

**ASIGNACIÓN DE ESPACIO DE ALMACENAMIENTO DEL ALMACÉN DE
MATERIAS PRIMAS DE LA EMPRESA NUTRIUM DE TULUÁ**

**CARLOS ESTEBAN BURGOS LÓPEZ
RODRIGO RAMÍREZ AGUDELO**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
GUADALAJARA DE BUGA**

**ASIGNACIÓN DE ESPACIO DE ALMACENAMIENTO DEL ALMACÉN DE
MATERIAS PRIMAS DE LA EMPRESA NUTRIUM DE TULUÁ**

**CARLOS ESTEBAN BURGOS LÓPEZ
RODRIGO RAMÍREZ AGUDELO**

Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Industrial

**DIRECTOR:
MARIO JOSÉ BASALLO TRIANA**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
GUADALAJARA DE BUGA**

NOTA DE ACEPTACIÓN

JURADO 1

JURADO 2

Guadalajara de Buga, 2019

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director **Mario José Basallo T., Ingeniero Industrial**, por todo su apoyo en la elaboración de este proyecto, dedicando parte de su tiempo, mostrando siempre su buena voluntad compartiendo sus conocimientos.

Al profesor **Juan José Rojas R., Ingeniero Industrial**, por sus grandes aportes y colaboración en el proyecto.

A la empresa **NUTRIUM S.A.S** por su gran colaboración permitiendo la realización de este trabajo a través de visitas a la organización para la recolección de la información necesaria y por su buena disposición en colaborar con el proyecto.

A todas las personas que de una u otra manera han contribuido con el desarrollo de este proyecto.

DEDICATORIA

A mi madre, que ha sido el mayor apoyo a lo largo de mi carrera universitaria, brindándome su apoyo, sabiduría y siempre aconsejándome para alcanzar y superar cada uno de los retos que se iban presentando a lo largo de la carrera.

A mi padre que con su ejemplo de disciplina y constancia me ha ayudado a crecer de manera tanto personal, como profesional.

A mis hermanos que me han brindado su apoyo siempre que lo he necesitado siendo así un sostén y una guía, para no desfallecer y superar cada uno de los retos que se me han presentado a lo largo de mi vida y la carrera, permitiéndome así, desarrollarme como una persona íntegra basada en principios y valores.

A mi compañero por su amistad y su entrega y dedicación con el trabajo de grado fueron de vital importancia para alcanzar cada uno de los objetivos propuestos.

Carlos Esteban Burgos López

DEDICATORIA

A Dios, por darme fuerza y paciencia cada día para alcanzar este y cada uno de los logros que me he propuesto y por siempre llenar mi vida de bendiciones.

A mis padres, por su apoyo y amor incondicional en cada momento de mi vida, además por brindarme siempre lo mejor y darme la oportunidad de crecer tanto personalmente como profesionalmente.

A mi novia, por su comprensión y apoyo incondicional durante toda la carrera, por levantarme cada vez que me tropezaba y por darme el amor y la fortaleza para siempre continuar.

A mis hermanos, por estar siempre cuando los he necesitado, aconsejarme y apoyarme en mi crecimiento personal y profesional.

A mi familia, por los valores y compañía durante toda mi vida y así contribuir a la culminación de esta y demás metas.

Gracias a mi compañero de trabajo de grado por su compromiso y sobre todo por su amistad.

Rodrigo Ramírez Agudelo

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Por medio de la presente declaración certificamos que los contenidos del presente trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Industrial son producto de nuestra directa contribución intelectual.

Todos los datos y referencias a textos, investigaciones, libros, revistas, tesis, entre otros, ya publicados, están debidamente referenciados y citados, identificados con su respectivo crédito e incluido en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal.

Por lo anterior, declaramos que el trabajo de grado presentado está totalmente libre de derecho de autor y, por lo tanto, nos hacemos responsables de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de responsabilidad a la Universidad del Valle.

Para constancia de lo anteriormente expuesto, se firma esta declaración a los 13 días, del mes de noviembre, del año 2018, en el municipio de Guadalajara de Buga, Colombia.

Carlos Esteban Burgos López
Código:1450032

Correo: Carlos.burgos@correounivalle.edu.co

Rodrigo Ramírez Agudelo
Código:1450110

Correo: rodrigo.ramirez@correounivalle.edu.co

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	12
2. OBJETIVOS	16
2.1. PROPÓSITO DE INVESTIGACIÓN	16
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. JUSTIFICACIÓN	17
4. MARCO TEÓRICO.....	19
4.1. FLUJO DE MATERIAL	19
4.1.1. Unidades de manejo	19
4.1.2. Tipos de almacenaje	20
4.2. OPERACIONES DE ALMACENAJE	20
4.2.1. Recibimiento	20
4.2.2. Almacenaje	20
4.2.3. Comprobación y empaque	21
4.3. DISEÑO DE ALMACENES	21
4.3.1. Diseño de área de carga unitaria.....	21
4.3.2. Diseño de recolección de cajas desde área de estibas.....	21
4.3.1. Diseño de recolección de piezas desde área de cajas.	21
4.4. EL PROBLEMA DE ASIGNACIÓN DE ESPACIO DE ALMACENAMIENTO	22
4.4.1. Planteamiento de programación lineal	22
4.5. SISTEMAS DE GESTIÓN DE ALMACENES (WMS)	23
5. REVISION DE LITERATURA	24
6. CARACTERIZACIÓN DEL ALMACÉN.....	27
6.1. TIPO DE ALMACENAMIENTO.....	27
6.2. SISTEMA DE ALMACENAMIENTO Y MANEJO DE MATERIALES	28
6.3. OPERACIONES DEL ALMACÉN	31

6.4. DISTRIBUCIÓN DEL ALMACÉN	33
6.5. NORMATIVA LEGAL VIGENTE.....	36
6.6. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	37
6.7. TIEMPOS DE ALISTAMIENTO DE PEDIDOS	41
6.8. RELACIÓN DEL TRABAJO CON EL WMS SAP	43
7. MODELO DE ASIGNACIÓN DE ESPACIOS	44
7.1. PLANTEAMIENTO MATEMÁTICO MODELO DE ASIGNACIÓN DE ESPACIOS PARA EL ALMACÉN DE MATERIAS PRIMAS DE LA EMPRESA NUTRIUM DE TULUÁ	44
7.1.1 Conjuntos principales.....	44
7.1.2 Parámetros	44
7.1.3 Variables de decisión.....	45
7.1.4 Función objetivo.....	46
7.1.5 Restricciones	47
7.2. PROGRAMACIÓN DEL MODELO	49
8. RESULTADOS DEL MODELO Y VALIDACIÓN	52
8.1. RESULTADOS DEL MODELO.....	52
8.1.1. Variable de Asignación X_{ij}	52
8.1.2. Variable de Cantidad Asignada Y_{ij}	53
8.1.3. Resultado Función Objetivo Z.....	53
8.2. VALIDACIÓN DE RESULTADOS	55
8.2.1. Distribución actual.....	55
8.2.2. Distribución basada en el COI	56
8.2.3. Distribución con base al modelo.....	57
8.2.4. Comparación de las distribuciones	57
8.2.4.1. Distancias vs operaciones mensuales	58
8.2.5. Experimentos numéricos	59
9. CONCLUSIONES	65
10. BIBLIOGRAFÍA	67

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realiza con el fin de llevar a cabo una asignación de espacios de almacenamiento del almacén de materias primas de la empresa Nutrium de la ciudad de Tuluá, con el fin de mejorar la utilización del espacio del almacén, así como los tiempos de manejo de materiales. Para lo cual se llevará a cabo una caracterización del almacén, que posteriormente permitirá identificar cual es el modelo matemático que mejor de ajuste a la realidad del sistema de estudio, para finalmente obtener lo que será la nueva disposición de los diferentes productos a guardar dentro del almacén de materias primas de la empresa Nutrium.

Palabras clave: Almacenamiento, programación lineal, utilización, asignación, restricciones y modelo.

INTRODUCCIÓN

Actualmente para las empresas uno de los factores más importantes es la definición del almacenamiento de sus productos, en este caso de las materias primas que requiere para llevar a cabo sus operaciones. Teniendo en cuenta esto, se expone la oportunidad de mejora que presenta el almacén de materias primas de la empresa Nutrium ubicada en la ciudad de Tuluá (Valle del Cauca).

Para ello se ha planteado como objetivo la realización de una propuesta que permita la asignación de espacios de almacenamiento para el almacén de materias primas de la empresa Nutrium, buscando mejorar el espacio de almacenamiento y los tiempos de manejo de los materiales. Pero, primero se deberán llevar a cabo actividades que permitan identificar cuáles son los insumos para almacenar y los espacios disponibles para ello, así mismo identificar cuál será el modelo matemático que mejor se ajuste a las circunstancias y que permita optimizar las variables antes mencionadas. Además, se plantea el modelo, se resuelve mediante el software descrito en secciones posteriores y se hace una validación de los resultados obtenidos, mostrando así la mejora presentada.

Con esto, se espera contribuir positivamente a las labores productivas de la compañía, puesto que una mejora en el almacén de materias primas significará una mejora en todo el proceso productivo de la empresa, a través de la reducción de tiempos de respuesta, así como la disminución de costos para esta área.

Además, en este documento se presentará la situación que genera la oportunidad de mejora, los objetivos que se plantean alcanzar con la realización del trabajo, así como la justificación para realizar el mismo. De igual modo, se hace una introducción a los diferentes conceptos relevantes para el caso, por medio del marco teórico y una revisión de la literatura, para reconocer que se ha hecho en el campo.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

Bartholdi y Hackman (2017, p.29) sostuvieron que “La mayor parte del gasto en un almacén típico es en mano de obra; la mayor parte de esto se utiliza en el alistamiento de pedidos; y la mayor parte de esto en recorridos.” Es por esto por lo que optimizar la utilización del espacio del almacén y los costos de manejo de materiales es de gran importancia para las organizaciones. Una correcta gestión de almacenes es crucial para reducir los costos logísticos (Guerriero, Musmanno, Pisacane y Rende 2012, p.1).

El caso de estudio está localizado en la empresa Nutrium de la ciudad de Tuluá, esta se dedica al procesamiento de frutas tropicales, las cuales convierte en pulpa de fruta para posteriormente distribuirlas a sus clientes tanto nacionales como internacionales, además procesa dulce de guayaba. La compañía pierde dinero por los tiempos excesivos de manejo de materiales en el almacén de materias primas, por lo tanto, como toda empresa, se encuentra interesada en mitigar sus pérdidas. Por lo anterior, se propone aproximarse lo más posible a un estado ideal en donde se reduzcan los costos logísticos, específicamente en el almacén de materias primas.

Los almacenes son espacios en la cadena de suministro en los cuales se guardan productos terminados o materias primas. Ballou (2004, p.472) sostuvo que “El almacenamiento simplemente es la acumulación de inventario en el tiempo”. A pesar de la simple definición de almacenamiento, los almacenes son un área muy importante en la cadena de suministro.

El área de almacenamiento, específicamente el almacén de materias primas de Nutrium, interactúa en mayor medida con el área de compras y producción. Estas tres áreas comparten una estrecha relación, la cual debe ser bien coordinada para que las operaciones de la compañía fluyan lo mejor posible. Es decir que un problema en el área de almacenamiento influye directamente en el área de producción, en ciertos casos en el de compras y puede llegar a afectar la satisfacción de los clientes al no poder cumplir con los pedidos en el tiempo requerido por los mismos.

Las operaciones de almacenaje se dividen en procesos entrantes: recepción y almacenaje, y procesos de salida: alistamiento de pedidos, comprobación, embalaje y envío (Bartholdi y Hackman, 2017, p.23). Para la empresa caso de estudio, todas estas operaciones se realizan en el momento oportuno, exceptuando el embalaje porque el caso de estudio, al ser un almacén de materias primas envía directamente los pedidos al área de producción que se encuentra en frente del almacén. Las operaciones como recepción, almacenaje, alistamiento de pedidos y envío son

realizadas con un montacargas compartido con el almacén de producto terminado y también son realizadas manualmente con un carro hidráulico para los materiales que no son de tanto volumen o para pedidos pequeños. Las operaciones de almacenaje son realizadas por los almacenistas y dirigidas por el jefe de almacén, que en la empresa es el mismo que se encarga de toda la cadena de suministro.

En el almacén de materias primas se guarda todo lo relacionado con el funcionamiento de la empresa, desde papelería hasta materiales para el proceso productivo, exceptuando la fruta que requiere refrigeración y se almacena en cuartos fríos, pero esta únicamente representa el 1% de los inventarios.

La empresa clasifica sus materiales en los siguientes cuatro grupos: materia prima, material de empaque, repuestos y sustancias químicas de lavado. El almacén está dividido en tres secciones, la primera y más extensa es en la que se almacena la materia prima y el material de empaque; el cual está compuesto por dos pasillos, cuatro estanterías y 280 posiciones, sin embargo, en la segunda planta hay una estantería destinada al almacenamiento de una parte del material de empaque; la segunda es en la que se almacenan las sustancias químicas la cual está aislada, tiene tres estanterías y de 20 a 25 sustancias químicas; y por último está la sección en que se almacena todo lo relacionado con los repuestos, tiene tres estanterías y de 300 a 400 materiales de repuesto. Además, hay un cuarto de dosificación en el cual también se almacena insumos necesarios para la operación.

El almacén se encuentra ligeramente organizado de acuerdo con las restricciones de los materiales, como son: tiempo de vida útil, volumen del producto, peso del producto, rotación dentro de los procesos de producción, características químicas del material a almacenar, temperatura de almacenaje y demás parámetros. Sin embargo, los productos son asignados de acuerdo con estas restricciones en los espacios que resulten disponibles, puesto que no hay un sistema de información que permita identificar cual es la posición idónea para almacenarlo. Para ello se dispone, casi que en plenitud, de la experiencia del operario encargado del almacén, pues es este quien decide en base a su experiencia y criterio donde almacenar un producto, además de esto, no se tiene un registro detallado de la posición en la que queda almacenado el producto, para ello simplemente en las estanterías hay etiquetas que indican que producto hay en la posición, aunque, en reiteradas ocasiones lo que muestra la etiqueta no concuerda con lo que hay en la posición por lo que se requieren de tiempos adicionales para encontrar el producto solicitado.

Por otra parte, al tratarse de estanterías de doble profundidad, frecuentemente se presenta que los productos solicitados al almacén se encuentren en la posición posterior. Esto se debe a que, al no tener un sistema de información adecuado dichos productos terminan almacenados en esas posiciones a causa de que el operario encargado del almacén realiza movimientos con el fin de guardar los

productos que lleguen nuevos al almacén, lo que naturalmente genera complicaciones en la extracción de un producto solicitado, pues habría que mover primero la posición delantera, para poder llegar a los de atrás, generando así tiempos adicionales a la momento de entregar un producto solicitado por el almacén;

La situación anterior es recurrente y ha ocasionado deterioro de los materiales por exceso de manejo de estos y por las posiciones difíciles en que quedan algunos ítems; retrasos en los pedidos que realiza producción por demoras en los tiempos de alistamiento; demoras en la ubicación de los materiales entrantes porque no se tiene preestablecido la ubicación donde van a llegar los mismos y por la poca disponibilidad de espacios para cumplir con las restricciones de asignar el producto. Se han presentado también demoras en el conteo de inventarios porque no se tiene el seguimiento del lugar donde están ubicados los ítems. Todo esto se ve reflejado en excesos de uso de espacio y tiempo, aspectos que le cuestan a la empresa grandes sumas de dinero (Bartholdi y Hackman, 2017, p.23), al igual que el deterioro de los materiales.

Una de las principales complicaciones que presenta el trabajo, es el hecho de que no ha sido cuantificado que tan grande puede llegar a ser el problema, pues el sustento del mismo, han sido las diferentes charlas y entrevistas que se han tenido tanto con la encargada del almacén, como con el operador encargado de almacenar los productos, quienes han mencionado que en reiteradas ocasiones no se tiene plenamente identificada la posición en la que se encuentra almacenado un producto, generando tiempos adicionales al momento de localizarlo, de allí la necesidad de implementar una asignación de espacios de almacenamiento de la mano con un sistema de información (SAP por ejemplo) que ayuden a determinar donde asignar los diferentes productos y mantener el registro de su ubicación respectivamente, permitiendo así la plena caracterización del almacén que facilitaría hallar los productos, una vez sean requeridos y reduciría los costos excesivos que se desencadenan por el proceso de asignación que se tiene actualmente y garantizaría la calidad de servicio de la compañía evitando retrasos en los pedidos de los clientes.

El planteamiento de este problema lleva a los autores a hacerse las siguientes preguntas de investigación:

¿Cómo organizar el almacén para mejorar la utilización del espacio del almacén y los tiempos de manejo de materiales?, entendiéndose por utilización de espacio, un uso eficiente de los espacios del almacén, aumentando el espacio disponible en el almacén para el recibimiento productos.

¿Qué normatividad legal vigente regula el almacenamiento de materia prima, de manera que se puedan identificar restricciones o precauciones al momento de almacenar los materiales?

¿De qué manera validar si los resultados de asignación de espacio de almacenamiento son representativos para la organización?

2. OBJETIVOS

2.1. PROPÓSITO DE INVESTIGACIÓN

Realizar una propuesta para la asignación de espacios de almacenamiento en un sistema con estanterías de doble profundidad en el almacén de materias primas de la empresa NUTRIUM, con el fin de mejorar la utilización del espacio del almacén y los tiempos de manejo de materiales.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las características y las restricciones de almacenamiento de las materias primas del caso de estudio de acuerdo con la normatividad legal vigente y las buenas prácticas de almacenamiento de la empresa, con el fin de evitar la contaminación o deterioro de los materiales.
- Identificar un modelo para asignar los espacios de almacenamiento de cada ítem.
- Validar el modelo de asignación de espacio propuesto con el fin de ver los resultados de mejora con respecto a los tiempos de manejo de los materiales.

3. JUSTIFICACIÓN

(Ross 2015, p. 607) Define la gestión de almacenes como “el segmento de la función logística de una empresa responsable del almacenamiento y manejo de inventarios que comienza con la recepción del proveedor y finaliza en el punto de consumo. La gestión de este proceso incluye el mantenimiento de información precisa y oportuna sobre el estado del inventario, la ubicación, la condición y el desembolso.”

