



FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL

**Rediseño del Calendario de Recepción de Pedidos del Centro de  
Distribución 6003 de Walmart Chile**

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la  
Ingeniería y al Título de Ingeniero Civil Industrial

**Alexander Thomas Toledo Barraza**

Prof. Guía: Dr. Filadelfo de Mateo

Julio, 2025

## Agradecimientos

*Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que, de una u otra forma, me ayudaron a llegar a donde estoy y a ser quien soy.*

*En primer lugar, agradezco a mi pareja Francisca Castillo. Fuiste mi motivación, mi compañera de trabajos y la única persona que siempre estuvo en mis peores momentos. Me ayudaste cuando más lo necesitaba y nunca me dejaste de lado, a pesar de que tú también tenías tus propias batallas. Supiste entenderme tal como soy, me aceptaste con mis defectos y virtudes, y me entregaste un amor verdaderamente incondicional y desinteresado, sin peros ni condiciones. Sin ti, este camino habría sido muchísimo más difícil. No me permitiste rendirme cuando ya no quería seguir, me diste tu apoyo y fuiste mi luz cuando el miedo me superaba.*

*Agradezco también a cada uno de mis compañeros que me ayudaron en algún momento, con quienes trabajé o compartí, aunque haya sido solo una conversación. Todos, de alguna forma, aportaron a mi formación como persona y me permitieron llegar hasta aquí. Siempre los recordaré, y no tengan dudas de que estaré para ustedes cuando me necesiten.*

*Gracias al equipo de Walmart Chile, quienes me brindaron un ambiente propicio para aprender y me permitieron desarrollar este gran proyecto. En especial a Ignacio Toledo: no eras mi tutor, y aún así trabajaste junto a mí, guiándome y corrigiéndome cuando lo necesité. También a José Pinto, mi compañero de práctica: entramos como desconocidos y nos fuimos como amigos.*

*Gracias por tu apoyo y por compartir tus conocimientos para que este proyecto pudiera concretarse.*

*Finalmente, a mi familia, por permitirme estudiar y alcanzar mis metas sin mayores preocupaciones. Gracias por el amor, el apoyo y el cariño constante que me brindaron en este viaje, sé que ese apoyo será igual o incluso mayor en lo que viene.*

*Alexander Thomas Toledo Barraza.*

## Resumen Ejecutivo

En el contexto logístico del retail chileno, la eficiencia de los centros de distribución es clave para garantizar la disponibilidad de productos y mejorar el desempeño operativo. Este proyecto se desarrolla en el Centro de Distribución 6003 de Walmart Chile, ubicado en Antofagasta, el cual enfrenta una alta variabilidad en la recepción diaria de productos. Esta condición genera sobrecargas operativas, subutilización de recursos y afecta negativamente indicadores como el OTIF y el Fill Rate.

Para abordar este problema, se propone el rediseño del calendario de recepción semanal mediante la implementación de un algoritmo heurístico programado en Python, basado en la técnica de recocido simulado. La metodología empleada permite redistribuir los días de recepción de productos, manteniendo restricciones operativas y comerciales del centro, con el objetivo de minimizar la varianza diaria del volumen recibido.

Los resultados obtenidos muestran una mejora significativa en la distribución semanal de las recepciones, evidenciada por la reducción en la desviación estándar diaria de cajas recibidas. Esta propuesta contribuye a mejorar la eficiencia operativa del centro, optimiza el uso de recursos logísticos y constituye una solución escalable para otros centros de distribución de la compañía.

**Palabras clave:** logística, variabilidad, recocido simulado, heurística, optimización, distribución, centros logísticos.

## Abstract

In the logistics context of the Chilean retail sector, distribution center efficiency is critical to ensuring product availability and improving operational performance. This project focuses on Distribution Center 6003 of Walmart Chile, located in Antofagasta, which experiences high daily variability in product reception. This leads to operational overloads, underutilization of resources, and negatively impacts key performance indicators such as OTIF and Fill Rate.

To address this issue, the weekly reception calendar is redesigned through the implementation of a heuristic algorithm developed in Python, based on the simulated annealing technique. The methodology allows for the redistribution of product reception days while maintaining the center's operational and commercial constraints, aiming to minimize the daily variance in received volume.

The results show a significant improvement in the weekly distribution of product receptions, as evidenced by the reduction in the daily standard deviation of received boxes. This proposal enhances the center's operational efficiency, optimizes the use of logistics resources, and offers a scalable solution for other distribution centers within the company.

**Keywords:** logistics, variability, simulated annealing, heuristic, optimization, distribution, warehouse operations.

# Índice

Índice.....	5
Introducción .....	8
Capítulo 1: Descripción de la Organización .....	9
1.1    Historia.....	9
1.2    Misión y Visión.....	9
1.2.1    Misión. ....	9
1.2.2    Visión. ....	9
1.3    Valores.....	10
1.4    Objetivos.....	10
1.5    Lugar del Proyecto.....	10
1.6    Estructura Organizacional.....	11
1.7    Descripción del Centro de Distribución 6003.....	12
1.8    Cierre del Capítulo 1 .....	13
Capítulo 2: Situación Actual .....	14
2.1    Contextualización del problema operativo .....	14
2.2    Análisis de la situación actual del proceso de recepción .....	14
2.3    Diagnóstico de la variabilidad operativa.....	17
2.4    Consecuencias sobre los indicadores de desempeño .....	17
2.5    Cierre de Capítulo 2 .....	18
Capítulo 3: Marco Teórico .....	20
3.1    Fundamentos de la logística en centros de distribución.....	20
3.1.1    El centro de distribución y su rol en la cadena de suministro.....	20
3.1.2    La importancia de una recepción equilibrada de productos.....	21
3.1.3    La automatización y las tecnologías aplicadas a la recepción de productos.....	22

3.1.4	Problemas derivados de una mala distribución de recepciones. ....	24
3.2	Variabilidad en la recepción de productos .....	25
3.2.1	La variabilidad y su impacto en las operaciones logísticas. ....	25
3.2.2	Medidas estadísticas de dispersión: varianza y desviación estándar. ....	26
3.2.3	La importancia de reducir la variabilidad. ....	27
3.3	Optimización aplicada a la logística .....	28
3.3.1	Concepto de optimización en logística. ....	28
3.3.2	Optimización combinatoria y planificación de calendarios logísticos. ....	29
3.3.3	El balanceo de cargas en operaciones logísticas. ....	30
3.3.4	La minimización de la varianza como criterio de optimización. ....	31
3.4	Algoritmos heurísticos y su uso en programación.....	32
3.4.1	Concepto de heurística en programación.....	32
3.4.2	Estrategias de búsqueda local aplicadas a la programación logística. ....	32
3.4.3	Ventajas y limitaciones de los algoritmos heurísticos en logística. ....	34
3.5	Python como herramienta para la optimización logística .....	35
3.5.1	Ventajas de utilizar Python en la optimización logística. ....	35
3.5.2	Principales librerías de Python aplicadas a la logística. ....	35
3.5.3	Aplicaciones de Python en la optimización de procesos logísticos.....	36
Capítulo 4:	Metodología .....	37
4.1	Enfoque metodológico general .....	37
4.1.1	Consideraciones específicas del CD 6003 .....	38
4.2	Formulación del modelo y lógica de optimización.....	38
4.2.1	Formulación del problema .....	38
4.2.2	Lógica operativa del algoritmo .....	40
4.2.3	Justificación del enfoque metodológico.....	40

4.2.4	Factibilidad computacional y herramientas utilizadas .....	41
4.3	Diseño del algoritmo de redistribución.....	42
4.3.1	Estructura y funciones principales del algoritmo.....	43
4.3.2	Resultados obtenidos .....	43
4.4	Implementación computacional del modelo .....	44
4.4.1	Extracción y preparación de datos .....	44
4.4.2	Aplicación del algoritmo de recocido simulado .....	45
4.4.3	Ejecución y resultados del algoritmo.....	45
4.4.4	Generación de entregable.....	46
Capítulo 5: Resultados .....		47
5.1	Comparación antes y después .....	47
5.2	Impacto en la variabilidad diaria.....	49
5.3	Análisis e implicancias operativas .....	50
Conclusiones.....		51
Referencias.....		52

## Introducción

En el contexto actual de la logística y distribución en el sector retail, la eficiencia operativa de los centros de distribución se ha convertido en un factor clave para garantizar la disponibilidad de productos en tienda, mejorar el uso de los recursos disponibles y mejorar la satisfacción del cliente final. Walmart Chile, como líder del mercado nacional, enfrenta el desafío constante de mantener altos estándares de eficiencia en su red logística, particularmente en centros de distribución estratégicos como el CD 6003 ubicado en Antofagasta.

Uno de los procesos críticos dentro de estos centros es la recepción de productos, etapa inicial que impacta directamente en la planificación de inventarios, la utilización de recursos humanos y físicos, y el cumplimiento de los principales indicadores de desempeño logístico. Sin embargo, en el Centro de Distribución 6003 se ha detectado una alta variabilidad diaria en el volumen de cajas recibidas, lo que genera sobrecargas de trabajo, subutilización de capacidades en algunos días y riesgos operativos que comprometen la eficiencia del sistema.

Ante esta situación, el presente proyecto tiene como objetivo rediseñar el calendario de recepción de productos mediante el desarrollo e implementación de un algoritmo heurístico, programado en Python, que permita redistribuir las recepciones de manera equilibrada a lo largo de la semana. Se busca con ello reducir la variabilidad diaria de carga, mejorar el uso de recursos y el desempeño logístico del centro.

Para sustentar esta propuesta, se realiza un análisis detallado de la situación actual, un diagnóstico de la variabilidad operativa y una revisión teórica de conceptos relevantes como la optimización logística, la variabilidad de procesos y el uso de algoritmos heurísticos. La metodología desarrollada permite evaluar el impacto del nuevo calendario sobre los principales indicadores de desempeño del centro, contribuyendo a la mejora continua de las operaciones logísticas de Walmart Chile.

De esta manera, el proyecto no solo responde a una necesidad operativa específica, sino que también busca aportar una solución replicable y escalable para otros centros de distribución de la compañía a nivel nacional.

# Capítulo 1: Descripción de la Organización

## 1.1 Historia

Walmart fue fundado en 1962 por Sam Walton en Rogers, Arkansas (EE. UU.), con la misión de ofrecer precios bajos todos los días. Con el paso del tiempo, se consolidó como la cadena de retail más grande del mundo, expandiéndose a múltiples países y destacando por su enfoque en eficiencia operativa, adopción tecnológica y una estrategia multiformato que incluye tiendas físicas, comercio electrónico y clubes de precios.

Walmart Chile S.A., filial de Wal-Mart Stores Inc., inició sus operaciones en el país en 2009 tras la adquisición de una participación mayoritaria en la empresa nacional Distribución y Servicio D&S. Desde entonces, ha implementado una estrategia multiformato y omnicanal, operando con cuatro formatos principales: Líder, Express de Líder, SuperBodega aCuenta y Central Mayorista, totalizando 399 tiendas distribuidas desde Arica hasta Punta Arenas. Además, cuenta con tres canales digitales (Líder App, Líder.cl y aCuenta.cl) y más de 40.000 colaboradores, lo que la posiciona como el principal empleador del país.

## 1.2 Misión y Visión

La cultura organizacional es uno de los principales elementos que diferencia a Walmart Chile, definida internamente como el ADN Walmart Chile, un sello que los identifica y los hace únicos. Este ADN representa su forma de trabajar, de relacionarse como equipo, de servir a los clientes y de transformar continuamente el negocio. Todo esto se realiza manteniendo firme y vivo su propósito: *“Ahorrarle tiempo y dinero a sus clientes, para que puedan vivir mejor.”*

### 1.2.1 Misión.

*“Ahorrarle tiempo y dinero a nuestros clientes, para que puedan vivir mejor.”* Con esto se refieren a “Proporcionar a nuestros clientes ahorro de tiempo gracias a nuestra propuesta omnicanal.”, “Entregarles herramientas y servicios financieros” y “Realizar acciones que fortalezcan a las personas, las comunidades y a nuestro planeta.”

### 1.2.2 Visión.

*“Ser la empresa de ventas al por menor preferida por los consumidores.”*

## 1.3 Valores

En Walmart Chile la forma de hacer las cosas es guiada por medio de cuatro valores, con los cuales les permite crear confianza, construir un entorno correcto para los equipos de trabajo y generar éxito.

- **Búsqueda de la Excelencia:** Los colaboradores trabajan como equipo entregando su mejor versión y representan ejemplos positivos a medida.
- **Respeto por las Personas:** Todos los colaboradores son valorados, cada uno se hace responsable del trabajo que desarrolla y se practica la comunicación mediante la escucha activa y compartiendo.
- **Actuar con Integridad:** Se actúa con el nivel más alto de integridad, siendo honestos, justos e imparciales, mientras se trabaja cumpliendo todas las leyes y las políticas de la empresa.
- **Servicio al Cliente:** La compañía está para servir a sus clientes, apoyarse entre colaboradores y aportar a las comunidades locales.

## 1.4 Objetivos

### Objetivo General

Rediseñar el calendario de recepción de productos del Centro de Distribución 6003 de Walmart Chile, mediante la implementación de un algoritmo heurístico, con el propósito de reducir la variabilidad diaria de cajas recibidas y mejorar la eficiencia operativa del centro.

