

CONSULTORÍA

MODELO DE REPOSICIÓN DE EQUIPOS DE CAMPO, PARA EL MEJORAMIENTO PRODUCTIVO Y

ECONÓMICO DE INGENIO LA CABAÑA

AUTORES:

JOSÉ ALEXANDER RAMOS CANTILLO

GEOVANY HERNEY MELENDEZ OVIEDO



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS

Y ADMINISTRATIVAS

MBA - MAESTRIA EN ADMINISTRACIÓN DE EMPRESAS

SANTIAGO DE CALI

2025

CONSULTORÍA

**MODELO DE REPOSICIÓN DE EQUIPOS DE CAMPO, PARA EL MEJORAMIENTO PRODUCTIVO Y
ECONÓMICO DE INGENIO LA CABAÑA**

AUTORES:

JOSÉ ALEXANDER RAMOS CANTILLO

GEOVANNY HERNEY MELENDEZ OVIEDO

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
MAGISTER EN ADMINISTRACIÓN DE EMPRESAS**

DIRECTOR: DAVID ARANGO

ESTADÍSTICO, MAGISTER EN ECONOMÍA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS

Y ADMINISTRATIVAS

MBA - MAESTRIA EN ADMINISTRACIÓN DE EMPRESAS

SANTIAGO DE CALI

2025

Santiago de Cali, 24 de febrero de 2025

Doctor

Fabián Fernando Osorio Tinoco

Decano

Facultad De Ciencias Económicas y Administrativas

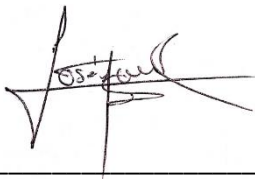
Pontificia Universidad Javeriana

La Ciudad

Por medio de la presente estamos entregando a usted el Trabajo de Grado cuyo título es “**Modelo de reposición de equipos de campo, para el mejoramiento productivo y económico de ingenio La Cabaña**”.

Esperamos que este Trabajo cumpla con los requisitos académicos exigidos y que alcance el propósito para el cual fue elaborado.

Atentamente;



José Alexander Ramos Cantillo

C.C. 1.121.897.081



Geovanny Herney Meléndez Oviedo

CC. 1.130.629.948

Santiago de Cali, 24 de febrero de 2025

Doctor

Fabián Fernando Osorio Tinoco

Decano

Facultad De Ciencias Económicas y Administrativas

Pontificia Universidad Javeriana

La Ciudad

Por medio de la presente me permito comunicarle, que en mi calidad de director de trabajo de grado he leído detenidamente el informe final del estudio titulado **“Modelo de reposición de equipos de campo, para el mejoramiento productivo y económico de ingenio La Cabaña”**, realizado por los estudiantes de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas de la Universidad Javeriana nombres: José Alexander Ramos cantillo C.C. 1.121.897.081 y Geovanny Herney Meléndez Oviedo 1.130.629.948, y considero que cumple con todos los requisitos requeridos para ser presentada a evaluación.

Atentamente;

David Arango Londoño

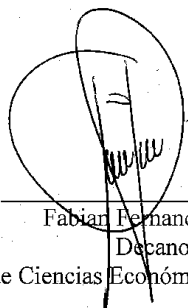
David Arango Londoño

Director del Trabajo de Grado

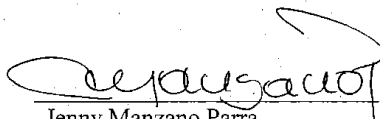
ARTÍCULO 23 de la resolución N° 13 de julio 6 de 1946

“La Universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de Tesis. Sólo velará porque no se publique nada contrario al dogma y a la moral católica y porque la Tesis no contenga ataques o polémicas puramente personales; antes bien, se vea en ellas al anhelo de buscar la Verdad y la Justicia”.

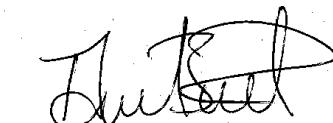
“MODELO DE REPOSICIÓN DE EQUIPOS DE CAMPO, PARA EL MEJORAMIENTO PRODUCTIVO Y ECONÓMICO DE INGENIO LA CABAÑA.” Aprobado por el Comité de Trabajos de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana para optar por el título de Magíster en Administración de Empresas”.