Por lo anterior, es clara la importancia que tiene la gestión de almacenes porque una mala gestión afecta directamente las operaciones de todas las áreas de la empresa que requieran tanto materia prima como producto terminado. Para el caso de estudio se tomará en cuenta únicamente el almacén de materias primas, con el cual se relacionan todas las áreas de la empresa debido a que este guarda todo lo necesario para el funcionamiento de la empresa, sin embargo, un error en la gestión de este puede afectar en mayor medida el área de producción, ya que es la que requiere mayor flujo de material y las demoras en el despacho de materia prima pueden retrasar las entregas de producto terminado a los clientes.

Con este trabajo se pretende determinar la asignación de espacios de almacenamiento del almacén de materias primas de la empresa NUTRIUM de Tuluá; porque, aunque actualmente la empresa organiza los materiales de acuerdo a las restricciones de almacenamiento de la normatividad legal vigente y las buenas prácticas de almacenamiento que tiene la empresa, no se tiene un conocimiento exacto de donde se encuentra cada ítem, por consiguiente, tampoco se tienen asignados los espacios de cada uno de estos en el almacén.

El no conocimiento de las ubicaciones y extraer ítems de lugares difíciles, genera exceso de manipulación de los materiales que a su vez aumenta los tiempos de alistamiento, lo cual se ve reflejado en el deterioro de materiales, demoras en los pedidos requeridos por el área de producción y, por consiguiente, se aumentan los costos logísticos de la empresa. Además, se generan también demoras en el conteo de inventarios y el almacén no programa la ubicación de los pedidos que se encuentran por llegar, es decir, se generan demoras en la ubicación de la materia prima entrante.

La realización de este proyecto impactará positivamente en la economía de la empresa, reduciendo los costos logísticos de almacenaje por medio de la optimización del espacio del almacén y los tiempos de manejo de materiales. Por lo tanto, los operarios encargados del área de almacenaje serán beneficiados, porque no tendrán que realizar movimientos inoficiosos que alarguen el tiempo de la realización de sus tareas, y así, podrán utilizar su tiempo en otras actividades que le generen más valor a la compañía.

Por otra parte, es de vital importancia la utilización de herramientas propias de la ingeniería industrial para la realización de este proyecto, lo cual, impactará positivamente en la culminación del ciclo de académico de pregrado en ingeniería industrial de los autores; temas como logística, investigación de operaciones y estadística son necesarios para el desarrollo de este trabajo.

4. MARCO TEÓRICO

En la actualidad, las empresas se encuentran muy interesadas en tratar de tener altos volúmenes de producción y distribución de sus productos, utilizando el mínimo nivel de inventario y al mismo tiempo garantizando tiempos de entrega cada vez menores, generando así, altos niveles de servicio para los clientes. En consecuencia, la gestión de almacenes se convierte en un punto crucial y clave para reducir los costos logísticos (Guerriero et al., 2012).

Es por esto, que la definición de almacén es importante para este trabajo, al igual que la de gestión de almacenes. Para la definición de almacén, Kappauf, Lauterbach y Koch (2012, p.99) cita a Pfohl (2004, pp. 124-146) quien dijo “es una unidad estructural con todos los recursos y disposiciones organizativas necesarias para la ejecución de procesos relacionados con la gestión de inventario y almacén, incluidas las unidades organizativas relacionadas con la recepción y el envío de mercancías”. Lo cual muestra la relevancia de los almacenes y deja clara la estrecha relación que hay entre la gestión de inventarios y la gestión de almacenes.

La gestión de almacenes del siglo XXI proporciona a los fabricantes y distribuidores vías únicas para obtener ventajas competitivas. Anteriormente, la gestión de almacenes era vista solo como una parte de la cadena de abastecimiento que guardaba materiales para la producción y productos terminados. Sin embargo, para las cadenas de suministro globales altamente interconectadas de hoy en día, esta percepción estática del almacenamiento se ha vuelto obsoleta (Ross, 2015).

Es oportuno entonces, definir la gestión de almacenamiento, Ross (2015, p.607) sostuvo que es “el segmento de la función logística de una empresa responsable del almacenamiento y manejo de inventarios que comienza con la recepción del proveedor y finaliza en el punto de consumo. La gestión de este proceso incluye el mantenimiento de información precisa y oportuna relacionada con el estado del inventario, ubicación, condición y desembolso.”

En este capítulo, se habla de los almacenes, de acuerdo con los flujos de materiales, operaciones y diseño; además, se muestra el planteamiento del problema de la asignación de espacios de almacenamiento y su relación con SAP WMS.

4.1.FLUJO DE MATERIAL

Se mencionan dos aspectos importantes, como son las unidades de manejo y los tipos de almacenaje. Sin embargo, Bartholdi & Hackman (2017, p.11) sostienen que “la idea fundamental es la gestión de dos recursos: espacio y tiempo”.

4.1.1. Unidades de manejo

Las cadenas de suministro, en sentido ascendente generalmente fluye en unidades grandes, como paletas (estibas), a medida que va descendiendo se va dividiendo

en unidades más pequeñas (Bartholdi & Hackman, 2017, p.12). En este sentido los SKU (unidad básica de almacenamiento), es la unidad física más pequeña para hacer un rastreo, sobre el recorrido que está haciendo un producto en cuestión.

4.1.2. Tipos de almacenaje

Los almacenes se pueden categorizar por tipo, principalmente definidos por los clientes (Bartholdi & Hackman, 2017, p.8). Cabe mencionar algunos de los modelos más importantes.

Un centro de distribución minorista, típicamente el encargado de suministrar producto de manera directa a tiendas minoristas. *Centro de distribución de piezas de servicio*, de los más difíciles de administrar, puesto que suministra piezas de repuesto a todo lo referente a maquinaria, generalmente funciona por dos modalidades, pedidos para mantener *stock* u órdenes de emergencia. *Un almacén 3PL (Third Party Logistics)*, que son los centros a través de los cuales las empresas subcontratan las operaciones de almacenamiento. *Almacén de productos perecederos*, encargados de almacenar productos, como alimentos, flores, medicamentos, los cuales requieren refrigeración para proteger su corta vida útil.

4.2. OPERACIONES DE ALMACENAJE

Aunque los almacenes pueden servir para diferentes fines, muchos comparten el mismo patrón general de flujo de materiales (Bartholdi & Hackman, 2017, p.23), sustancialmente recibir los envíos, prepararlos para su almacenamiento, hacer labores de comprobación y empaquetado y enviarlos a los clientes cuando estos los requieran.

Una regla general, es que en la medida de lo posible el material, debe mantener un flujo continuo (Bartholdi & Hackman, 2017, p.24).

4.2.1. Recibimiento

Este proceso puede comenzar con una notificación previa de la llegada de los bienes, que permite programar el recibo y la descarga, para coordinar de manera eficiente las diferentes operaciones a realizar, una vez llega, se descarga y posiblemente se organiza para guardarlo, mientras se realizan las comprobaciones de papeleo (Bartholdi & Hackman, 2017, p.24).

4.2.2. Almacenaje

El sistema de almacenamiento tiene dos funciones importantes la posición (almacenamiento) y manejo (Ballou, 2004, p.472). En este sentido, Bartholdi & Hackman (2017, p.25) sostienen que “antes de guardar el producto se determina el lugar de almacenamiento”, debido a que esto determina en gran medida que tan rápido y a que costo se puede recuperar el producto para el cliente. De esta forma,

una vez haya sido guardado el producto, se debe registrar la posición donde se hizo, para mantener un control sobre esta.

4.2.3. Comprobación y empaque

Para este proceso, es claro que, uno de los principales problemas, es que los clientes prefieren recibir los productos, en la menos cantidad de contenedores (o el tipo de embalaje que se utilice) posibles, lo que permite reducir las labores de manejo de estos (Bartholdi & Hackman, 2017, p.29). En ese sentido las labores de empaque pueden requerir demasiada mano de obra, pero hay poco margen de maniobra. Así pues, una vez terminado esto, hay que verificar que el pedido del cliente está completo, pues la precisión de este es una clave para la medida del servicio al cliente.

4.3. DISEÑO DE ALMACENES

Bartholdi & Hackman (2017, p.49), sostienen que “cuando el producto se almacena en lugares convenientes, es fácil recuperarlo cuando es solicitado por un cliente. Pero lo que se entiende por "conveniencia" depende de los modelos de trabajo y del espacio. Estos modelos son más sencillos para paletas (estibas), ya que tienen dimensiones estándar y, en muchos casos, se manejan uno a la vez. El concepto de "conveniencia" se vuelve progresivamente más difícil de precisar a medida que analizamos las unidades más pequeñas de almacenamiento y manipulación, como cartones y piezas”.

4.3.1. Diseño de área de carga unitaria

Es el tipo más simple de almacén, *almacén de carga unitaria*, es decir que solo se maneja una sola unidad de material común a la vez, que en la mayoría de las situaciones la unidad más típica son las paletas (estibas), debido a que estas en su mayoría están estandarizadas y se deben manejar solo uno a la vez (Bartholdi & Hackman, 2017, p.51). Un ejemplo común de este tipo de almacén, son los espacios de almacenamiento tercerizados 3PL.

4.3.2. Diseño de recolección de cajas desde área de estibas.

Es un modelo de almacén un poco más complejo, puesto que ya considera las cajas, como una unidad de manipulación. Normalmente estas cajas se almacenan en paletas, por lo que la reposición es un proceso de carga unitaria (Bartholdi & Hackman, 2017, p.77), de esta forma, una de las complicaciones, es que se vuelve mucho más difícil medir la conveniencia de una ubicación individual.

4.3.1. Diseño de recolección de piezas desde área de cajas.

La recolección de piezas es la actividad más laboriosa del almacén, puesto que es aquí donde se manejan las unidades en medidas más pequeñas. (Bartholdi &

Hackman, 2017, p.77). Además de ser una de las principales preocupaciones de las empresas actualmente, que buscan reducir el inventario de productos.

Básicamente, este modelo de diseño va un poco más allá, puesto que ya considera las piezas unitarias como una unidad de manipulación

4.4. EL PROBLEMA DE ASIGNACIÓN DE ESPACIO DE ALMACENAMIENTO

Guerriero et al. (2012, p.2) sostienen que “el problema de asignación de espacio de almacenamiento (SLAP, por sus siglas en inglés), una versión más general del PAP (Products Allocation Problem), consiste en asignar los productos a los diferentes espacios en un almacén, lo que minimiza los costos de manejo y maximiza la utilización del espacio. El principio básico es que los productos de alta demanda deben asignarse en los espacios más cercanos a las puertas de Entrada/Salida para reducir, como sea posible, el tiempo total para las operaciones de manejo”.

4.4.1. Planteamiento de programación lineal

Ballou (2004, p.549) presenta un modelo simple para el problema de la disposición de producto involucrando tanto el área de almacenamiento, como la recolección de pedidos.

$Zmin = \sum_{i=1}^M C_{ij} \sum_{j=1}^N X_{ij} \sum_{i=1}^M \frac{1}{G_j^s} X_{ij} \leq 1$ para $i = 1, \dots, L$ Restricción de la capacidad de bahía de sección de reserva.

$\sum_{i=1}^M \frac{1}{G_j^a} X_{ij} \leq 1$ para $i = L + 1, \dots, M$ Restricción de la capacidad de bahía de sección de ensamblado.

$\sum_{i=L+1}^M X_{ij} \geq R_j^a$ para $j = 1, \dots, N$ Número mínimo de unidades de cada producto a guardar en la sección de ensamblado

$\sum_{i=1}^M X_{ij} \geq R_j$ para $j = 1, \dots, N$ Número total de unidades que se almacenaran a lo largo del almacén.

$X_{ij} \geq 0$ Una cantidad negativa de producto j no puede almacenarse.

X_{ij} = Cantidad de producto j almacenado en la bahía i .

C_{ij} = Costo de manejar el producto j cuando se almacena en la bahía i .

M = Numero de bahías de almacenamiento de ambas secciones de reserva y ensamblado.

N = Numero de artículos diferentes de inventario que maneja el almacén.

L = Numero de bahías de almacenamiento dentro de la sección de reserva.

G_j = Cantidad del producto j que puede almacenarse en una bahía.

R_j = Cantidad requerida del producto j que se almacenara en el almacén.

R_j^a = Cantidad mínima del producto j que se almacenara en la sección de ensamblado.

s y a = Son supra índices para denotar las secciones de reserva y ensamblado respectivamente.

4.5. SISTEMAS DE GESTIÓN DE ALMACENES (WMS)

Uno de los más importantes desarrollos en almacenamiento actualmente, es la aplicación de software automatizado por computador, que reúne la información para planear, controlar, monitorear y realizar las labores de manejo de materiales (Ross, 2015, p.672). De allí la importancia de los *sistemas de gestión de almacenes*, que es la aplicación de software, para dar soporte a cada una de las operaciones diarias de un almacén, centrado en tareas como seguimiento de los niveles de inventario y la ubicación de existencias. En algunas ocasiones se buscan que estos sistemas vayan de la mano con los ERP (plan de recursos empresariales).

5. REVISION DE LITERATURA

El tema de gestión de almacenes ha sido estudiado por diferentes autores, sin embargo, el problema de asignación de espacio de almacenamiento ha recibido poca atención en la literatura científica, en especial la parte de la modelación (Guerriero et al, 2012). A pesar de esto, actualmente se encuentran varios métodos de solución del problema, los cuales serán expuestos en este capítulo con el fin de contextualizar el tema central de este trabajo.

La gestión de almacenes y la gestión de inventarios van estrechamente relacionadas, Van den Berg y Zijm (1999), hablan de los modelos y sistemas de soporte para la planeación y control de la gestión de almacenes y cómo contribuye a la gestión de inventarios. En estos modelos se presenta el SLAP, el cual es abordado por Hausman, Schwarz y Graves (1976), que hablan acerca de la asignación de almacenamiento óptimo y presentan tres políticas de asignación de espacio de almacenamiento: almacenaje basado en clases, almacenamiento al aleatorizado y almacenamiento dedicado o fijo.

Teniendo en cuenta las tres políticas del SLAP, se han realizado diferentes modelos y algoritmos para solucionar el problema. Van den Berg (1996), presenta un algoritmo eficiente de programación dinámica que encuentra la asignación de clases minimizando el tiempo medio de ciclo de comando único.

Muppani y Adil (2007a), desarrollan un algoritmo de recocido simulado (SAA, por sus siglas en inglés) para resolver un modelo de programación lineal entera mixta para el SLAP, los autores afirman que este algoritmo da mejores resultados para la formación de clases que el planteado por otros autores en los que se utiliza programación dinámica de referencia. Además, Muppani y Adil (2007b) proponen otro modelo, esta vez de programación no lineal y para resolver el SLAP plantean un algoritmo de ramificación y acotamiento. Los autores realizan una comparación entre la solución para la política de almacenamiento específico y almacenamiento por clases y obtuvieron que la política basada en clases tiene como resultado un menor costo total de preparación de pedidos y espacio de almacenamiento.

Sanei, Nasiri, Marjani y Husseini (2011), proponen un modelo de programación lineal entera y un algoritmo heurístico basado en el método de ramificación y acotamiento, el cual tiene en cuenta penalidades para su localización, es decir, se establecen penalidades entre productos que no pueden estar juntos, estas penalidades se basan en darle prioridad a los productos que deben estar juntos; se le da diferente penalidad cuando se ubican en posiciones contiguas, opuestas, traseras y por último en posiciones lejanas. El método minimiza las penalidades y el costo de manejo de materiales.

Eriksson y Patrik (2011), incluyen dentro de su trabajo la localización de espacio de almacenamiento en un almacén que maneja estibas, los autores plantean un modelo sencillo de programación entera binaria como punto de partida para cualquier situación del SLAP, además utilizan un algoritmo heurístico para solucionar el modelo. La función objetivo del modelo minimiza el tiempo total de manejo de materiales, a través de la suma del tiempo de cada operación de manejo de materiales. De acuerdo con los autores, el modelo no necesariamente asigna el lugar óptimo por su sencillez, sin embargo, afirman que el peor resultado que puede dar es el doble del óptimo.

Igualmente, lo planteado por Sanei et al. (2011) es complementado por Guerriero et al. (2012) quienes abordan el problema de asignación de productos por medio de un modelo de programación lineal para un almacén multicapa. Sin embargo, debido a la complejidad que tienen el SLAP (NP-hard), utilizan un heurístico de búsqueda local iterativa. El método propuesto por los autores da resultados de buena calidad en poco tiempo de procesamiento, situación que no sucede con muchos de los modelos planteados por la literatura. Asimismo, en las situaciones en las que el método no se resolvió óptimamente, las soluciones del heurístico siguen teniendo un menor costo que la situación inicial de asignación.

Chuang, Lee y Lai (2012), utilizan técnicas de agrupamiento basadas en la asociación de ítems (problemas p-mediana) e implementan las técnicas de asignación para localizar los ítems agrupados en lugares de almacenamiento. Dos modelos de programación lineal entera mixta son desarrollados y se utiliza el software comercial Lingo para encontrar la solución. Los resultados muestran que el método propuesto mejora el funcionamiento de las distancias de recolección usando las políticas de asignación propuestas.

Mirabelli, Pizzuti y Laganà (2013), se basan en lo planteado por Guerriero et al. (2012); utilizan también un modelo de programación lineal entero en un almacén multicapa que es complementado por un heurístico de búsqueda local iterativa. Sin embargo, añaden una clasificación ABC para determinar las clases más importantes, factor que ayuda en el desarrollo del método, obtienen como resultado la minimización del costo de manejo de materiales.

Guerriero et al. (2015), diseñan un método RH (rollout-based approach), que es un híbrido entre un heurístico constructivo y un método de búsqueda local, para resolver el SLAP por medio de la política de clases, al mismo tiempo realizan una comparación de heurísticos para determinar el algoritmo que de mejores resultados, por lo que se tiene como resultado que el método propuesto es mejor.