### Objetivos Específicos

- Medir el nivel de variabilidad diaria en la recepción de productos y su impacto en la operación logística.
- Diseñar una metodología basada en técnicas heurísticas para redistribuir los días de recepción de proveedores.
- Desarrollar el modelo de redistribución utilizando herramientas de programación en Python.

## 1.5 Lugar del Proyecto

El presente proyecto se desarrolla en el Centro de Distribución 6003 de Walmart Chile, ubicado en la ciudad de Antofagasta. Este centro de distribución forma parte de la red logística

nacional de Walmart, que abastece a diversas tiendas de formato SuperBodega aCuenta y Líder en la zona norte del país.

El CD 6003 se especializa en la recepción, almacenamiento y despacho de productos secos, desempeñando un rol estratégico en la continuidad operativa de las tiendas en su cargo. Su actividad logística está orientada a mantener altos niveles de disponibilidad de productos, asegurando la reposición oportuna y eficiente hacia los puntos de venta.

El proyecto se enfoca en el proceso de recepción de mercaderías, considerando la alta variabilidad observada en el volumen diario de cajas recibidas, y busca proponer una mejora en la programación de las recepciones, con el fin de mejorar la utilización de recursos, reducir los desbalances de carga operativa y fortalecer el cumplimiento de los indicadores de desempeño logístico.

## **1.6 Estructura Organizacional**

Walmart Chile presenta una estructura organizacional jerárquica que permite una gestión eficiente de sus operaciones a nivel nacional. En la cúspide se encuentra el gerente general (CEO), responsable de liderar la estrategia global de la compañía y supervisar todas las áreas funcionales.

Bajo su liderazgo, la organización se divide en diversas gerencias que abarcan funciones clave como:

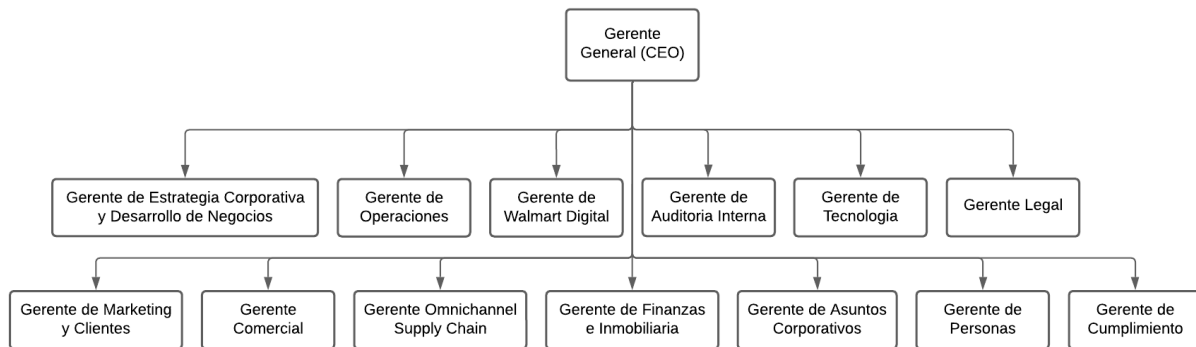
- Estrategia Corporativa y Desarrollo de Negocios: Define y lidera la estrategia de crecimiento de la empresa y nuevos negocios.
- Marketing y Clientes: Desarrolla estrategias de comunicación, marketing y experiencia del cliente.
- Comercial: Gestiona las categorías de productos y las relaciones con proveedores.
- Operaciones: Supervisa las operaciones diarias de tiendas y centros de distribución.
- Walmart Digital: Lidera las plataformas de venta online y la transformación digital.
- Auditoría Interna: Evalúa la eficacia de los controles internos y los procesos de riesgo.
- Tecnología: Gestiona los sistemas de información y las soluciones tecnológicas de la compañía.
- Legal: Asegura el cumplimiento normativo y gestiona asuntos legales corporativos.
- Omnichannel Supply Chain: Coordina la cadena de suministro para todos los canales de venta (físico y digital).

- Finanzas e Inmobiliaria: Administra los recursos financieros y los activos inmobiliarios de la empresa.
- Asuntos Corporativos: Maneja las relaciones institucionales, comunicación externa y responsabilidad social.
- Personas: Gestiona el capital humano, el desarrollo organizacional y el clima laboral.
- Cumplimiento: Asegura la implementación de políticas éticas y de cumplimiento interno.

Esta estructura organizacional le permite a Walmart Chile operar de manera eficiente, integrando las áreas estratégicas necesarias para su sostenibilidad y crecimiento en el mercado.

A continuación, se presenta la representación gráfica de la estructura organizacional:

**Figura 1: Estructura Organizacional de Walmart Chile.**



**Fuente:** Elaboración propia, a partir de la información entregada por la empresa.

## 1.7 Descripción del Centro de Distribución 6003

El Centro de Distribución 6003, ubicado en la ciudad de Antofagasta, es una instalación estratégica dentro de la red logística de Walmart Chile. Su principal función es abastecer a las tiendas ubicadas en la zona norte del país, más específicamente las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama, en los formatos de Líder, SuperBodega aCuenta y Express de Líder, garantizando la disponibilidad de productos para los clientes de la zona.

Este centro opera principalmente con productos secos, administrando el proceso completo de recepción, almacenamiento, preparación de pedidos y despacho hacia las tiendas. Aunque su infraestructura es moderna y adaptada a las necesidades logísticas de la región, el CD 6003 se caracteriza por ser de menor tamaño en comparación con otros centros de distribución de la compañía a nivel nacional. Esta característica lo convierte en un entorno propicio para la

implementación de proyectos piloto de mejora operativa, permitiendo evaluar el impacto de nuevas metodologías en un ambiente controlado antes de una posible expansión a otras unidades de mayor escala.

En su operación diaria, el centro trabaja seis días a la semana, ya que no se realizan recepciones los días domingo. Además, presenta una restricción operativa los días sábado, ya que dispone de aproximadamente un 60% de la dotación habitual de personal, debido a las políticas de turnos de la empresa.

El flujo de productos hacia el CD se organiza mediante una planificación de compras semanal, coordinada entre los analistas de reabastecimiento y los proveedores. Aunque este proceso busca optimizar la disponibilidad de productos en tiendas, actualmente enfrenta desafíos relacionados con la concentración de recepciones en determinados días de la semana, generando alta variabilidad en las cargas de trabajo diarias.

Por estas razones, el Centro de Distribución 6003 ha sido seleccionado como caso de estudio para el presente proyecto, enfocado en rediseñar el calendario de recepciones para mejorar la eficiencia operativa y reducir la variabilidad en la carga de trabajo.

## **1.8 Cierre del Capítulo 1**

La información presentada en este capítulo proporciona el contexto organizacional y logístico en el cual se desarrolla el proyecto de rediseño del calendario de recepciones del Centro de Distribución 6003 de Walmart Chile. Conociendo la historia, misión, visión, valores, estructura organizacional y características operativas del centro, es posible comprender la importancia estratégica que tiene la eficiencia logística para la compañía.

En el siguiente capítulo, se analiza en detalle la situación actual del proceso de recepción de productos, diagnosticando los principales problemas que justifican la necesidad de intervención y mejora.

## **Capítulo 2: Situación Actual**

### **2.1 Contextualización del problema operativo**

La eficiencia logística en los centros de distribución (CD) es un factor crítico para el éxito de las operaciones de Walmart Chile, especialmente considerando el volumen de productos que deben ser gestionados diariamente. Dentro de este contexto, el proceso de reabastecimiento de los CD representa un desafío clave, ya que involucra la coordinación entre múltiples actores internos y externos para asegurar la disponibilidad de productos en tiendas, sin generar sobrecostos o ineficiencias operativas.

Walmart Chile implementa un programa de colaboración con proveedores conocido como CPFR (Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment), el cual busca mejorar la planificación y el abastecimiento mediante acuerdos de colaboración. A través de este programa, se establecen reuniones periódicas entre analistas de reabastecimiento de Walmart y representantes de los proveedores, donde se discuten proyecciones de demanda, necesidades de stock y programación de entregas hacia los centros de distribución.

Sin embargo, a pesar de estos esfuerzos de coordinación, persisten problemas operativos relevantes, particularmente en la planificación de la recepción de productos en los CD. Una gestión ineficiente de las recepciones puede derivar en un uso subóptimo de los recursos disponibles — como espacio de almacenamiento, personal y equipos de manipulación— afectando directamente la capacidad del centro para cumplir con los indicadores de desempeño logístico establecidos.

En este marco, el presente proyecto se enfoca en analizar y mejorar el proceso de recepción de productos en el Centro de Distribución 6003, buscando reducir la alta variabilidad diaria en el volumen de cajas recibidas, que actualmente genera sobrecargas de trabajo, ineficiencias y riesgos operativos.

### **2.2 Análisis de la situación actual del proceso de recepción**

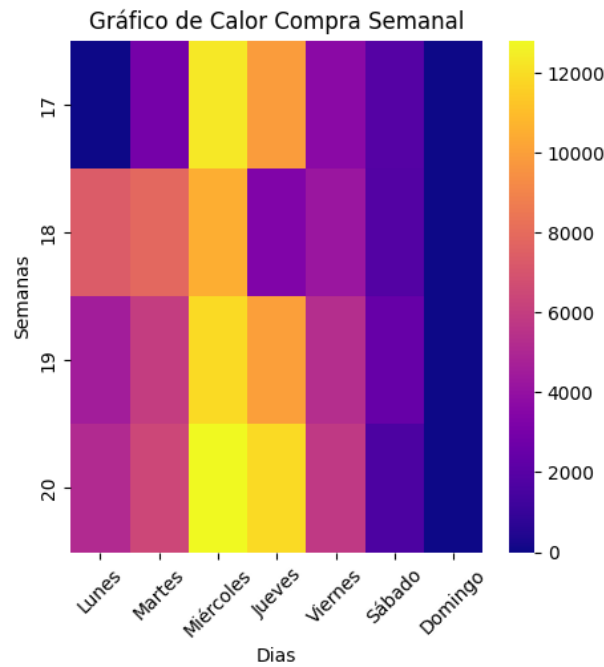
Actualmente, la planificación de las compras semanales en Walmart Chile tiene como objetivo principal asegurar una alta disponibilidad de productos en los centros de distribución, a fin de mantener abastecidas las tiendas y garantizar una experiencia de compra satisfactoria para los clientes. Esta planificación es llevada a cabo por los analistas de reabastecimiento, quienes

negocian directamente con los proveedores las fechas de entrega de los productos, buscando acuerdos que resulten convenientes para ambas partes.

Sin embargo, estas negociaciones, pese a sus buenas intenciones, han generado consecuencias no deseadas en la distribución de las recepciones a lo largo de la semana. En particular, se observa una fuerte concentración de compras algunos días, mientras que los otros días presentan niveles más moderados.

La Figura 2 presenta un mapa de calor correspondiente a la planificación de compras en la semana 17 para las siguientes 4 semanas, donde se evidencia la concentración de cajas a comprar en días específicos.

**Figura 2:** Mapa de calor de la planificación de compra semanal.

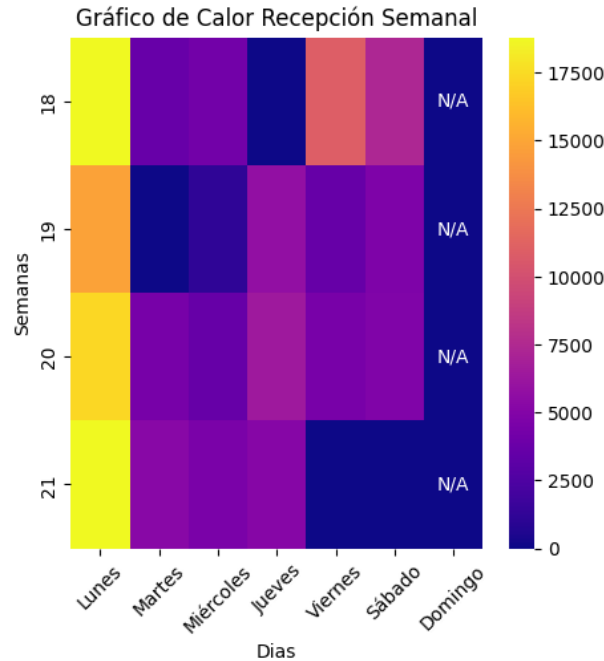


**Fuente:** Elaboración propia, a partir de los datos entregados por la empresa.

Esta tendencia de concentrar las compras a mitad de semana responde principalmente al intento de mejorar ciertos indicadores clave de desempeño (KPIs) de los productos en tienda, tales como la disponibilidad (Instock) y el fill rate. Sin embargo, como efecto colateral, se ha generado una sobrecarga de trabajo en los días de mayor recepción, afectando la eficiencia operativa del centro de distribución.

Por otro lado, analizando los datos de recepción se puede evidenciar como en algunos días se recibe una alta cantidad de cajas, mientras que en otros se ve una cantidad muy baja. Esta situación se ilustra en la Figura 3, donde se presenta el mapa de calor de la planificación en la semana 17 para las próximas 4 semanas, donde se evidencia la concentración de cajas a recibir en días específicos.

