

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Reducción del costo unitario de cajas en una empresa empaedora de frutas

INGE- 3095

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingenieros Industriales

Presentado por:

Samary Victoria Cedeño Velásquez

Johan Steven Moreira Vargas

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

A Dios, por brindarme la fortaleza y la constancia para perseverar; y a mi familia, especialmente a mis padres, por su amor, sacrificio y apoyo incondicional. Gracias por creer en mí, acompañarme en cada desafío y enseñarme el valor del esfuerzo y la responsabilidad, valores que hoy forman parte esencial de quien soy.

Samary Cedeño Velásquez

A mi madre, por su amor y sacrificio incondicional, y a mi familia, por su apoyo constante durante todo este camino académico.

Johan Moreira Vargas

Agradecimientos

Expresamos nuestro sincero agradecimiento a quienes, desde su labor académica, contribuyeron de manera significativa a nuestro desarrollo profesional y humano. A la MSc. María Fernanda López y a la MSc. Sofía López, por su orientación y valiosos aportes. De manera especial, a nuestra tutora, MSc. Ma. Laura Retamales, por su guía constante, sus consejos y su acompañamiento a lo largo de todo el proceso. A la PhD. María Denise Rodríguez y al Ing. Daniel Pólit, a quienes igualmente extendemos nuestro reconocimiento.

Autores

Declaración Expresa

Nosotros, Samary Victoria Cedeño Velásquez y Johan Steven Moreira Vargas acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá a los autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 17 de octubre del 2025.

Samary Victoria Cedeño Velásquez

Johan Steven Moreira Vargas

Evaluadores

María Fernanda López Sarzosa, M.Sc.

Profesor de Materia

María Laura Retamales García, M.Sc.

Tutor de proyecto

Resumen

El presente proyecto tuvo como objetivo reducir el costo unitario por caja en una empresa empacadora de frutas mediante el análisis del proceso productivo y la implementación de mejoras operativas. El proyecto se justifica por el incremento sostenido del costo unitario, especialmente durante jornadas de baja producción, situación que afecta negativamente la rentabilidad de la empresa. Para el desarrollo del proyecto se aplicó la metodología DMAIC de Lean Six Sigma, utilizando diversas herramientas de análisis que permitieron comprender el comportamiento del proceso e identificar los factores críticos que influyen en su desempeño. A partir de este análisis, se evidenció una alta incidencia de ingreso de fruta no conforme en las operaciones diarias, atribuida principalmente a deficiencias en la planificación productiva. Con base en el diagnóstico obtenido, se formuló una propuesta de mejora que integró un modelo de pronóstico mediante media móvil exponencialmente ponderada (EWMA) y un modelo de planificación basado en programación lineal entera mixta (MILP). Los resultados obtenidos mostraron una reducción del costo unitario de US\$1,41 a US\$1,33 por caja, así como una disminución del porcentaje de fruta no conforme del 11 % al 7 %, fortaleciendo el control del proceso y la toma de decisiones operativas.

Palabras clave: DMAIC, planificación operativa, pronóstico, toma de decisiones, mejora continua.

Abstract

The present project aimed to reduce the unit cost per box in a fruit packing company through the analysis of the production process and the implementation of operational improvements. The project is justified by the sustained increase in unit cost, especially during low-production days, a situation that negatively affects the company's profitability. For the development of the project, the DMAIC methodology of Lean Six Sigma was applied, using various analytical tools that made it possible to understand process behavior and identify the critical factors influencing its performance. From this analysis, a high incidence of nonconforming fruit entering daily operations was identified, mainly attributed to deficiencies in production planning. Based on the diagnostic results, an improvement proposal was formulated that integrated a forecasting model using an exponentially weighted moving average (EWMA) and a planning model based on mixed-integer linear programming (MILP). The results obtained showed a reduction in unit cost from US\$ 1.41 to US\$ 1.33 per box, as well as a decrease in the percentage of nonconforming fruit from 11% to 7%, strengthening process control and operational decision-making.

Keywords: DMAIC, operational planning, forecasting, decision-making, continuous improvement.

Índice general

Resumen	I
<i>Abstract</i>	II
Abreviaturas	VI
Simbología	VII
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	IX
Capítulo 1	1
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 Descripción del problema	3
1.2 Justificación del problema	4
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	4
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	4
1.4 Marco teórico.....	5
1.4.1 <i>Lean Manufacturing</i>	5
1.4.2 <i>Six Sigma</i>	5
1.4.3 <i>Lean Six Sigma</i>	5
1.4.4 <i>Sistema de costos</i>	6
1.4.5 <i>Media Móvil Exponencialmente Ponderada</i>	6
1.4.6 <i>Programación Lineal Entera Mixta</i>	6
Capítulo 2	7
2. METODOLOGÍA	8
2.1 Etapa Definición	8
2.1.1 <i>SIPOC del proceso</i>	8
2.1.2 <i>Identificación de la voz del cliente y diagrama de afinidad</i>	8
2.1.3 <i>Árbol crítico de la calidad</i>	9

2.1.4	<i>Variable de respuesta (Y)</i>	10
2.1.5	<i>Definición del problema</i>	12
2.1.6	<i>Triple Línea Base del proyecto</i>	12
2.2	<i>Etapa Medición</i>	13
2.2.1	<i>Mapeo del proceso (VSM)</i>	13
2.2.2	<i>Confiabilidad de los datos</i>	14
2.2.3	<i>Análisis de estabilidad</i>	15
2.2.4	<i>Análisis de capacidad</i>	16
2.2.5	<i>Estratificación</i>	17
2.2.6	<i>Definición del problema enfocado</i>	18
2.3	<i>Etapa Análisis</i>	18
2.3.1	<i>Lluvia de ideas e Ishikawa</i>	18
2.3.2	<i>Matriz causa–efecto y Diagrama de Pareto</i>	19
2.3.3	<i>Matriz impacto–control</i>	20
2.3.4	<i>Plan de verificación de causas</i>	21
2.3.5	<i>Verificación estadística de causas</i>	21
2.3.6	<i>Técnica de los 5 porqués</i>	22
2.4	<i>Etapa Mejora</i>	24
2.4.1	<i>Evaluación y selección de alternativas</i>	24
2.4.2	<i>Implementación</i>	24
Capítulo 3		27
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	28
3.1	<i>Costo unitario de empaque</i>	28
3.2	<i>Impacto económico</i>	29
3.3	<i>Impacto ambiental</i>	30
3.4	<i>Impacto Social</i>	30
3.5	<i>Plan de Control</i>	31

Capítulo 433

4. Conclusiones y recomendaciones.....34

 4.1 Conclusiones..... 34

 4.2 Recomendaciones 35

Bibliografía.....36

Abreviaturas

3W+2H	What? When? Where? How much? How do I know?
AV	Agrega Valor
DMAIC	Define, Measure, Analyze, Improve, Control
EWMA	Exponentially Weighted Moving Average
I-MR	Individual and Moving Range
LCI	Límite de Control Inferior
LCS	Límite de Control Superior
LSE	Límite de Especificación Superior
MILP	Mixed-Integer Linear Programming
NAV	No Agrega Valor
NAVN	No Agrega Valor, pero es Necesario
SIPOC	Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers
VSM	Value Stream Mapping

Simbología

h	Hora
kg	Kilogramo
p	Valor p

Índice de figuras

Figura 2.1 <i>Serie temporal del costo unitario de empaque</i>	12
Figura 2.2 <i>VSM del proceso de empaque</i>	14
Figura 2.3 <i>Procedimientos de recolección de datos de Costos (A) y (B) de Producción</i>	15
Figura 2.4 <i>Gráficos I-MR del comportamiento del costo unitario de empaque Sept – Oct 2025</i>	16
Figura 2.5 <i>Histograma de capacidad</i>	17
Figura 2.6 <i>Diagramas de cajas por niveles de volúmenes de producción</i>	18
Figura 2.7 <i>Diagrama Ishikawa</i>	19
Figura 2.8 <i>Diagrama de Pareto con las causas potenciales del alto costo unitario</i>	20
Figura 2.9 <i>Matriz impacto – control</i>	20
Figura 2.10 <i>Proceso de implementación</i>	26
Figura 3.1 <i>Comparación Costo Unitario</i>	28
Figura 3.2 <i>Análisis Impacto Económico</i>	29
Figura 3.3 <i>Análisis Impacto Ambiental</i>	30
Figura 3.4 <i>Análisis Impacto Social</i>	31

Índice de tablas

Tabla 2.1 <i>Diagrama de afinidad</i>	9
Tabla 2.2 <i>Árbol crítico de la calidad</i>	9
Tabla 2.3 <i>Componentes de la Ecuación 2.1</i>	10
Tabla 2.4 <i>Indicadores de la Triple Línea Base</i>	13
Tabla 2.5 <i>Análisis de varianza (ANOVA) causa X4</i>	21
Tabla 2.6 <i>Análisis de varianza (ANOVA) causa X18</i>	22
Tabla 2.7 <i>Técnica de los 5 porqués</i>	23
Tabla 2.8 <i>Plan de implementación</i>	25
Tabla 3.1 <i>Estadísticas descriptivas</i>	29
Tabla 3.2 <i>Prueba Mann-Whitney</i>	29
Tabla 3.3 <i>Plan de Control</i>	32

Capítulo 1

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la creciente demanda de frutas exóticas ha impulsado a las empacadoras a mejorar sus procesos con el fin de garantizar calidad, eficiencia operativa y control de costos. Las empresas del sector deben responder a variaciones frecuentes en la disponibilidad de fruta y mantener niveles de productividad que permitan cumplir con los requerimientos de los clientes, por lo que su estabilidad operativa se convierte, entonces, en un desafío cuando los volúmenes procesados fluctúan, ya que pequeños cambios pueden alterar el rendimiento general del proceso.

La empacadora en la cual se desarrolló este proyecto, realiza actividades de recepción, clasificación, selección, limpieza, empaque y paletizado principalmente de pitahaya, en un entorno donde la disponibilidad de materia prima varía a diario. La operación depende de recursos que no siempre se ajustan al ritmo de producción, motivo por el cual el comportamiento del costo unitario por caja emerge como un indicador clave para evaluar la eficiencia del proceso. Así, el control de costos se relaciona con desafíos económicos actuales, como la variación en los precios de insumos y la irregularidad del abastecimiento; también incorpora una dimensión social, al influir en la estabilidad del personal y en la organización del trabajo diario, y un componente ambiental, dado que la reducción del rechazo de fruta y la gestión eficiente de los materiales procesados permiten disminuir la generación de residuos y mitigar el impacto asociado a su disposición.