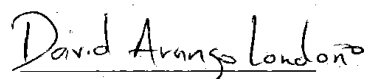
Fabian Fernando Osorio Tinoco
Decano
Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas



Jenny Manzano Parra
Directora de Maestría
en Administración de Empresas



Diego Alberto Baez Palencia
Jurado



David Arango Londoño
Director del Trabajo de Grado

Santiago de Cali, 14 de febrero de 2025

DEDICATORIA

A **Andrea Johana Guzmán Pérez**, mi amada esposa, cuyo amor, apoyo incondicional y fe en mí han sido el motor que me impulsó a alcanzar este sueño. Gracias por caminar a mi lado y por tu infinita paciencia en cada paso de este camino.

A **Helen Sofía Ramos Guzmán**, mi hija amada, cuya sonrisa ilumina mis días y me inspira a ser mejor cada día. Que este logro sea un recordatorio de que no hay límites para los sueños y que todo es posible con esfuerzo y dedicación.

A mi abuela, que ahora habita en el cielo, pero cuya fe en mí sigue viva en mi corazón. Gracias por tus enseñanzas, por creer en mí cuando aún dudaba de mí mismo y por ser mi guía y mi fuerza, incluso desde la eternidad.

A ustedes, mi razón de ser y mi mayor motivación, les dedico este trabajo con todo mi amor y gratitud.

JOSE ALEXANDER RAMOS CANTILLO

DEDICATORIA

A mi amada esposa, **Maricela Londoño León**, mi refugio, mi apoyo incondicional y mi compañera de vida. Gracias por ser mi mayor motivación, por iluminar mis días incluso en los momentos más difíciles, por creer en mí y compartir conmigo este gran proyecto de vida. Tu paciencia, comprensión y sacrificio han sido pilares fundamentales en el transcurrir de este camino, sin tu amor y compañía, este logro no habría sido posible.

A mi amado hijo, **Geoymar Alejandro Meléndez Londoño**, mi mayor inspiración y la razón de cada uno de mis esfuerzos. Cada paso que doy es con el anhelo de brindarte un futuro lleno de oportunidades y enseñarte con mi ejemplo que, con esfuerzo, constancia y disciplina, cualquier meta es alcanzable. Que este logro sea para ti una prueba de que no existen límites cuando se persigue con pasión y determinación aquello que verdaderamente deseas.

A mi querida abuela, **Raquel Oviedo**, por su amor incondicional, su apoyo infinito y por inculcarme valores que han sido la base de mi desarrollo personal y profesional. A mi tía **Lidia Oviedo**, quien, desde el cielo, continúa guiándome con su bendición y amor eterno, inspirándome a seguir adelante con fortaleza, gratitud y la confianza de que todo, puesto en manos de Dios, sigue su propósito perfecto.

A mi familia, por su cariño inquebrantable, por su apoyo constante y por enseñarme el verdadero significado del esfuerzo, la dedicación y la perseverancia.

Y a todos los que, de una u otra manera, han sido parte de este camino y me han brindado su apoyo incondicional, mi más sincero agradecimiento.