**Figura 3:** Mapa de calor de la planificación de recepción semanal.



**Fuente:** Elaboración propia, a partir de los datos entregados por la empresa.

Además, el proceso operativo enfrenta limitaciones estructurales: los centros de distribución de Walmart Chile no reciben productos los días domingo, reduciendo el margen de flexibilidad a solo seis días semanales. A ello se suma que los sábados la dotación de personal disponible corresponde aproximadamente al 60% de la capacidad habitual de otros días laborales, lo que limita aún más la posibilidad de equilibrar las cargas de trabajo de manera eficiente.

En resumen, el análisis de la situación actual muestra una concentración de recepciones en determinados días, una baja utilización en otros, y restricciones operativas que complican aún más el balance de cargas, configurando un escenario logístico subóptimo que requiere ser corregido.

## **2.3 Diagnóstico de la variabilidad operativa**

El análisis de la planificación semanal de recepciones revela una alta variabilidad en el volumen diario de cajas recibidas en el Centro de Distribución 6003 de Walmart Chile. Esta variabilidad se manifiesta en diferencias significativas entre los días de alta y baja actividad, generando una distribución irregular de la carga de trabajo a lo largo de la semana.

Como se observó en los mapas de calor presentados anteriormente, existen días donde las recepciones se concentran de manera excesiva, principalmente los lunes, mientras que otros días presentan volúmenes bajos o nulos, como ocurrió el jueves de la semana 18 y el martes de la semana 19. Esta falta de uniformidad en las recepciones incrementa la presión operativa sobre el personal y los recursos logísticos en los días pico, mientras que provoca subutilización de capacidades en los días de baja actividad.

Además de la distribución desigual de las recepciones, existen restricciones operativas que agravan el problema. Entre ellas destaca la imposibilidad de recibir productos los días domingo, reduciendo el margen de ajuste a seis días de operación por semana. Asimismo, los sábados se cuenta con un 60% de la dotación laboral disponible en comparación con un día hábil normal, limitando la capacidad de absorción de volúmenes adicionales.

Esta combinación de alta concentración de recepciones, días de baja o nula actividad, y restricciones operativas genera una variabilidad significativa en la carga de trabajo diaria, la cual impacta directamente en la eficiencia del proceso logístico. La existencia de días con saturación de muelles de descarga, tiempos de espera prolongados y mayores riesgos de errores en el registro de productos son algunas de las consecuencias observadas que justifican la necesidad de intervenir en el diseño del calendario de recepción.

Los analistas deben semana a semana reajustar el calendario de recepciones para mitigar la mala planificación previa, por medio de renegociaciones con los proveedores para cambiar los días de recepción logran de cierta manera disminuir la sobrecarga del CD, aunque no sea un resultado óptimo resulta ser útil para evitar graves consecuencias en el centro de distribución.

## **2.4 Consecuencias sobre los indicadores de desempeño**

La alta variabilidad en la recepción diaria de productos no solo afecta a la distribución de la carga operativa dentro del Centro de Distribución 6003, sino que también tiene un impacto negativo sobre los principales indicadores de desempeño logístico (KPIs) que mide Walmart Chile.

Entre los indicadores más afectados se encuentran:

- **OTIF (On Time In Full):** Este indicador mide el cumplimiento de entregas completas y a tiempo hacia las tiendas. La saturación operativa en días pico puede generar demoras en la recepción, procesamiento y despacho de productos, afectando la capacidad del centro de cumplir con los tiempos comprometidos.
- **Fill Rate:** Este indicador refleja la proporción de pedidos que son abastecidos en su totalidad. Una recepción irregular de productos puede provocar desabastecimientos parciales, especialmente si la congestión operativa genera errores en el procesamiento de inventarios o en la asignación de productos a los pedidos de las tiendas.

Además de los impactos directos en los KPIs, la sobrecarga de trabajo en ciertos días genera un entorno propenso a errores operativos, como registros incorrectos de inventario, daños en mercancía por manipulación apresurada o descoordinaciones en los procesos de despacho. Esta situación no solo compromete la eficiencia interna, sino que también incrementa los costos operativos, ya sea por horas extra, mayores tiempos de espera de transportistas o necesidad de reprocesos.

Aunque los centros de distribución cuentan con stocks de seguridad que permiten amortiguar parcialmente las variaciones en la recepción, el desbalance en la carga de trabajo representa una amenaza constante para el desempeño operativo del centro y su contribución a la cadena de suministro de Walmart.

Por lo tanto, se vuelve fundamental rediseñar el calendario de recepción de productos, buscando reducir la variabilidad diaria y mejorar el uso de los recursos disponibles, en línea con los objetivos estratégicos de eficiencia logística y satisfacción del cliente.

## 2.5 Cierre de Capítulo 2

El análisis de la situación actual evidencia que el Centro de Distribución 6003 enfrenta una distribución desigual de recepciones a lo largo de la semana, generando variabilidad significativa en la carga de trabajo diaria. Esta situación, agravada por restricciones operativas como la no recepción los domingos y la reducción de capacidad los sábados, impacta negativamente en la eficiencia de las operaciones y en el cumplimiento de los principales indicadores logísticos, como el OTIF y el Fill Rate.

En este contexto, se hace necesario desarrollar una solución que permita redistribuir las recepciones de manera más equilibrada, reduciendo la variabilidad diaria y optimizando la utilización de recursos operativos. El capítulo siguiente presenta el marco teórico que sustenta la propuesta metodológica planteada para abordar este problema.

## **Capítulo 3: Marco Teórico**

### **3.1 Fundamentos de la logística en centros de distribución**

La logística es un componente clave en la gestión de la cadena de suministro, especialmente en industrias de alto dinamismo como el retail. En este contexto, los centros de distribución (CD) desempeñan un rol esencial al funcionar como nodos que permiten la consolidación, almacenamiento y redistribución de productos hacia los distintos puntos de venta o al consumidor final.

El presente punto aborda los principales conceptos logísticos necesarios para comprender el funcionamiento de un CD, junto con los problemas operativos más comunes y las tecnologías que actualmente se utilizan para optimizar dichos procesos. Estos fundamentos permitirán comprender el entorno en el cual se enmarca el problema abordado por este proyecto, así como las herramientas disponibles para su solución.

#### **3.1.1 El centro de distribución y su rol en la cadena de suministro.**

Los centros de distribución (CD) son infraestructuras logísticas fundamentales dentro de la cadena de suministro, ya que cumplen funciones clave como la recepción, almacenamiento, consolidación de pedidos y posterior despacho hacia distintos destinos. Según Álvarez (2024), su propósito principal es asegurar que los productos lleguen a los consumidores de forma eficiente, mediante una gestión optimizada de inventarios y flujos de entrega.

A diferencia de los almacenes convencionales, los CD se caracterizan por su enfoque en la agilidad y la capacidad de respuesta ante cambios en la demanda. Esto se logra mediante la implementación de tecnologías que facilitan la automatización de procesos, el monitoreo en tiempo real y la trazabilidad de los productos, lo cual incrementa la satisfacción del cliente final (Álvarez, 2024).

En el sector retail, Rossell (2023) destaca que los CD funcionan como nodos estratégicos que conectan a los proveedores con los puntos de venta físicos o con los consumidores finales. Su localización geográfica y su capacidad operativa son determinantes para lograr eficiencia logística, reducir tiempos de entrega y fortalecer la competitividad empresarial.

Por su parte, León Rincón y Restrepo Beltrán (2022) subrayan que una adecuada planificación de las operaciones dentro del CD —especialmente en lo referente a la programación

de las recepciones— resulta fundamental para evitar sobrecargas, demoras o saturaciones operativas. Una distribución equilibrada de las recepciones durante la semana permite optimizar el uso del personal, el espacio de almacenamiento y los equipos logísticos, favoreciendo así una operación más fluida y eficiente.

### **3.1.2 La importancia de una recepción equilibrada de productos.**

La recepción de productos constituye una de las etapas más críticas en la operación de un centro de distribución, ya que marca el inicio del flujo físico de mercancías dentro del sistema logístico. Según la Escuela Select (s.f.), este proceso comprende la descarga, verificación, control de calidad y registro de los productos provenientes de los proveedores, siendo clave para mantener la integridad del inventario y evitar errores en las siguientes etapas.

#### **Planificación de la recepción**

Una recepción mal planificada puede generar congestión operativa, ralentizar el procesamiento de pedidos y afectar negativamente la eficiencia global del centro. Toyota Forklifts (s.f.) destaca que una planificación adecuada de esta etapa debe considerar la programación de entregas, la coordinación con los proveedores y la correcta asignación de recursos humanos y materiales. En este sentido, la tecnología juega un papel fundamental, ya que permite automatizar tareas, reducir errores manuales y mejorar la visibilidad del inventario en tiempo real.

#### **Problemas comunes**

Entre los desafíos más frecuentes en la recepción de productos se encuentran:

- **Variabilidad en las entregas:** Las fluctuaciones en el volumen y la frecuencia de las entregas pueden generar desequilibrios en la carga de trabajo, afectando la eficiencia operativa.
- **Errores en la documentación:** Discrepancias entre los albaranes y los productos recibidos pueden complicar el control de inventario y generar pérdidas.
- **Limitaciones en la capacidad de almacenamiento:** Una recepción desorganizada puede llevar a una ocupación ineficiente del espacio, dificultando el acceso a los productos y aumentando los tiempos de procesamiento.

Mecalux (s.f.b) enfatiza que abordar estos problemas requiere una planificación estratégica, el uso de herramientas tecnológicas adecuadas y una comunicación efectiva con los proveedores. Optimizar la recepción de productos no solo mejora el desempeño operativo del CD,

sino que también contribuye a reducir la variabilidad en el sistema logístico, lo que se traduce en una cadena de suministro más ágil, confiable y adaptable a la demanda.

### **3.1.3 La automatización y las tecnologías aplicadas a la recepción de productos.**

La automatización ha transformado profundamente las operaciones logísticas en los centros de distribución (CD), especialmente en procesos como la recepción de productos. La incorporación de tecnologías permite optimizar la eficiencia operativa, minimizar errores humanos y mejorar la trazabilidad de los flujos de mercancías. Estas herramientas han evolucionado desde soluciones básicas de registro hasta sistemas complejos que combinan software, sensores, robótica e inteligencia artificial.

#### **Sistemas de gestión de almacenes (SGA)**

Los sistemas de gestión de almacenes (SGA) son plataformas digitales que permiten planificar, coordinar y controlar las operaciones dentro del CD. De acuerdo con Mecalux (s.f.a), estos sistemas automatizan tareas clave como la asignación de ubicaciones, la validación de mercancías y el control de inventario en tiempo real. Además, proporcionan visibilidad integral del flujo de productos, facilitando la toma de decisiones basada en datos. Su implementación reduce errores, agiliza los procesos de recepción y fortalece el desempeño del centro logístico.

#### **Tecnologías de identificación y seguimiento**

La identificación automática mediante tecnologías como los códigos de barras y la identificación por radiofrecuencia (RFID) ha mejorado significativamente la precisión y velocidad en la recepción de productos. Estas herramientas permiten verificar de forma automática las unidades recibidas y registrar su ingreso al inventario con un bajo margen de error. Según Cadlan (s.f.), estas tecnologías también habilitan el monitoreo en tiempo real del movimiento de la mercancía, lo que agiliza la validación y mejora la eficiencia operativa del CD.

#### **Robótica y automatización física**

La integración de robots colaborativos y sistemas automáticos de manipulación de carga se ha convertido en una estrategia clave para mejorar la productividad en las operaciones de recepción. Como señala STG Latam (s.f.), estos sistemas permiten procesar grandes volúmenes de productos con menos intervención humana, reduciendo los tiempos de descarga y aumentando la

seguridad del entorno operativo. La robótica aplicada a la logística facilita una operación más rápida, precisa y menos propensa a errores derivados del trabajo manual intensivo.

### **Inteligencia artificial y análisis de datos**

El uso de inteligencia artificial (IA) en entornos logísticos permite predecir comportamientos de demanda, optimizar rutas y anticipar reajustes en la recepción de productos. De acuerdo con Element Logic (s.f.), la IA posibilita el análisis de grandes volúmenes de datos históricos y operacionales para generar decisiones más informadas y en tiempo real. Esta tecnología incrementa la capacidad de respuesta de los CD frente a escenarios cambiantes, mejorando la adaptabilidad del sistema logístico.

### **Aplicación de tecnologías en Walmart**

Empresas líderes en el sector retail, como Walmart, han realizado inversiones estratégicas en la automatización de sus centros de distribución. A nivel global, la compañía ha implementado tecnologías como robots de clasificación, montacargas autónomos y sistemas de inteligencia artificial para gestionar inventarios y procesos de recepción.

Actualmente, Walmart se encuentra en proceso de construir cinco nuevos centros de distribución de productos perecederos con tecnología avanzada. El primero, ubicado en Shafter, California, permite almacenar el doble de cajas y procesar más del doble del volumen en comparación con un CD tradicional. Además, se están modernizando centros ya existentes, como el de Winter Haven, Florida, integrando automatización en más de 500.000 pies cuadrados en cada instalación (Walmart Inc., 2024).