El proyecto se desarrolla dentro del ámbito de la Ingeniería Industrial, integrando técnicas de análisis de procesos, medición operativa, estadística aplicada y metodologías de mejora continua como *Lean Six Sigma*, permitiendo desarrollar competencias relacionadas con la toma de decisiones basadas en datos y con la evaluación de comportamientos operativos en escenarios reales. La colaboración con una empacadora permite comprender de manera directa la dinámica operativa del sector y detectar con mayor precisión los puntos donde la eficiencia puede

fortalecerse. En ese sentido, este vínculo aporta un beneficio mutuo: por un lado, ofrece a la organización herramientas para mejorar su desempeño y reducir costos; por otro, contribuye al sector productivo al generar conocimiento aplicable a procesos similares, favoreciendo prácticas más sostenibles, eficientes y competitivas dentro de la cadena de valor. De manera general, el alcance del proyecto se orienta a comprender cómo varía el costo unitario en función de los niveles de producción y a analizar las condiciones bajo las cuales se incrementa.

El presente informe se organiza en cuatro capítulos: el primero aborda el contexto y los fundamentos teóricos, el segundo explica la metodología empleada, el tercero desarrolla el análisis de la información recopilada, el cuarto presenta las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

1.1 Descripción del problema

La empacadora analizada procesa pitahaya mediante actividades operativas cuya demanda depende del volumen de fruta recibido cada día. La disponibilidad de materia prima fluctúa por factores externos como el clima, los tiempos de cosecha o la logística de los productores, lo que genera variaciones en la carga operativa y conduce a escenarios en los que varios recursos continúan siendo requeridos aun cuando el volumen procesado disminuye.

Los registros internos evidencian que los días con menor producción presentan los valores unitarios más altos, lo que confirma la presencia de un problema actual y medible que amerita de un análisis técnico.

El comportamiento observado se relaciona con variables como el volumen procesado, el nivel de utilización del personal propio, el consumo de recursos operativos y la discontinuidad del flujo de trabajo. La variabilidad en el abastecimiento y la necesidad de mantener recursos disponibles durante toda la jornada convierten el costo unitario por caja en un indicador crítico para evaluar el desempeño real del proceso.

1.2 Justificación del problema

El análisis del costo unitario por caja es fundamental para la gestión operativa de una empaedora, ya que su comportamiento influye en la rentabilidad y en la competitividad del negocio. Los incrementos observados en jornadas con baja producción afectan directamente los márgenes económicos y evidencian oportunidades de mejora relacionadas con la planificación, la asignación de recursos y la estabilidad del flujo de trabajo. Abordar esta problemática permite optimizar la operación y mejorar la eficiencia general del proceso.

Desde una perspectiva académica, la investigación agrega valor al involucrar metodologías de mejora continua aplicadas a un proceso donde la variabilidad es una condición inherente.

La justificación práctica se sustenta en que los resultados del proyecto pueden apoyar decisiones orientadas a reducir la variabilidad del costo unitario, mejorar la utilización de recursos y promover una operación más estable y eficiente. La identificación de los factores que inciden en los incrementos del costo en días de baja producción contribuye a diseñar estrategias para fortalecer la sostenibilidad y el desempeño de la empaedora.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Disminuir el costo unitario promedio por caja empacada en la empaedora en un 25% (de US\$1,41 a US\$1,33) en un plazo de 120 días, mediante la aplicación de herramientas Lean Six Sigma.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Analizar los factores que contribuyen al alto costo unitario por caja empacada, teniendo en cuenta los costos de mano de obra, materiales, alimentación y servicios básicos.

2. Identificar los cuellos de botella y las ineficiencias en el proceso de empaque utilizando herramientas de mejora continua.
3. Implementar mejoras destinadas a reducir los desperdicios y gestionar los recursos de manera eficiente, optimizando así los costos operativos.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Lean Manufacturing

Lean Manufacturing es una filosofía de trabajo basada en las personas, cuya meta es mejorar el flujo de los procesos eliminando los desperdicios. Se considera desperdicio todo aquello que no agrega valor y consume más recursos de los necesarios. Esta filosofía se enfoca en siete desperdicios: sobreproducción, inventario, defectos, esperas, transporte, movimiento y sobreprocesamiento (Hernández Matías & Vizán Idoipe, 2013).

1.4.2 Six Sigma

Para Gutiérrez (2010) *Six Sigma* es una metodología de mejora continua que se centra en mejorar los procesos y reducir su variabilidad. Tiene un enfoque muy sistemático y cuantitativo, ya que a través del análisis de datos se busca identificar y eliminar las causas de errores y defectos en los procesos, siempre teniendo en cuenta las necesidades del cliente. Su objetivo, que da sentido a su nombre, es alcanzar procesos de calidad *Six Sigma*, lo que significa que, como máximo, se generen 3.4 defectos por cada millón de oportunidades de error. Para aplicar esta metodología se tiene un ciclo de cinco etapas: Definir, Medir, Analizar, Mejorar, Controlar, el cuál guía la ejecución ordenada del proyecto.

1.4.3 Lean Six Sigma

Para Shah & Deshpande (2015), *Lean Six Sigma* es una metodología que integra los principios de Lean con las herramientas de Six Sigma para lograr soluciones más completas y

efectivas. Su propósito es optimizar recursos, aumentar la velocidad y estabilidad de los procesos considerando las necesidades de los clientes.

1.4.4 Sistema de costos

Un sistema de costos por proceso se utiliza en industrias que producen en masa, en grandes volúmenes y con poca variación de productos. En este sistema, el costo unitario se obtiene dividiendo el costo total de producción, que incluye tanto los costos fijos como variables, entre el número total de unidades producidas en un periodo específico (por día, orden de producción, etc.) (Sanchez de los Santos, 2012).

1.4.5 Media Móvil Exponencialmente Ponderada

EWMA, por sus siglas en inglés. Es una técnica ampliamente utilizada para el pronóstico de series de tiempo en contextos empresariales e industriales, debido a su simplicidad y buen desempeño predictivo. Este modelo asigna mayor peso a las observaciones más recientes, permitiendo una rápida adaptación a cambios en el comportamiento de la serie. Su implementación requiere pocos parámetros y bajo esfuerzo computacional, lo que lo hace especialmente atractivo en aplicaciones operativas (Sbrana & Pelagatti, 2024).

1.4.6 Programación Lineal Entera Mixta

Es una técnica de optimización utilizada para apoyar la toma de decisiones. Un modelo de optimización se considera un programa entero (IP) cuando al menos una de sus variables es discreta. Si todas las decisiones son de este tipo, el modelo es un programa entero puro; cuando se combinan decisiones enteras con valores continuos, se habla de un programa entero mixto (MILP). Este tipo de modelos permite representar situaciones reales de asignación y selección de manera clara, manteniendo una estructura matemática sencilla que facilita su solución (Rardin, 2017).

Capítulo 2

2. METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto sigue la metodología DMAIC, la cual proporciona una estructura ordenada para comprender el proceso, medir su comportamiento real y analizar los factores que afectan el costo unitario por caja.

2.1 Etapa Definición

La etapa de Definición permite establecer con claridad el problema central y los elementos clave que guían el proyecto. En este punto se identificaron las necesidades y expectativas del cliente, se describió el alcance del proceso y se recopiló información inicial que facilitó comprender la situación de la empresa.

2.1.1 SIPOC del proceso

Para esta fase se utilizó un SIPOC con el fin de describir de manera resumida las actividades que conforman el proceso de empaque. Como se presenta en la Apéndice A.1, esta herramienta permitió organizar la información inicial, identificar a los actores involucrados y delimitar el alcance del proyecto¹.

2.1.2 Identificación de la voz del cliente y diagrama de afinidad

En esta etapa se identificó la voz del cliente a partir de los criterios del gerente general y de operaciones, y la información recopilada se organizó mediante un diagrama de afinidad como se observa en la Tabla 2.1, lo que permitió agrupar los comentarios en categorías.

¹ El alcance del proceso incluye todas las actividades comprendidas entre la recepción de fruta y su paletizado.

Tabla 2.1*Diagrama de afinidad*

Medición del desempeño y productividad	<p>Equilibrar las cargas de trabajo entre el personal de la empresa y el personal tercerizado.</p> <p>Reducir la cantidad de operarios subutilizados o con sobrecarga de trabajo.</p> <p>Mantener una productividad estable a lo largo de la jornada.</p> <p>Definir el número óptimo de trabajadores según el volumen de producción.</p>
Eficiencia y flujo del proceso	<p>Mantener un flujo continuo en el proceso.</p> <p>Reducir o eliminar actividades que no agregan valor.</p> <p>Lograr la coordinación entre el personal interno y la mano de obra tercerizada.</p>
Control de costos	<p>Reducir el costo por caja empacada sin comprometer la calidad.</p> <p>Mantener la estabilidad de los costos.</p>

2.1.3 Árbol crítico de la calidad

El árbol crítico de la calidad que se muestra en la Tabla 2.2 se elaboró con el propósito de traducir las necesidades y expectativas del cliente en requisitos específicos.

Tabla 2.2*Árbol crítico de la calidad*

Necesidad	Conductores	Críticos para la calidad
Reducción del costo unitario por caja	Medición del desempeño y productividad	Tasa de utilización del personal propio (%)
		Productividad (kg/hora-hombre)
		Cobertura de capacitación (%)
	Eficiencia y flujo del proceso	Proporción de tiempo inactivo (%)
		Tiempo promedio de espera por lote (min)
Control de costos		Tasa de fruta no conforme (%)
		Costo unitario de empaque (US\$/caja)

2.1.4 Variable de respuesta (Y)

La variable de respuesta seleccionada corresponde al costo unitario por caja empacada (US\$/caja), el cual representa el costo promedio diario que requiere procesar una caja de fruta desde su recepción hasta el paletizado final en la empacadora. Sus componentes se encuentran definidos en la ecuación 2.1 y con mayor detalle en la Tabla 2.3.

$$\text{Costo unitario} = \frac{C_{1i} + C_{2i} + C_{3i} + C_{4i} + C_{5i}}{B_i} \quad (2.1)$$

Dónde:

Tabla 2.3

Componentes de la Ecuación 2.1

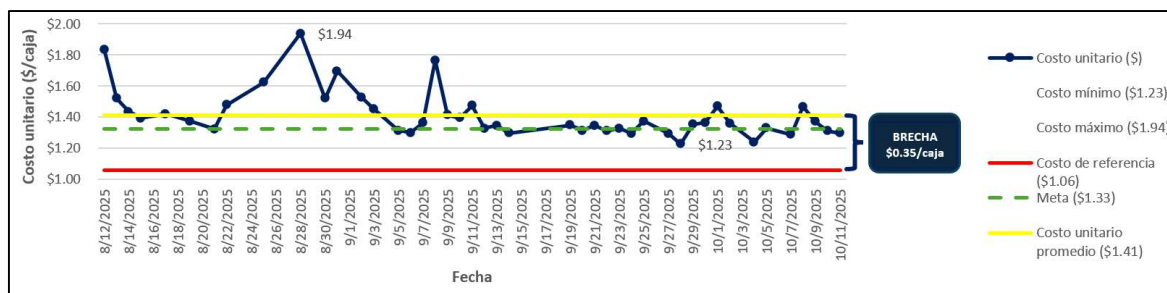
Código	Componente	Descripción	¿Cómo se calcula?	Unidades
C_{1i}	Costo de materiales de empaque	Incluye mallas, palets, etiquetas y otros consumibles utilizados en el proceso de empaque	Dólares gastados en materiales de empaque en el día i	US\$/día
C_{2i}	Costo de mano de obra interna	Mano de obra interna directa involucrada en la carga, pesaje y descarga	Horas trabajadas en el día $i \times$ Costo de mano de obra por hora	US\$/día
C_{3i}	Costo de mano de obra de terceros (empaque)	Mano de obra subcontratada para actividades de clasificación, lavado, secado y empaque	Número de cajas empacadas en el día $i \times$ Tarifa de terceros	US\$/día

C_{4i}	Costo de alimentación del personal	Alimentación para el personal operativo durante el turno de trabajo	Número de operarios en el día i \times costo unitario de alimentación	US\$/día
C_{5i}	Costo de servicios básicos	Electricidad y agua potable	Número de cajas empacadas en el día i \times Factor Unitario de Servicios (Costo mensual de servicios / Cajas procesadas mensualmente)	US\$/día
B_i	Cantidad total de cajas procesadas	Cajas procesadas	Número de cajas procesadas en el día i .	cajas/día

Tras definir la variable de respuesta, se analizó su comportamiento a lo largo del tiempo por medio de una serie temporal correspondiente al periodo comprendido entre agosto y octubre de 2025, presentada en la Figura 2.1. El gráfico reveló que el costo unitario alcanza un máximo de 1.94 dólares por caja y un mínimo de 1.23 dólares, con un promedio de 1.41 dólares durante el periodo estudiado. Al compararse con la referencia interna de 1.06 dólares por caja, se determinó una brecha de 0.35 dólares, que permitió definir a su vez una meta de reducción realista equivalente al 25% de dicha brecha, lo que representa aproximadamente 0.08 dólares por caja.