GEOVANNY MELENDEZ OVIEDO

Tabla de Contenido

| | |
|--|-----------|
| 1. RESUMEN | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| 2. INTRODUCCIÓN | 3 |
| 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 7 |
| 4. JUSTIFICACIÓN | 10 |
| 5. OBJETIVOS | 12 |
| 5.1 GENERAL:..... | 12 |
| 5.2 ESPECÍFICOS:..... | 12 |
| 6. ESTADO DEL ARTE | 13 |
| 7. MARCO CONCEPTUAL | 16 |
| 7.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PRODUCCIÓN DE CAÑA AZUCAR..... | 16 |
| 7.2 PRINCIPALES LABORES EN EL CULTIVO DE CAÑA DE AZUCAR | 22 |
| 7.3 SELECCIÓN Y ADMINISTRACIÓN DE LA MAQUINARIA AGRICOLA..... | 25 |
| 7.4 GESTIÓN DE LA REPOSICIÓN DE MAQUINARIA AGRÍCOLA..... | 28 |
| 7.5 MODELOS ESTADÍSTICOS Y DE PREDICCIÓN..... | 29 |
| 7.5.1 Componentes del Modelo..... | 30 |
| 7.5.1.1 Técnicas Estadísticas Utilizadas:..... | 30 |
| 7.5.1.2 Variables Clave:..... | 30 |
| 7.5.1.3 Resultados Esperados:..... | 31 |
| 7.6 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN..... | 32 |
| 7.7 ENFOQUES INTEGRALES PARA LA REPOSICIÓN DE MAQUINARIA..... | 33 |
| 7.8 MATRIZ DE RIESGO Y SU IMPACTO EN LA PRODUCTIVIDAD | 35 |
| 7.8.1 Riesgos Estratégicos..... | 35 |
| 7.8.2 Riesgos Operativos..... | 36 |
| 7.8.3 Riesgos de Cumplimiento..... | 36 |
| 7.8.4 Riesgos Financieros | 36 |
| 7.9 ANÁLISIS FINANCIERO EN LA TOMA DE DECISIONES DE REPOSICIÓN | 38 |
| 7.10 MODELOS ESTADÍSTICOS PARA PREDECIR LA RENTABILIDAD..... | 40 |
| 8 METODOLOGÍA | 42 |
| 8.1 DESCRIPCIÓN DE LA MATRIZ DE RIESGO | 42 |
| 8.2.1 Revisión documental: | 42 |
| 8.2.2 Entrevistas con expertos:..... | 43 |
| 8.3 CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ DE RIESGOS | 43 |
| 8.3.1 Identificación de riesgos:..... | 43 |
| 8.3.2 Evaluación de la frecuencia e impacto:..... | 43 |
| 8.3.3 Cálculo de la calificación de riesgo:..... | 43 |
| 8.4 ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LOS RIESGOS EN LA PRODUCTIVIDAD Y RENTABILIDAD..... | 44 |
| 8.4.1 Cuantificación: | 44 |
| 8.5 ANÁLISIS FINANCIERO PARA LA TOMA DE DECISIONES DE REPOSICIÓN..... | 48 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 8.6 | RECOPIACIÓN Y PREPARACIÓN DE DATOS:..... | 48 |
| 8.6.1 | <i>Recolección de Informes Financieros:</i> | 48 |
| 8.6.2 | <i>Ajustes y Normalizaciones:</i> | 49 |
| 8.7 | ANÁLISIS DEL ESTADO DE RESULTADOS | 49 |
| 8.7.1 | <i>Análisis de Tendencias de Ingresos y Gastos:</i> | 49 |
| 8.7.2 | <i>Análisis de Variabilidad y Crecimiento:</i> | 49 |
| 8.8 | ANÁLISIS DEL BALANCE GENERAL | 49 |
| 8.8.1 | <i>Análisis de Composición de Activos y Pasivos:</i> | 49 |
| 8.8.2 | <i>Evaluación de Liquidez y Solvencia:</i> | 50 |
| 8.9 | ANÁLISIS DE RATIOS FINANCIEROS..... | 50 |
| 8.9.1 | <i>Ratios de Rentabilidad:</i> | 50 |
| 8.9.2 | <i>Ratios de Liquidez:</i> | 50 |
| 8.9.3 | <i>Ratios de Endeudamiento:</i> | 50 |
| 8.9.4 | <i>Ratios de Actividad:</i> | 51 |
| 8.10 | EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO Y DIAGNÓSTICO FINANCIERO | 51 |
| 8.10.1 | <i>Análisis Horizontal y Vertical:</i> | 51 |
| 8.10.2 | <i>Uso de Modelos Predictivos: Altman Z-Score:</i> | 51 |
| 8.11 | DESARROLLO DEL MODELO ESTADÍSTICO DE REPOSICIÓN DE EQUIPOS | 52 |
| 8.11.1 | <i>Recolección de Datos:</i> | 52 |
| 8.11.2 | <i>Implementación del Modelo Random Forest en R:</i> | 52 |
| 8.11.2.1 | <i>Selección de Variables:</i> | 52 |
| 8.11.2.2 | <i>División de Datos:</i> | 53 |
| 8.11.2.3 | <i>Entrenamiento con Random Forest:</i> | 53 |
| 8.11.3 | <i>Validación del Modelo:</i> | 53 |
| 8.11.3.1 | <i>Matriz de Confusión:</i> | 53 |
| 8.11.3.2 | <i>Kappa:</i> | 53 |
| 8.11.4 | <i>Métricas por Clase:</i> | 54 |
| 8.11.4.1 | <i>Sensibilidad y Especificidad:</i> | 54 |
| 8.11.4.2 | <i>Valor predictivo positivo (Pos Pred Value) y Valor predictivo negativo (Neg Pred Value):</i> | 54 |
| 8.11.4.3 | <i>Importancia de Variables:</i> | 54 |
| 8.11.4.4 | <i>Evaluación de Importancia de Variables:</i> | 54 |
| 8.11.4.5 | <i>Predicciones Agrupadas por Rango de Potencia:</i> | 55 |
| 8.11.5 | <i>Categorización en Intervalos de Reposición (1 a 5 años)</i> | 55 |
| 8.11.5.1 | <i>1 año:</i> | 55 |
| 8.11.5.2 | <i>2 años:</i> | 55 |
| 8.11.5.3 | <i>3 años:</i> | 55 |
| 8.11.5.4 | <i>4 años:</i> | 56 |
| 8.11.5.5 | <i>5 años:</i> | 56 |
| 8.11.6 | <i>Priorización y Plan de Acción para la Reposición de Maquinaria</i> | 56 |
| 8.11.6.1 | <i>Priorización de Equipos Críticos:</i> | 56 |
| 8.11.6.2 | <i>Redistribución del Presupuesto:</i> | 56 |
| 8.11.6.3 | <i>Monitoreo Continuo y Actualización del Modelo:</i> | 57 |
| 9 | RESULTADOS | 58 |
| 9.1 | EVALUACIÓN DE LA MATRIZ DE RIESGO | 58 |
| 9.1.1 | <i>Riesgos operativos:</i> | 59 |
| 9.1.2 | <i>Riesgos financieros:</i> | 59 |
| 9.1.3 | <i>Riesgos estratégicos:</i> | 59 |
| 9.1.4 | <i>Riesgos de cumplimiento:</i> | 59 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 9.2 | RESULTADOS DEL ANÁLISIS FINANCIERO..... | 60 |
| 9.2.1 | <i>Análisis Vertical y Horizontal de estado de resultados y Balance General.....</i> | 60 |
| 9.2.2 | <i>Rentabilidad y Operación</i> | 62 |
| 9.2.3 | <i>Liquidez</i> | 63 |
| 9.2.4 | <i>Endeudamiento</i> | 63 |
| 9.2.5 | <i>Actividad</i> | 64 |
| 9.2.6 | <i>Modelo Predictivo Altman Z-Score.....</i> | 65 |
| 9.3 | APLICACIÓN Y PREDICCIÓN DEL MODELO DE RANDOM FOREST PARA LA REPOSICIÓN DE EQUIPOS | 66 |
| 9.3.1 | <i>Importancia de las Variables en la Predicción</i> | 66 |
| 9.3.1.1 | <i>Disponibilidad:</i> | 66 |
| 9.3.1.2 | <i>Horómetro y horas trabajadas:</i> | 66 |
| 9.3.1.3 | <i>Costo total por hora:</i> | 67 |
| 9.3.1.4 | <i>Antigüedad:</i> | 67 |
| 9.3.2 | <i>Resultados de Validación del Modelo</i> | 67 |
| 9.3.2.1 | <i>Precisión general:.....</i> | 67 |
| 9.3.2.2 | <i>Kappa:.....</i> | 67 |
| 9.3.2.3 | <i>Matriz de Confusión:</i> | 67 |
| 9.4 | CLASIFICACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE EQUIPOS | 68 |
| 9.4.1 | <i>1 año:.....</i> | 68 |
| 9.4.2 | <i>2 a 3 años:.....</i> | 68 |
| 9.4.3 | <i>4 a 5 años:.....</i> | 68 |
| 9.5 | IMPACTO DEL MODELO EN LA ESTRATEGIA DE REPOSICIÓN DEL INGENIO LA CABAÑA | 69 |
| 9.5.1 | <i>Reemplazo de equipos críticos:.....</i> | 69 |
| 9.5.2 | <i>Reasignación de presupuesto:</i> | 69 |
| 9.5.3 | <i>Monitoreo continuo:.....</i> | 70 |
| 10 | CONCLUSIONES | 71 |
| 11 | RECOMENDACIONES | 74 |
| 12 | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS..... | 77 |
| 13 | ANEXOS | 83 |