Otro ejemplo es la colaboración con la empresa Symbotic, que ha permitido implementar sistemas automatizados para clasificar, almacenar y recuperar mercancías, mejorando sustancialmente la eficiencia en los centros regionales de distribución (Walmart Inc., 2021)

### **Beneficios de la automatización en la recepción**

La implementación de estas tecnologías en la recepción de productos ofrece múltiples beneficios, entre ellos:

- **Reducción de errores:** La automatización minimiza la intervención manual, disminuyendo las posibilidades de errores en la recepción y registro de mercancías (Cadlan, s.f.).
- **Mayor eficiencia:** Los procesos automatizados permiten manejar mayores volúmenes de productos en menos tiempo, mejorando la productividad del CD (Mecalux, s.f.a).

- **Mejora en la trazabilidad:** La tecnología facilita el seguimiento preciso de los productos desde su llegada hasta su almacenamiento o distribución, permitiendo una gestión más controlada y transparente del inventario (Element Logic, s.f.; Cadlan, s.f.).
- **Adaptabilidad:** La automatización permite a los CD adaptarse rápidamente a cambios en la demanda o en las condiciones del mercado, manteniendo un alto nivel de servicio (Element Logic, s.f.).

### **3.1.4 Problemas derivados de una mala distribución de recepciones.**

Una gestión ineficiente en la recepción de mercancías puede desencadenar una serie de problemas que afectan tanto la operatividad interna del centro de distribución como la satisfacción del cliente final. A continuación, se detallan algunas de las principales consecuencias:

#### **Congestión operativa y cuellos de botella**

La acumulación de entregas en determinados días de la semana genera saturación en los muelles de descarga, lo cual retrasa el procedimiento de mercancías y entorpece el flujo de trabajo dentro del centro de distribución (Mecalux, s.f.b).

#### **Incremento en los costos operativos**

La sobrecarga de trabajo en ciertos días puede requerir turnos adicionales o personal extra, lo que incrementa los costos logísticos. Además, la desorganización genera tiempos muertos y uso ineficiente de recursos (STG Latam, s.f.).

#### **Disminución de la satisfacción del cliente**

Un mal funcionamiento en las etapas iniciales de la cadena, como la recepción, puede traducirse en errores de despacho o en entregas tardías, afectando negativamente la percepción del cliente (Cadlan, s.f.).

#### **Pérdida de control sobre el inventario**

La alta variabilidad en las recepciones puede dificultar el registro y la ubicación adecuada de los productos, generando inexactitudes en el inventario disponible y aumentando el riesgo de faltantes o sobrantes (Mecalux, s.f.b).

#### **Riesgos en la seguridad y calidad de los productos**

Cuando los espacios están sobrecargados y el proceso de recepción es desordenado, aumenta la probabilidad de daños a la mercancía o de accidentes laborales, comprometiendo tanto la seguridad del personal como la integridad de los productos (STG Latam, s.f.).

Estos problemas evidencian la necesidad de implementar un sistema de programación equilibrado y adaptativo para las recepciones, con el fin de distribuir la carga de trabajo de manera más eficiente y sostenida a lo largo de la semana.

## **3.2 Variabilidad en la recepción de productos**

La variabilidad en los procesos logísticos es uno de los factores que más influye en la eficiencia operativa de un centro de distribución. En particular, la variación en la cantidad de productos recibidos por día puede generar importantes desequilibrios en la carga de trabajo, afectando tanto al personal como al uso de los recursos físicos disponibles. Esta situación es especialmente crítica en empresas del sector retail, donde la fluidez del abastecimiento es clave para garantizar la disponibilidad de productos en tiendas y satisfacer la demanda de los clientes.

Comprender y cuantificar la variabilidad permite identificar patrones, días críticos o comportamientos ineficientes dentro del calendario de recepción. En este contexto, el presente capítulo explora el concepto de variabilidad, sus implicancias operacionales y la forma en que puede medirse y reducirse, sentando las bases para el desarrollo de modelos de optimización que serán tratados en secciones posteriores.

### **3.2.1 La variabilidad y su impacto en las operaciones logísticas.**

La variabilidad es un concepto central en el análisis de procesos, ya que describe el grado de dispersión o inestabilidad que presentan los datos respecto a un valor promedio. Según Montgomery (2013), entender la variabilidad permite evaluar el comportamiento de un sistema, identificar sus fluctuaciones y establecer medidas para su control. Esta noción es especialmente relevante en contextos operacionales, donde los cambios en los volúmenes de entrada, tiempos de proceso o demanda generan efectos acumulativos en la cadena logística.

En el ámbito de los centros de distribución, la variabilidad se manifiesta comúnmente en la cantidad de productos que se reciben o procesan en un periodo determinado. Silver, Pyke y Peterson (1998) destacan que una alta variabilidad dificulta la planificación de recursos y la coordinación entre etapas, incrementando la probabilidad de cuellos de botella, tiempos muertos y uso ineficiente del personal y del espacio.

Además, desde una perspectiva estratégica, Chopra y Meindl (2016) indican que los sistemas logísticos con alta variabilidad presentan una menor cantidad de respuestas y flexibilidad,

lo que se traduce en mayores costos operativos y menores niveles de servicio. Por ello, gestionar y reducir la variabilidad se ha convertido en un objetivo clave dentro de las organizaciones que buscan mejorar su competitividad y desempeño en la cadena de suministro.

Controlar y minimizar la variabilidad se vuelve, por tanto, una estrategia clave para lograr eficiencia operacional en entornos logísticos complejos, como los centros de distribución de empresas retail.

### **3.2.2 Medidas estadísticas de dispersión: varianza y desviación estándar.**

Las medidas de dispersión son herramientas estadísticas que permiten cuantificar la variabilidad o inestabilidad de un conjunto de datos. En logística, estas medidas son especialmente útiles para analizar la consistencia de procesos como el flujo de materiales, la planificación de la demanda o la recepción de productos (Montgomery, 2013).

Dos de las métricas más utilizadas para evaluar la dispersión son la varianza y la desviación estándar, las cuales permiten identificar la magnitud de las fluctuaciones en torno a un valor promedio.

#### **Varianza**

La varianza representa el promedio de las diferencias al cuadrado entre cada valor observado y la media del conjunto. Se define como:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Donde:

- $x_i$ : valor observado del conjunto de datos en la posición  $i$ ,
- $\bar{x}$ : promedio del conjunto de datos,
- $n$ : número total de observaciones.

Una varianza elevada indica una mayor dispersión, lo que se traduce en mayor irregularidad en el comportamiento del sistema.

#### **Desviación estándar**

La desviación estándar es la raíz cuadrada de la varianza y expresa la dispersión en las mismas unidades que los datos originales:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Esta medida facilita la interpretación práctica y permite realizar comparaciones entre diferentes procesos operativos

### **Aplicación en logística**

En operaciones logísticas, una alta dispersión puede reflejar problemas como cargas de trabajo desequilibradas, congestión en ciertos periodos o uso ineficiente de recursos. Por ellos, medir y analizar la variabilidad en los distintos procesos (como la recepción de productos) es fundamental para planificar con mayor precisión, reducir sobrecostos y mejorar el rendimiento global del sistema (Chopra & Meindl, 2016)

### **3.2.3 La importancia de reducir la variabilidad.**

Reducir la variabilidad en los procesos logísticos es un objetivo prioritario para muchas organizaciones, ya que permite lograr sistemas más estables, eficientes y predecibles. Según Chopra y Meindl (2016), un menor grado de variabilidad facilita la planificación operativa, permitiendo un uso más eficiente del personal, el equipamiento y la infraestructura. Esto resulta particularmente relevante en centros de distribución, donde las fluctuaciones diarias en la carga de trabajo pueden generar desequilibrios críticos.

Montgomery (2013) sostiene que los procesos con alta variabilidad presentan una mayor probabilidad de errores, retrasos y sobrecostos. Por ejemplo, una recepción de productos muy concentrada en ciertos días puede provocar saturación en los muelles de descarga, tiempos de espera prolongados y un aumento en el riesgo de errores en el registro de inventario. Por el contrario, un flujo más equilibrado contribuye a la mejora continua y a la estandarización de las operaciones, dos principios clave en la gestión de calidad.

Además, Silver, Pyke y Peterson (1998) argumentan que la reducción de la variabilidad permite a las organizaciones responder de manera más efectiva a la demanda, al contar con una estructura operativa menos expuesta a tensiones extremas. Esto no solo incrementa la eficiencia interna, sino que también fortalece la capacidad de respuesta hacia el cliente final, mejorando la calidad del servicio y la percepción del usuario.

Una operación con menor variabilidad no solo reduce los riesgos logísticos, sino que también da lugar a mejoras significativas en distintos frentes de la gestión operativa. Silver et al. (1998) sostienen que una distribución equilibrada de las cargas permite planificar con mayor precisión el uso del personal, prevenir cuellos de botella en los días pico y mantener una ocupación más estable de la infraestructura disponible. Esto, a su vez, se traduce en una reducción de costos asociados a la sobrecarga o la subutilización de recursos.

Desde la perspectiva de la mejora continua, Montgomery (2013) indica que reducir la variabilidad en los procesos favorece la estandarización, la automatización y el cumplimiento de indicadores clave de desempeño (KPIs), al operar en un entorno más controlado. Asimismo, Chopra y Meindl (2016) destacan que un entorno operativo más predecible contribuye no solo al rendimiento interno, sino también a un clima laboral más estable y sostenible para los equipos logísticos. En conjunto, estos beneficios fortalecen la capacidad de respuesta de la organización, generando cadenas de suministro más ágiles y confiables ante las variaciones de la demanda.

En definitiva, atacar la variabilidad no solo mejora la eficiencia interna, sino que fortalece toda la cadena de suministro al permitir una respuesta más ágil y confiable frente a la demanda del cliente.

### **3.3 Optimización aplicada a la logística**

En un entorno logístico cada vez más complejo y dinámico, la optimización se presenta como una herramienta esencial para mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y aumentar la satisfacción del cliente. Esta disciplina permite identificar y aplicar soluciones que maximizan el rendimiento de los procesos logísticos, adaptándose a las fluctuaciones del mercado y a las demandas específicas de cada organización. La aplicación de técnicas de optimización en la logística no solo contribuye a una gestión más eficaz de los recursos, sino que también fortalece la capacidad de respuesta ante imprevistos y mejora la competitividad en el sector.

#### **3.3.1 Concepto de optimización en logística.**

La optimización, en el contexto logístico, se entiende como el proceso de encontrar la mejor solución posible a un problema específico, respetando un conjunto de restricciones y buscando maximizar o minimizar una función objetivo. Xu et al. (2024) explican que este enfoque se utiliza para alcanzar una mayor eficiencia operativa al seleccionar alternativas que optimicen variables

clave como el costo, el tiempo de entrega o el uso de recursos, sin comprender la calidad del servicio.

Desde la perspectiva de la gestión logística, Lu et al. (2022) señalan que la optimización puede aplicarse a múltiples niveles del proceso, incluyendo la planificación de rutas de transporte, la gestión de inventarios, la asignación de recursos y la programación de operaciones en centro de distribución. Estas aplicaciones buscan no solo reducir desperdicios y tiempos improductivos, sino también responder con mayor agilidad a las demandas del entorno.

Para lograr esto, Xu et al. (2024) destacan el uso de herramientas avanzadas como algoritmos de programación matemática, modelos de simulación y técnicas de análisis de datos. Estas herramientas permiten tomar decisiones informadas basadas en escenarios múltiples, facilitando la implementación de estrategias de mejora continua. Además, la incorporación de estas tecnologías fortalece la resiliencia de las cadenas de suministro, permitiéndoles adaptarse rápidamente a contextos cambiantes y entornos de alta incertidumbre.

### **3.3.2 Optimización combinatoria y planificación de calendarios logísticos.**

La optimización combinatoria es un enfoque dentro de la investigación de operaciones que se encarga de encontrar soluciones óptimas dentro de un conjunto finito pero muy amplio de posibles combinaciones. Este tipo de problemas surge con frecuencia cuando las decisiones a tomar son discretas, como asignar tareas, secuencias, rutas o, como en este caso, reorganizar los días en los que se reciben productos. Según Papadimitriou y Steiglitz (1998), este tipo de optimización busca la mejor alternativa bajo ciertas restricciones, lo cual es especialmente útil cuando se manejan múltiples variables que interactúan entre sí.

En el contexto logístico, la optimización combinatoria permite modelar y rediseñar calendarios operativos con el fin de distribuir más equitativamente las recepciones de productos entre los distintos días de la semana. Nemhauser y Wolsey (1988) explican que estos modelos son particularmente relevantes en problemas donde se deben satisfacer múltiples condiciones simultáneamente, como ventanas de entrega, compromisos con proveedores y limitaciones operativas del centro de distribución.

Toth y Vigo (2014) añaden que muchos de estos problemas pertenecen a la clase de los denominados “NP-difíciles”, es decir, que no pueden resolverse eficientemente con métodos exactos cuando la escala del problema crece. Por esta razón, es común recurrir a técnicas

heurísticas que permiten encontrar soluciones aceptables en tiempos razonables, aunque no necesariamente óptimas.