Figura 2.1

Serie temporal del costo unitario de empaque



2.1.5 Definición del problema

La definición del problema se construyó a partir del análisis previo mediante la herramienta 3W + 2H, la cual permitió precisar qué situación afecta a la empaedora, dónde ocurre, cuándo se presenta, y la base para determinar qué es un problema, tal como se visualiza en el Apéndice A.2.

A continuación, se presenta el problema identificado:

“Desde el 12 de agosto de 2025, se ha observado un costo unitario promedio alto por caja empacada en la instalación de empaque de fruta. Durante este periodo, el costo unitario promedio fue de US\$1.41 por caja, mientras que el costo mínimo registrado fue de US\$1.23 por caja.”

2.1.6 Triple Línea Base del proyecto

En esta etapa también se definieron los indicadores asociados al Triple Línea Base, con el propósito de evaluar el desempeño del proceso desde una perspectiva integral que incluya dimensiones financieras, sociales y ambientales. La Tabla 2.5 resume los indicadores definidos para cada dimensión y las metas establecidas para el proyecto.

Tabla 2.4*Indicadores de la Triple Línea Base*

Categoría	Indicador	Fórmula	Meta	Valor actual
Social	Tasa de cobertura de capacitación (TCR)	$TCR = \frac{\text{Total de trabajadores capacitados}}{\text{Total de trabajadores}} \times 100$	$\geq 90\%$	0%
Ambiental	Tasa de fruta no conforme (FRR)	$UC = \frac{\text{Fruta no conforme rechazada (kg)}}{\text{Fruta recibida (kg)}} \times 100$	$\leq 10\%$	11%
Financiero	Costo Unitario por Caja Empacada (Ca)	$Ca = \frac{\text{Costo total operacional}}{\text{Cajas procesadas}}$	US\$1.33/caja	US\$1.41/caja

2.2 Etapa Medición

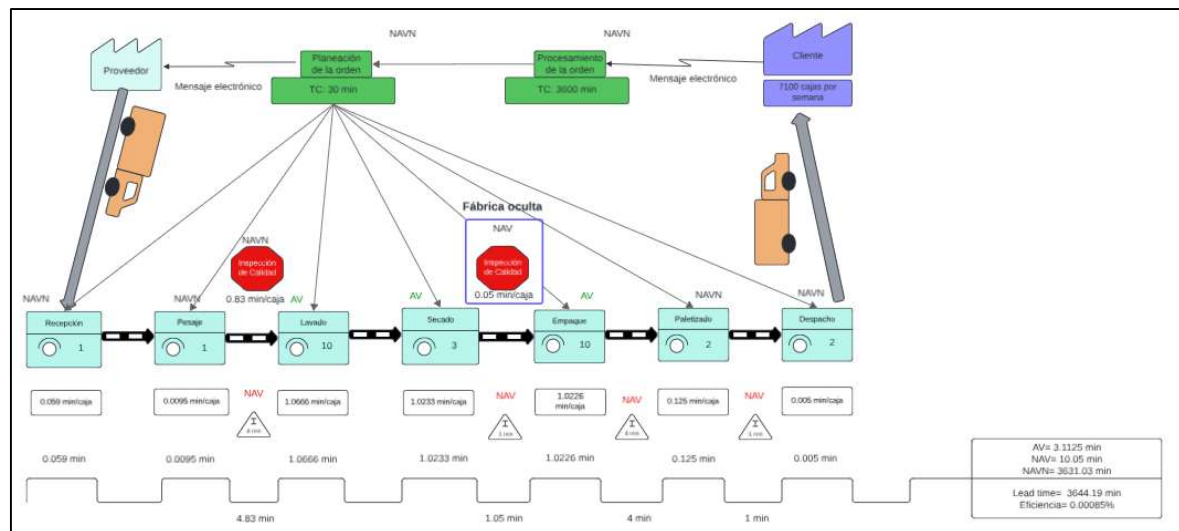
La etapa de medición permitió cuantificar el comportamiento real del proceso y obtener los datos necesarios para comprender cómo varía el costo unitario por caja en distintas condiciones operativas.

2.2.1 Mapeo del proceso (VSM)

El mapeo del proceso se desarrolló mediante un *Value Stream Mapping*. La herramienta permitió identificar las actividades que agregan valor, las que no lo hacen y las que no lo hacen, pero son necesarias para ejecutar el proceso. La Figura 2.2 muestra el VSM elaborado a partir de la información recopilada.

Figura 2.2

VSM del proceso de empaque



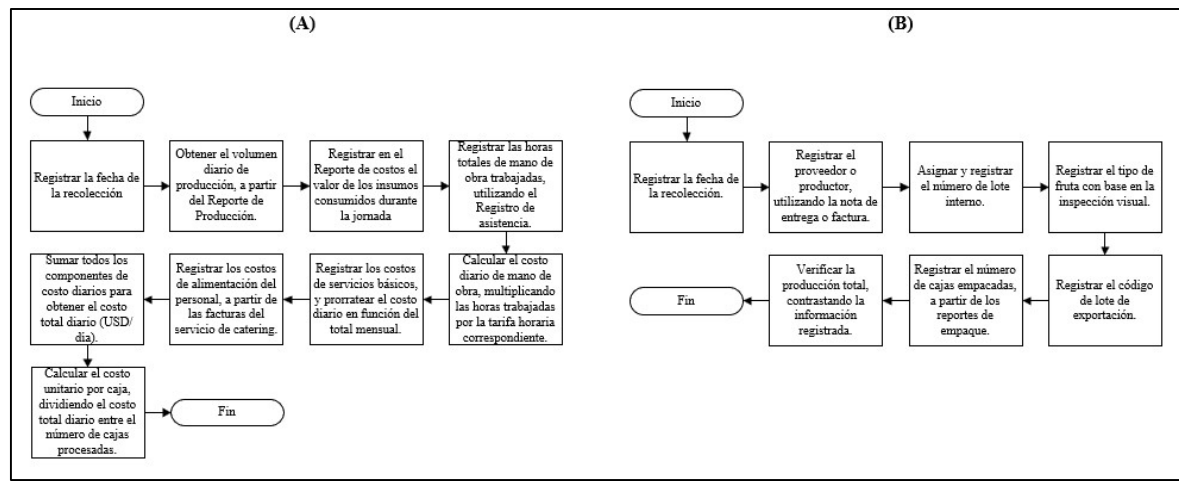
El análisis del flujo muestra un cuello de botella en la secuencia de lavado, secado y empaque, donde los tiempos de ciclo alcanzan valores cercanos a 1.02 - 1.06 minutos por caja. La estación de lavado, con 1.0666 minutos por caja, define la capacidad del sistema, ya que el resto de las actividades opera con mayor rapidez. También se identifica una fábrica oculta debido a una doble inspección de calidad en la estación de empaque que añade trabajo sin valor y prolonga el tiempo total de procesamiento.

2.2.2 Confiabilidad de los datos

La confiabilidad de los datos se aseguró mediante procedimientos de recolección estandarizados, como los presentados en la Figura 2.3. Asimismo, la información utilizada provino directamente de fuentes operativas primarias, tales como reportes de producción, hojas de asistencia, facturas y recibos, garantizando que los datos reflejaran las condiciones operativas reales y no estimaciones o supuestos.

Figura 2.3

Procedimientos de recolección de datos de Costos (A) y (B) de Producción



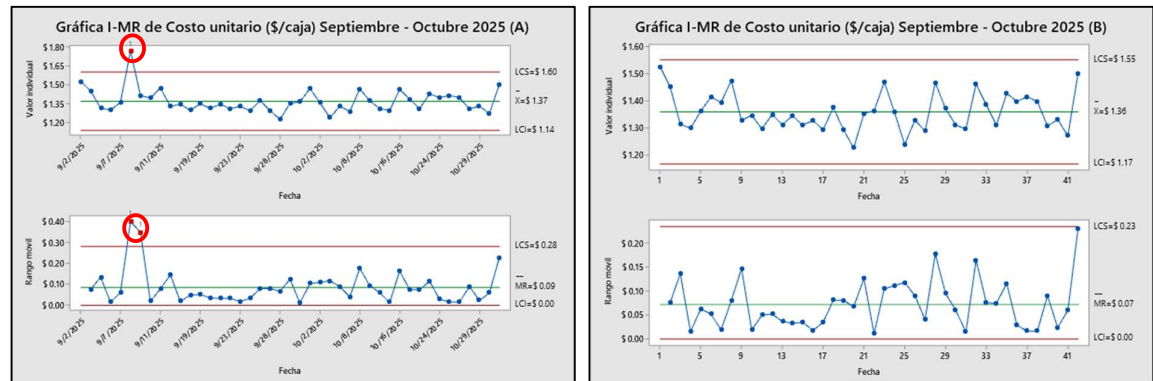
2.2.3 Análisis de estabilidad

El análisis de estabilidad se realizó mediante gráficos I-MR contruidos con los datos de costos unitarios de septiembre y octubre como se muestra en la Figura 2.4. En la primera iteración, ambos gráficos detectaron puntos fuera de los límites de control, asociados al 08/09/2025, día en el que se recibió un volumen inusual de personal tercerizado que elevó los costos de alimentación y alteró el costo unitario. Esa observación se clasificó como variación especial y se retiró del conjunto de datos. Con la segunda iteración, los datos restantes (42 puntos) se mantuvieron dentro de los límites y sin señales de inestabilidad, por lo que el proceso se consideró estable.