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Principales resultados de producción años 2018 - 2023 del Ingenio La Cabaña..... | 8 |
| Tabla 2: Cronograma de labores para el levantamiento del cultivo..... | 24 |
| Tabla 3: Indicadores teóricos para cambio de maquinaria y porcentaje de costo de mantenimiento..... | 27 |
| Tabla 4: Modelo de indicadores para determinar el seguimiento y cambio de maquinaria agrícola..... | 29 |
| Tabla 5: Descripción del Modelo Estadístico y de Predicción para determinar el desempeño y rentabilidad de maquinaria agrícola | 31 |
| Tabla 6: Descripción del modelo de Optimización para determinar el momento óptimo de reposición de maquinaria agrícola | 33 |
| Tabla 7: Descripción del Modelo Integral de Reposición de Maquinaria agrícola..... | 34 |
| Tabla 8: Clasificación de riesgos y su impacto en la productividad y rentabilidad del ingenio La Cabaña | 48 |
| Tabla 9: Indicadores financieros de rentabilidad Ingenio La Cabaña | 62 |
| Tabla 10: Indicadores financieros de liquidez Ingenio La Cabaña | 63 |
| Tabla 11: Indicadores financieros de endeudamiento Ingenio La Cabaña | 63 |
| Tabla 12: Indicadores financieros de Actividad Ingenio La Cabaña..... | 64 |
| Tabla 13: Modelo predictivo Z-SCORE para Ingenio La Cabaña | 65 |
| Tabla 14: Propuesta de renovación de maquinaria a 2 años | 75 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1: Factores que influyen en la producción de caña de azúcar..... | 16 |
| Figura 2: Variación de los índices de ingreso, costo y utilidad según el comportamiento de la variable de interés..... | 20 |
| Figura 3: Ubicación de los riesgos por frecuencia e impacto en umbrales de criticidad. | 58 |
| Figura 4: Resumen de predicciones por rango de potencia. | 68 |
| Figura 5: Equipos a reponer en 1 año por rango de potencia | 69 |

