822>

Zapata C. (2016). *Optimización de la distribución de mercancías utilizando un modelo genético multiobjetivo de inventario colaborativo de m proveedores con n clientes*. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/53703/>