Figura 2.4

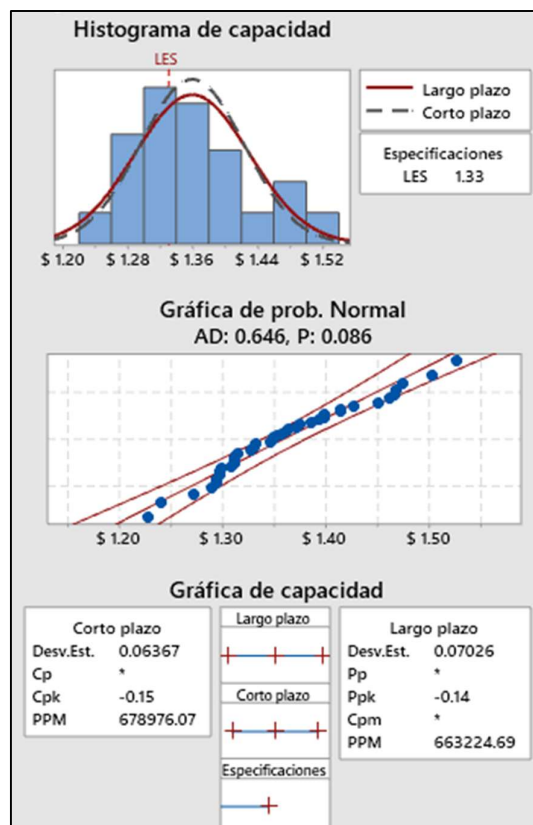
Gráficos I-MR del comportamiento del costo unitario de empaque Sept – Oct 2025

(A) Antes y (B) Después



2.2.4 Análisis de capacidad

El análisis de capacidad se realizó utilizando el límite superior de especificación de 1.33 dólares por caja como se muestra en la Figura 2.5. Los resultados muestran que, aunque los datos siguen una distribución normal ($p > 0.05$), el proceso no cumple con este valor de referencia. El índice Cpk registrado es negativo (- 0.15), lo que indica que el promedio del proceso se encuentra por encima del límite establecido y, por tanto, no es capaz de operar dentro del nivel esperado.

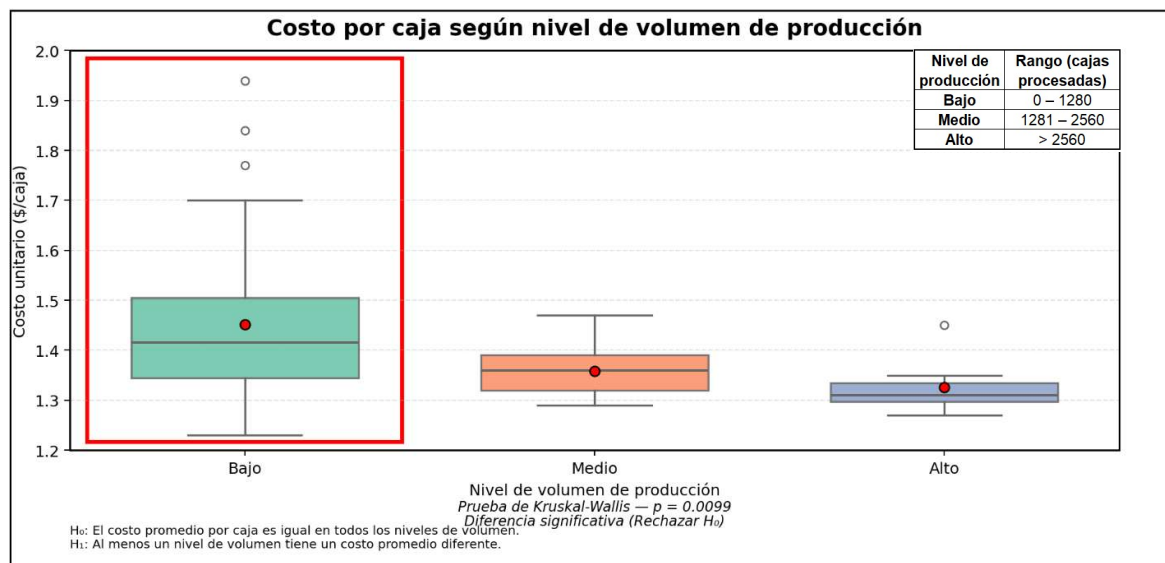
Figura 2.5*Histograma de capacidad*

2.2.5 Estratificación

El volumen de producción fue elegido como factor de estratificación después de aplicar la prueba de Kruskal–Wallis que se muestra en la Figura 2.6, que confirmó diferencias significativas entre los niveles evaluados ($p > 0.05$). El análisis mostró que los días de baja producción presentan los mayores costos unitarios y una mayor variabilidad, por lo que se identificaron como el foco principal para las estrategias de reducción de costos en la empacadora.

Figura 2.6

Diagramas de cajas por niveles de volúmenes de producción



2.2.6 Definición del problema enfocado

A continuación, se presenta el problema considerando el factor de estratificación identificado y datos desde agosto hasta octubre de 2025:

“Desde el 12 de agosto de 2025, se ha observado un costo unitario promedio alto por caja empacada en días de baja producción, en las instalaciones de la empacadora. Durante este periodo, el costo unitario promedio fue de US\$1.45 por caja, mientras que el costo mínimo registrado fue de US\$1.23 por caja.”

2.3 Etapa Análisis

En esta fase, con la participación del gerente general, el jefe de operaciones y el personal operativo, se obtuvieron las causas potenciales del problema, se validaron y se estableció la causa raíz.

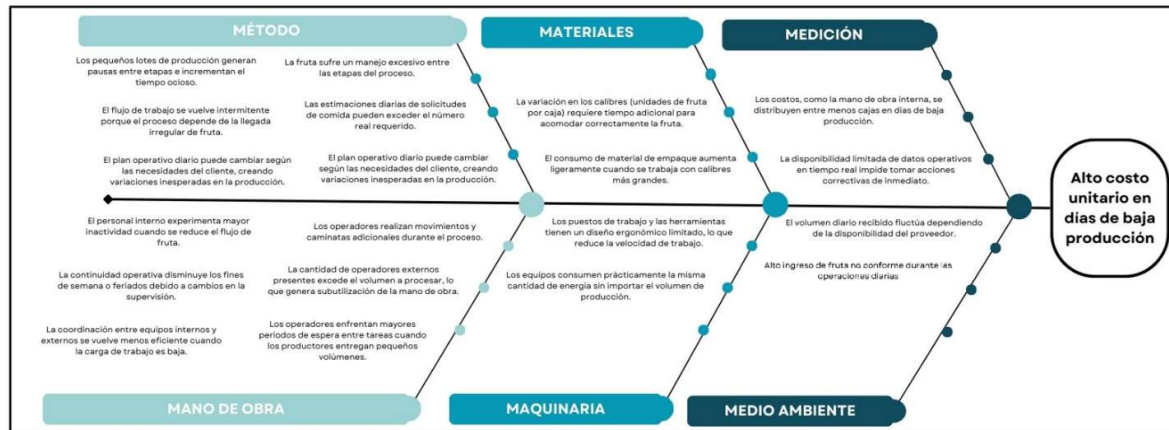
2.3.1 Lluvia de ideas e Ishikawa

La identificación de las posibles causas del problema comenzó con una sesión de lluvia de ideas realizada junto con el equipo operativo. De aquel intercambio surgieron 20 causas

preliminares, las mismas que posteriormente fueron clasificadas en las seis categorías habituales del diagrama Ishikawa, el cual se evidencia en la Figura 2.7.

Figura 2.7

Diagrama Ishikawa



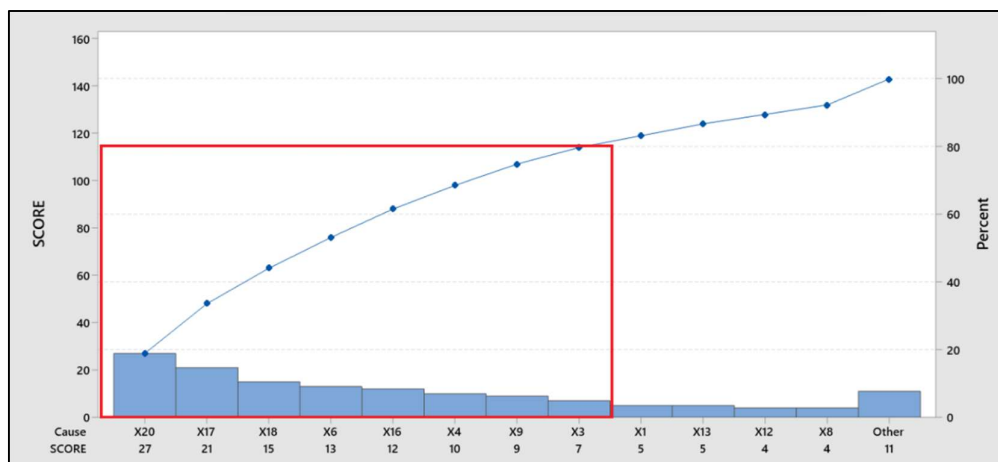
2.3.2 Matriz causa-efecto y Diagrama de Pareto

La matriz causa-efecto se elaboró con el propósito de priorizar las causas identificadas durante esta etapa considerando el estándar definido en el Apéndice A.3.2. La herramienta, cuyos resultados se muestran en la Apéndice A.3.1, permitió valorar cada causa desde la perspectiva de quienes supervisan el proceso diariamente, asignando puntajes, según el nivel de impacto observado en el costo unitario y la influencia en el desempeño operativo.

Con base en los resultados obtenidos, se elaboró el diagrama de Pareto presentado en la Figura 2.8, el cual permitió identificar las causas que concentran aproximadamente el 80 % del impacto asociado al alto costo unitario por caja empacada durante los días de baja producción. Dichas causas fueron destacadas en la Matriz Causa-Efecto mostrada en el Apéndice A.3.1, donde se resaltan en color celeste para facilitar su identificación.

Figura 2.8

Diagrama de Pareto con las causas potenciales del alto costo unitario

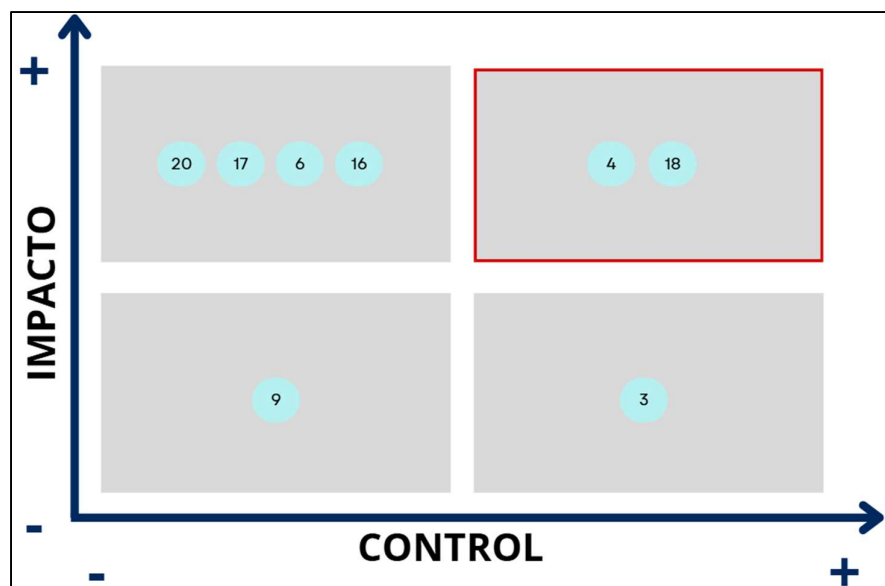


2.3.3 Matriz impacto-control

Tras identificar las causas con mayor influencia en el problema, se priorizaron aquellas sobre las que la empaadora podía ejercer un control directo y que, al mismo tiempo generaban un impacto significativo en el costo unitario por caja, por medio de la Matriz Impacto – Control como se evidencia en la Figura 2.9.