Índice de Anexos

| | |
|---|----|
| Anexo A: Análisis y estado actual financiero de ingenio la cabaña. | 83 |
| Anexo B: Supuestos modelo de valoración ingenio la cabaña. | 83 |
| Anexo C: Estados financieros proyectados ingenio la cabaña..... | 83 |
| Anexo D: Análisis Renting 2024..... | 83 |
| Anexo E: Modelos financieros para reposición de equipos..... | 83 |

1. RESUMEN

El ingenio La Cabaña, una de las empresas líderes del sector agroindustrial de la caña de azúcar ubicada en el norte del Cauca, lleva a cabo evaluaciones y planes de mejoramiento de sus procesos en campo y en fábrica de manera continua. Este trabajo de consultoría responde a la necesidad de establecer criterios objetivos para la toma de decisiones en la reposición de equipos en sus departamentos operativos, adaptando estas decisiones a la situación financiera del ingenio.

Para lograr este objetivo, se propone un modelo estadístico basado en el algoritmo de *Random Forest*, el cual permite predecir el "tiempo de reposición" de los equipos agrícolas en función de variables clave, como el costo operativo por hora, la antigüedad, la disponibilidad y las horas de uso acumuladas. Este modelo de Machine Learning proporciona una clasificación precisa de los equipos en categorías de reposición, ayudando a priorizar la inversión en aquellos con mayores necesidades de renovación, para este caso corresponde a los clasificados en "1 año" y "2 años".

La aplicación del modelo Random Forest representa un avance hacia la gestión eficiente de la maquinaria, asegurando que las decisiones de reposición contribuyan a maximizar la rentabilidad y mantener la sostenibilidad operativa en el largo plazo. Además, este enfoque proporciona un marco para la planificación estratégica basada en datos, garantizando la disponibilidad y eficiencia de los equipos en el área de campo, lo que se traduce en mejoras significativas en la productividad del Ingenio La Cabaña.

Palabras Claves: Ingenio, Reposición, Maquinaria, Modelo y Rentabilidad.

ABSTRACT

La Cabaña Sugar Mill, one of the leading companies in the sugarcane agro-industrial sector located in northern Cauca, continuously conducts evaluations and improvement plans for its field and factory processes. This consulting project addresses the need to establish objective criteria for decision-making regarding the replacement of equipment in its operational departments, aligning these decisions with the mill's financial situation.

To achieve this objective, a statistical model based on the Random Forest algorithm is proposed. This model enables the prediction of the "replacement time" for agricultural equipment based on key variables such as hourly operating cost, age, availability, and accumulated usage hours. The machine learning model provides an accurate classification of the equipment into replacement categories, thereby aiding in prioritizing investment in those units with the greatest renewal needs—specifically, those classified as “1 year” and “2 years.”