Rojas, Solano y Montoya (2019), realizaron una revisión sistemática de literatura del SLAP, en la cual, utilizaron 71 documentos, teniendo en cuenta los diferentes nombres como se ha referenciado el problema de asignación de espacios de

almacenamiento y el año de publicación. El artículo muestra los métodos de solución más utilizados para el problema, además de los parámetros que han sido usados para darle solución y las consideraciones y restricciones que se han tenido. Este artículo es sin duda el que más información reúne acerca del problema de todos los consultados. El método exacto más usado es la programación lineal entera mixta, la política más usada es el almacenamiento por clases y los parámetros más utilizados para la optimización son el espacio, distancia y tiempo; de acuerdo con el artículo.

Acorde a lo encontrado en la literatura, se puede afirmar que el tipo de política más usada para la asignación de espacios es el almacenamiento basado en clases o grupos, lo cual confirma lo que dijo Guerriero et al (2012, p.4386) “el almacenamiento basado en clases es el método más efectivo, dividiendo los artículos en clases y asignando a cada clase un conjunto de áreas en las cuales los productos se ubican de cualquier manera.”

6. CARACTERIZACIÓN DEL ALMACÉN

6.1. TIPO DE ALMACENAMIENTO

Hausman et al. (1976), discuten tres políticas de almacenamiento: almacenamiento basado en clases, almacenamiento aleatorizado y almacenamiento dedicado o fijo.

En Nutrium no está sistematizada la política de almacenamiento ni se utiliza una política específica como las que presenta el referente. Se había utilizado siempre una política de almacenamiento basada en el conocimiento del jefe del área, la cual no era totalmente aleatoria, ni totalmente dedicada o fija. Porque se tenía en cuenta un principio básico de almacenamiento que sugiere asignar los productos con mayor demanda en las ubicaciones cercanas a las entradas y salidas del almacén, lo cual reduce el tiempo total de manejo de materiales (Guerriero et al., 2015, p.7376). Sin embargo, a partir de este año se decidió utilizar una política basada en clases, igualmente basada en el conocimiento del jefe del área.

Se decidió utilizar una política por clases porque la organización se encuentra en proceso de certificación de la norma FSSC ISO 22000, el cumplimiento de esta norma exige la separación de materias primas clasificadas como alérgenos, esto implica realizar una separación de la línea de dulces y la línea de jugos, que son las dos líneas que maneja la organización.

Antes del actual almacenamiento por clases, en el almacén se habían evidenciado retrasos en el alistamiento de pedidos, deterioro de materiales por la cantidad de movimientos necesarios para la extracción de algunos materiales, demoras en la ubicación de los materiales entrantes porque no se tiene preestablecido la ubicación donde van a llegar los mismos y por la poca disponibilidad de espacios. Además, se han presentado también demoras en el conteo de inventarios porque no se hace seguimiento al lugar donde están ubicados los ítems. Todo esto se ve reflejado en excesos de utilización de espacio y tiempo, aspectos que le cuestan a la empresa grandes sumas de dinero (Bartholdi y Hackman, 2017, p.23), al igual que el deterioro de los materiales.

Las consecuencias de realizar una asignación sin principios metodológicos, demuestra que, aunque la experiencia puede ayudar a mantener el sistema en equilibrio o con resultados aceptables, se pueden obtener resultados bastante representativos utilizando herramientas ingenieriles. De la misma manera, la actual asignación por clases sigue siendo basada en el conocimiento del jefe del área y no garantiza la reducción de los tiempos de manejo de materiales ni la minimización de la utilización del espacio.

Aunque, la necesidad de la certificación de inocuidad haya obligado a la organización a clasificar su almacén por clases (jugos y dulces), se podría elegir cualquiera de las políticas de almacenamiento para realizar la asignación de

espacios y así mejorar los tiempos de manejo de materiales y la utilización del almacén, sin embargo, se elige la política de asignación dedicada o fija porque se ajusta más a las necesidades de la organización, dado que, una política aleatorizada llevaría a una situación parecida a la del planteamiento del problema, dificultando la identificación del material en físico y la política por clases, se pensó en primera instancia, sin embargo, la distribución del almacén y los materiales hacían complicada la utilización de la política, además, en una clase, se organizan aleatoriamente las referencias de productos de la misma, aspecto que para la empresa no era viable. Al tener una política dedicada, cada producto tendrá su lugar y al ser optimizado por medio del modelo que se propone más adelante, se tendrá un lugar fijo para cada referencia de producto, con un tiempo mínimo de recolección de pedidos de acuerdo con el número de operaciones mensuales de cada referencia. Lo cual, permite que se disminuyan los tiempos de verificación de inventario, mejorar los tiempos de alistamiento y el deterioro de los materiales por excesos de manipulación porque esta política ubica los productos con más demanda en ubicaciones que son cercanas y de fácil acceso (Van den Berg & Zijm, 1999), de esta manera, se evitan mayor manipulación de los materiales.

Para el desarrollo del trabajo, la actual división por clases del almacén (jugos y dulces), es considerada por los autores como una restricción de compatibilidad de las referencias de los productos con las ubicaciones y no como una política de almacenamiento actual.

6.2. SISTEMA DE ALMACENAMIENTO Y MANEJO DE MATERIALES

“Dentro del almacén, la carga unitaria estandarizada más grande es generalmente la estiba, que es solo una base rígida sobre la cual se pueden apilar las cajas de cartón”, Bartholdi & Hackman (2017, p.39), que es precisamente la unidad en la que se guardan los productos en el almacén de materias primas.

Por otra parte, estas estibas, son almacenadas en estanterías. Bartholdi & Hackman (2017), sostienen que, de esta forma, cada nivel de la estantería se maneja de manera independiente, obteniendo así un mejor acceso a las cajas, como bien pasa en el almacén, permitiendo así que se pueda almacenar más material de manera vertical, contrario a lo que ocurriría si solo se dispusiera del piso para guardar productos.

Bartholdi & Hackman (2017), detallan los diferentes tipos de estanterías más comunes para el apilamiento de estibas. Pero en concreto, el almacén de materias primas de Nutrium maneja las *double-deep rack*, que por su traducción al español serían estanterías de doble profundidad como se puede apreciar en la Ilustración 1.

Ilustración 1. Estanterías usadas para el almacenamiento de estibas



En entrevistas con la persona encargada del almacén, esta sostiene que *“tenemos determinados unas estanterías para la línea de dulces, y otra para la línea de jugos, solo en esas estanterías se pueden almacenar materiales de cada línea...”*, aspecto importante que va de la mano con la política que será tenido en cuenta en la realización del modelo.

Como se detalla en la Ilustración 1, es necesario acceder por medio de equipo especializado a las posiciones más altas del estante. En este caso, el almacén cuenta con un montacargas eléctrico Rockla, como el de la Ilustración 2. Sin embargo, este montacargas es de uso compartido con la zona de almacenamiento de producto terminado, por lo que en ocasiones no se encuentra disponible para el uso del almacén de materias primas y obliga a mantener las estibas en el suelo, hasta que esta se desocupe. Por otro lado, para el manejo de las estibas que se guardan en las posiciones del primer nivel, el almacén de materias primas dispone de una transpaleta manual o carro hidráulico, como el que se muestra en la Ilustración 3. Así mismo, están a disposición los operarios que normalmente se encuentran en el almacén.

Por lo anterior, es claro que el sistema de almacenamiento de materias primas de la organización tiene una flota heterogénea compuesta por un montacargas y un carro hidráulico.

De acuerdo con la ficha técnica del montacargas, la velocidad de subida es de 0,58 m/s, la velocidad de bajada es de 0,55 m/s y la velocidad en el plano es de 3,11 m/s; esta última es determinada de acuerdo con la calibración específica del almacén, ya que, el montacargas tiene mayor velocidad.

Ilustración 2. Montacargas usado en el almacén



Ilustración 3. Equipo para el movimiento de materiales



Un aspecto importante por describir es el funcionamiento de las estanterías. En primer lugar, se disponen de 4 niveles de altura, es decir hay cuatro pisos para guardar estibas. Las estanterías funcionan por módulos, los módulos están compuestos por 16 posiciones, 4 posiciones en cada nivel; en cada nivel se pueden almacenar 4 estibas, dos a lo ancho y dos a lo largo, como se aprecia en la Ilustración 4 y cada vez que una estiba se almacena en algún módulo de la estantería pasa a ser denominada posición. El almacén cuenta con un total de 19 módulos, sin embargo, 3 de ellos solo tienen 8 posiciones por estar en medio de un pasillo; lo anterior, para un total de 280 posiciones. Aunque este trabajo sólo tendrá en cuenta 276 posiciones para la asignación de espacios, dado que, hay 4 posiciones que pertenecen al área de control de calidad y allí almacenan materiales específicos de ellos que están por fuera del inventario del almacén de materias primas.

Ilustración 4. Estibas del almacén.



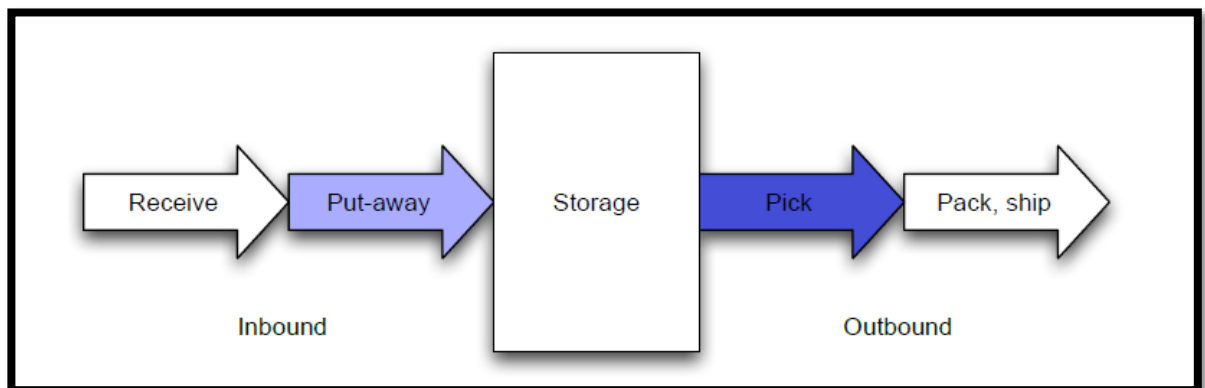
Lo que normalmente suele almacenarse en las estibas son cajas, costales, bolsas, cubetas, tanques cilíndricos y rollos, materiales que, por su forma, facilitan su organización y apilamiento en las estibas, permitiendo así un mejor uso del área de la estiba y del espacio vertical disponible.

Finalmente, un aspecto a destacar es que cada una de las vigas de soporte de las estanterías, tiene la capacidad de soportar hasta 2500 kilogramos, es decir, que al vincular las bases que soportaran las estibas, estas pueden soportar en total 5000 kilogramos. Sin embargo, para ser más específicos, se dice que cada posición tiene una capacidad de 2500 Kg.

6.3. OPERACIONES DEL ALMACÉN

Bartholdi & Hackman (2017), detallan la reorganización de productos; esta se lleva a cabo por medio de procesos físicos resumidos en la Ilustración 5. Para más información acerca de las operaciones del almacén, puede remitirse a la bibliografía en cuestión. De esta forma, se centrará más en las operaciones que hace el almacén en cada uno de los puntos.

Ilustración 5. Operaciones de almacenaje. Imagen tomada de Bartholdi & Hackman (2017, p.24)



El recibimiento comienza con la notificación previa de la llegada del producto, en este punto en concreto la encargada del almacén menciona *“Es algo subjetivo, nosotros enviamos la orden de compra con fechas de entrega estimadas, pero el sistema no genera ninguna alerta diciendo que hoy llegará algún producto. Es decir que diariamente recibimos materiales, pero desconocemos cuales van a llegar”*, esto es un tema complejo, pues ello no permite que se esté preparado para la llegada de algún material y es más un problema logístico, que se sale del alcance del almacén de materias primas, pues está relacionado directamente con los proveedores, sin embargo, es un aspecto dentro del cual se puede trabajar para mejorar, pero no está dentro de los objetivos de este trabajo. Por otro lado, una vez llega el producto, este es inspeccionado para verificar que no haya anomalías y en caso de haberlas notificarlas con el proveedor del producto.

Frente al tema de almacenamiento, una vez llega el producto al almacén, el operador encargado del mismo lo organiza en la entrada. Mientras el producto está en la entrada, el encargado va, analiza e identifica de acuerdo a su propio criterio que lugar de las estanterías es el más adecuado para guardar el producto. En caso de que sea en una posición de primer nivel, el propio operario se encarga de movilizar el producto hasta su posición con la ayuda de un carro hidráulico. En caso de estar en una posición por encima del segundo nivel, necesitará del montacargas que se usa en conjunto con el almacén de producto terminado y en caso de que este, esté desocupado se procederá a almacenar el producto, de no estar disponible, el material se queda en la entrada del almacén, hasta que el montacargas esté disponible para movilizarlo hasta su posición de almacenaje.

Actualmente la compañía no cuenta con ningún sistema que determine en qué posición debe ser almacenado el producto que llegue, pues esto se hace empíricamente, teniendo en cuenta aspectos como el mencionado anteriormente y una restricción para los azúcares, la cual indica que estos deben estar almacenados en la parte superior de las estanterías, es decir en el cuarto nivel. De esta forma son almacenados, frente a esto, la encargada menciona *“No se registra donde se almacena, tan solo en cada estantería esta rotulado el código SAP y nombre, así como fichas técnicas y de seguridad”*, aspecto inquietante, puesto que esto no permite evaluar de manera rápida la ubicación del producto, una vez este sea requerido. Además, en la práctica se identificó que son muy pocos los productos que están identificados en las posiciones.

Frente a la salida de productos del almacén, hay varios aspectos interesantes que vale la pena mencionar, en primera instancia en cuanto a la manera en que salen los productos del almacén, la encargada menciona *“Es una reserva o salida (depende si es para traslado a otro Almacén o consumo por orden) que la trae la persona que la requiera, en ella se registra, fecha, código SAP, nombre, cantidad.”*, de forma que se maneja un registro digital de que productos han sido solicitados del

almacén, junto con toda la información que menciona la encargada. Una vez que la orden llega, el operario del almacén se encarga de verificar que lo que se pidió lo haya en el almacén, para de esta forma alistar el producto y llevarlo hasta la entrada del almacén, y así posteriormente dar la autorización al solicitante de que se acerque a la entrada por el producto.

Finalmente, en el almacén no se maneja un criterio fijo para seleccionar que referencia del producto debe salir primero del almacén, como ya se mencionó, simplemente se revisa que el producto solicitado esté, se autoriza al solicitante para venir por él y se tiene un registro de lo que fue sacado del almacén.

6.4. DISTRIBUCIÓN DEL ALMACÉN

En este apartado se mostrará la distribución física del almacén de materias primas. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se puede detallar la forma en la que están organizadas las estibas del almacén de materias primas, así como las longitudes de cada una de estas. Cada uno de los bloques de estanterías tiene una altura de 4 niveles como ya se había descrito anteriormente, sin embargo, en la parte del plano que indica “*pasillo*”, es el espacio donde se encuentra la apertura, para que el montacargas, logre pasar a los bloques de almacenamiento que se encuentran más atrás en el almacén. En ese sentido, este espacio tiene una altura de aproximadamente 2.87 metros, por lo cual, en el punto medio de esas estanterías, los módulos no suben 4 niveles, si no 2, por lo que, en la zona central de esas 3 estanterías dobles, hay un espacio total de 24 posiciones de almacenamiento.

Ilustración 6. Almacén por niveles (posiciones). Elaboración propia

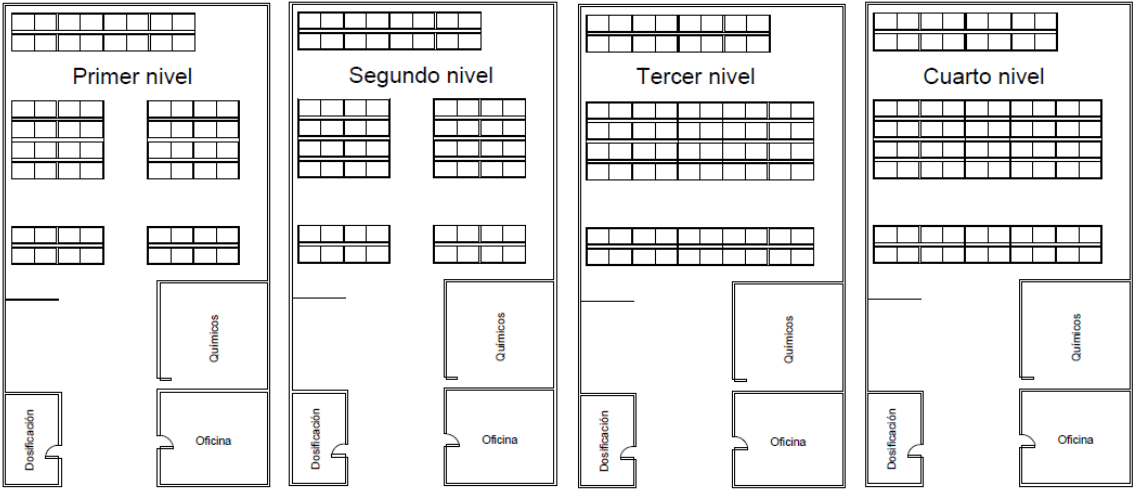
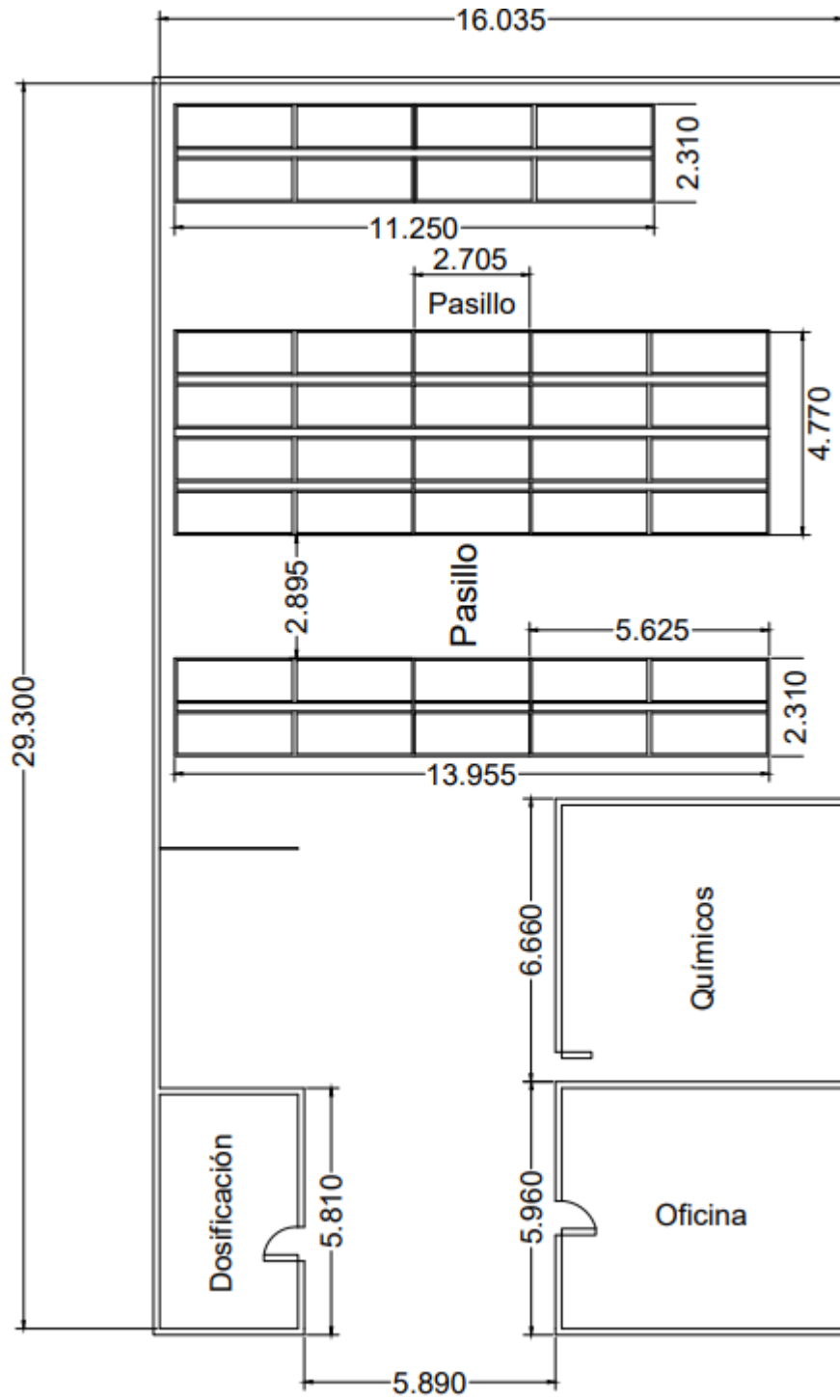