Figura 2.9

Matriz impacto – control



2.3.4 Plan de verificación de causas

Para las causas obtenidas del apartado anterior, se estableció un plan de verificación como se observa en el Apéndice A.4, para corroborar el impacto y significancia de las mismas dentro del problema.

2.3.5 Verificación estadística de causas

Verificación estadística de causa X4: El número de operadores de empaque de terceros presentes supera el volumen diario a procesar, lo que genera subutilización de mano de obra.

Si bien la ecuación de regresión obtenida (Ecuación 2.2) muestra un coeficiente β_1 positivo (1.61) para la variable estudiada (Ratio Mano de Obra/Volumen), el análisis de regresión lineal (Tabla 2.5) evidencia un valor p de 0.334, superior al nivel de significancia de 0.05. En consecuencia, dicho coeficiente no cumple con el criterio de significancia estadística, por lo que no se puede establecer una relación causal significativa entre el exceso de personal y el incremento del costo unitario de empaque.

Ecuación de regresión

$$\text{Costo unitario (US$/caja)} = 1.354 + 1.61 \text{ Ratio de trabajadores a volumen} \quad (2.2)$$

Tabla 2.5

Análisis de varianza (ANOVA) causa X4

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	Valor F	Valor P
Regresión	1	0.03936	0.03936	0.98	0.334
<i>Ratio de Trabajadores a Volumen</i>	1	0.03936	0.03936	0.98	0.334
Error	19	0.762	0.04011		
Total	20	0.80136			

Verificación estadística de causa X18: Alto ingreso de fruta no conforme durante las operaciones diarias.

La ecuación de regresión obtenida (Ecuación 2.3) muestra un coeficiente β_1 positivo igual a 0.855 para la variable de X18 (Tasa de rechazo), lo que indica que un incremento en la tasa de

rechazo se asocia con un aumento del costo unitario de empaque. Basado en el análisis de regresión lineal (Tabla 2.6), se obtuvo un valor p de 0.002, inferior al nivel de significancia de 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se confirma la existencia de una relación directa y estadísticamente significativa entre el alto ingreso de fruta no conforme y el costo unitario.

Ecuación de regresión

$$\text{Costo unitario (US$/caja)} = 1.3554 + 0.855 \text{ Tasa de rechazo} \quad (2.3)$$

Tabla 2.6

Análisis de varianza (ANOVA) causa XI8

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	Valor F	Valor P
Regresión	1	0.1938	0.19382	11.45	0.002
<i>Tasa de rechazo</i>	1	0.1938	0.19382	11.45	0.002
Error	40	0.6773	0.01693		
Total	41	0.8712			

2.3.6 Técnica de los 5 porqués

Se analizaron los resultados de las herramientas aplicadas y se presentó la causa potencial significativa. A esta causa se le realizó un análisis profundo para determinar su causa raíz utilizando la herramienta de los 5 Porqués, como se muestra en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7

Técnica de los 5 porqués

X18	Ronda 1	Hipótesis	Ronda 2	Hipótesis	Ronda 3	Hipótesis	Acción a tomar
Alto ingreso de fruta no conforme en las operaciones diarias	¿Por qué está ingresando fruta no conforme al proceso?	Porque la empresa no conoce con anticipación qué proporción de la fruta entrante será no conforme y qué proporción será apta para empaque.					Diseñar e implementar un sistema que reemplace los supuestos fijos por decisiones basadas en datos reales y actuales.
			¿Por qué la empresa no conoce con anticipación qué proporción de la fruta entrante será no conforme y qué proporción será apta para empaque?	Porque cada proveedor presenta diferentes niveles de fruta no conforme y no existe un análisis que permita estimar el porcentaje esperado.			
					¿Por qué no existe un análisis para estimar el porcentaje esperado de fruta no conforme por proveedor?	Porque la planificación operativa se basa en supuestos fijos que no reflejan la variabilidad real del proceso ni de sus proveedores.	
Causa raíz: La planificación operativa se basa en supuestos fijos que no reflejan la variabilidad real del proceso y de sus proveedores.							

2.4 Etapa Mejora

En esta etapa, se realizó el análisis y evaluación de alternativas de solución para abordar la causa raíz identificada, y se llevó a cabo la implementación de la alternativa seleccionada.

2.4.1 Evaluación y selección de alternativas

En los Apéndice A.5.1 y A.5.2 se presenta la comparación de las alternativas de modelo y de estrategia de implementación, respectivamente, utilizando una escala de evaluación de 1 a 5, donde 5 representa el mejor desempeño en cada criterio analizado.

En general, se seleccionó el modelo EWMA + MILP por su mejor desempeño global y baja necesidad de configuración del usuario final. Asimismo, se optó por el desarrollo propio en Python, como estrategia de implementación, ya que ofrece mayor flexibilidad y escalabilidad, con menor dependencia de terceros y beneficios económicos para la empresa.

2.4.2 Implementación

A continuación, en la Tabla 2.8 se presenta el plan de implementación del modelo seleccionado, en el cual se detallaron las actividades, responsables, herramientas, costos y cronograma definidos para llevar a cabo la solución propuesta.

Tabla 2.8

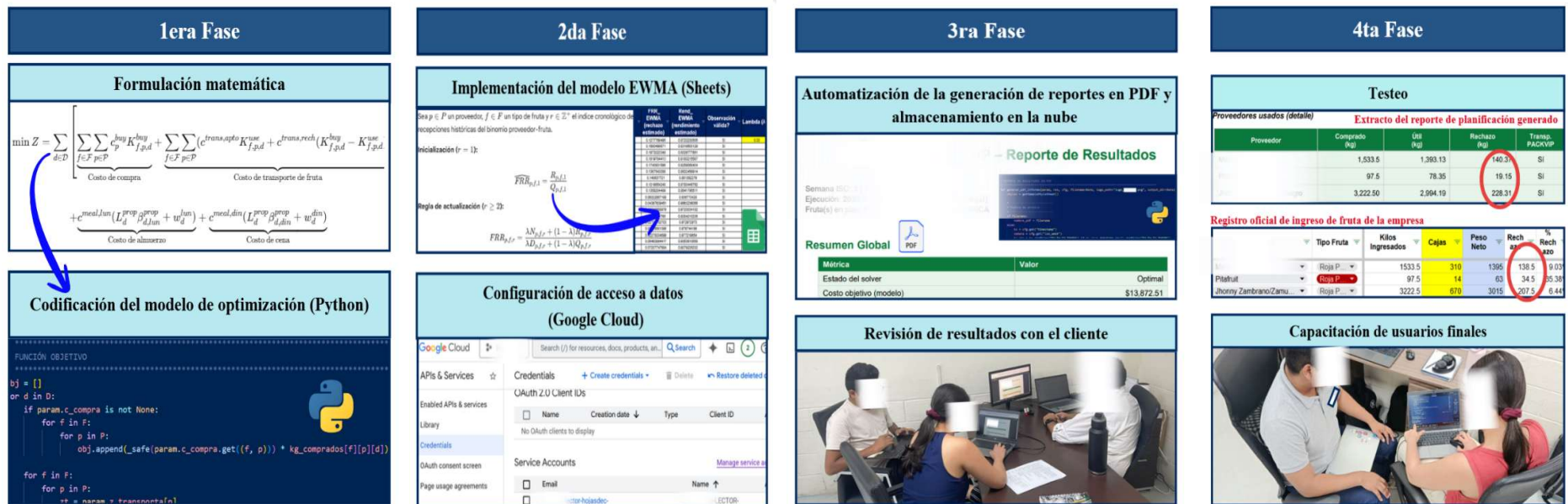
Plan de implementación

Causa raíz	¿Qué?	¿Cómo?	¿Dónde?	¿Quién?	¿Cuánto?	¿Cuándo?	Estado
La planificación operativa se basa en supuestos fijos que no reflejan la variabilidad real de los rendimientos y de los proveedores.	Diseñar e implementar un sistema de planificación que reemplace los supuestos fijos por decisiones basadas en datos reales y actuales.	Fase 1: Formulación del modelo MILP en Python, definición de la función objetivo de minimización de costos, restricciones operativas y diseño de la arquitectura de datos en Google Sheets.	Google Sheets (datos y pronóstico) y Python (optimización).	Líderes del proyecto: análisis, modelación, desarrollo e implementación del sistema. Cliente: validación operativa de datos y resultados.	USD 0 (desarrollo interno).	Fase 1: 10 de diciembre – 18 de diciembre. Fase 2: 21 de diciembre – 05 de enero. Fase 3: 06 de enero – 12 de enero. Fase 4: 13 de enero – 20 de enero.	Completado
		Fase 2: Carga y estandarización de datos reales, validación operativa, implementación del modelo de pronóstico EWMA y conexión API entre Google Sheets y Python.					
		Fase 3: Ejecución del optimizador con datos reales, revisión de resultados y automatización de la generación de reportes en formato PDF.					
		Fase 4: Testeo comparando compras reales versus recomendaciones del modelo, documentación técnica y capacitación al usuario final.					

De acuerdo con el plan de implementación definido, la ejecución del proyecto se llevó a cabo de manera progresiva a través de cuatro fases claramente diferenciadas, tal como se ilustra en la Figura 2.10.