En el caso de este proyecto, la asignación de días de recepción a los proveedores puede ser formulada como un problema combinatorio: dada ciertas restricciones (como días fijos, volumen por proveedor y límites operativos), se busca una combinación alternativa de asignaciones que minimice la variabilidad semanal. Esta perspectiva permite transformar un problema logístico en un modelo de optimización abordable mediante programación matemática y análisis computacional.

### **3.3.3 El balanceo de cargas en operaciones logísticas.**

El balanceo de cargas es una estrategia fundamental en la gestión operativa que busca distribuir de manera uniforme el trabajo, los recursos o el flujo de productos a lo largo de un periodo determinado. En entornos logísticos, esta práctica permite evitar concentraciones excesivas de actividad en ciertos momentos, lo cual reduce el riesgo de cuellos de botella, mejora la utilización de recursos y aumenta la estabilidad de los procesos (Gupta & Stafford, 2006).

De acuerdo con Simchi-Levi et al. (2008), una carga equilibrada en los centros de distribución permite planificar mejor la demanda de mano de obra, evitar la sobrecarga de turnos críticos y garantizar un uso más eficiente del espacio físico y los equipos de manipulación. Cuando el trabajo se distribuye de manera homogénea entre días o turnos, los procesos se vuelven más predecibles y menos propensos a errores operativos.

En el caso de la recepción de productos, el balanceo de cargas implica distribuir la llegada de proveedores de forma que el volumen de cajas no se concentre en pocos días de la semana. Esta distribución permite mitigar la variabilidad diaria y generar flujos más estables, lo que impacta positivamente en la planificación del personal, la ocupación de los muelles de descarga y el cumplimiento de los tiempos de procesamiento.

Desde un enfoque cuantitativo, Soman et al. (2004) señalan que el balanceo puede medirse mediante indicadores como la varianza, la desviación estándar o el coeficiente de variación. Al minimizar estas métricas, se busca lograr una distribución más nivelada del volumen diario, lo cual es clave para mejorar la eficiencia operativa y facilitar la implementación de modelos automatizados o semiautomatizados de programación.

En resumen, aplicar balanceo de cargas en la planificación de calendarios logísticos no solo mejora el rendimiento diario, sino que también incrementa la capacidad del sistema para responder a la demanda sin necesidad de sobredimensionar recursos, alineándose con los principios de eficiencia y mejora continua.

### **3.3.4 La minimización de la varianza como criterio de optimización.**

La varianza es una medida estadística que permite cuantificar la dispersión de un conjunto de datos respecto a su medida. En el ámbito logístico, esta métrica se utiliza frecuentemente para evaluar la estabilidad de procesos operativos, tales como la recepción de productos, el uso de recursos o la carga de trabajo diaria. Un valor elevado de varianza indica una distribución desequilibrada, con días de alta exigencia y otros con baja utilización, lo cual afecta negativamente la eficiencia del sistema (Montgomery, 2013).

En problemas de planificación logística, minimizar la varianza se ha consolidado como un enfoque efectivo para alcanzar flujos de trabajo más equilibrados. Tal como indican Silver, Pyke y Peterson (1998), cuando se logra reducir la variabilidad en la carga diaria, se optimiza el uso del personal, se evita la congestión en las instalaciones y se facilita el cumplimiento de los tiempos de procesamiento.

Desde la perspectiva de la investigación operativa, la minimización de la varianza puede establecerse como función objetivo dentro de un modelo de optimización. Este enfoque implica diseñar un conjunto de decisiones (por ejemplo, reasignar días de recepción a distintos proveedores) de manera que el volumen de cajas recibido por día sea lo más uniforme posible. Chopra y Meindl (2016) explican que este tipo de modelos no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también incrementa la capacidad de respuesta del sistema ante variaciones en la demanda o contingencia imprevistas.

Además, minimizar la varianza es compatible con la integración de restricciones operativas reales, como días fijos de entrega, capacidades máximas o acuerdos comerciales, lo que permite su implementación en entornos productivos reales sin comprometer su aplicabilidad. Esto hace que el criterio de equidad operativa —representado a través de la varianza— sea tanto una herramienta analítica como un objetivo estratégico dentro del diseño de soluciones logísticas.

### **3.4 Algoritmos heurísticos y su uso en programación**

Los algoritmos heurísticos son métodos de resolución de problemas que, sin garantizar una solución óptima, permiten encontrar resultados satisfactorios en tiempos razonables, especialmente en contextos donde la complejidad del problema impide el uso de métodos exactos. En el ámbito de la logística, estos algoritmos son ampliamente utilizados para abordar situaciones de planificación, asignación y secuenciación bajo restricciones múltiples y dinámicas (Blum & Roli, 2003).

#### **3.4.1 Concepto de heurística en programación.**

Una heurística es una técnica de búsqueda orientada a encontrar buenas soluciones aproximadas para problemas complejos que serían intratables si se resolvieron mediante métodos exhaustivos. Tal como definen Michalewicz y Fogel (2004), una heurística se basa en reglas empíricas, experiencia previa o estructuras específicas del problema para guiar la exploración del espacio de soluciones sin evaluarlas todas.

Este enfoque es especialmente útil en problemas combinatorios de gran tamaño, como la optimización de calendarios logísticos, donde el número de combinaciones posibles puede crecer exponencialmente al aumentar la cantidad de elementos involucrados. En estos casos, una solución óptima puede ser computacionalmente inviable, mientras que una heurística bien diseñada puede entregar soluciones cercanas al óptimo con bajos tiempos de procesamiento.

#### **3.4.2 Estrategias de búsqueda local aplicadas a la programación logística.**

Dentro del conjunto de algoritmos heurísticos, las estrategias de búsqueda local son ampliamente utilizadas para resolver problemas de optimización combinatoria con alta complejidad. Este enfoque se basa en partir desde una solución inicial —posiblemente aleatoria o basada en la configuración actual del sistema— y realizar pequeñas modificaciones en ella, buscando una mejora progresiva del valor de la función objetivo (Aarts & Lenstra, 2003).

Una de las técnicas más aplicadas dentro de este marco es el “swap” o intercambio, que consiste en modificar la solución mediante el intercambio de dos elementos. En el contexto de este proyecto, la estrategia de “swap entre días” implica mover la recepción de un proveedor desde un día sobrecargado hacia otro con menor volumen, con el fin de reducir la varianza diaria de cajas.

Esta acción puede repetirse de manera secuencial para ir mejorando gradualmente la distribución semanal.

Aunque las búsquedas locales tienden a encontrar óptimos locales, es posible diseñar algoritmos deterministas basados en intercambios sistemáticos, sin reducir a la aleatoriedad, que logren soluciones de alta calidad y resultados consistentes. Michalewicz y Fogel (2004) destacan que este tipo de algoritmos, al eliminar componentes aleatorios y seguir reglas definidas, permiten obtener resultados reproducibles, lo cual es fundamental en contextos donde se requiere trazabilidad y estabilidad en la toma de decisiones.

Asimismo, Aarts y Lenstra (2003) sostienen que el ampliar el vecindario de búsqueda o realizar múltiples iteraciones estructuradas, las técnicas basadas en “swap” pueden explorar zonas más amplias del espacio de soluciones, acercándose al óptimo global. Esto permite su aplicación en entornos productivos donde se busca un balance entre eficiencia computacional, calidad de solución y consistencia de los resultados.

Por su parte, el enfoque greedy (voraz) representa otra alternativa, en la cual se elige en cada paso la opción que produce la mejora inmediata más significativa. Si bien no garantiza una solución óptima global, su velocidad de ejecución y simplicidad lo hacen útil en escenarios donde se requieren respuestas rápidas (Russell & Norvig, 2016).

La combinación de estas técnicas puede ser especialmente poderosa en la planificación logística. Por ejemplo, implementar un algoritmo de búsqueda local con intercambios controlados (“swap”) y criterios voraces para decidir los movimientos, permite explorar el espacio de soluciones de forma estructurada, manteniendo tiempos de cómputo bajos. Este tipo de soluciones ha sido aplicado con éxito en problemas de programación de turnos, asignación de tareas y balanceo de cargas en sistemas productivos (Pinedo, 2016).

En entornos logísticos reales, como el centro de distribución analizado en este proyecto, las decisiones relacionadas con la redistribución de recepciones suelen tomarse de forma manual, basándose en la experiencia de los analistas y la observación de la carga semanal. Esta práctica, aunque efectiva en ciertos casos, representa una forma empírica de heurística, donde se aplican criterios simplificados de mejora sin una estructura formal (Blum & Roli, 2003). La presente propuesta busca sistematizar ese proceso mediante un enfoque computacional reproducible, que permita encontrar configuraciones más equilibradas de forma consistente y medible.

### **3.4.3 Ventajas y limitaciones de los algoritmos heurísticos en logística.**

Los algoritmos heurísticos presentan una serie de ventajas que los convierten en herramientas particularmente útiles para abordar problemas complejos de optimización en logística. Una de sus principales fortalezas es la flexibilidad, ya que pueden adaptarse fácilmente a diferentes tipos de restricciones, configuraciones operativas y objetivos, sin necesidad de reestructurar completamente el modelo (Michalewicz & Fogel, 2004).

Otra ventaja importante es su bajo tiempo de cómputo en comparación con métodos exactos. Esto permite generar soluciones en tiempos razonables, incluso en escenarios con gran cantidad de variables y combinaciones posibles. Según Pinedo (2016), esta característica los hace especialmente útiles para la toma de decisiones operativas en tiempo real o para casos donde se requiere iterar rápidamente entre alternativas de solución.

Además, los algoritmos heurísticos son frecuentemente más fáciles de implementar y mantener en ambientes productivos. No requieren herramientas de programación sofisticadas ni una formulación matemática rígida, lo que facilita su aplicación por parte de profesionales con conocimientos prácticos del sistema.

Sin embargo, estas ventajas vienen acompañadas de ciertas limitaciones. La principal es que no garantizan encontrar el óptimo global, especialmente si se usan reglas simples o espacios de búsqueda limitados. También pueden ser sensibles a la solución inicial o al orden en que se aplican las modificaciones, lo que puede afectar la calidad del resultado final (Blum & Roli, 2003).

Por otro lado, al no seguir un criterio sistemático de exploración total, los algoritmos heurísticos pueden estancarse en soluciones subóptimas si no se implementan mecanismos de escape o mejora progresiva. Esto requiere una cuidadosa evaluación de su desempeño y validación empírica para asegurar que los resultados sean aceptables dentro del contexto operativo.

En resumen, los algoritmos heurísticos representan una alternativa poderosa para resolver problemas logísticos complejos con múltiples restricciones, como el rediseño del calendario de recepción. Su aplicación permite alcanzar soluciones eficientes, adaptables y reproducibles, aunque es importante reconocer que su efectividad depende en gran medida del diseño específico y de los criterios de evaluación utilizados.

### 3.5 Python como herramienta para la optimización logística

El uso de herramientas computacionales es esencial para abordar problemas logísticos complejos que involucran grandes volúmenes de datos y múltiples variables. En este contexto, Python se ha consolidado como uno de los lenguajes de programación más utilizados en ciencia de datos, optimización y logística operativa, debido a su flexibilidad, versatilidad y la amplia comunidad de desarrollo que lo respalda.

#### 3.5.1 Ventajas de utilizar Python en la optimización logística.

Python destaca por su sintaxis simple y legible, lo que facilita la implementación de algoritmos, incluso para usuarios con experiencia limitada en programación. Además, es un lenguaje de código abierto, con una gran cantidad de librerías especializadas y soporte continuo por parte de la comunidad académica e industrial (Van Rossum & Drake, 2009).

Una de sus principales fortalezas es la capacidad de integrar diferentes áreas funcionales en un solo flujo de trabajo: procesamiento de datos, análisis estadístico, visualización de resultados y optimización matemática. Esto permite construir soluciones completas, desde la carga de datos hasta la evaluación de resultados, sin necesidad de cambiar de entorno.

#### 3.5.2 Principales librerías de Python aplicadas a la logística.

Para problemas de optimización logística, Python cuenta con un ecosistema muy robusto de librerías. Por ejemplo:

- **Pandas:** Esencial para la manipulación de datos tabulares, permite estructurar calendarios, agrupar por proveedor o semana, y preparar datasets para el análisis.
- **Numpy:** Complementa a Pandas con potentes herramientas de cálculo numérico, especialmente útil para calcular métricas estadísticas como varianza y desviación estándar de forma eficiente.
- **Pulp:** Permite formular y resolver modelos de programación lineal y entera de forma intuitiva, lo cual es ideal para representar formalmente el problema de redistribución de recepciones bajo restricciones específicas.
- **Scipy.optimize:** Provee una colección de algoritmos de optimización continua y discreta, incluyendo métodos como *differential evolution*, *basinhopping* o *SLSQP*, que pueden ser adaptados a escenarios logísticos con estructuras complejas.

- **Simanneal o implementaciones propias de Simulated Annealing:** Estas librerías permiten aplicar metaheurísticas estocásticas como el recocido simulado, que son útiles para escapar de óptimos locales en problemas altamente combinatorios.
- **Networkx:** Aunque tradicionalmente usada en grafos, puede utilizarse para modelar estructuras de dependencias logísticas o restricciones entre nodos (por ejemplo, proveedores con calendarios fijos).
- **Matplotlib y Seaborn:** Ofrecen herramientas de visualización efectivas para analizar la evolución de la carga operativa, representar la varianza diaria antes y después de la redistribución, y comunicar resultados de forma clara.