Ilustración 7. Plano del almacén. Elaboración propia.



En la *Ilustración 6*, se muestran todas las posiciones del almacén por nivel. En esta imagen se observa claramente que a partir del nivel 3 hay posiciones en el medio del pasillo central.

6.5. NORMATIVA LEGAL VIGENTE

Todas las organizaciones a nivel mundial están regidas por diferentes normas que en algunos casos son obligatorias y en otros, son de libre escogencia cumplirlas. Para el sector alimenticio en el cual se encuentra la empresa en estudio, se tiene especial cuidado en el cumplimiento de las normas por las implicaciones graves que puede tener para la salud humana el incumplimiento de estas.

Para el almacenamiento de productos alimenticios hay algunas normas y leyes Nacionales e internacionales que se especifican a continuación.

En Colombia, se tiene la resolución 2674 de 2013 que dicta todas las disposiciones de Buenas Prácticas de Manufactura (BPM), esta resolución la deben cumplir todas las organizaciones que ejerzan actividades de fabricación, procesamiento, preparación, envase, almacenamiento, transporte, distribución y comercialización de alimentos y materias primas de alimentos. Por este motivo, Nutrium se basa principalmente en el cumplimiento de esta resolución.

Sin embargo, la dinámica de la economía tanto nacional como internacional, obliga a las organizaciones a cumplir estándares cada vez más exigentes. Por esta razón, la empresa en estudio le apunta a cumplir con la FSMA y la certificación FSSC (Food Safety System Certification) 22000.

La FSMA es la ley de Modernización de la Inocuidad de los Alimentos, es la ley más radical aprobada por EE. UU. en su índole. Actualmente Nutrium se encuentra en el proceso de certificación de la FSSC 22000, esta norma establece estándares internacionales para el aseguramiento de la inocuidad alimentaria.

El cumplimiento de la FSSC 22000 garantiza a Nutrium en gran parte el cumplimiento de la ley de Modernización de la Inocuidad de los Alimentos (FSMA). Teniendo en cuenta lo planteado anteriormente y relacionándolo con el área de almacenamiento, Nutrium actualizó su Programa de Buenas Prácticas de Manufactura en el Almacenamiento de Suministros, especialmente con el objetivo de cumplir todos los requisitos que exige la norma.

El Programa de Buenas Prácticas de Manufactura en el Almacenamiento de Suministros tiene las siguientes condiciones generales:

- Cuando se almacene fuera de las estanterías, se debe distanciar de la pared a unos 60 cm. Aproximadamente y del piso a 15 cm.
- Debe estar libre de humedad o excesivas temperaturas, mantener en un ambiente no mayor a 30°C.

- No se debe colocar sobre las materias primas objetos pesados u otros materiales diferentes.
- El producto estibado debe quedar firme y no debe exceder el nivel máximo de arrume recomendado.
- No se deben mezclar materias primas que se utilizan en los productos con sustancias químicas utilizadas para la limpieza.
- Las sustancias peligrosas se deben manipular con cuidado de no producir ningún derrame, por lo tanto, deben estar siempre bien tapadas y rotuladas.
- En las estanterías se deben tener separado los materiales empleados en la línea de dulces de los utilizados en la línea de pulpas.
- Los materiales catalogados como alérgenos deben de ser almacenados en la zona determinada para el control de alérgenos. La zona de almacenamiento de materiales con componentes alérgenos debe estar identificada y segregada; no se deben almacenar productos alérgenos con materiales que se utilicen en la línea de pulpas u otras líneas no declaradas alérgenos.
Cuando se vaya a realizar el despacho a Producción de los materiales catalogados como alérgenos, se debe garantizar que los mismos se entreguen en una sola estiba sin otros materiales.
- El control de inventarios se realiza a través del sistema SAP.
- La capacidad máxima por nivel de estantería es de 2500 Kilos.
- Los arrumes de materiales que se realizan en las estibas deben quedar sobre la superficie de esta, sin voladizos (parte de los materiales por fuera de la estiba).

Las condiciones anteriormente mencionadas son relevantes para tener en cuenta en el desarrollo de este trabajo, como por ejemplo en el planteamiento de restricciones para el modelo. No se menciona todo el Programa de Buenas Prácticas de Manufactura en el Almacenamiento de Suministros para ser más concisos, sin embargo, este programa muestra que la empresa tiene planteado lo exigido por la resolución nacional y la norma FSSC 22000.

6.6. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

En esta sección, se detalla de la cantidad de materiales que son almacenados en el almacén y sus características físicas o dimensiones.

En la descripción de la situación problemática se indicó que en Nutrium hay diferentes sitios de almacenamiento de materiales e insumos; tales como, el cuarto de dosificación, el área de almacenamiento de químicos, el almacén de repuestos y el almacén de material de empaque y materia prima con estanterías de doble profundidad, en este último es en el cual se concentran los objetivos de este trabajo.

Es decir, en el almacén objeto de estudio solo se almacena material de empaque y materia prima.

El primer paso en esta caracterización de materiales fue identificar los materiales e insumos de la organización que son guardados en el almacén objeto de estudio. En este ejercicio se identificaron materiales de empaque y materias primas, 42 y 40 referencias respectivamente, además de una referencia no perteneciente a ninguna de las anteriores. para un total de 82 referencias distintas almacenadas.

Por lo tanto, estas 82 referencias de materiales de empaque y materias primas son las que se incluyen dentro del modelo de asignación de espacios de almacenamiento que se propone en los siguientes capítulos.

Luego de la identificación de las 82 referencias, se tomaron las características físicas de cada una de ellas. Las características medidas fueron: peso (Kg), ancho (cm), largo (cm) y altura (cm). Además, se tuvo en cuenta el tipo de embalaje de cada una de las referencias. Un ejemplo claro de lo anterior se puede observar en la Tabla 1. Por cuestiones de espacio, se incluyen únicamente cinco (5) materiales, sin embargo, la tabla completa puede consultarse en los anexos de este documento.

Con la tabla de caracterización de materiales, ya se tiene información suficiente para las restricciones de espacio, ya que, en la sección 6.2 se menciona la capacidad de las estanterías tanto de posiciones como de peso. Sin embargo, dentro de esta sección se incluyen las restricciones de las ubicaciones con respecto a las referencias de productos, estas restricciones son las siguientes:

1. El almacén se encuentra dividido en la línea de pulpas y la línea de dulces, estas dos líneas no pueden almacenarse juntas para evitar la contaminación cruzada, ya que, hay insumos de la línea de dulces que contienen alérgenos. Para esta situación, el almacén tiene definidas unas posiciones para la línea de dulces y otras para la línea de pulpas.
2. Los bultos de azúcar se almacenan siempre en el último nivel (cuarto nivel).
3. Las referencias de bolsa plástica para tambor metálico y bolsa plástica para tambor plástico deben almacenarse únicamente en el primer nivel.
4. Todas las referencias de materias primas deben estar almacenadas en el primer nivel.
5. La referencia de bolsas asépticas de 55 galones solo se puede almacenar en el primer nivel de los módulos 1,2,4 y 5 del tercer pasillo, dado que las posiciones del primer nivel de estos módulos tienen una altura mayor a los demás, por lo tanto, cumple para el almacenamiento de este material.

6. Las referencias alergénicas solo se pueden almacenar en las posiciones 13,14,15 y 16 del módulo 1 en el pasillo cuatro. Lo anterior, para evitar la contaminación cruzada de alimentos.
7. En las posiciones 13,14,15 y 16 del módulo 6 en el pasillo cuatro, solo se puede almacenar la referencia de sal industrial, sin embargo, la sal puede almacenarse en otras posiciones aparte de estas.

Estas fueron las restricciones identificadas, dado que en el almacén se tienen posiciones exclusivas para la línea de jugos y dulce, estas restricciones son vistas más desde la perspectiva de qué referencias de productos pueden almacenarse en cada posición (referencias mencionadas en los puntos anteriores). No hay restricciones tan fuertes en cuanto a compatibilidad entre productos (exceptuando los alérgenos), porque los materiales más delicados en cuanto al almacenamiento son los químicos y estos ya se encuentran en una zona aislada al igual que los insumos que se almacenan en el cuarto de dosificación. Por otro lado, hay otras restricciones del tipo de infraestructura y ambiente que ya son abordadas con el Programa de Buenas Prácticas de Manufactura en el Almacenamiento de Suministros, aspectos que están descritos en la sección 6.5.

Teniendo en cuenta las restricciones listadas (1 a 7), se construyó una matriz de compatibilidad de las ubicaciones con respecto a las referencias de productos. En esta matriz se tiene, producto por producto en qué ubicaciones se puede almacenar, cumpliendo así las restricciones establecidas. La matriz está en términos de 1 y 0, 1 si la referencia se puede asignar a una ubicación y 0 de lo contrario. En la Tabla 2. se puede observar parte de la matriz, sin embargo, la matriz se adjunta como documento anexo.

Por otro lado, es necesario conocer información de cómo es el movimiento de los productos que se están guardando en el almacén, pues este es un insumo de vital importancia para la programación del modelo matemático (véase capítulo 7).

Para el caso de estudio, se recolectó información de dos parámetros; cantidad de operaciones mensuales e inventario final de cada una de las referencias. Para la primera de estas, la información se obtuvo de dos formas, por un lado, trabajo de campo realizado con el operario encargado de la administración del almacén el cual suministro información (a partir de su experiencia) acerca del movimiento de los ítems a lo largo del tiempo que él ha permanecido en la empresa y por otra parte, un histórico de las operaciones que tuvieron las referencias a lo largo del año 2017 (información suministrada por la Jefe de Compras de la empresa a partir de los registros almacenados en SAP), de igual modo se obtuvo la información del segundo parámetro.

Cabe destacar que, para el caso de las operaciones mensuales (parámetro OM_i , en el modelo de la sección 7.1.2), una vez se obtuvo la información, esta se analizó de

modo que para efectos del modelo solo se tomaron la cantidad de operaciones de salida que tuvo cada referencia, es decir la cantidad de veces que esa referencia salió del almacén, haciendo así que el número de operaciones mensuales para cada una de las referencias sea el promedio simple entre el número de operaciones de salida totales sobre el horizonte de tiempo analizado enero-diciembre de 2017 (12 meses), se hizo de esta forma, pues la función objetivo que se analizará más adelante busca minimizar los tiempos de alistamiento de las referencias, haciendo así que sea pertinente solo la información de salida. Por su parte, con los inventarios (parámetro $CANP_i$, en el modelo de la sección 7.1.2) también se obtuvo la información histórica del 2017, con esta información se pudo determinar en promedio cuántas unidades de cada referencia se mantenían en el almacén, este dato se determinó a partir de la siguiente formula:

$$\frac{\sum_{t=1}^n \left(\frac{II_t + IF_t}{2} \right)}{n}$$

Ecuación 1. Cantidad promedio del ítem en el almacén

Donde:

II_t = *Inventario inicial del periodo t*

IF_t = *Inventario final del periodo t*

n = *Numero de periodos*

De modo que se calcula el promedio entre el inventario inicial y final para cada uno de los periodos (para este caso meses), se hace una sumatoria de todos los periodos t analizados (12 meses) y se divide entre el número de periodos utilizados, obteniendo así el promedio de unidades que se mantienen en el almacén. De este modo, al analizar un horizonte de tiempo lo suficientemente significativo se puede conocer de mejor manera cuanto es en promedio la cantidad de producto que se suele tener guardado en el almacén a lo largo del tiempo.

Tabla 1. Caracterización de Materiales. Elaboración propia.

 TABLA DE RECOPIACIÓN DE DATOS DIMENSIONES REFERENCIAS DE MATERIAS PRIMAS Y MATERIALES DE EMPAQUE										
Material	Código	Ancho (Cm)	Alto (Cm)	Largo (Cm)	Requerimiento volumetrico (cm3)	Peso (Kg)	TIPO	Zonificación	OM	CANP (UNIDADES DEL PRODUCTO)
BOLSA EN NYLON 12 LTS. P/SISTEMA B.I.B	1	99,00	23,00	60,00	136.620,00	15,00	Material de empaque	Jugos	2	23
LAMINA BOPP DOÑA GUAYABA INDIVIDUAL	2	27,00	27,00	16,00	11.664,00	9,00	Material de empaque	Dulce	2	57
BOLSA PLASTICA TAMBOR PLASTICO	3	47,00	16,00	102,00	76.704,00	30,00	Material de empaque	Jugos	0,5	20
BOLSA ASEPTICA THERMICA PEQUENA 1 G	4	58,00	22,00	48,00	61.248,00	5,00	Material de empaque	Dulce	1	83
BOLSA ASEPTICA DE 55 GALONES NUEVA	5	32,00	29,00	118,00	109.504,00	20,00	Material de empaque	Jugos	1	199
CAJA PARA BOLSA 20 KG	6	70,00	19,00	70,00	93.100,00	15,00	Material de empaque	Jugos	1	78
BOLSA ASEPTICA 20 KG	7	49,00	22,50	58,00	63.945,00	10,00	Material de empaque	Jugos	1	44
ESTIBA DE 115*113*10 CMS EXPORTACION	8	113,00	10,00	115,00	129.950,00	25,00	Material de empaque	Jugos	1	160
PEGANTE CAJA SWIFT 84404	9	66,00	15,00	46,00	45.540,00	25,00	Material de empaque	Jugos	2	5
BOLSA PLASTICA PARA TAMBOR METALICO	10	47,00	16,00	102,00	76.704,00	30,00	Material de empaque	Jugos	2	60
CUÑETE PLASTICO CON ASA (5 GALONES)	11	30,00	72,00	30,00	64.800,00	3,00	Material de empaque	Jugos	0,2	20
CAJA CARTON CORUG. HIT EXPRESS 12 LTS	12	49,00	26,00	60,00	76.440,00	2,00	Material de empaque	Jugos	3	43
CAJA CARTON CORRUGADO MR. TEA 12 LT	13	49,00	26,00	60,00	76.440,00	2,00	Material de empaque	Jugos	3	52
LAMINADO BOCADILLO LONJA DE 300 GRS	14	30,00	30,00	18,00	16.200,00	10,00	Material de empaque	Dulce	6	68
CORRUGADO DE CERNIDO 1KG	15	27,00	27,00	33,00	24.057,00	21,00	Material de empaque	Dulce	1	19

Tabla 2. Matriz de Compatibilidad. Elaboración Propia

 REFERENCIAS EN CÓDIGOS										
Ubicación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
2	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
3	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
4	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
5	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
6	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
7	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
8	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
9	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
10	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
11	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
12	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
13	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
14	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1

6.7. TIEMPOS DE ALISTAMIENTO DE PEDIDOS

Uno de los objetivos de este trabajo es mejorar los tiempos de manejo de materiales. Se observaron las operaciones de almacenaje del sistema en estudio, además, se consultó con el jefe del almacén y se llegó a la conclusión de que la operación más relevante para el sistema es la del alistamiento de materiales. Dado que, producción realiza pedidos que se requieren en muchas ocasiones inmediatamente y una demora en la entrega de los pedidos, es una demora que repercute directamente en el sistema de producción.

Para simplificar la asignación de espacios y poder cumplir con los objetivos del trabajo, se acuerda minimizar los tiempos de alistamiento de pedidos en el modelo de asignación de espacios de almacenamiento. Por tanto, a continuación, se describe como fueron calculados estos tiempos.