Figura 2.10

Proceso de implementación



Capítulo 3

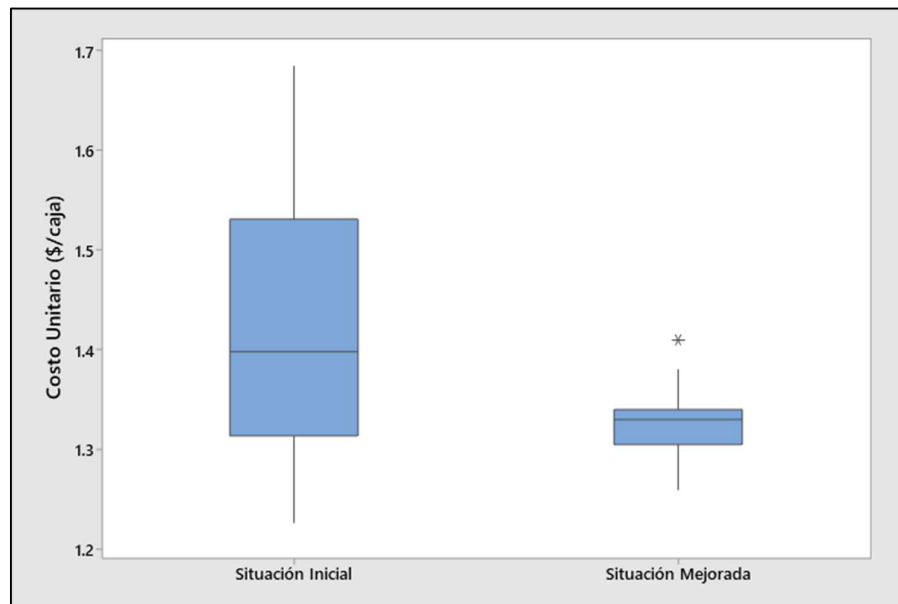
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Costo unitario de empaque

Para validar el impacto de la solución implementada, se realizó una comparación entre la situación inicial del proceso y el escenario posterior a la implementación, se obtuvieron las estadísticas descriptivas (Tabla 3.1) y a través de prueba Mann-Whitney (Tabla 3.2). se determina que sí hay una diferencia significativa entre ambos casos.

Figura 3.1

Comparación Costo Unitario



Método

η_1 : mediana de Situación Inicial

η_2 : mediana de Situación Mejorada

Diferencia: $\eta_1 - \eta_2$

Hipótesis nula H_0 : $\eta_1 - \eta_2 = 0$

Hipótesis alterna H_1 : $\eta_1 - \eta_2 \neq 0$

Tabla 3.1*Estadísticas descriptivas*

Muestra	N	Mediana
Situación Inicial	20	1.39832
Situación Mejorada	6	1.33000

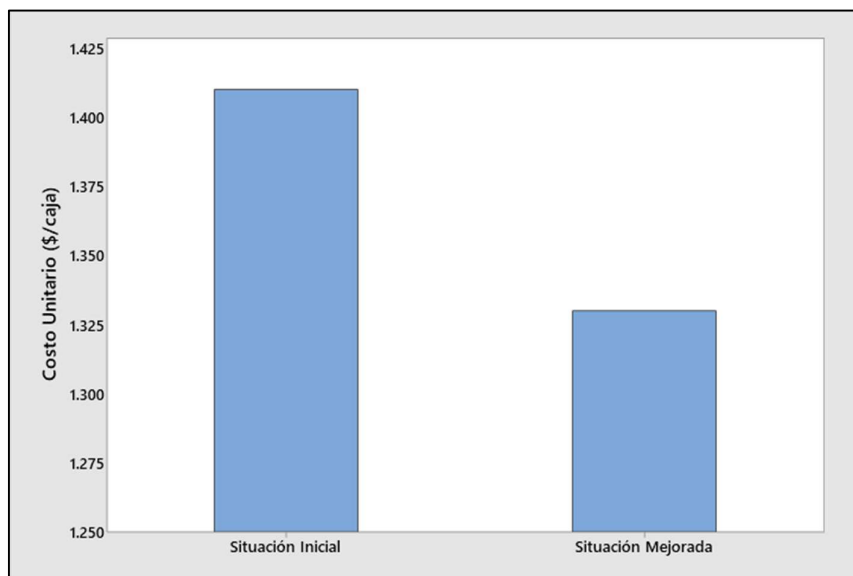
Tabla 3.2*Prueba Mann-Whitney*

Método	Valor W	Valor p
No ajustado para empates	562.00	0.006
Ajustado para empates	562.00	0.006

Considerando que la prueba arrojó un valor $p < 0.05$, se concluye que la diferencia entre los dos escenarios es significativa.

3.2 Impacto económico

La reducción del costo unitario de empaque de US\$1,41 a US\$1,33 representa un ahorro unitario de US\$0,08 por caja, lo que se traduce en un ahorro económico aproximado de US\$3.072 mensuales, considerando una demanda promedio de 9600 cajas semanales. Este resultado confirma el impacto positivo de las mejoras implementadas sobre el desempeño económico del proceso.

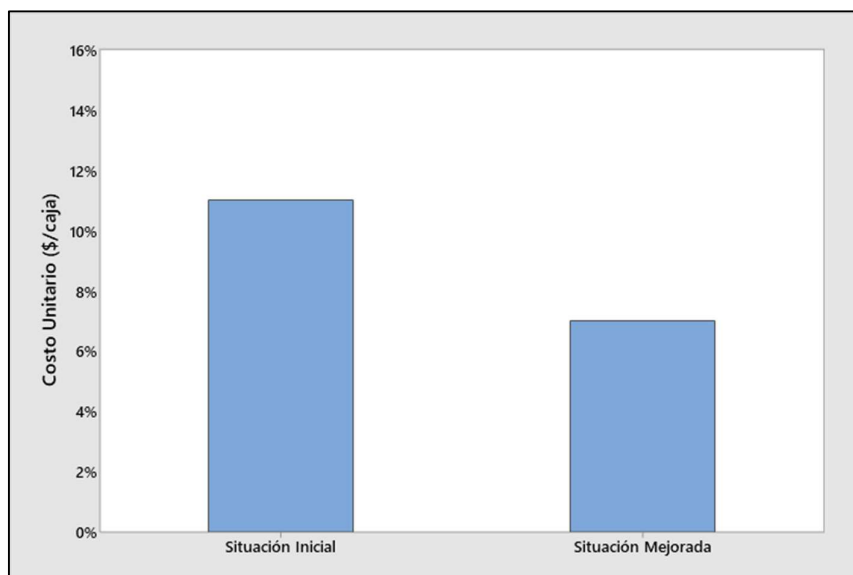
Figura 3.2*Análisis Impacto Económico*

3.3 *Impacto ambiental*

La implementación de la herramienta de planificación mejoró la toma de decisiones al incorporar una estimación del peso de fruta no conforme basada en datos históricos, reemplazando el uso de supuestos fijos establecidos del 10% para todos los proveedores. Como resultado, la tasa de rechazo de fruta no conforme se redujo de 11% a 7%; un 4%, evidenciando una mejora significativa en la calidad de la fruta recibida.

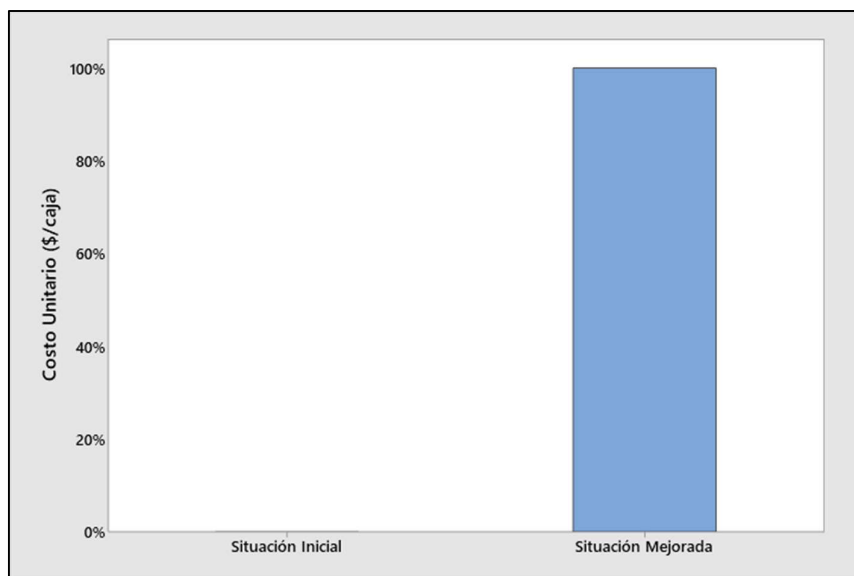
Figura 3.3

Análisis Impacto Ambiental



3.4 *Impacto Social*

La implementación de acciones orientadas al desarrollo del personal permitió incrementar la tasa de capacitación del 0% al 100%, fortaleciendo las habilidades del talento humano y promoviendo una cultura de mejora continua.

Figura 3.4*Análisis Impacto Social*

3.5 *Plan de Control*

Se estableció un plan de control orientado a supervisar el desempeño de los factores gestionados por el modelo de planificación desarrollado, con el fin de asegurar la sostenibilidad de las mejoras implementadas. El plan contempla la asignación de responsabilidades, la descripción de las actividades a ejecutar, la frecuencia de seguimiento, los puntos de control y otros elementos clave necesarios para mantener un desempeño operativo adecuado. La Tabla 3.3 presenta el detalle del plan de control establecido.

Tabla 3.3*Plan de Control*

Solución	¿Qué?	¿Quién?	¿Por qué?	¿Cómo?	¿Cuándo?	¿Dónde?	¿Cuánto tiempo?
	Ejecución diaria del modelo de planificación y optimización	Líder de Planificación de Operaciones	Garantizar que las decisiones diarias de planificación se basen en datos reales y actuales, y no en supuestos fijos	Ejecutar el modelo integrado de planificación utilizando datos de entrada actualizados	Diario	Sistema de planificación	5–10 minutos por día
Planificación operativa basada en datos	Monitoreo del costo unitario y del rendimiento del proceso	Asistente de Operaciones	Verificar que la reducción de costos y la eficiencia operativa se mantengan en el tiempo	Revisar reportes automatizados e indicadores KPI generados por el sistema	Diario	Registros de ingreso de fruta y registros de comparación de costos de la empresa	~5 minutos por día
	Análisis de desviaciones respecto al plan óptimo	Gerente de la empresa, Líder de Planificación de Operaciones, Asistente de Operaciones	Detectar desviaciones de manera temprana y prevenir el deterioro del desempeño del proceso	Revisión semanal de las desviaciones entre los resultados planificados y los reales	Semanal	Registros de comparación de costos de la empresa	20–30 minutos por semana

Capítulo 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Demostrado el impacto de la solución implementada sobre el desempeño operativo de la empresa, se presentan a continuación las principales conclusiones derivadas del análisis realizado, las cuales sintetizan los hallazgos más relevantes del proyecto.

4.1 Conclusiones

1. Aunque el enfoque específico en los días de baja producción permitió una reducción parcial del costo unitario de USD 1,45 a USD 1,36, sin alcanzar el valor objetivo de USD 1,33, el objetivo general del proyecto fue plenamente alcanzado al reducir el costo unitario promedio de empaque de USD 1,41 a USD 1,33 por caja.
2. Los costos asociados a la mano de obra, particularmente la mano de obra tercerizada, fueron identificados como los principales contribuyentes al elevado costo unitario por caja, mientras que otros costos tuvieron una incidencia secundaria. Estas condiciones estuvieron asociadas a ineficiencias del proceso derivadas de la variabilidad en el suministro de fruta y de esquemas de planificación basados en supuestos, lo que generaba subutilización de recursos.
3. La implementación del modelo de pronóstico de rendimiento basado en media móvil exponencialmente ponderada (EWMA) mejoró la estimación de fruta utilizable por proveedor, contribuyendo a una reducción del 4 % en fruta no conforme y a un aumento en la precisión de la planificación diaria de la producción.
4. El modelo de optimización formulado mediante programación lineal entera mixta (MILP) permitió alinear las decisiones de compra de fruta, dimensionamiento de la fuerza laboral y definición de horarios de operación con la capacidad real del sistema, posibilitando un incremento de la producción diaria promedio de hasta 48 cajas adicionales.
5. La capacitación completa del personal involucrado permitió el uso efectivo de la herramienta desarrollada, lo que se tradujo en una reducción del 83 % en el tiempo requerido

para la planificación diaria, fortaleciendo la toma de decisiones basada en datos y la capacidad de respuesta operativa.