Este conjunto de librerías permite construir soluciones completamente personalizadas, donde es posible comenzar con una heurística determinista simple (por ejemplo, con Pandas y Numpy), escalar a formulaciones matemáticas con Pulp y, si es necesario, incorporar algoritmos metaheurísticos o híbridos con Scipy o estrategias como Simulated Annealing. La capacidad de combinar estos enfoques dentro de un mismo lenguaje le otorga a Python una gran ventaja frente a otras plataformas.

### **3.5.3 Aplicaciones de Python en la optimización de procesos logísticos.**

Diversos estudios y aplicaciones industriales han demostrado la utilidad de Python en la optimización de procesos logísticos. Por ejemplo, según García et al. (2020), Python fue utilizado exitosamente para diseñar rutas óptimas de distribución en una empresa de alimentos, reduciendo en un 15% los tiempos de entrega. Asimismo, Shapiro (2021) describe el uso de Python en modelos de asignación de turnos logísticos, mostrando mejoras significativas en la planificación del recurso humano.

Estas aplicaciones evidencian que Python no solo permite resolver problemas de optimización, sino que también se adapta fácilmente a contextos operativos reales, integrando modelos matemáticos con datos del entorno productivo.

## Capítulo 4: Metodología

El presente capítulo describe la metodología propuesta para abordar el problema de alta variabilidad en la recepción de productos en el Centro de Distribución 6003 de Walmart Chile. A partir de los antecedentes expuestos en los capítulos anteriores, se plantea un enfoque de solución basado en la redistribución de las recepciones semanales, con el objetivo de reducir la dispersión diaria en el volumen de cajas.

La propuesta contempla el diseño e implementación de un algoritmo computacional que permite modificar de manera sistemática la asignación de días de entrega para cada proveedor, evaluando el impacto de cada ajuste sobre la varianza diaria del calendario. Para ello, se utilizarán herramientas de programación en Python y técnicas heurísticas de mejora iterativa, basadas en intercambios (swap) entre días.

Este enfoque metodológico se desarrolla de forma flexible, permitiendo adaptar tanto el tipo de heurística como las librerías utilizadas, según el comportamiento del problema y los resultados obtenidos durante las etapas de prueba. A continuación, se presenta la justificación del enfoque seleccionado y se detallan los pasos seguidos en la formulación del modelo, el diseño del algoritmo y su validación práctica.

### 4.1 Enfoque metodológico general

Para abordar el problema de alta variabilidad en la recepción diaria de productos, se plantea una estrategia de rediseño del calendario semanal de entregas, manteniendo constante el volumen total de cajas por semana y proveedor. El objetivo principal es redistribuir las entregas dentro de cada semana, reduciendo la varianza diaria del volumen recibido.

Debido a la complejidad combinatoria del problema —dada la gran cantidad de proveedores y restricciones asociadas a cada uno— se opta por una metodología heurística, enfocada en aplicar mejoras iterativas al calendario actual a través de algoritmos de búsqueda local. En particular, se utilizan operaciones de intercambio (swap) entre días para evaluar posibles mejoras en la distribución del volumen.

Esta metodología se implementa mediante programación en Python, lo que permite automatizar el proceso, generar múltiples escenarios de prueba y evaluar el impacto de cada redistribución con métricas estadísticas. La flexibilidad del enfoque permite adaptar la lógica del algoritmo según los resultados obtenidos y las condiciones observadas durante la validación.

### 4.1.1 Consideraciones específicas del CD 6003

El diseño del modelo se basa en condiciones específicas del centro de distribución 6003 de Walmart Chile, que acotan el problema y definen su alcance operativo. A diferencia de otros centros de distribución de la compañía, el CD 6003 maneja exclusivamente productos de tipo ACP (Alimentos, Consumibles y Pets), lo que implica un tipo de operación más homogénea.

Además, este centro opera únicamente bajo el flujo de abastecimiento Staple, el cual se caracteriza por la programación anticipada de pedidos, sin participación de flujos como el Cross Dock o Flujo continuo, presentes en otros centros. Esto permite establecer supuestos más controlados en cuanto a la regularidad y previsibilidad de las entregas.

Estas condiciones permiten diseñar un modelo más enfocado y menos condicionado por variaciones operativas externas, facilitando la aplicación de algoritmos heurísticos orientados a mejorar la distribución semanal sin comprometer la lógica del negocio.

## 4.2 Formulación del modelo y lógica de optimización

El presente modelo tiene como objetivo rediseñar el calendario de recepción de cajas del CD 6003 con base en la minimización de la variabilidad diaria, respetando las condiciones operativas y logísticas impuestas por la realidad del centro de distribución y sus proveedores. El enfoque adoptado considera un horizonte de planificación de 4 semanas proyectadas, en el cual los proveedores deben mantener un calendario constante de entregas, permitiendo una planificación estable y operacionalmente viable.

### 4.2.1 Formulación del problema

- **Variables de decisión:**

- $x_{iz}$ : Variable binaria que indica si el proveedor  $z$  realiza una entrega el día  $i$  de la semana. Esta decisión se aplica de forma constante para cada una de las 4 semanas del horizonte proyectado.

- **Parámetros conocidos:**

- $C_{izs}$ : Número de cajas originalmente programadas para el proveedor  $z$  en el día  $i$  de la semana  $s$ .
- $D$ : Conjunto de días hábiles de la semana.
- $S$ : Conjunto de semanas proyectadas.

- $Z$ : Conjunto de proveedores.
- $d_z$ : Cantidad de días asignados históricamente al proveedor  $z$  por semana.
- $\mu$ : Promedio esperado de cajas diarias de lunes a viernes.
- $\alpha$ : factor de capacidad máxima del sábado respecto al promedio, en este caso 0,6.

- **Función Objetivo:**

Minimizar la varianza de cajas recibidas diariamente, considerando la suma total de cajas proyectadas en el horizonte de planificación:

$$\min Var \left( \sum_{z \in Z} \sum_{s \in S} C_{izs} \cdot x_{iz} \right) \forall i \in D_h$$

Donde  $D_h = \{Lunes, Martes, Miércoles, Jueves, Viernes, Sábado\}$  representa los días hábiles para la recepción de cajas (domingo excluido), y la función  $Var(\cdot)$  calcula la varianza de las cargas diarias agregadas

- **Restricciones:**

- **Frecuencia de días de entrega por proveedor constante:** Cada proveedor debe mantener su frecuencia original de días de entrega por semana.
- **Calendario fijo por proveedor:** Una vez definido, el calendario de entregas de cada proveedor debe mantenerse constante a lo largo de las 4 semanas proyectadas.
- **No se permite dividir entregas por día:** Cuando se traslada una entrega desde un día a otro, debe trasladarse todas las cajas programadas para ese día y proveedor, durante todas las semanas. No se permite fraccionar entregas.
- **No se permite superposición de días sin mover todos los bloques:** Si se desea mover la carga de un proveedor desde un día ocupado a otro también ocupado, debe considerarse el traslado completo de ambos días, o bien evitar el movimiento para no duplicar cargas.
- **Combinación de días según la frecuencia del proveedor:** Se deben respetar las combinaciones de días habilitados según la frecuencia de días de entrega del proveedor.
- **Domingo no disponible:** No se permite asignar entregas el domingo.
- **Capacidad máxima del sábado:** La cantidad de cajas acumuladas que se asignen al sábado no debe superar el 60% del promedio de lunes a viernes.

## 4.2.2 Lógica operativa del algoritmo

El proceso de optimización se implementa mediante un algoritmo de Simulated Annealing desarrollado manualmente en Python y ejecutado dentro de un contenedor en Dataiku. La data de entrada se extrae desde BigQuery, seleccionando las columnas relevantes a través de una consulta parametrizada. Posteriormente, la información se transforma en un DataFrame y se preprocesa para consolidar la carga total de cajas por día, proveedor y semana para el CD 6003.

Antes de aplicar el algoritmo, se realiza una acumulación por proveedor y día de la semana, de modo que el modelo trabaje con bloques de cajas representando la suma total de cuatro semanas. De esta forma, si un proveedor entrega 100 cajas todos los lunes, el bloque asociado al lunes se considera como 400 cajas. El algoritmo evalúa qué días serían óptimos para trasladar dichos bloques, respetando las restricciones anteriormente definidas.

Una vez determinado el calendario óptimo para cada proveedor, el modelo desagrega nuevamente las cajas para distribuir las uniformemente por semana. Así si el nuevo calendario indica que las 400 cajas antes entregadas los lunes ahora deben recibirse los martes, se programarán 100 cajas para cada martes durante las 4 semanas.

Este enfoque garantiza un balance entre realismo operacional, cumplimiento de restricciones y una ejecución computacional eficiente, adecuada al contexto logístico del CD 6003.

## 4.2.3 Justificación del enfoque metodológico

El presente proyecto aborda un problema de redistribución de cargas logísticas bajo múltiples restricciones operativas, tales como la consistencia semanal en los calendarios de entrega por proveedor, la prohibición de superposición entre asignaciones y la limitación de capacidad durante ciertos días. Esta configuración corresponde a un problema de optimización combinatoria, caracterizado por la existencia de un espacio de soluciones extremadamente amplio y complejo.

En este contexto, se optó por utilizar un enfoque heurístico basado en recocido simulado (simulated annealing), una técnica de búsqueda local que permite explorar múltiples configuraciones alternativas mediante la generación controlada de perturbaciones sobre soluciones actuales. Esta metodología resulta especialmente adecuada cuando se requiere balancear entre calidad de la solución y tiempos de cómputo razonables, como ocurre frecuentemente en problemas logísticos reales.

El uso de métodos exactos, como la programación entera o lineal, fue descartado debido a la alta complejidad del modelo al considerar múltiples dimensiones (proveedor, día, semana, volumen, restricciones operativas), lo que habría implicado una formulación demasiado rígida o costosa computacionalmente. Por el contrario, el enfoque heurístico adoptado permite obtener soluciones suficientemente buenas, ajustadas a la realidad del centro de distribución, en plazos compatibles con la toma de decisiones operacionales.

De este modo, la elección del recocido simulado responde a la necesidad de contar con una herramienta flexible, eficiente y aplicable a escenarios reales de operación logística, sin perder rigurosidad en la lógica de optimización utilizada.

#### **4.2.4 Factibilidad computacional y herramientas utilizadas**

La factibilidad de la implementación metodológica fue garantizada mediante el uso de herramientas tecnológicas disponibles dentro del entorno de trabajo del área logística de Walmart Chile. El modelo fue desarrollado íntegramente en el lenguaje de programación Python, por su flexibilidad, su sintaxis legible y su ecosistema de librerías especializadas en análisis de datos y optimización.

La extracción de datos se realizó a través de consultas SQL en la plataforma Google BigQuery, desde donde se obtuvieron los registros de planificación de recepciones por proveedor, día y semana. Posteriormente, el procesamiento y estructuración de los datos fue efectuado en Dataiku, herramienta que facilitó la depuración, consolidación y validación de la información.

La ejecución del algoritmo se llevó a cabo directamente en el entorno de Python, utilizando librerías como *Pandas* para la manipulación de datos, *Numpy* para cálculos numéricos y *Matplotlib* para la visualización de resultados. Esta configuración tecnológica permitió desarrollar un prototipo funcional capaz de integrarse al flujo real de trabajo, operando sobre datos reales y ofreciendo soluciones prácticas en tiempos de ejecución reducidos.

En consecuencia, se puede afirmar que la metodología propuesta no solo es teóricamente adecuada para abordar el problema identificado, sino que además es completamente factible desde el punto de vista técnico y operativo, lo que fortalece su aplicabilidad dentro del contexto logístico del Centro de Distribución 6003.

### 4.3 Diseño del algoritmo de redistribución

Para resolver el problema de redistribución del calendario de recepción, se optó por desarrollar un algoritmo heurístico que permite minimizar de forma iterativa la variabilidad diaria de cajas recibidas por semana. Dado que el espacio de soluciones posibles es amplio y discreto (combinaciones de días por proveedor), se descartó el uso de métodos exactos, ya que presentan un alto costo computacional y menor adaptabilidad a las restricciones prácticas del problema.

El enfoque adoptado se basa en técnicas de búsqueda local, específicamente en la ejecución de intercambios (swaps) entre días de entrega de un mismo proveedor, considerando todo el horizonte de 4 semanas proyectadas. El modelo evalúa configuraciones alternativas de calendario y acepta aquellas que permiten reducir la varianza diaria acumulada. Cada movimiento se realiza respetando el calendario constante por proveedor, trasladando bloques completos de carga (es decir, el total de cajas asignadas a un día determinado durante el horizonte completo).