1. En primera instancia, se calculó la distancia que hay desde el punto de entrega del producto, hasta la posición en la que se encuentra almacenado el producto y volver a la posición. De modo que se identifique la distancia total recorrida para poder traer un producto solicitado.
2. Se determinó una velocidad de recorrido estándar (independientemente de si se iba a con el equipo para mover materiales de manera manual o el propio montacarga), en 0,75 m/s.
3. Se determinó una velocidad de ascenso y descenso (0.582 m/s para el ascenso y 0.555 m/s para el descenso, ambas determinadas a partir de las especificaciones técnicas del montacarga), pues si el ítem requerido está ubicado en el nivel 2, 3 o 4 es necesario el uso del montacarga para acceder a este, en caso de que esté ubicado en el primer nivel, se presupone un tiempo cero, pues no hay que hacer mayores movimientos más que el del recorrido hasta la posición para acceder al producto.
4. Se determinan los tiempos para llegar a cada una de las posiciones, teniendo en cuenta que hay una distancia base de recorrido (por el piso) y una distancia de ascenso y descenso (dependiendo del nivel de la posición), de modo que, de manera simple se hace la siguiente operación $\left(\frac{d[m]}{v[\frac{m}{s}]} \right)$, dado que el resultado obtenido de la operación está en tiempo (segundos), no resta más que sumar esos tres tiempos (recorrido, ascenso y descenso), para obtener el tiempo total necesario para llegar a una posición en concreto.

Para este apartado se manejaron 2 supuestos. El primero, que teniendo en cuenta que la velocidad promedio de un ser humano al caminar es aproximadamente de 5 Km/h¹ (1,33 m/s), se estableció en 0,75 m/s la velocidad de carga manual (teniendo en cuenta el peso del equipo de transporte manual), tanto cargado, como descargado, pues el peso de los productos que se almacenan en el primer nivel es significativamente menor al peso del equipo de transporte manual, siendo así despreciable y permitiendo considerar dicha velocidad como una constante en ambos casos, de igual modo por complejidad del modelo, la velocidad del montacarga y el transporte manual se consideró igual y el segundo que por temas de complejidad del modelo, el tiempo de extracción de los productos se manejó

¹ Ver velocidad promedio en: <https://academic.oup.com/ageing/article/26/1/15/35875>

como 0, independientemente de la posición y nivel en la que se encuentre alojado un producto en cuestión.

6.8.RELACIÓN DEL TRABAJO CON EL WMS SAP

Nutrium cuenta con el software SAP WMS, con el cual la empresa podría llevar una completa trazabilidad de los productos en el almacén, sin embargo, actualmente la empresa no está aprovechando este recurso para su almacén de materias primas, por lo que el resultado de este trabajo dará las condiciones ideales para utilizar el software de la mejor manera.

Con el desarrollo de este trabajo se asignarán los espacios de almacenamiento a cada una de las referencias de material de empaque y materia prima. Todo esto con el objetivo de disminuir el tiempo que toma realizar las operaciones de almacenaje y mejorar los espacios disponibles.

Es claro que la trazabilidad de los materiales puede realizarse con el software de SAP WMS sin necesidad de este trabajo, pero la idea es que los resultados del trabajo ayuden a la implementación de SAP WMS en la organización. SAP WMS es vital para manejar todos los movimientos de los materiales y dar conocimiento del lugar exacto en el que se encuentran. La combinación de una buena asignación de espacios y el procesamiento de software le darán a la empresa mejores condiciones en todas las operaciones de almacenaje y por consiguiente disminuir los tiempos de manejo de materiales.

7. MODELO DE ASIGNACIÓN DE ESPACIOS

7.1. PLANTEAMIENTO MATEMÁTICO MODELO DE ASIGNACIÓN DE ESPACIOS PARA EL ALMACÉN DE MATERIAS PRIMAS DE LA EMPRESA NUTRIUM DE TULUÁ

A continuación, se presenta el modelo de asignación de espacios de almacenamiento propuesto para el almacén de materias primas de la empresa Nutrium de Tuluá. Es importante resaltar que el modelo propuesto es una adaptación del modelo utilizado por Guerriero et. al, 2012. Aunque el modelo del autor es una asignación por clases, se adaptó principalmente su propuesta de la función objetivo. Teniendo en cuenta las características propias del caso de estudio, se construyó un modelo de asignación de espacios dedicada o fija.

7.1.1 Conjuntos principales

$i = Referencias \{1, \dots, 82\}$, las referencias son los tipos de productos que se guardan en el almacén, de cada una de estas referencias hay cierta cantidad por asignar.

$j = Ubicaciones \{1, \dots, 276\}$, las ubicaciones son los espacios físicos en los que se almacenan los productos.

7.1.2 Parámetros

- $VR_i = Volumen de la referencia i [cm^3]$, contiene los datos del volumen de cada referencia en cm^3 .
- $CV_j = Capacidad volumetrica de la ubicación j [cm^3]$, contiene los datos de la capacidad de volumen en cm^3 de cada una de las ubicaciones del almacén.
- $PR_i = Peso de la referencia i [Kg]$, contiene los datos del peso de cada referencia en Kg.
- $CPE_j = Capacidad de peso de la ubicación j [Kg]$, contiene los datos de la capacidad de peso en Kg de cada una de las ubicaciones del almacén.
- $TP_j = Tiempo de desplazarse en el plano a la ubicación j y llevar el producto hasta el punto de recolección del pedido.$

- TS_j = *Tiempo de subida a la ubicación j*, contiene los datos de los tiempos de subida a cada una de las ubicaciones.
- TB_j = *Tiempo de bajada desde la ubicación j*, contiene los datos de los tiempos de bajada a cada una de las ubicaciones.
- MC_{ij} = *Matriz de compatibilidad de la referencia i con la ubicación j*
Esta matriz, involucra todas las posiciones y todas las referencias del almacén, en ella misma está plasmado si una referencia puede estar o no ubicado en una posición. Lo anterior, de acuerdo con todas las restricciones que se identificaron en el almacén como:
 - La materia prima debe ir en el primer nivel.
 - Los bultos de azúcar en el último nivel.
 - Posiciones específicas para referencias de jugos y de dulces.
 - Espacios fijos para sal industrial.
 - Espacios fijos para referencias de alérgenos.
 - Dos referencias de material de empaque que deben almacenarse en el primer nivel, ya que, debido a sus características física, almacenarlas en niveles más altos ponen en riesgo la salud de los trabajadores.

En términos generales esta matriz reúne todas las restricciones de compatibilidad de las referencias con respecto a cada ubicación.

- OM_i = *Número de operaciones mensuales de la referencia i*, vector con los datos del número de extracciones promedio de la referencia i en un mes.
- $CANP_i$ = *Cantidad de productos de la referencia i a almacenar*, vector con los datos de la cantidad de productos de la referencia i para asignar, parámetro que se tomara como una constante puesto que es un promedio de los productos almacenados a lo largo del año 2017. (ver sección 6.6.)

7.1.3 Variables de decisión

- Y_{ij} = *Cantidad de productos de la referencia i a ubicar en la posición j*.

Esta variable indica la cantidad de productos de cada referencia a ubicar en cada una de las posiciones del almacén.

- $X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la referencia i se localiza en la posición j;} \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$

Esta variable binaria, es la variable encargada de la asignación de los espacios. La variable X_{ij} , es igual a 1 cuando asigna una referencia a una ubicación, cuando es cero (0), no la asigna.

7.1.4 Función objetivo

En este modelo se desea minimizar el tiempo de alistamiento de pedidos en todo el almacén, asignando las posiciones más adecuadas para cumplir este objetivo. El tiempo está representado por TP, TS y TB, si se ubica la referencia i en una posición j, la variable binaria hace que se pueda realizar la operación, además, multiplica también el número de operaciones mensuales de esa posición. Dado que el resto de la operación es la proporción del producto en cierta ubicación por el número de veces que se mueve al mes.

Se presenta la función objetivo:

$$\text{minimizar } Z = \sum_j^m \sum_i^n \left((TP_j + TS_j + TB_j) * OM_i \left(\frac{Y_{ij}}{CANP_i} \right) \right)$$

Ecuación 2. Función Objetivo

Interpretación función objetivo:

Para hacer la interpretación más sencilla, supongamos $i=1$ y $j=1$:

- **Tiempo de alistamiento:**

Por un lado, la función objetivo está en términos de tiempo. Se suman los tiempos de desplazamiento en el plano, el tiempo de subida y el tiempo de bajada a la posición número 1 ($TP_1 + TS_1 + TB_1$), lo cual, representa el tiempo de alistamiento de pedidos.

- **Cantidad de operaciones mensuales:**

Por otra parte, la función objetivo está en términos del número de operaciones mensuales. $OM_1 \left(\frac{Y_{11}}{CANP_1} \right)$, se tiene el número de operaciones mensuales de la referencia 1 (OM_1), el cual es multiplicado por la relación entre la cantidad de productos de la referencia 1 a ubicar en la posición 1 (Y_{11}) y la cantidad de productos de la referencia 1 a almacenar ($CANP_1$); la relación $\left(\frac{Y_{11}}{CANP_1} \right)$ es la proporción de productos de la referencia 1 a almacenar en la ubicación 1, es decir, del 100% de productos de la referencia 1, se obtiene el porcentaje que se va a almacenar en la ubicación 1.

$OM_1 \left(\frac{Y_{11}}{CANP_1} \right)$, esta multiplicación da como resultado la cantidad de operaciones a realizar de la referencia 1 desde la ubicación 1 en un mes.

Para concluir:

Se tienen dos partes de la función objetivo, la primera es el tiempo total de alistamiento de pedidos de la ubicación 1 y la segunda parte, es la cantidad de operaciones a realizar de la referencia 1 desde la ubicación 1 en un mes. Lo anterior, da como resultado el tiempo total de alistamiento de pedidos por mes de la ubicación 1 que contiene el producto 1.

Por lo tanto, la función objetivo suma todos los tiempos de alistamiento de pedidos de cada posición en un mes, minimizándolos a través del planteamiento de todo el modelo.

7.1.5 Restricciones

Restricciones de asignación:

Las siguientes restricciones están relacionadas directamente con la asignación de los productos a las ubicaciones; teniendo en cuenta la compatibilidad de estos con las ubicaciones, la cantidad de referencias por ubicación y la asignación de todos los productos a una ubicación.

- **Restricción de compatibilidad:** para cada producto, en cada posición; la variable binaria debe ser menor o igual que la compatibilidad en ese punto. Esto limita la variable binaria con la compatibilidad de los productos, es decir, la variable binaria X_{ij} sólo puede tomar valores compatibles.

$$X_{ij} \leq MC_{ij}, \forall i, j$$

Ecuación 3. Restricción de Compatibilidad

- **Restricción mínima de asignación por ubicación:** para cada ubicación, sólo se asigna una referencia de producto como máximo. Es decir, también puede haber referencias sin uso.

$$\sum_i^n (X_{ij}) \leq 1, \forall j.$$

Ecuación 4. Restricción Mínima de Asignación por Ubicación

- **Restricción de Asignación mínima:** esta restricción define que cada referencia debe ser asignada en al menos una ubicación. Lo anterior, asegura que todas las referencias sean guardadas en el almacén.

$$\sum_j^m (X_{ij}) \geq 1, \forall i.$$

Ecuación 5. Restricción de Asignación Mínima

- **Restricción de Asignación de productos en cantidades:** esta restricción es la que permite que la variable Y_{ij} tome valores únicamente en las posiciones (j) que son asignadas de acuerdo con la variable binaria.

$$Y_{ij} \leq CANP_i * X_{ij}, \forall i, j.$$

Ecuación 6. Restricción de Asignación de Productos en Cantidades

Restricciones de capacidad

Las restricciones de capacidad tienen en cuenta la disponibilidad de volumen y peso de las ubicaciones para asignar una cantidad dada de productos a las mismas, teniendo los datos de peso y volumen de cada referencia.

- **Restricción de Volumen por Ubicación:** esta restricción no permite que se asignen más productos de una referencia de los que pueden entrar en cada ubicación por volumen.

$$\sum_i^n VR_i * Y_{ij} \leq CV_j, \forall j.$$

Ecuación 7. Restricción de Volumen por Ubicación

- **Restricción de Peso por Ubicación:** esta restricción no permite que se asignen más productos de una referencia de los que pueden entrar en cada ubicación por peso.

$$\sum_i^n PR_i * Y_{ij} \leq CPE_j, \forall j.$$

Ecuación 8. Restricción de Peso por Ubicación

- **Restricción de Peso Primer Nivel:** ya que en el primer nivel los productos son recogidos por un operario con un gato hidráulico, se tiene esta restricción de peso por temas de salud del trabajador, el peso de la estiba a recoger no debe exceder los 500 Kg.

$$\sum_i^n PR_i * Y_{ij} \leq 500 \quad \forall j \in \{\text{ubicaciones de primer nivel}\}.$$

Ecuación 9. Restricción de Peso Primer Nivel

Restricción de disponibilidad de producto: el problema tiene como entrada una cantidad exacta de cada referencia a almacenar, es por esto, que la cantidad de

productos a almacenar de cada una de las referencias tiene que ser igual a la cantidad de productos de cada referencia disponible para almacenar.

$$\sum_j^m Y_{ij} = CANP_i, \forall i. \text{ Restricción de disponibilidad de producto.}$$

Ecuación 10. Restricción de Disponibilidad de Producto

7.2. PROGRAMACIÓN DEL MODELO

El modelo se programó en el software IBM ILOG CPLEX versión 12.8 Optimization Studio. Este software tiene la posibilidad de utilizarse con diferentes lenguajes de programación, sin embargo, el lenguaje predeterminado en su interfaz es OPL (*Optimization Programming Language*), el mismo en el que se programó el modelo en cuestión.

En las ilustraciones 8 y 9 se observa toda la programación del modelo (archivo .mod), sin embargo, es importante resaltar que los conjuntos principales se definieron como tipo *range* (*rango*), los parámetros se definieron como tipo *float* (*hace referencia a números reales*), la variable binaria X_{ij} se definió como tipo *boolean*, la variable Y_{ij} se definió como tipo *int+* (*entero positivo*).

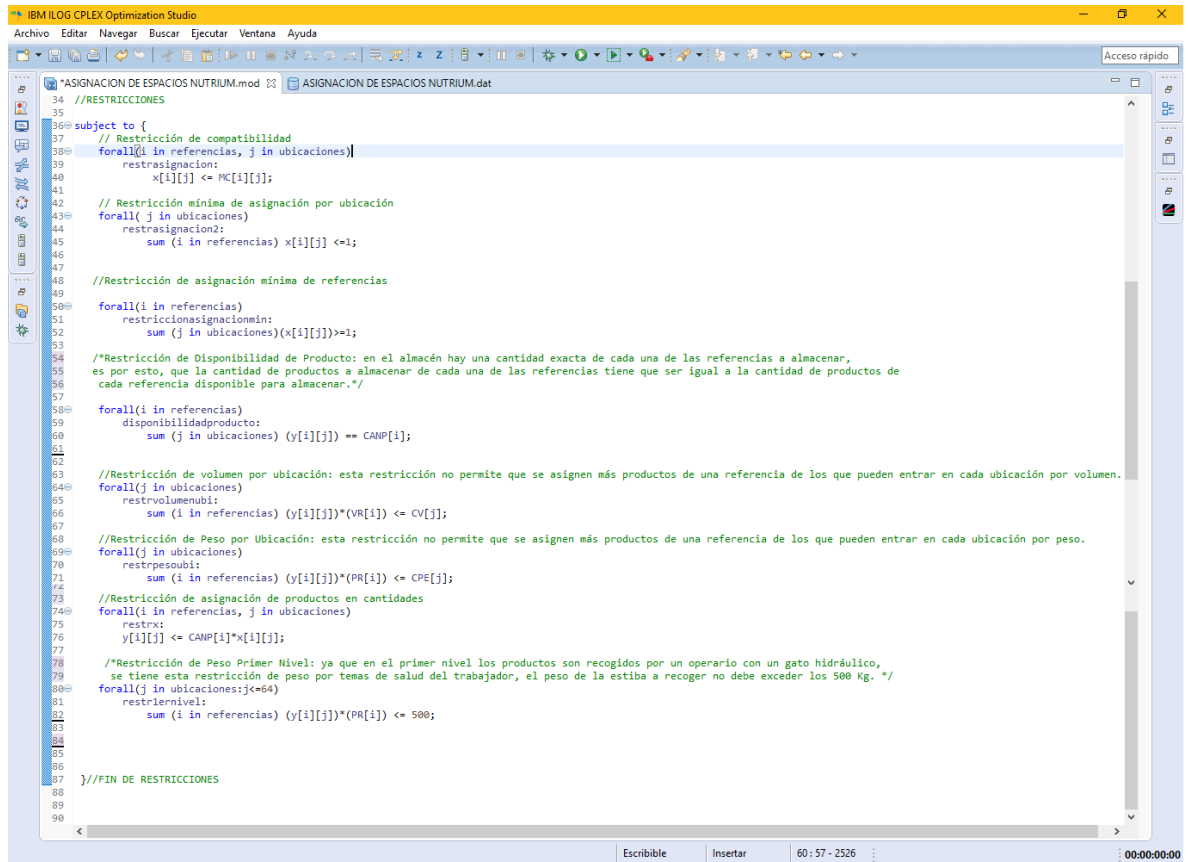
Ilustración 8. Modelo IBM ILOG CPLEX parte 1.

```

1  /*****
2  * OPL 12.8.0.0 Model
3  * Authors: Rodrigo Ramirez & Esteban Burgos
4  *****/
5  //CONJUNTOS PRINCIPALES
6  int Nbreferencias=...;
7  int Nubicaciones=...;
8  range referencias=1..Nbreferencias; //Referencias i del almacén
9  range ubicaciones=1..Nubicaciones; //Ubicaciones j en donde se almacenará toda la cantidad de productos por cada referencia.
10
11
12  //PARÁMETROS
13  float VR[referencias]=...; //Volumen de la referencia i en cm3
14  float CV[ubicaciones]=...; //Capacidad volumetrica de la ubicación j en cm3
15  float PR[referencias]=...; //Peso de la referencia i en Kg
16  float CPE[ubicaciones]=...; //Capacidad de peso de la ubicación j en Kg
17  float TP[ubicaciones]=...; //Tiempo de desplazarse en el plano a la ubicación j en segundos
18  float TS[ubicaciones]=...; //Tiempo de subida a la ubicación j en segundos
19  float TB[ubicaciones]=...; //Tiempo de bajada desde la ubicación j en segundos
20  float MC[referencias][ubicaciones]=...; //Matriz de compatibilidad del producto i con la ubicación j dado en unos o ceros
21  float OM[referencias]=...; //Número de operaciones mensuales de la referencia i
22  float CANP[referencias]=...; //Cantidad de productos de la referencia i a almacenar
23
24  //VARIABLES DE DECISIÓN
25  dvar boolean x[referencias][ubicaciones]; //Variable binaria igual a 1 si el producto i está localizado en la posición j; 0 de lo contrario.
26  dvar int+ y[referencias][ubicaciones]; //Cantidad de productos de la referencia i a ubicar en la posición j
27
28
29  //FUNCIÓN OBJETIVO
30  dexpr float z= (sum(i in referencias, j in ubicaciones) ((TP[j]+TS[j]+TB[j])*OM[i]*(y[i][j]/CANP[i])));
31
32  minimize z;
33
34  //RESTRICCIONES
35
36  subject to {
37      // Restricción de compatibilidad
38      forall(i in referencias, j in ubicaciones)

```

Ilustración 9. Modelo IBM ILOG CPLEX parte2.