4.2 Recomendaciones

Tras culminar lo planificado en la propuesta y considerando los resultados alcanzados, se presentan las siguientes recomendaciones.

1. Mantener el uso permanente de la solución propuesta, asegurando que las decisiones relacionadas con la compra de fruta, la asignación de mano de obra y la definición de horarios de operación continúen basándose en datos actualizados y confiables del proceso.
2. Utilizar la información generada por el sistema para respaldar la renegociación de los contratos de mano de obra tercerizada, alineando los costos laborales con la variabilidad de la producción y los niveles reales de productividad.
3. Fortalecer de manera continua la capacitación del personal en análisis de datos y metodologías de mejora continua, con el fin de consolidar una cultura organizacional orientada a la eficiencia y a la toma de decisiones informadas.

Bibliografía

- Gutiérrez, H. (2010). *Calidad total y Productividad*. The McGraw-Hill.
- Hernández Matías, J. C., & Vizán Idoipe, A. (2013). *Lean manufacturing: concepto, técnicas e implantación*. Madrid.
- Rardin, R. (2017). *Optimization in operations research*. Pearson.
- Sanchez de los Santos, K. (2012). *Costos I*. México: Red Tercer Milenio S.C.
- Sbrana, G., & Pelagatti, M. (2024). Optimal hierarchical EWMA forecasting. *International Journal of Forecasting*, 1-2. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2022.12.008>.
- Shah, J., & Deshpande, N. (2015). Lean Six Sigma: An integrative approach of Lean and Six Sigma. *International Journal of Current Engineering and Technology* , 4,5.

Apéndice A.1: SIPOC del proceso de empaque de la empresa

Proveedores	Entradas	Proceso	Salidas	Clientes
Cliente de exportación (empresa socia)	Orden de compra y requerimientos de fruta	Procesamiento de la orden y planificación de empaque	Plan de producción y cronograma de despacho	Equipo de planeación y operaciones de la empresa
Productores de fruta	Fruta fresca	Transporte desde las fincas	Fruta entregada en el área de recepción de la empresa	Personal de recepción de la empresa
Personal de recepción de la empresa	Fruta fresca	Recepción, descarga e inspección de la fruta en planta	Gavetas de fruta sobre pallets	Personal de pesaje de la empresa
Personal de pesaje de la empresa	Gavetas de fruta	Pesaje y registro del ingreso	Lotes de fruta registrados e identificados	Operarios de selección (personal tercerizado)
Operarios de selección (personal tercerizado)	Cajas de fruta en pallets	Selección y clasificación por calibre y calidad	Fruta seleccionada lista para lavado	Operarios de lavado (personal tercerizado)
Operarios de lavado (personal tercerizado)	Agua potable, agentes sanitizantes, fungicida	Lavado y enjuague de la fruta seleccionada	Fruta limpia y desinfectada	Operarios de secado (personal tercerizado)
Operarios de secado (personal tercerizado)	Secadores industriales	Secado y tratamiento con fungicida	Fruta seca libre de humedad	Operarios de empaque (personal tercerizado)
Operarios de empaque (personal tercerizado)	Cajas de cartón, PLUs, sachets absorbentes de etileno, balanzas, etc.	Empaque de fruta en cajas por calibre y etiquetado	Cajas empacadas y etiquetadas	Personal de paletizado de la empresa
Personal de paletizado de la empresa	Pallets, mallas, termógrafos, etc.	Paletizado, envoltura y colocación de dispositivo para el control de temperatura	Cajas paletizadas y aseguradas listas para despacho	Cliente de exportación (empresa socia)

Apéndice A.2.

Definición del problema mediante la herramienta 3W+2H

Dimensión	Detalle
¿Qué?	Se registró un costo unitario promedio alto por caja empacada
¿Cuándo?	Desde el 12 de agosto de 2025
¿Dónde?	En la instalación de empaque de fruta, donde se acondiciona y prepara el producto.
¿Cuánto?	El costo unitario promedio registrado fue de US\$1.41 por caja
¿Cómo lo sé?	Se sabe por comparación, ya que el costo unitario mínimo alcanzado anteriormente fue de US\$1.23 por caja

Apéndice A.3.1: Matriz Causa - Efecto

X	Causa	Evaluador			Puntaje
		Gerente de Operaciones	Gerente General	Jefe de Operadores	
1	Los operadores realizan movimientos y caminatas adicionales durante el proceso.	3	1	1	5
2	El personal interno experimenta mayor inactividad cuando se reduce el flujo de fruta.	0	1	0	1
3	Los operadores enfrentan mayores períodos de espera entre tareas cuando los productores entregan pequeños volúmenes.	3	3	1	7
4	El número de trabajadores presentes excede el volumen a procesar, lo que genera subutilización de la mano de obra.	9	1	0	10
5	La fruta sufre un manejo excesivo entre las etapas del proceso.	1	0	0	1
6	El flujo de trabajo se vuelve intermitente porque el proceso depende de la llegada irregular de fruta.	9	3	1	13
7	Los cambios de lote generan micro-paradas significativas durante el día.	1	0	0	1
8	Las estimaciones diarias de solicitudes de comida pueden exceder el número real requerido.	3	1	0	4
9	Los pequeños lotes de producción generan pausas entre etapas e incrementan el tiempo ocioso.	3	3	3	9
10	La coordinación entre equipos internos y externos se vuelve menos eficiente cuando la carga de trabajo es baja.	0	3	0	3
11	Los puestos de trabajo y las herramientas tienen un diseño ergonómico limitado, lo que reduce la velocidad de trabajo.	0	3	0	3

12	Los equipos consumen prácticamente la misma cantidad de energía sin importar el volumen de producción.	3	1	0	4
13	La variación en los calibres (unidades de fruta por caja) requiere tiempo adicional para acomodar correctamente la fruta.	3	1	1	5
14	El consumo de material de empaque aumenta ligeramente cuando se trabaja con calibres más grandes.	0	0	1	1
15	La disponibilidad limitada de datos operativos en tiempo real impide tomar acciones correctivas de inmediato.	0	0	0	0
16	Los costos, como la mano de obra interna, se distribuyen entre menos cajas en días de baja producción.	3	9	0	12
17	La fruta llega en horarios variables, lo que retrasa el inicio de las operaciones.	3	9	9	21
18	Alto ingreso de fruta no conforme durante las operaciones diarias.	3	9	3	15
19	La continuidad operativa disminuye los fines de semana o feriados debido a cambios en la supervisión.	1	0	0	1
20	El plan operativo diario puede cambiar según las necesidades del cliente, generando variaciones inesperadas en la producción.	9	9	9	27

Apéndice A.3.2: *Tabla de asignación de puntajes*

<i>Puntaje</i>	<i>Grado de impacto</i>
<i>0</i>	<i>No tiene impacto</i>
<i>1</i>	<i>Impacto bajo</i>
<i>3</i>	<i>Impacto medio</i>
<i>9</i>	<i>Impacto alto</i>

Apéndice A.4

Plan de verificación de causas

Variable dependiente (Y)	No.	Causa potencial	Teoría de impacto	¿Cómo verificar?	Estado
Costo unitario de empaque (USD/caja)	X ₄	El número de operadores de empaque de terceros presentes supera el volumen diario a procesar, lo que genera subutilización de mano de obra.	Cuando el número de trabajadores asignados a operaciones de empaque es desproporcionado respecto al volumen diario de producción, las horas-hombre se distribuyen entre menos cajas, incrementando el costo unitario (US\$/caja),	<p>Regresión lineal simple: Y = Costo unitario de empaque (USD/caja) X = Ratio trabajadores-volumen = Trabajadores presentes / Cajas procesadas Hipótesis: H₀: El ratio trabajadores-volumen no tiene relación con el costo unitario ($\beta_1 = 0$) H₁: Un mayor ratio trabajadores-volumen incrementa significativamente el costo unitario ($\beta_1 > 0$) Decisión estadística:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ajustar el modelo de regresión $Y = \beta_0 + \beta_1 X$ • Si el valor $p < 0.05$ y $\beta_1 > 0$ el exceso de personal impacta directamente el costo unitario. 	No verificado
	X ₁₈	Un alto ingreso de fruta no conforme reduce la cantidad de fruta utilizable que entra al proceso.	Un alto ingreso de fruta no conforme reduce la fruta aprovechable, interrumpe el flujo productivo y consume recursos operativos en manejo no productivo, lo que reduce el output y aumenta el costo unitario de empaque.	<p>Regresión lineal simple: Y = Costo unitario de empaque (US\$/caja) X = Tasa de rechazo (%) Hipótesis: H₀: La tasa de rechazo no se relaciona con el costo unitario ($\beta_1 = 0$). H₁: Una mayor tasa de rechazo incrementa significativamente el costo unitario ($\beta_1 > 0$). Decisión estadística:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ajustar el modelo de regresión $Y = \beta_0 + \beta_1 X$ • Si el valor $p < 0.05$ y $\beta_1 > 0$, un alto ingreso de fruta no conforme eleva el costo unitario de empaque. 	X Verificado

Nota: Un β_1 significativo (valor $p < 0.05$) demuestra un efecto estadístico real. Incluso si el R^2 fuera bajo, la causa sigue siendo válida porque el resultado es consistente con la forma en que opera el proceso.

Apéndice A.5.1.

Evaluación y selección de modelos

Alternativa	Descripción	Criterios de evaluación						Resultado/Conclusión por alternativa
		Anticipación del % no conforme	Manejo de variabilidad	Diferenciación por proveedor	Potencia de decisión (calidad del plan)	Impacto esperado	Baja configuración del usuario final	
A1	Promedio móvil + reglas fijas	2	2	3	2	2	5	16: Alternativa simple y de fácil implementación, pero con bajo impacto en la calidad del plan y limitada capacidad para reducir la fruta no conforme.
A2	Promedio móvil por proveedor + Programación lineal	3	2	5	3	3	4	20: Mejora la diferenciación por proveedor respecto a la opción anterior, aunque la programación lineal limita la calidad de las decisiones operativas. 25: Ofrece una planificación de alta calidad mediante MILP y buen nivel de anticipación, a costa de una mayor configuración del modelo de pronóstico.
A3	ETS (Holt-Winters) + MILP	4	3	4	5	5	4	
A4	EWMA (pronóstico) + MILP	4	3	5	5	5	5	27: Presenta el mejor desempeño global, combinando alta calidad de decisión, impacto operativo y mínima configuración para el usuario final.

Apéndice A.5.2.