El procedimiento general del algoritmo puede resumirse en los siguientes pasos:

- **Lectura del calendario original:** Se cargan los volúmenes de cajas por proveedor, semana y día desde una base de datos interna mediante una consulta SQL estructurada.
- **Cálculo de la varianza acumulada:** Se evalúa la varianza total de cajas recibidas por día, considerando la suma de las 4 semanas proyectadas.
- **Selección de proveedor y combinación de días:** Se escoge aleatoriamente un proveedor y dos días distintos donde realiza entregas, siempre que se respete su número total de días asignados.
- **Simulación de un movimiento:** Se traslada toda la carga acumulada de uno de los días seleccionados hacia un nuevo día no ocupado, respetando todas las restricciones operativas (no usar domingos, no superar la capacidad del sábado, no repetir días y respetar las combinaciones de días).
- **Evaluación del impacto del cambio:** Si el movimiento genera una disminución en la varianza total diaria, se acepta la nueva solución como la actual. Si no mejora, se puede aceptar de forma probabilística bajo la lógica de recocido simulado (simulated annealing), permitiendo escapar de óptimos locales.
- **Iteración:** El proceso se repite durante un número determinado de iteraciones o hasta que la solución converge dentro de un umbral de mejora.

Este diseño permite aplicar una lógica flexible, eficiente y replicable, que respeta las condiciones reales del centro de distribución y se adapta fácilmente a nuevas restricciones operativas o escenarios futuros.

### 4.3.1 Estructura y funciones principales del algoritmo

El algoritmo se compone de varias funciones definidas manualmente, diseñadas para cumplir con las restricciones del problema logístico y ejecutar correctamente el proceso iterativo de mejora. Las funciones más relevantes incluyen:

- *Generar\_solucion\_inicial()*: Construye una solución válida de inicio basada en la estructura original de calendarios por proveedor. Cada proveedor mantiene la cantidad de días asignados por semana y se asegura que no existan asignaciones en domingos ni superposiciones de días.
- *Evaluar\_solucion(solucion)*: Calcula la desviación estándar de las cajas distribuidas por día en la solución propuesta. Esta métrica representa la variabilidad de la carga de trabajo diaria, y es el criterio que se busca minimizar.
- *Vecino(solucion\_actual)*: Genera una nueva solución candidata moviendo aleatoriamente la asignación de días para un proveedor, respetando la cantidad de cajas por semana y evitando conflictos operativos. Este movimiento define el vecindario del algoritmo.
- *Aceptar(sol\_actual, sol\_nueva, temp)*: Define si la nueva solución es aceptada o no, en función de su calidad relativa y de la temperatura actual del sistema. Si la nueva solución es mejor, se acepta, si es peor, se acepta con una probabilidad decreciente conforme baja la temperatura, permitiendo escapar de óptimos locales.
- *Simulated\_annealing()*: Función principal que ejecuta el proceso iterativo. Inicializa con una solución válida, evalúa su desempeño, genera soluciones vecinas, y decide si reemplazarlas en cada iteración según una política de enfriamiento gradual.

Esta arquitectura permite implementar de forma controlada la lógica del recocido simulado, adaptada a las necesidades específicas del problema de redistribución logística del CD 6003.

### 4.3.2 Resultados obtenidos

Luego de ejecutar el algoritmo sobre la planificación de compras de las próximas 4 semanas, se obtuvieron los siguientes volúmenes diarios de cajas a recibir en el centro de distribución, comparando la distribución original versus la solución optimizada:

**Tabla 1:** Comparación del volumen diario de cajas antes y después de la optimización del calendario de recepciones.

<b>Día</b>	<b>Calendario original (cajas)</b>	<b>Calendario optimizado (cajas)</b>
Lunes	27.476	32.802
Martes	55.191	32.787
Miércoles	10.214	32.893
Jueves	27.785	33.113
Viernes	17.539	33.052
Sábado	46.771	20.338

**Fuente:** Elaboración propia, a partir de la ejecución del algoritmo de recocido simulado desarrollado en Python.

La desviación estándar de los volúmenes diarios disminuyó de 17.145 cajas a 5.142 cajas, lo que representa una reducción del 70% en la variabilidad semanal. Esta mejora refleja un balance de carga más uniforme a lo largo de los días de operación, lo cual permite planificar mejor la dotación de personal, reducir los riesgos operativos y mejorar el uso de recursos físicos dentro del centro.

Estos resultados demuestran que el algoritmo desarrollado es capaz de generar propuesta viable de calendario que mejoran significativamente el desempeño logístico del centro de distribución, alineándose con los objetivos del proyecto.

## **4.4 Implementación computacional del modelo**

La implementación del modelo se realizó mediante un entorno de trabajo que integra herramientas de análisis de datos y programación. Todo el flujo se ejecuta utilizando Dataiku, donde se organiza el pipeline de procesamiento, y se conecta con BigQuery como fuente de datos. El desarrollo del algoritmo y su ejecución final se realizan en lenguaje Python.

### **4.4.1 Extracción y preparación de datos**

Los datos se extraen desde la base de datos de Walmart Chile mediante una consulta SQL en BigQuery, filtrando las variables relevantes: identificador del proveedor, semana, día de entrega, cantidad de cajas, centro de distribución, tipo de flujo y cantidad de cajas. Luego, en

Dataiku, se crea una tabla filtrada con los datos del centro de distribución 6003, considerando solamente flujo Staple.

Los datos son agregados para obtener la carga total por proveedor y por día de la semana en un horizonte de 4 semanas. Esta consolidación permite que el algoritmo trabaje con bloques acumulados de carga, es decir, la suma total de cajas entregadas los lunes, martes, etc., en todo el horizonte.

#### **4.4.2 Aplicación del algoritmo de recocido simulado**

El algoritmo implementado sigue la lógica del simulated annealing, permitiendo evaluar miles de combinaciones posibles y aceptando temporalmente soluciones no óptimas para escapar de mínimos locales. Está programado de forma manual en Python, usando estructuras de datos como DataFrames y funciones de evaluación personalizadas.

Se respeta que:

- Cada proveedor mantenga un calendario fijo durante todas las semanas.
- Cada movimiento traslade la totalidad de cajas de un día seleccionado.
- No se permita asignar entregas los domingos.
- El sábado no supere el 60% de la capacidad promedio diaria de lunes a viernes.
- No haya solapamiento de días asignados por proveedor.

#### **4.4.3 Ejecución y resultados del algoritmo**

El algoritmo ejecuta dos funciones antes de ejecutar el simulated annealing, lo primero que se hace es mover todas las posibles cajas que se planean recibir los domingos a un día que no tenga recepción de cajas, esto busca evitar posibles errores en la restricción de que no se reciben cajas los domingos, después se ejecuta una función de mueve las cajas que se planean recibir los sábados hacia otros días en donde no se reciben cajas, esta función lo que hace es evitar problemas con la restricción de la capacidad máxima con la que cuenta el centro de distribución para ese día, ya que suele pasar que este día se planean recibir más cajas que cualquier otro día de la semana.

Una vez que se tienen los días sábados y domingos con 0 cajas, se ejecuta el algoritmo de redistribución el cual ejecuta a lo más 5000 iteraciones o hasta que el recocido ya no acepte resultados peores al mejor encontrado, una vez finalizada esta ejecución se obtiene la menor desviación posible, pero para asegurar que el modelo encuentre un óptimo global y no solo un

óptimo local, el algoritmo se ejecuta 10 veces, en donde el resultado final será la desviación estándar más pequeña entre las 10 ejecuciones distintas, esto significa que se generan a lo más 50.000 iteraciones, este proceso es eficaz y además es eficiente, ya que solo se demora 5 minutos en obtener este resultado final.

#### **4.4.4 Generación de entregable**

El entregable final del algoritmo consiste en un nuevo calendario de recepción para cada proveedor, expresado como un código de 7 dígitos, donde cada posición representa un día de la semana (de domingo a sábado) y el valor indica si ese día ha sido asignado para la recepción del proveedor.

Por ejemplo, el calendario original de un proveedor que entrega lunes y martes se representaría como 0120000, mientras que, si el algoritmo redistribuye sus entregas a lunes y miércoles, el nuevo calendario sería 0103000. Este código permite mantener una estructura uniforme y fácil de interpretar para evaluar los cambios generados por el modelo. Este mismo código es utilizado para el calendario de compras, el cual es utilizado para generar las órdenes de compra correspondientes, este código es generado considerando el lead time de cada proveedor y su nuevo código de recepción, por ejemplo, utilizando el nuevo calendario de 0103000, como patrón de recepción del proveedor A, el cual tiene un lead time de 4 días, su código de compra será 0000407, esto significa que las órdenes de compra para este proveedor serán los días jueves y sábados.

Finalmente, estos patrones nuevos de compra y recepción son escritos en un archivo CSV, el cual junto a gráficos de columna de comparación entre la recepción anterior y posterior a la redistribución tanto a nivel semanal como el acumulado de las siguientes 4 semanas, además de incluir una tabla resumen de aquellos proveedores que fueron reasignados.

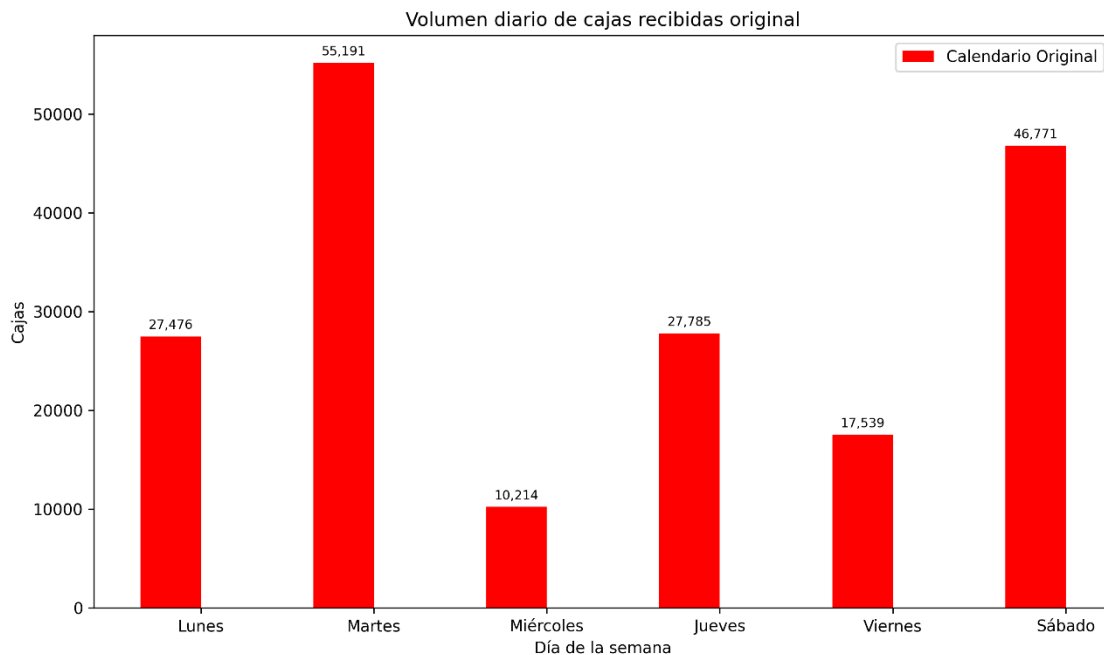
## Capítulo 5: Resultados

### 5.1 Comparación antes y después

Con el objetivo de evaluar el impacto del algoritmo propuesto sobre la distribución de las recepciones, se comparó la planificación original con la solución generada por el modelo de recocido simulado. La principal métrica de comparación fue el volumen total de cajas recibidas por día para las siguientes 4 semanas de manera acumulada y también detallada, antes y después de la aplicación del algoritmo.

La Figura 4 muestra un gráfico de barras que representa la distribución diaria de cajas bajo la planificación original, donde se evidencia una alta concentración en los martes y sábados, y una baja carga los miércoles y viernes.

**Figura 4:** Gráfico de barras recepción de cajas acumulada original.

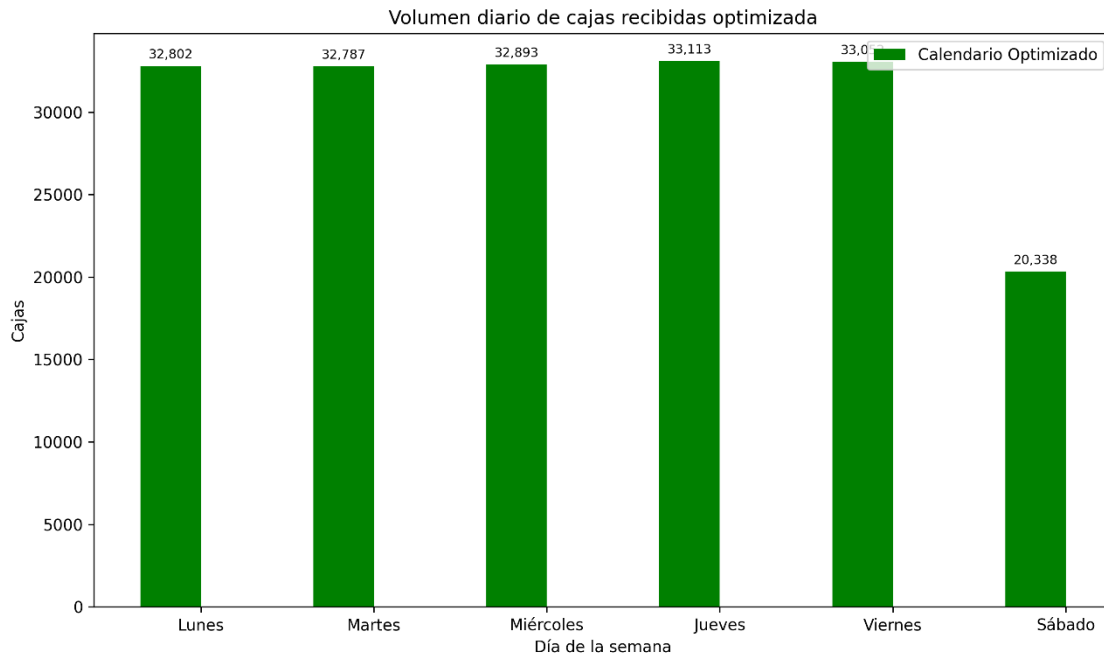


**Fuente:** Elaboración propia, a partir de la extracción de los datos.

Adicionalmente, se puede evidenciar como la planificación actual no está considerando que los sábados la capacidad máxima del centro de distribución es menor que la de resto de días, por lo tanto, el centro de distribución se ve sobrecargado ese día, lo que puede generar conflictos en los turnos.