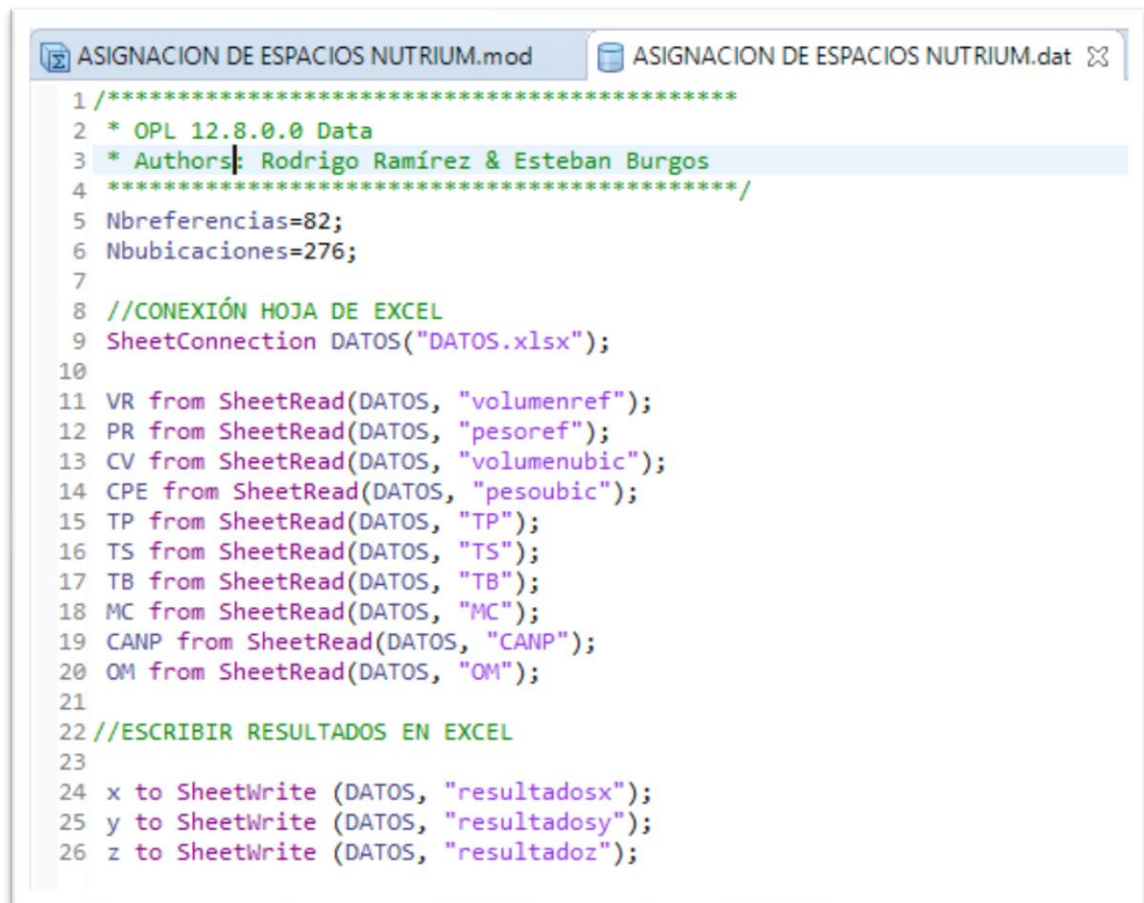


```
34 //RESTRICCIONES
35
36 subject to {
37     // Restricción de compatibilidad
38     forall(i in referencias, j in ubicaciones)
39         restrasignacion:
40             x[i][j] <= MC[i][j];
41
42     // Restricción mínima de asignación por ubicación
43     forall(j in ubicaciones)
44         restrasignacion2:
45             sum (i in referencias) x[i][j] <= 1;
46
47     //Restricción de asignación mínima de referencias
48
49     forall(i in referencias)
50         restriccionasignacionmin:
51             sum (j in ubicaciones) (x[i][j]) >= 1;
52
53     /*Restricción de Disponibilidad de Producto: en el almacén hay una cantidad exacta de cada una de las referencias a almacenar,
54     es por esto, que la cantidad de productos a almacenar de cada una de las referencias tiene que ser igual a la cantidad de productos de
55     cada referencia disponible para almacenar.*/
56
57     forall(i in referencias)
58         disponibilidadproducto:
59             sum (j in ubicaciones) (y[i][j]) == CANP[i];
60
61
62     //Restricción de volumen por ubicación: esta restricción no permite que se asignen más productos de una referencia de los que pueden entrar en cada ubicación por volumen.
63     forall(j in ubicaciones)
64         restrvolumenubi:
65             sum (i in referencias) (y[i][j])*(VR[i]) <= CV[j];
66
67     //Restricción de Peso por Ubicación: esta restricción no permite que se asignen más productos de una referencia de los que pueden entrar en cada ubicación por peso.
68     forall(j in ubicaciones)
69         restrpesoubi:
70             sum (i in referencias) (y[i][j])*(PR[i]) <= CPE[j];
71
72     //Restricción de asignación de productos en cantidades
73     forall(i in referencias, j in ubicaciones)
74         restrx:
75             y[i][j] <= CANP[i]*x[i][j];
76
77     /*Restricción de Peso Primer Nivel: ya que en el primer nivel los productos son recogidos por un operario con un gato hidráulico,
78     se tiene esta restricción de peso por temas de salud del trabajador, el peso de la estiba a recoger no debe exceder los 500 Kg. */
79     forall(j in ubicaciones:j<=64)
80         restrlernivel:
81             sum (i in referencias) (y[i][j])*(PR[i]) <= 500;
82
83
84
85 }//FIN DE RESTRICCIONES
86
87
88
89
90
```

Por otra parte, se tiene el archivo de datos (.dat), en este archivo se encuentran anexada toda la información necesaria para el funcionamiento del modelo. Sin embargo, esta información no se agregó directamente al programa, en vez de eso, se conectó por medio de la función SheetConnection y from SheetRead, esta función permite conectar hojas de Excel con el software, por lo tanto, la información se presenta como datos adjuntos en un archivo de Excel llamado DATOS.xlsx.

A continuación, se puede observar en la Ilustración 10, la formulación de los datos en el software IBM ILOG CPLEX.

Ilustración 10. Formulación de archivo .dat IBM ILOG CPLEX



```
1 /*****
2 * OPL 12.8.0.0 Data
3 * Authors: Rodrigo Ramírez & Esteban Burgos
4 *****/
5 Nbreferencias=82;
6 Nbubicaciones=276;
7
8 //CONEXIÓN HOJA DE EXCEL
9 SheetConnection DATOS("DATOS.xlsx");
10
11 VR from SheetRead(DATOS, "volumenref");
12 PR from SheetRead(DATOS, "pesoref");
13 CV from SheetRead(DATOS, "volumenubic");
14 CPE from SheetRead(DATOS, "pesoubic");
15 TP from SheetRead(DATOS, "TP");
16 TS from SheetRead(DATOS, "TS");
17 TB from SheetRead(DATOS, "TB");
18 MC from SheetRead(DATOS, "MC");
19 CANP from SheetRead(DATOS, "CANP");
20 OM from SheetRead(DATOS, "OM");
21
22 //ESCRIBIR RESULTADOS EN EXCEL
23
24 x to SheetWrite (DATOS, "resultadosx");
25 y to SheetWrite (DATOS, "resultadosy");
26 z to SheetWrite (DATOS, "resultadoz");
```

En la Ilustración 10 se ven relacionados todos los parámetros del modelo, estos parámetros se encuentran en la hoja de Excel DATOS.xlsx, además, lo que se encuentra entre comillas (") es el nombre del vector dentro del archivo de Excel, de esta manera, el programa puede identificar a que datos se hace referencia.

Por otra parte, se observa luego de un comentario que dice ESCRIBIR RESULTADOS EN EXCEL, otra función llamada to SheetWrite, esta es la encargada de escribir los resultados de las variables x & y en el archivo de Excel, además del valor de la función objetivo z. Dado que los resultados son bastante extensos, se utiliza esta función para tener los resultados en Excel y así poder analizarlos fácilmente.

8. RESULTADOS DEL MODELO Y VALIDACIÓN

8.1. RESULTADOS DEL MODELO

Como se explicó en la sección anterior, los resultados del modelo se reescriben dentro de un archivo de Excel. A continuación, se muestran los resultados obtenidos con el modelo de asignación de espacios de almacenamiento. **Variable de Asignación X_{ij}**

En el archivo de Excel Datos, se tiene la pestaña *Resultados X*, en esta se configuró una matriz para recibir los resultados del modelo, la matriz muestra en color rojo si se infringen restricciones básicas como asignar más de un producto a una misma ubicación o no asignar algún producto, además, muestra en color verde si no se infringen estas restricciones.

Por otra parte, se muestra en color verde las referencias que son asignadas a cada posición. En la Ilustración 11 se muestra parte de los resultados, sin embargo, debido a lo extenso de esta tabla, no se muestra completamente pero sí se adjunta en los archivos anexos.

Ilustración 11 Tabla de Resultados Variable X_{ij}

RESULTADOS X			Ubicaciones j									
Pasillo			3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Módulo			1	1	1	1	2	2	2	2	5	5
Nivel			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Productos i	Referencias	Línea	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	BOLSA EN NYLON 12 LTS. P/SISTEMA B.I.B	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	LAMINA BOPP DOÑA GUAYABA INDIVIDUAL	Dulce	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	BOLSA PLASTICA TAMBOR PLASTICO	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	BOLSA ASEPTICA THERMICA PEQUENA 1 G	Dulce	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	BOLSA ASEPTICA DE 55 GALONES NUEVA	Jugos	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
6	CAJA PARA BOLSA 20 KG	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	BOLSA ASEPTICA 20 KG	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	ESTIBA DE 115*113*10 CMS EXPORTACION	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	PEGANTE CAJA SWIFT 84404	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	BOLSA PLASTICA PARA TAMBOR METALICO	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	CUÑETE PLASTICO CON ASA (5 GALONES)	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	CAJA CARTON CORUG. HIT EXPRESS 12 LTS	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	CAJA CARTON CORRUGADO MR. TEA 12 LT	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	LAMINADO BOCADILLO LONJA DE 300 GRS	Dulce	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	CORRUGADO DE CERNIDO 1KG	Dulce	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	LAMINA RECORTADA GABERAS 40 X 90CM	Dulce	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	LAMA MONOCAPA SIN IMPRESIÓN	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	CAJA CARTON CORRUGADO 100 GRS	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	LAMINA POLIETILENO 1 Kg	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	LAMINA POLIETILENO 150 gr	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Se analizaron los resultados de esta variable y se encontró que todas las restricciones se cumplen, es decir, los resultados son consistentes y el modelo funciona correctamente.

8.1.2. Variable de Cantidad Asignada Y_{ij}

En el archivo de Excel Datos, se tiene la pestaña *Resultados Y*, en esta se configuró una matriz para recibir los resultados del modelo, la matriz muestra en color rojo si se infringen restricciones básicas como no asignar algún producto, además, muestra en color verde si no se infringen estas restricciones.

Por otra parte, se muestra en color verde la cantidad de productos de cada referencia que son asignados a cada posición. En la Ilustración 12 se muestra parte de los resultados, sin embargo, debido a lo extenso de esta tabla, no se muestra completamente pero sí se adjunta en los archivos anexos.

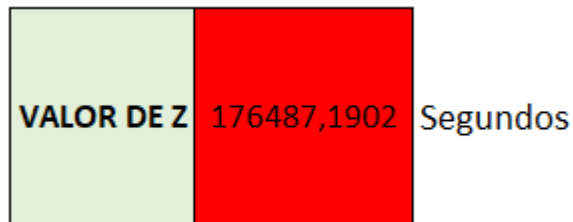
Ilustración 12. Tabla de Resultados Variable Y_{ij}

RESULTADOS Y			Ubicación s j														
	Pasillo		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Módulo		1	1	1	1	2	2	2	2	5	5	5	5	4	4	4
	Nivel		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Productos i	Referencias	Línea	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	BOLSA EN NYLON 12 LTS. P/SISTEMA B.I.B	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	LAMINA BOPP DOÑA GUAYABA INDIVIDUAL	Dulce	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	BOLSA PLASTICA TAMBOR PLASTICO	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	BOLSA ASEPTICA THERMICA PEQUENA 1 G	Dulce	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	BOLSA ASEPTICA DE 55 GALONES NUEVA	Jugos	22	22	22	1	0	0	0	22	22	22	22	22	0	0	0
6	CAJA PARA BOLSA 20 KG	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	BOLSA ASEPTICA 20 KG	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	ESTIBA DE 115*113*10 CMS EXPORTACION	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	PEGANTE CAJA SWIFT 84404	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	BOLSA PLASTICA PARA TAMBOR METALICO	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	CUÑETE PLASTICO CON ASA (5 GALONES)	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	CAJA CARTON CORUG. HIT EXPRESS 12 LTS	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	CAJA CARTON CORRUGADO MR. TEA 12 LT	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	LAMINADO BOCADILLO LONJA DE 300 GRS	Dulce	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	CORRUGADO DE CERNIDO 1KG	Dulce	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	LAMINA RECORTADA GABERAS 40 X 90CM	Dulce	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	LAMA MONOCAPA SIN IMPRESIÓN	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	CAJA CARTON CORRUGADO 100 GRS	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	LAMINA POLIETILENO 1 Kg	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	LAMINA POLIETILENO 150 gr	Jugos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

8.1.3. Resultado Función Objetivo Z

Los resultados de la función objetivo están dados en tiempo (segundos), este tiempo es el de realizar la operación de alistamiento de pedidos en un mes con la configuración dada por el modelo de programación. El resultado de la función Z se muestra en la ilustración 13. (IBM International Business Machines Corporation, s.f.)

Ilustración 13. Resultado Función Objetivo

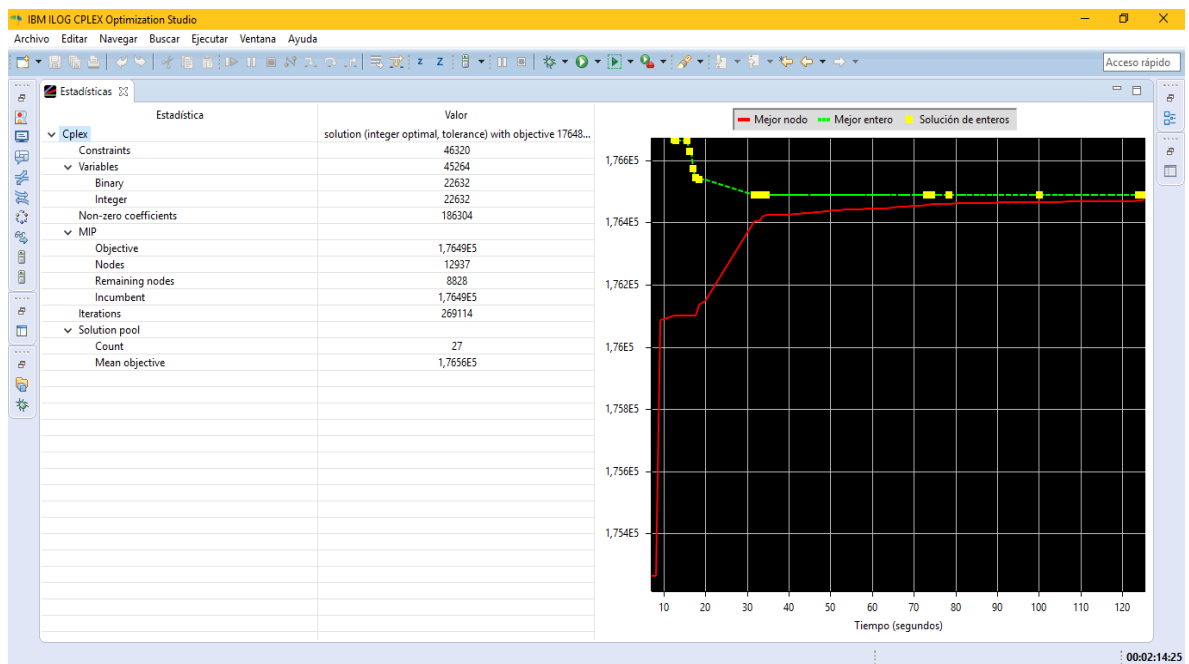


El resultado de Z a simple vista no representa nada, ya que, aún no se ha comparado con ningún otro valor. La verdadera relevancia del valor encontrado por medio del modelo de asignación de espacios de almacenamiento planteado en este trabajo se encuentra en el siguiente capítulo, capítulo 8 dentro del cual se validan los resultados del modelo.

Además, se calculó la utilización del espacio del almacén con los resultados del modelo y se encontró que es del 31,85%

Para finalizar este capítulo, se muestran resultados generales del software IBM ILOG CPLEX en la ilustración 14. El software solucionó el modelo en 00:02:14:25 (hh/mm/ss/ms), utilizando un computador Intel (R) Core (TM) i5-4210U CPU @1.70GHz 2.40 GHz, con una memoria RAM de 4,00 GB.