Evaluación y selección de estrategia de implementación del modelo seleccionado

Alternativa	Estrategia de implementación	Criterios de evaluación					Resultado/Conclusión por alternativa
		Tiempo de implementación	Costo de desarrollo	Flexibilidad futura	Escalabilidad	Dependencia de terceros	
A1	Integración al ERP	5	2	2	2	2	13: Permite una rápida implementación y fácil adopción por el usuario final, pero presenta baja flexibilidad y alta dependencia del ERP para futuras modificaciones.
A2	Desarrollo propio en Python	3	5	5	5	5	23: Ofrece mayor flexibilidad y escalabilidad, con menor dependencia de terceros, a costa de un mayor esfuerzo inicial de desarrollo, pero nulo costo monetario, ahorrándole a la empresa cerca de US\$400.

Apéndice B: Formulación de Media Móvil Exponencialmente Ponderada (EWMA)

Tasa estimada de fruta no conforme por proveedor y producto

Sea $p \in P$ un proveedor, $f \in F$ un tipo de fruta y $r \in \mathbb{Z}^+$ el índice cronológico de recepciones históricas del binomio proveedor-fruta.

Inicialización ($r = 1$):

$$\widehat{FRR}_{p,f,1} = \frac{R_{p,f,1}}{Q_{p,f,1}}$$

Regla de actualización ($r \geq 2$):

$$FRR_{p,f,r} = \frac{\lambda N_{p,f,r} + (1 - \lambda)R_{p,f,r}}{\lambda D_{p,f,r} + (1 - \lambda)Q_{p,f,r}}$$

Donde:

- $Q_{p,f,r}$ [kg]: peso total de fruta tipo f recibido del proveedor p en la recepción r .
- $R_{p,f,r}$ [kg]: peso de fruta tipo f rechazado (por calidad, daños o no conformidad) del proveedor p en la recepción r .
- $\lambda \in [0, 1]$: parámetro de suavizado EWMA.

Interpretación de los acumuladores EWMA:

- $N_{p,f,r}$: peso rechazado acumulado ponderado exponencialmente para la combinación proveedor p y fruta f hasta la recepción r .
- $D_{p,f,r}$: peso recibido acumulado ponderado exponencialmente para la combinación proveedor p y fruta f hasta la recepción r .

Fracción de rendimiento utilizable estimada

$$\hat{y}_{f,p} = 1 - \widehat{FRR}_{p,f,r}$$

$\hat{y}_{f,p}$: Fracción de rendimiento utilizable estimada de la fruta f del productor p , parámetro de entrada crítico para el modelo de planificación MILP.

Apéndice C: Formulación del modelo de Programación Lineal de Entera Mixta (MILP)

Conjuntos e Índices

- $p \in \mathcal{P}$: productores de fruta / proveedores.
- $d \in \mathcal{D}$: días de planificación.
- $f \in \mathcal{F}$: tipos de fruta.
- $l \in \mathcal{L}$: niveles discretos de mano de obra externa (opciones de número de personal).

Parámetros

1. Suministro, rendimiento y demanda

- $A_{f,p,d}$: Kilogramos máximos disponibles de fruta f , del productor p , el día d .
- $\hat{y}_{f,p}$: Fracción de rendimiento utilizable estimada de la fruta f del productor p .
- $Q_{f,d}$: Kilogramos utilizables requeridos de fruta f para ser procesados el día d .

2. Capacidad y tiempos

- α : Productividad de empaque externo (kg por hora por persona).
- S_d^{prod} : Hora de inicio del turno externo el día d .
- H_d^{max} : Duración máxima permitida del turno el día d .
- H^{lun}, H^{din} : Duración de los descansos para almuerzo y cena, respectivamente.
- U^{lun}, U^{din} : Umbrales de tiempo que activan los descansos de almuerzo y cena.
- U^{night} : Umbral de tiempo que activa las operaciones nocturnas.
- M, ε : Constante Big-M para lógica lineal y parámetro de tolerancia pequeña.

3. Personal y presencia (la empresa y externos)

- L_d^{prop} : Número de trabajadores de la empresa presentes el día d .
- $\beta_{d,lun}^{prop}, \beta_{d,din}^{prop}$: Indicadores de que se requiere almuerzo y cena para la empresa el día d .
- β_d^{night} : Indicador de que se requiere transporte nocturno para la empresa el día d .
- L^{max} : Recuento máximo de personal externo disponible.

4. Costos y umbrales lógicos

- c_p^{buy} : Costo de compra por kilogramo al productor p .
- $c^{trans,apto}$: Costo de transporte por kilogramo de fruta utilizable.
- $c^{trans,rech}$: Costo de transporte por kilogramo de fruta rechazada (no utilizable).
- $c^{meal,lun}$: Costo unitario de almuerzo.
- $c^{meal,din}$: Costo unitario de cena.
- c^{night} : Costo unitario de transporte nocturno para la empresa.
- c^{lab} : Costo por hora por trabajador externo.

Variables

1. Variables de suministro y procesamiento

- $K_{f,p,d}^{buy} \geq 0$: Kilogramos de fruta f comprados al productor p el día d .
- $K_{f,p,d}^{use} \geq 0$: Kilogramos utilizables de fruta f procesados el día d .

2. Variables de turno y producción

- $T_d \geq 0$: Duración total del turno externo el día d .
- $P_d \geq 0$: Tiempo productivo del turno externo el día d .
- $F_d \geq 0$: Hora de finalización del turno externo el día d .

3. Variables de personal

- $L_d \in \mathbb{Z}_+$: Mano de obra externa asignada el día d .
- $x_{d,l} \in \{0, 1\}$: Es igual a 1 si se selecciona el nivel de mano de obra externa l el día d .

4. Variables de activación y lógicas

- $y_d \in \{0, 1\}$: Es igual a 1 si la producción externa está activa el día d .
- $b_d^{lun} \in \{0, 1\}$: Es igual a 1 si se activa el almuerzo el día d .
- $b_d^{din} \in \{0, 1\}$: Es igual a 1 si se activa la cena el día d .
- $b_d^{night} \in \{0, 1\}$: Es igual a 1 si se activan las operaciones nocturnas el día d .

5. Variables auxiliares y de linealización

- $u_{d,l} \geq 0$: Persona-horas totales linealizadas asociadas con $T_d \cdot x_{d,l}$.
- $v_{d,l} \geq 0$: Persona-horas productivas linealizadas asociadas con $P_d \cdot x_{d,l}$.
- $w_d^{lun} \geq 0$: Número de trabajadores externos que reciben almuerzo el día d .
- $w_d^{din} \geq 0$: Número de trabajadores externos que reciben cena el día d .

Función Objetivo MILP

$$\begin{aligned}
 \min Z = \sum_{d \in \mathcal{D}} & \left[\underbrace{\sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} c_p^{buy} K_{f,p,d}^{buy}}_{\text{Costo de compra}} + \underbrace{\sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} (c^{trans,apto} K_{f,p,d}^{use} + c^{trans,rech} (K_{f,p,d}^{buy} - K_{f,p,d}^{use}))}_{\text{Costo de transporte de fruta}} \right. \\
 & + \underbrace{c^{meal,lun} (L_d^{prop} \beta_{d,lun}^{prop} + w_d^{lun})}_{\text{Costo de almuerzo}} + \underbrace{c^{meal,din} (L_d^{prop} \beta_{d,din}^{prop} + w_d^{din})}_{\text{Costo de cena}} \\
 & \left. + \underbrace{c^{night} L_d^{prop} \beta_d^{night}}_{\text{Costo transporte nocturno la empresa}} + \underbrace{c^{lab} \sum_{l \in \mathcal{L}} l u_{d,l}}_{\text{Costo mano de obra externa}} \right]
 \end{aligned}$$

Restricciones del Modelo

1. Suministro, rendimiento y demanda

- **Disponibilidad de compra:** Limita la compra de fruta al máximo disponible de cada productor: $K_{f,p,d}^{buy} \leq A_{f,p,d} \quad \forall f, p, d.$
- **Relación de rendimiento:** Define la relación entre kilogramos comprados y rendimiento estimado: $K_{f,p,d}^{use} \leq \hat{y}_{f,p} K_{f,p,d}^{buy} \quad \forall f, p, d.$
- **Satisfacción de demanda:** Asegura que se procesen los kilogramos requeridos para cada tipo de fruta: $\sum_{p \in \mathcal{P}} K_{f,p,d}^{use} \geq Q_{f,d} \quad \forall f, d.$

2. Activación y capacidad

- **Activación de producción:** Vincula la compra de fruta con la activación del turno externo: $\sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} K_{f,p,d}^{use} \leq \left(\sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \hat{y}_{f,p} A_{f,p,d} \right) y_d \quad \forall d.$
- **Límites de tiempo y personal:** $T_d \leq H_d^{max} y_d, P_d \leq H_d^{max} y_d, L_d \leq L^{max} y_d \quad \forall d.$
- **Capacidad de procesamiento:** Asegura suficientes horas hombre para manejar el volumen total: $\alpha \sum_{l \in \mathcal{L}} l v_{d,l} \geq \sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} K_{f,p,d}^{buy} \quad \forall d.$

3. Tiempos del turno

- **Descomposición del tiempo:** $T_d = P_d + H^{lun} b_d^{lun} + H^{din} b_d^{din} \quad \forall d.$
- **Hora de finalización:** $F_d = S_d + T_d \quad \forall d.$

4. Lógica de descansos y turno nocturno

- **Activador de almuerzo:** $F_d \geq U^{lun} - M(1 - b_d^{lun}), F_d \leq (U^{lun} - \varepsilon) + Mb_d^{lun} \quad \forall d.$
- **Activador de cena:** $F_d \geq U^{din} - M(1 - b_d^{din}), F_d \leq (U^{din} - \varepsilon) + Mb_d^{din} \quad \forall d.$
- **Activador turno nocturno:** $F_d \geq U^{night} - M(1 - b_d^{night}), F_d \leq (U^{night} - \varepsilon) + Mb_d^{night} \quad \forall d.$

5. Selección de personal y linealización

- **Selección de nivel:** $\sum_{l \in \mathcal{L}} x_{d,l} = 1 \quad \forall d.$
- **Linealización de horas hombre:** $u_{d,l} \leq T_d, u_{d,l} \leq H_d^{max} x_{d,l}, u_{d,l} \geq T_d - H_d^{max}(1 - x_{d,l}) \quad \forall d, l.$
- **Linealización conteo de comidas:** $w_d^{lun} \leq L_d, w_d^{lun} \leq L^{max} b_d^{lun}, w_d^{lun} \geq L_d - L^{max}(1 - b_d^{lun}) \quad \forall d.$

6. Restricciones de tipo de variable

- **Variables binarias:** $y_d, b_d^{lun}, b_d^{din}, b_d^{night}, x_{d,l} \in \{0, 1\}.$
- **Variables continuas no negativas:**
 $K_{f,p,d}^{buy}, K_{f,p,d}^{use}, T_d, P_d, F_d, S_d, L_d, u_{d,l}, w_d^{lun}, w_d^{din} \geq 0.$