La Figura 5 muestra la nueva distribución obtenida por el modelo optimizado, con un reparto más equilibrado del volumen de trabajo a lo largo de los días operativos (lunes a sábado). Se observa una clara reducción de los picos operativos y un mejor aprovechamiento de los días subutilizados.

**Figura 5:** Gráfico de barras recepción de cajas acumuladas optimizado.

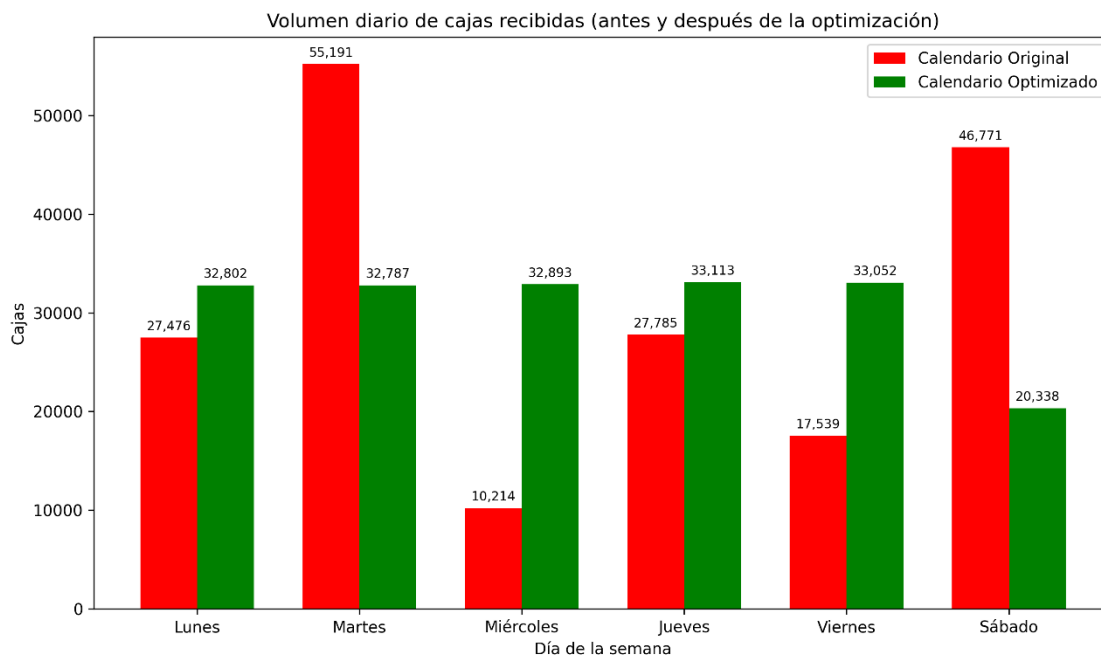


**Fuente:** Elaboración propia, a partir de la ejecución del modelo.

Adicionalmente podemos visualizar que el sábado se respeta la capacidad máxima del centro de distribución, lo que puede generar mejorar en el ambiente laboral ese día, además de todos los beneficios que se generan con tener una recepción más equilibrada durante la semana.

La Figura 6 nos muestra la comparación de ambas distribuciones una al lado de la otra, en donde se puede evidenciar la mejora sustancial en todos los días de recepción, lo cual tendrá un impacto positivo en los indicadores clave de la compañía.

**Figura 6:** Gráfico de barras comparativo de recepción original vs acumulada.



*Fuente:* Elaboración propia, a partir de la información recopilada.

## 5.2 Impacto en la variabilidad diaria

El objetivo principal del modelo fue reducir la variabilidad diaria en la recepción de cajas, medida a través de la desviación estándar del volumen recibido.

En la Tabla 2 se presenta un resumen comparativo entre los principales indicadores estadísticos antes y después de aplicar el modelo.

**Tabla 2:** Comparación de indicadores para el acumulado de las siguientes 4 semanas

Indicador	Planificación Original	Planificación Optimizada
Promedio diario de cajas	30.829 cajas	30.829 cajas
Desviación estándar	17.145 cajas	5.142 cajas
Día con mayor volumen	Martes (55.191 cajas)	Jueves (33.113 cajas)
Día con menor volumen	Miércoles (10.214 cajas)	Sábado (20.338 cajas)

*Fuente:* Elaboración propia, a partir de los datos extraídos por el modelo

Se obtuvo una reducción de la desviación estándar del 70%, lo cual representa una distribución significativamente más estable de la carga diaria. Este resultado es consistente con los objetivos planteados y evidencia el éxito del enfoque heurístico adoptado.

### 5.3 Análisis e implicancias operativas

Los resultados obtenidos no solo validan la efectividad del algoritmo en términos estadísticos, sino que también reflejan beneficios operativos concretos para el CD 6003. Entre los principales impactos observados se encuentran:

- **Reducción del riesgo de saturación operativa** en los días tradicionalmente críticos, como lunes o miércoles, lo cual permite evitar cuellos de botella en los muelles de descarga.
- **Mejor utilización de la dotación disponible los martes y jueves**, que previamente mostraban subutilización, contribuyendo a una planificación de turnos más eficiente y equitativa.
- **Cumplimiento efectivo de la restricción operativa del sábado**, ya que la solución generada por el algoritmo asegura que el volumen de cajas asignado no exceda el 60% de la capacidad promedio semanal, respetando así las limitaciones reales de dotación establecidas por la empresa.
- **Disminución potencial de errores logísticos**, dado que una carga más balanceada permite ejecutar las recepciones con mayor control y menor presión sobre el equipo.
- **Facilidad para planificación del personal**, ya que el flujo de trabajo más estable permite ajustar turnos, asignar recursos y prever necesidades operativas de forma más predecible.

Además, la reducción en la variabilidad podría traducirse en mejoras en KPIs logísticos como el OTIF y el Fill Rate, aunque esto deberá confirmarse con datos operacionales longitudinales en etapas futuras del proyecto.

## Conclusiones

En conclusión, el modelo propuesto para el rediseño del calendario de recepción del centro de distribución 6003 de Walmart Chile cumple con su cometido de manera eficaz y eficiente, logrando reducir la desviación estándar de la recepción acumulada en un 70%, lo que permitiría una gran mejora dentro del ambiente laboral del centro de distribución, aunque el modelo cumple con su principal objetivo, aún queda pendiente evaluar el impacto que tiene la redistribución de la recepción en los KPIs de la compañía.

Además, aún se puede mejorar la distribución por medio de implementar priorizaciones, por ejemplo, considerar los KPIs de los proveedores, asignarle a cada uno de estos indicadores una ponderación de tal manera que el algoritmo asigne a ciertos días, como lunes o martes, a aquellos proveedores que tengan peores indicadores y que se puedan mejorar por medio de recibir lo antes posible sus productos. Esto permitiría mejorar tanto los KPIs de la compañía como los de sus proveedores, los cuales son los principales aliados de la empresa para lograr cumplir con su misión y visión.

## Referencias

- Aarts, E. H. L., & Lenstra, J. K. (2003). *Local Search in Combinatorial Optimization*. Princeton University Press.
- Álvarez, C. (2024). Centro de distribución: qué es y su rol en la cadena de suministro. Blog LLEGO. Recuperado de <https://blog.llego.cl/centro-de-distribucion-que-es-y-su-rol-en-la-cadena-de-suministro>
- Blum, C., & Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, 35(3), 268–308.  
<https://doi.org/10.1145/937503.937505>
- Cadlan. (s.f.). La importancia de la tecnología en la gestión de la cadena de suministro. Recuperado de <https://www.cadlan.com/noticias/tecnologia-en-la-cadena-de-suministro/>
- Chopra, S., & Meindl, P. (2016). *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation* (6th ed.). Pearson.
- Element Logic. (s.f.). Tecnología de centro de distribución: Inteligencia artificial (IA). Recuperado de <https://www.elementlogic.net/mx/blogs/tecnologia-de-centro-de-distribucion-inteligencia-artificial-ia/>
- Escuela Select. (s.f.). Recepción de mercancías: clave en el proceso logístico. Recuperado de <https://escuelaselect.com/recepcion-de-mercancias/>
- García, J. M., Rodríguez, A., & Torres, L. (2020). Optimización de rutas de distribución usando programación lineal y Python. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, 38(2), 75–84.
- Gupta, D., & Stafford, E. (2006). Flowline scheduling with buffers, finite-size batches, and changeovers. *Operations Research*, 54(6), 1125–1140.
- León Rincón, G. E., & Restrepo Beltrán, M. (2022). Criterios para la planeación de centros de distribución. *Revisión bibliométrica. En Contexto*, 10(17).  
<https://doi.org/10.53995/23463279.1167>

- Lu, J., Xu, H., Kan, X., & Lei, Y. (2022). Research on Optimization of Logistics Management Process from the Perspective of Supply Chain Management. *Frontiers in Business Economics and Management*, 6(3), 122–125. <https://doi.org/10.54097/fbem.v6i3.3328>
- Mecalux. (s.f.a). Tecnologías para almacenes optimizados y eficientes. Recuperado de <https://www.mecalux.es/blog/tecnologias-para-almacenes>
- Mecalux. (s.f.b). Recepción de mercancías: fases y estrategias. Recuperado de <https://www.mecalux.com.mx/blog/recepcion-mercancias-fases>
- Michalewicz, Z., & Fogel, D. B. (2004). *How to Solve It: Modern Heuristics* (2nd ed.). Springer.
- Montgomery, D. C. (2013). *Introduction to Statistical Quality Control* (7th ed.). Wiley.
- Nemhauser, G. L., & Wolsey, L. A. (1988). *Integer and Combinatorial Optimization*. Wiley-Interscience.
- Papadimitriou, C. H., & Steiglitz, K. (1998). *Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity*. Dover Publications.
- Pinedo, M. L. (2016). *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems* (5th ed.). Springer.
- Rossell, À. (2023). Centros de distribución: Nodos estratégicos en la cadena logística para una entrega ágil. Brolla. Recuperado de <https://brollafactory.com/es/blog/centros-de-distribucion-nodos-estrategicos-en-la-cadena-logistica-para-una-entrega-agil/>
- Russell, S., & Norvig, P. (2016). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (3rd ed.). Pearson.
- Shapiro, J. F. (2021). *Modeling the Supply Chain* (4th ed.). Wiley.
- Silver, E. A., Pyke, D. F., & Peterson, R. (1998). *Inventory Management and Production Planning and Scheduling* (3rd ed.). Wiley.
- Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., & Simchi-Levi, E. (2008). *Designing and Managing the Supply Chain* (3rd ed.). McGraw-Hill.

- Soman, C. A., Van Donk, D. P., & Gaalman, G. (2004). Combined make-to-order and make-to-stock in a food production system. *International Journal of Production Economics*, 90(2), 223–235.
- STG Latam. (s.f.). Buenas prácticas y tecnologías en recepción y almacenamiento de mercadería en un centro de distribución. Recuperado de <https://www.stglatam.com/blog/buenas-practicas-y-tecnologias-en-recepcion-y-almacenamiento-de-mercaderia-en-un-centro-de-distribucion/>
- Toyota Forklifts. (s.f.). Recepción de mercancías: definición, fases y principales KPIs. Recuperado de <https://blog.toyota-forklifts.es/recepcion-mercancias-como-mejorar-con-automatizacion-o-carretillas-elevadoras>
- Toth, P., & Vigo, D. (2014). *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications* (2nd ed.). SIAM.
- Van Rossum, G., & Drake, F. L. (2009). *Python 3 Reference Manual*. CreateSpace.
- Walmart Inc. (2021). Chain reaction: We're partnering with Symbotic to bring high-tech automation to our supply chain. Recuperado de <https://corporate.walmart.com/news/2021/07/14/chain-reaction-were-partnering-with-symbotic-to-bring-high-tech-automation-to-our-supply-chain>
- Walmart Inc. (2024). Walmart's grocery network transformation: The next steps on our supply chain modernization journey. Recuperado de <https://corporate.walmart.com/news/2024/07/10/walmarts-grocery-network-transformation-the-next-steps-on-our-supply-chain-modernization-journey>
- Xu, Z., Elomri, A., Baldacci, R., et al. (2024). Frontiers and trends of supply chain optimization in the age of industry 4.0: an operations research perspective. *Annals of Operations Research*, 338, 1359–1401. <https://doi.org/10.1007/s10479-024-05879-9>