Ilustración 14. Resultados Generales del Software



El diagrama de la Ilustración 14 es llamado gráfico de progreso, esta muestra el proceso de resolución y los resultados como un gráfico. El eje vertical de este gráfico es el valor del objetivo, para este caso es el tiempo total de alistamiento de pedidos mensual, dado en segundos y el eje horizontal es el tiempo de resolución del modelo en segundos.

El gráfico de progreso muestra la variación del mejor nodo y de los mejores valores enteros y resalta los valores encontrados durante la búsqueda:

- La línea verde muestra la evolución del valor de mejor entero, es decir, el mejor valor del objetivo encontrado que también es un valor entero.
- La línea roja muestra la evolución del mejor valor de los restantes nodos abiertos (no necesariamente enteros) al pasar de un nodo a otro nodo. Esto da un límite en la solución final.
- El punto amarillo indica un nodo donde se ha encontrado un valor entero. Estos puntos generalmente corresponden a las estrellas (asteriscos) en el registro de motor.

(IBM International Business Machines Corporation, s.f.)

8.2. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Para la validación de los resultados se pondrán en discusión 3 escenarios de asignación de espacio; el primero de ellos, un escenario de la situación actual del almacén, el segundo, una distribución realizada de acuerdo al COI (Cube per Order Index o índice cubico por orden) y el tercero, la distribución arrojada por el modelo matemático. De modo que se compararan los dos parámetros definidos para determinar el mejor modelo; porcentaje de volumen disponible de acuerdo con las posiciones vacías, con este se hace referencia a que, en la medida que haya más posiciones vacías en el modelo habrá hecho una mejor utilización del espacio, pues se estarán utilizando una menor cantidad de posiciones para almacenar todos los productos y el segundo, la función objetivo, con la cual se analizará cuál de las distribuciones es la que minimiza el tiempo de las operaciones mensuales que tiene cada una de las referencias.

8.2.1. Distribución actual

La construcción de esta asignación se basó completamente en el trabajo de campo, pues para este se detalló cuáles eran los productos almacenados en cada una de las posiciones, de modo que esa información se resumiera en una tabla, como se aprecia en la Ilustración 15.

Ilustración 15. Tabla ubicación de productos (distribución actual)

Numeración	Ubicación	Pasillo	Modulo	Nivel	Referencia Actual	Operaciones Mensuales (OM)	Yd Cantidad de Producto Almacenado en	Volumen ocupado	Capacidad de Volumen	Volumen Disponible/Excedido	CANP Cantidad Total de Producto a Almacenar	Tiempo de Picking ubicación	Tiempo de Picking Mes
1	14	3	1	1	BOLSA ASEPTICA DE 95 GALONES NUEVA	1	21	2299584	2436000	156416	199	23,97825	2,530254899
2	16	3	1	1	BOLSA ASEPTICA THERMICA PEQUENA 1G	1	36	2143680	2436000	292320	89	25,384375	10,7045452
3	10	3	1	1	BOLSA ASEPTICA DE 95 GALONES NUEVA	1	21	2299584	2436000	156416	199	25,238625	2,86339724
4	16	3	1	1	BOLSA ASEPTICA THERMICA PEQUENA 1G	1	36	2143680	2436000	292320	89	28,444375	11,23957962
5	14	3	2	1	BOLSA ASEPTICA DE 95 GALONES NUEVA	1	21	2299584	2436000	156416	199	21,95625	2,23358447
6	16	3	2	1	BOLSA ASEPTICA DE 95 GALONES NUEVA	1	21	2299584	2436000	156416	199	22,57875	2,28195659
7	10	3	2	1	BOLSA ASEPTICA DE 95 GALONES NUEVA	1	21	2299584	2436000	156416	199	22,42625	2,268523241
8	16	3	2	1	BOLSA ASEPTICA DE 95 GALONES NUEVA	1	21	2299584	2436000	156416	199	23,81875	2,514521462
9	16	3	5	1	BOLSA PLASTICA PARA TAMBOR METALICO	2	24	164096	2436000	599504	60	23,97825	10,1025
10	14	3	5	1	BOLSA PLASTICA PARA TAMBOR METALICO	2	29	164096	2436000	599504	60	25,384375	16,32318617
11	16	3	5	1	BOLSA PLASTICA PARA TAMBOR METALICO	2	16	1227264	2436000	1208736	60	25,238625	15,46033333
12	10	3	5	1	BOLSA EN NYLON 12 LTS. P/SISTEMA B.I.B	2	11	1502520	2436000	933780	23	26,644375	25,48952381
13	16	3	4	1	BOLSA ASEPTICA DE 95 GALONES NUEVA	1	21	2299584	2436000	156416	199	21,95625	2,23358447
14	14	3	4	1	BOLSA EN NYLON 12 LTS. P/SISTEMA B.I.B	2	12	1639440	2436000	796560	23	23,851875	23,65126087
15	16	3	4	1	BOLSA ASEPTICA DE 95 GALONES NUEVA	1	21	2299584	2436000	156416	199	22,42625	2,268523241
16	10	3	4	1	BOLSA ASEPTICA DE 95 GALONES NUEVA	1	21	2299584	2436000	156416	199	23,11875	2,514521462
17	16	3	6	1	DISPLAY BOCADILLO LIGHT X10 UNDS UNIBW	2	1	40020	164000	1623880	1	23,97825	47,86625
18	14	3	6	1	ACIDO CITRICO ANHIDRO	509	22	627440	164000	836560	42	25,384375	6767,957887

Esta información se fue construyendo a lo largo de las visitas que se realizaron a la empresa y con la guía del operario encargado de la organización de los productos en el almacén.

Como se ve en la Ilustración 15, se detalla la ubicación, pasillo, modulo y nivel de cada una de las posiciones disponibles y la referencia allí almacenada. Se detalla el número de operaciones mensuales de la referencia y la cantidad de unidades almacenadas de la referencia en esa posición, de modo que se calcula fácilmente el volumen almacenado en la posición, multiplicando el volumen de la referencia por la cantidad almacenada.

Se calcula el volumen disponible, como la diferencia de la capacidad de volumen y el volumen ocupado.

Se detalla el CANP (Cantidad Promedio Almacenada), para cada una de las referencias y el tiempo de alistamiento de pedidos hasta la posición, de modo que, una vez recogidos estos datos se calcula el *tiempo de alistamiento de pedidos mes*, para cada una de las referencias, por medio de la ecuación de la función objetivo mostrada en la sección 7.1.4.

Por otro lado, para determinar el porcentaje de volumen disponible de acuerdo con las posiciones vacías, se suma la capacidad volumétrica de las posiciones vacías y se divide sobre la capacidad volumétrica total del almacén, de modo que entre mayor sea este valor, indicará que hay más posiciones libres disponibles indicando así que se necesitaron de menos posiciones para el almacenamiento de todos los productos.

En ese sentido, los resultados para esta configuración fueron los siguientes:

Tiempo de alistamiento de pedidos mes: 3408,89 min.

Porcentaje de volumen disponible de acuerdo con las posiciones vacías: 26,89%.

8.2.2. Distribución basada en el COI

Para realizar esta distribución, lo primero es calcular el COI para cada uno de los ítems que serán almacenados en el almacén, por medio de la Ecuación 11.

$$COI = \frac{\text{Volúmen promedio requerido para el almacenamiento del producto}}{\text{Número promedio de ordenes diarias donde aparece el producto}}$$

Ecuación 11. Cálculo del COI

El criterio es que, entre más bajo sea el COI para un producto, más cerca deberá estar de las puertas de despacho (para el caso de estudio la puerta de despacho y la de recepción es la misma), pues el objetivo de esta razón es balancear la carga del centro de distribución de modo que los mayores volúmenes de inventario se muevan la menor distancia posible.

De modo que, una vez hecho el cálculo, la asignación de espacios para cada uno de los productos queda a criterio propio, siguiendo las indicaciones teóricas, además de las restricciones ya mostradas en la sección 6.6.

Por lo tanto, se organizaron los diferentes productos en cada una de las ubicaciones disponibles, como podrá corroborar el lector en los anexos a este documento. Obteniendo así los siguientes resultados en las dos variables más importantes para el caso de estudio.

Tiempo de alistamiento de pedidos mes: 3408,89 min.

Porcentaje de volumen disponible de acuerdo con las posiciones vacías: 29,12%.

8.2.3. Distribución con base al modelo

Esta, no es más que el análisis de la distribución arrojada por el modelo desarrollado en la sección 7, de modo que se repite el mismo proceso visto anteriormente para determinar el valor de los parámetros/indicadores de interés, obteniendo así los siguientes resultados:

Tiempo de alistamiento de pedidos mes: 2941,453 min.

Porcentaje de volumen disponible de acuerdo con las posiciones vacías: 31,85%.

8.2.4. Comparación de las distribuciones

Ahora haciendo una comparación (véase Tabla 3) de los tres escenarios puestos en discusión, es fácil visualizar que la distribución dada por el modelo en ambos casos es la que ofrece las mejores prestaciones en cada uno de los parámetros/indicadores analizados.

Tabla 3. Comparación de distribuciones

Distribución	Tiempo de alistamiento de pedidos mes	Porcentaje de volumen disponible de acuerdo con las posiciones vacías
<i>Distribución actual</i>	3408,89 (min)	26,89%
<i>Distribución basada en el COI</i>	3116,23 (min)	29,12%
<i>Distribución en base al modelo</i>	2941,45 (min)	31,85%

Se aprecia como frente a la distribución actual, mejora el tiempo de alistamiento de pedidos mes en un 13,71% (con respecto a la distribución actual) y mejora en un 5,6% (con respecto a la distribución basada en el COI). Además, cabe destacar como mejora el volumen disponible, pues se ve como mejora en 4.9 puntos porcentuales, frente a la distribución actual y en 2.67 puntos porcentuales con respecto a la distribución basada en el COI, destacar que esto es un aspecto positivo, pues indica que el modelo requiere de una menor cantidad de posiciones para almacenar todos los productos, permitiendo así dejar más espacios libres, permitiendo mayor maniobrabilidad en caso de que lleguen nuevos productos.

Cabe resaltar que la mejora entre el modelo y la distribución basada en el COI es relativamente baja, lo que deja ver como por medio de herramientas relativamente simples se logra llegar a buenos resultados, aunque, claro está, por debajo de lo que llega a ofrecer los modelos de programación lineal que llegan a mejores resultados.

8.2.4.1. Distancias vs operaciones mensuales

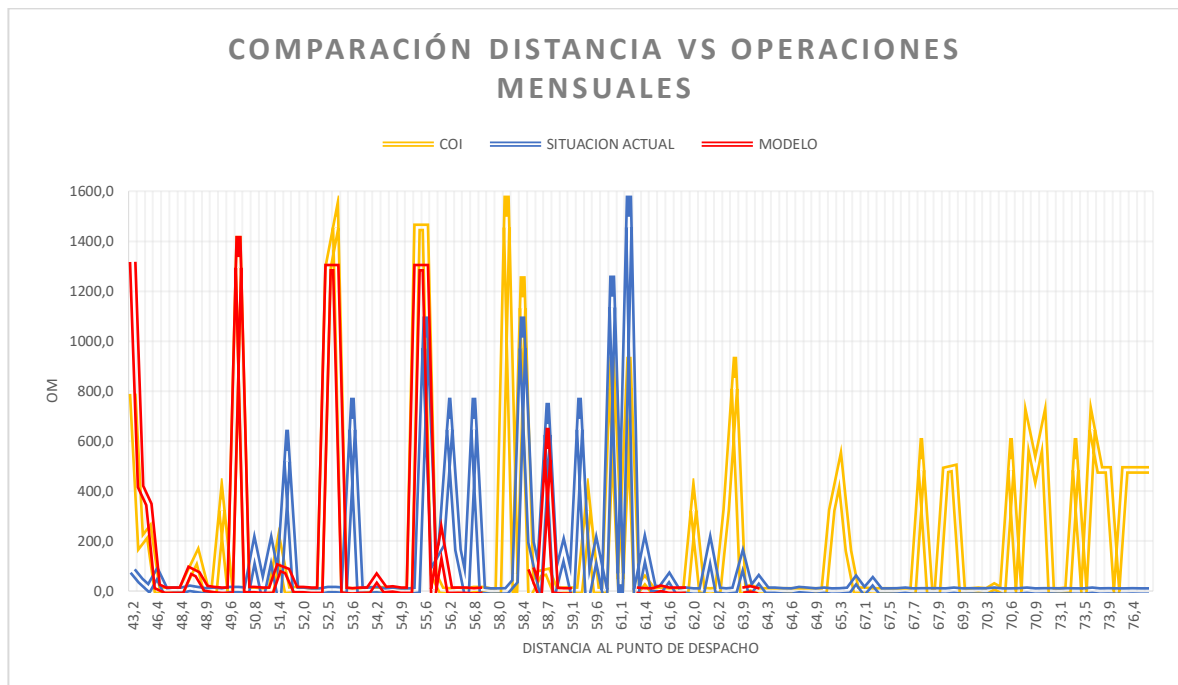
Una forma de analizar cómo está siendo la distribución en los diferentes escenarios, es comparar las distancias que se deben recorrer para recolectar cada una de las referencias en función del número de operaciones mensuales que esta posea, pues el lector en primera instancia podrá inferir que; entre más alto sea el número de operaciones mensuales de la referencia, más cerca debería estar esta del punto de recolección y es justamente esa premisa, la que se analizará en este apartado.

Para ello se compararán las diferentes distribuciones teniendo en cuenta todo el almacén de materias primas para ver que tal es el comportamiento global del mismo, frente a la hipótesis.

Aunque no es muy claro, en la Ilustración 16, se aprecia como el modelo hace que los ítems con un mayor movimiento estén más cerca del punto de recolección, ya que se aprecia como la mayoría de picos (productos con un alto número de operaciones mensuales), están ubicados a la izquierda de la gráfica, es decir, que se debe recorrer una menor distancia para llegar a ellos. Por su parte, la distribución basada en el COI sigue el mismo principio del modelo, aunque presenta variaciones

a lo largo del eje, debido el criterio de los autores al momento de asignar los productos a un espacio determinado finalmente la distribución de instante dado no sigue un criterio claro para almacenar los productos, pues se identifica claramente como los picos están distribuidos a lo largo del eje X y particularmente los productos con una mayor cantidad de operaciones mensuales asignados en las posiciones de recorrido medio, lo que claramente afecta y hace que aumente los tiempos de recolección de pedidos, como mostró en la sección 8.2.1

Ilustración 16. Comparación de los escenarios disponibles (todo el almacén)



8.2.5. Experimentos numéricos

En esta sección se realiza la variación de parámetros clave del modelo con el objetivo de ver el comportamiento del modelo y sus resultados, resultados tales como: la función objetivo y disponibilidad de espacio, los cuales son los más relevantes del modelo.

Los parámetros para variar son OM que son las operaciones de salida o extracción mensuales de cada referencia, sin embargo, también puede ser vista como la popularidad de la referencia, ya que, entre más movimientos tenga la referencia se puede decir que es más popular y CANP que es la cantidad de cada referencia a asignar, en otras secciones se discutió acerca de su cálculo.

Los análisis solo se hacen sobre estos dos parámetros, pues son los más relevantes a la hora de determinar la ubicación de cada uno de los productos, porque aunque desde la teoría de investigación de operaciones se indiquen que sea pertinente

hacer variaciones en los demás parámetros, para el caso de estudio analizado estos presentan muy poca variabilidad a lo largo del tiempo, por lo que, aunque los resultados que se pudieran llegar a obtener sean interesantes, estos no tendrían punto de comparación con el sistema real siendo así irrelevantes los resultados que se puedan obtener haciendo cambios en los demás parámetros.

Se muestra el cambio en los resultados variando los parámetros OM y CANP en:

- -30%, -20%, -10%, 10%, 20%, 30%.

Análisis parámetro OM

El parámetro OM se aumentó y disminuyó en 10%, 20% y 30% para observar el comportamiento del modelo como se planteó anteriormente. Los resultados de estas variaciones se encuentran en la Tabla 4. Y en las Ilustraciones 18 y 19. Los resultados de porcentajes de variación están dados con respecto al resultado actual del modelo.

Tabla 4. Resultados variación parámetro OM

Variaciones del Parámetro OM	Función Objetivo Z (Tiempo total Minutos)	Variación con respecto al resultado inicial de FO	% Espacio Disponible	Variación con respecto al resultado inicial de espacio	Tiempo de Solución	Variación Tiempo de Solución
-30%	2100,77	29%	23,7600%	25%	38,034	72%
-20%	2393,29	19%	25,7700%	19%	47,021	65%
-10%	2662,59	9%	29,5000%	7%	81,047	40%
Resultado Actual Modelo	2941,453	0%	31,8500%	0%	134,014	0%
10%	3205,81	-9%	35,6400%	12%	65,05	51%
20%	3477,32	-18%	37,7100%	18%	46,045	66%
30%	3756,12	-28%	40,8900%	28%	54,011	60%

Ilustración 17. Gráfico función objetivo vs variación parámetro OM

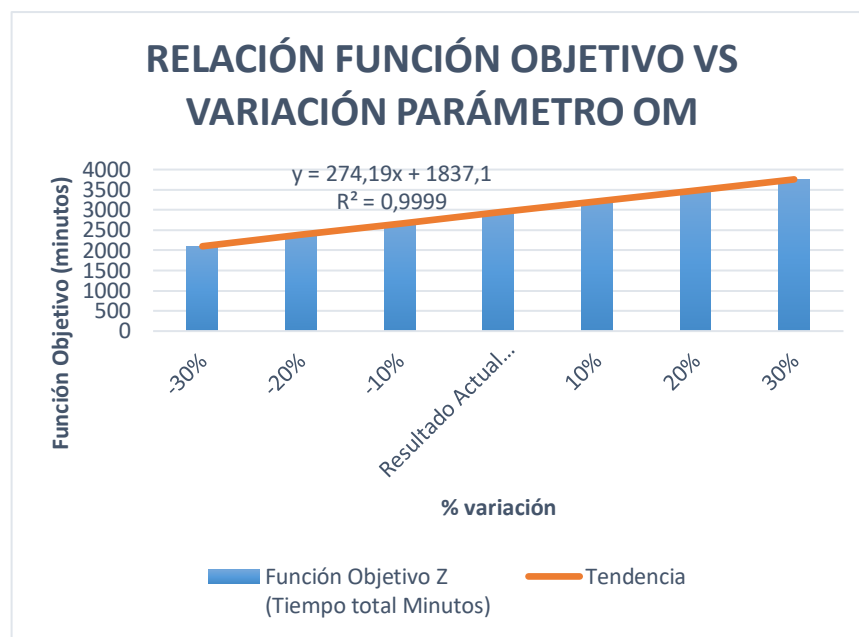
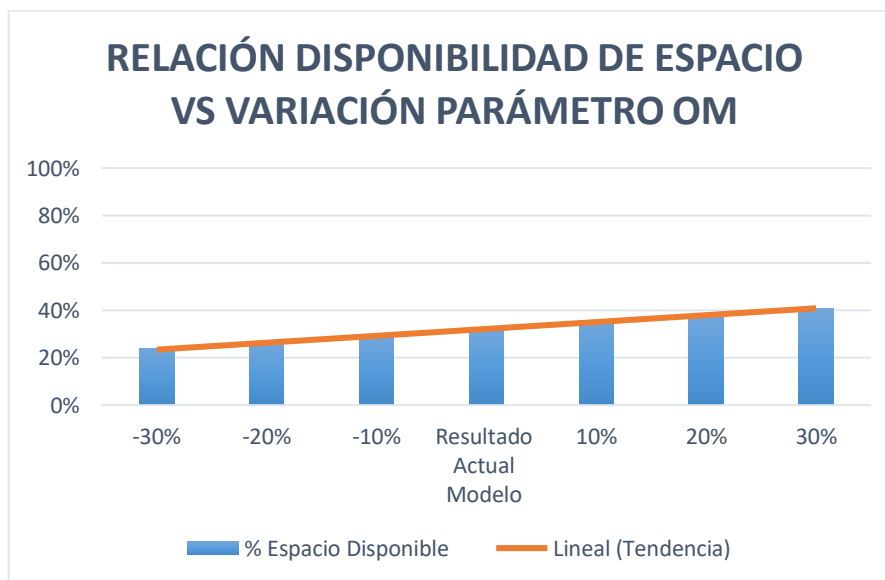


Ilustración 18. Gráfico disponibilidad de espacio vs variación parámetro OM



En las Ilustraciones 18 y 19, se observa claramente la tendencia de las variaciones. Por un lado, se tiene en la ilustración 18, la relación con respecto a la función objetivo; el parámetro OM está en cantidad de operaciones mensuales, es por esto, que intuitivamente se puede pensar que entre más operaciones haya, más tiempo se va a utilizar en el almacén. Por lo tanto, el análisis nos demuestra que esta

intuición es correcta, además de corroborar la funcionalidad del modelo. Así mismo se demuestra que la función objetivo es proporcional al parámetro OM, la gráfica muestra una ecuación lineal $y = 123,51x + 741,03$ con un $R^2 = 1$, lo cual indica que la ecuación encaja perfectamente en el comportamiento del parámetro OM.

Por otra parte, se tiene la ilustración 19 que muestra la variación en la disponibilidad de espacio cuando se varía el parámetro OM. Como era de esperarse, la disponibilidad de espacio cambia con la variación del parámetro OM, puesto que el aumento o disminución de operaciones afecta el criterio de espacio disponible ya que, cuando hay más o menos operaciones, el inventario aumenta o disminuye.

Análisis parámetro CANP

El parámetro CANP se aumentó en 10%, 20% y 22%, se disminuyó en 10%, 20% y 30% para observar el comportamiento del modelo como se planteó al inicio de esta sección. Los resultados de estas variaciones se encuentran en la Tabla 5. Y en las Ilustraciones 20 y 21. Los resultados de porcentajes de variación están dados con respecto al resultado actual del modelo.

Tabla 5. Resultados variación parámetro CANP

Variaciones del Parámetro CANP	Función Objetivo Z (Tiempo total Minutos)	Variación con respecto al resultado inicial de FO	% Espacio Disponible	Variación con respecto al resultado inicial de espacio
-30%	1206,7774	2%	44,8400%	41%
-20%	1213,6078	2%	40,8200%	28%
-10%	1222,33082	1%	35,8000%	13%
Resultado Actual Modelo	1235,05353	0%	31,7900%	0%
10%	1245,1618	-1%	28,1100%	-12%
20%	1268,06874	-3%	24,0900%	-24%
22%	1269,19532	-3%	23,4200%	-26%

Los resultados variando el parámetro CANP son aún más interesantes puesto que la capacidad del almacén no es infinita, entonces, llegará un punto en el cual no pueda aumentarse más la capacidad. Por tal razón, se pudo aumentar el parámetro hasta un 22%, ya que, más allá del 22% de aumento en el parámetro, el modelo no es factible.

En las Ilustraciones 20 y 21, se observa claramente la tendencia de las variaciones. Por un lado, se tiene en la ilustración 20, la relación con respecto a la función objetivo; se obtuvo que entre más espacio se ocupe, es decir, entre más se aumente el parámetro CANP, mayor es el tiempo de alistamiento (función objetivo), esto se debe a que entre más productos haya de una referencia, más difícil es obtener

espacios con menores tiempos de alistamiento. Así mismo, cuando hay menos productos de una referencia, es más fácil asignar espacios óptimos, disminuyendo así los tiempos de alistamiento y por lo tanto la función objetivo. La tendencia de esta relación se aproxima con la ecuación lineal $y = 11,393x + 1191,6$.

Por otra parte, se tiene la ilustración 21 que muestra la variación en la disponibilidad de espacio cuando se varía el parámetro CANP. Es lógico pensar que entre mayor sea el porcentaje en que el parámetro CANP se aumente, menor va a ser el espacio total disponible, de la misma manera, entre mayor sea el porcentaje en que se disminuya mayor va a ser el espacio total disponible. Lo anterior, se comprueba a través del análisis de sensibilidad; la Ilustración 21 confirma la suposición. La relación de la disponibilidad de espacio con la variación del parámetro CANP se ajusta considerablemente a la ecuación lineal $y = -0,0376x + 0,4775$, la pendiente negativa indica que es inversamente proporcional, como se discutió anteriormente, entre más se aumente el parámetro menos espacio disponible hay.

Para finalizar esta sección, es importante resaltar que aparte de las relaciones encontradas con respecto a los cambios de los parámetros, el análisis de sensibilidad comprueba la funcionalidad del modelo.

Ilustración 19. Gráfico función objetivo vs variación parámetro CANP

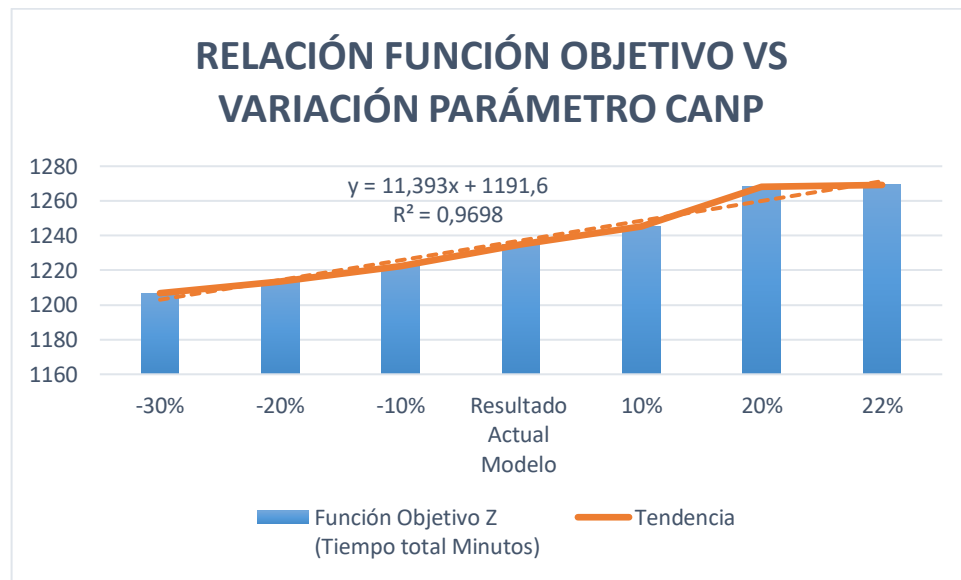
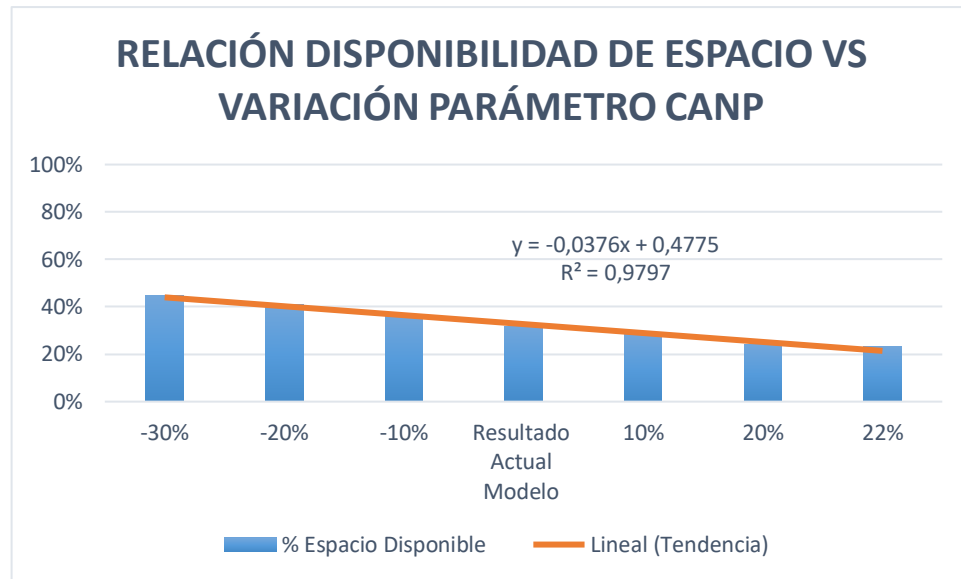


Ilustración 20. Gráfico disponibilidad de espacio vs variación parámetro CANP



9. CONCLUSIONES

Se estableció una política de almacenamiento dedicada para el caso de estudio, dado que, los objetivos de la organización son mantener una configuración única del almacén para crearlo dentro de SAP WMS y así conocer siempre la ubicación de cada referencia y la cantidad de cada una en cada posición. Otro tipo de política dificultaría estos objetivos dado el tipo de operación del almacén.

La operación principal, bajo la cual se desarrolló el proyecto es la de alistamiento de materiales, porque de acuerdo con la organización y observación por parte de los autores, es la más relevante, ya que, es la que tiene más dificultades en la operación y un retraso en la misma significa un retraso en todo el sistema de producción.

La distribución y manejo del almacén es adecuada para la industria alimentaria y por esto no se encontraron restricciones legales por implementar, sin embargo, las restricciones que se tuvieron en cuenta tienen que ver algunas con la salud y seguridad en el trabajado, operación del almacén e inocuidad del producto; estas restricciones son: La materia prima debe ir en el primer nivel, los bultos de azúcar en el último nivel, posiciones específicas para referencias de jugos y de dulces, espacios fijos para sal industrial, espacios fijos para referencias de alérgenos, dos referencias de material de empaque que deben almacenarse en el primer nivel, ya que, debido a sus características física, no se pueden almacenar en otro nivel. Todas estas restricciones se aplican con la matriz de compatibilidad de referencias con posiciones.

El modelo incluye 82 referencias de productos, 42 de material de empaque y 40 de materia prima, además, de tener a disposición 276 espacios de almacenamiento. Se tomaron las medidas y el peso de cada referencia, asimismo, las medidas de las posiciones. Las referencias son de diferentes figuras geométricas, por lo tanto, se asumieron como unidades cubicas para simplificar el problema.

Para la asignación de espacios de almacenamiento, se utilizó un modelo de programación lineal entera mixta (MILP), el cual minimiza el tiempo total mensual de alistamiento de materiales, a través de la popularidad de cada referencia (cantidad de operaciones de salida del almacén) y la cantidad a asignar de cada referencia. El modelo tiene restricciones de asignación, capacidad y disponibilidad de productos; además, una variable entera y otra binaria.

El modelo se programó en el software IBM ILOG CPLEX versión 12.8 Optimization Studio, mediante lenguaje OPL. Se utilizaron funciones en las hojas de datos como SheetConnection, from SheetRead y to SheetWrite; para conectar los datos del modelo desde una hoja de Excel y escribir los resultados de este en una hoja de Excel.

Los resultados obtenidos indican que el modelo mejoró con respecto a los escenarios puestos a comparación, más en la distribución actual que en la basada en el COI, mostrando que reduce los tiempos de alistamiento de pedidos de 3408 minutos en la distribución actual, hasta 2941 minutos, mejorando así en más de 13% para este rubro. De igual forma cabe destacar, que el modelo mejora la utilización del almacén, pues requiere de una menor cantidad de posiciones para almacenar todos los productos, dejando así una mayor cantidad de posiciones vacías que permite un mayor margen de maniobra ante un aumento súbito de la cantidad de productos a almacenar o ante la llegada de nuevos productos, esta mejora con respecto al modelo actual es aproximadamente del 5%. Cabe resaltar que la mejora entre el modelo y la distribución basada en el COI es relativamente baja (5,6% en tiempo y 2,67% en espacio), lo que deja ver como por medio de herramientas relativamente simples se logra llegar a buenos resultados.

Por otra parte, cabe destacar que el principio de organización que utiliza el modelo es el de dejar los productos con una mayor cantidad de operaciones mensuales cerca del punto de recolección a fin de reducir la distancia necesaria para acceder a ello y con esto, disminuir los tiempos de alistamiento de pedidos de estas referencias.

Frente los experimentos numéricos, hay que destacar los cambios que se presentan en función de la variable de interés que se esté afectando. Por un lado, cuando se afecta el número de operaciones mensuales, se muestra claramente como los tiempos de la función objetivo aumentan o decrecen según lo haga la variable, así mismo, el parámetro de disponibilidad de espacio del almacén varía de acuerdo a la cantidad de movimiento que haya en el almacén y cuando el parámetro que se somete a variación es la cantidad promedio a mantener en almacén, pues aunque la función objetivo presenta leves variaciones dependiendo de lo que suceda con el parámetro variado, es en la utilización del espacio donde se ve claramente cómo afecta los cambios de valor de CANP, pues se identifica claramente como el espacio disponible aumenta o disminuye en proporción a lo que suceda con el parámetro CANP.

Finalmente a manera de conclusión general, destacar la aplicación de los conocimientos adquiridos a lo largo de la experiencia universitaria y en este sentido, centralizarlos hacia un eje específico (en este caso, la programación lineal), mostrando así el amplio campo de acción que posee la ingeniería industrial para atacar problemas de este estilo y problemas afines, de igual forma dejando la puerta abierta ante futuras investigaciones que surjan a partir del desarrollo de este documento y que busquen profundizar y afianzar más los conocimientos en esta área.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Ballou, R. H. (2004). *Logística. Administración de la cadena de suministro*. Atlacomulco: Person Educación .
- Bartholdi, J. J., & Hackman, S. T. (2017). *Warehouse & Distribution Science*. Atlanta: Libro académico .
- Chuang, Y. f., Lee, H. T., & Lai, Y. C. (2012). Item-associated cluster assignment model on storage allocation problems. *Elsevier*, 1171-1177.
- Guerriero, F., Musmanno, R., Pisacane, O., & Rende, F. (2012). A mathematical model for the Multi-Levels Product Allocation Problem. *Elsevier*, 4385-4398.
- Guerriero, F., Pisacane, O., & Rende, F. (2015). Comparing heuristics for the product allocation problem in multi-level warehouses under compatibility constraints. *Elsevier*, 7375–7389.
- Hausman, W. h., Schwarz, L. B., & Graves, S. C. (1976). Optimal storage assignment in automatic warehousing systems. *Management Science*, 629-638.
- IBM International Business Machines Corporation. (s.f.). *ibm*. Obtenido de https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/SSSA5P_12.8.0/ilog.odm.s.ide.help/OPL_Studio/usroplide/topics/opl_ide_stats_MP_examprog.html
- Kappauf, J., Lauterbach , B., & Koch, M. (2012). *Logistics Core Operations with SAP*. Verlag-Berlin-Heidelberg: Springer .
- Mirabelli, G., Pizzuti, T., & Laganà, D. (2013). Adaptation of the Multi-Layer Allocation Problem for Warehouse Layout Optimization: a Case Study. *The 7th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications* (págs. 167-172). Berlin: IEEE.
- Muppani, V. R., & Adil, G. K. (2007). A branch and bound algorithm for class based storage location assignment. *Elsevier*, 492–507.
- Muppani, V. R., & Adil, G. K. (2007). Efficient formation of storage classes for warehouse storage location assignment: A simulated annealing approach. *Elsevier*, 609 – 618.
- Norén , P., & Eriksson, J. (2011). A heuristic algorithm for space allocation in a pallet storage warehouse. En P. Norén , & J. Eriksson, *Lagerstyrning och materialhantering inom Kraft Foods chokladtillverkning*. Lund: Students papers .

- Rojas Reyes, J. J., Solano Charris, E. L., & Montoya Torres, J. R. (2019). The storage location assignment problem: A literature review . *International Journal of Industrial Engineering Computations* .
- Ross, D. F. (2015). *Distribution Planning and Control: Managing in the Era of Supply Chain Management*. New York : Springer.
- Sanei, O., Nasiri, V., Marjani, M. R., & Hussein, S. M. (2011). A heuristic algorithm for the warehouse space assignment problem considering operational constraints: with application in a case study. *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, (págs. 258-264). Kuala Lumpur .
- Van den Berg, J. P. (1996). Class-Based Storage Allocation in a Single-Command Warehouse with Space Requirement Constraints. *International Journal of Industrial Engineering*, 21-28.
- Van den Berg, J. P., & Zijm, W. H. (1999). Models for warehouse management: Classification and examples. *Elsevier*, 519-528.