The application of the Random Forest model represents a significant advancement towards efficient machinery management, ensuring that equipment replacement decisions contribute to maximizing profitability and sustaining long-term operational viability. Furthermore, this approach offers a framework for data-driven strategic planning, guaranteeing the availability and efficiency of equipment in the field, which ultimately translates into significant improvements in the productivity of La Cabaña Sugar Mill.

Keywords: *Sugar Mill, Replacement, Machinery, Model and Profitability.*

2. INTRODUCCIÓN

El sector azucarero en Colombia es una de las actividades económicas más relevantes, no solo por su impacto en la generación de empleo, sino también por su contribución al desarrollo económico de las regiones donde se localizan los ingenios. La industria azucarera del Valle y Norte del Cauca es uno de los impulsores más importantes, puntualmente, del suroccidente colombiano. A lo largo del tiempo, se ha investigado y mejorado los diferentes procesos que hacen parte de la producción de azúcar, llegando incluso a la diversificación de la oferta hacia productos como el bagazo para la producción de papel, alcohol carburante, alcohol para destilería, mieles y energía. Una de las áreas de estudio crítica es el aspecto financiero de la maquinaria agrícola que acompaña todas las actividades de producción, desde la preparación del suelo para sembrar la caña en campo hasta la entrega final en fábrica.

En este sentido, la industria azucarera enfrenta retos importantes relacionados con la eficiencia operativa y la competitividad, siendo la maquinaria agrícola de campo un componente crítico para garantizar la productividad y la reducción de los costos operativos. En este contexto, el Ingenio La Cabaña, como parte del sector, necesita optimizar sus procesos de reposición de equipos de campo como insumo principal para la posterior producción de azúcar. La caña de azúcar (*Saccharum spp. Hybrid*) juega un papel central en todos los procesos, y es necesario que las decisiones de gestión de activos estén alineadas con la rentabilidad y productividad en el largo plazo.

La reposición de maquinaria agrícola no solo implica la renovación de equipos, sino que también representa una oportunidad para mejorar el rendimiento de las operaciones. La maquinaria es fundamental para actividades clave como la preparación de suelos, la siembra, el cuidado de cultivos y la cosecha, por lo que un mal manejo en su ciclo de vida puede generar impactos negativos tanto en la productividad como en la rentabilidad del ingenio. Es así como surge la necesidad de desarrollar modelos

que permitan una adecuada gestión de estos activos, de manera que se logren decisiones fundamentadas que optimicen tanto el uso de los equipos como el capital invertido. En la actualidad el Ingenio La Cabaña, enfrenta la necesidad constante de asegurar que sus equipos de campo estén en óptimas condiciones para maximizar la productividad y minimizar los costos asociados a fallas o mantenimientos imprevistos.

Para el Ingenio La Cabaña, al igual que en otros ingenios del sector azucarero colombiano, el ciclo de vida de la maquinaria agrícola es un factor determinante en su competitividad. Estudios recientes sobre la gestión de activos en el sector agroindustrial señalan que una correcta planificación en la reposición de maquinaria puede reducir los costos operativos hasta en un 20%, mientras que la falta de una adecuada gestión puede generar un aumento significativo en los costos de mantenimiento y una disminución de la productividad del 15% (Ruiz-Sánchez et al., 2020; Gómez et al., 2021). Estos estudios destacan la relevancia de contar con modelos predictivos y herramientas de análisis de riesgos que permitan una adecuada toma de decisiones en la reposición de maquinaria agrícola.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo general establecer un indicador que permita la reposición de equipos y a su vez mejore la eficiencia productiva y económica del ingenio. A partir de este indicador, se facilitará la toma de decisiones estratégicas, considerando tanto el rendimiento de la maquinaria agrícola como su impacto en la rentabilidad del negocio. Los objetivos específicos que guiarán el desarrollo de este trabajo incluyen la descripción de una matriz de riesgo que identifique los factores que influyen en la productividad y rentabilidad, el análisis de los estados financieros de la empresa para evaluar alternativas de reposición de equipos, y el desarrollo de un modelo estadístico que prediga la rentabilidad de la maquinaria agrícola y su necesidad de reposición en un horizonte de tiempo determinado.

El desarrollo de un modelo estadístico le permitirá al ingenio predecir la rentabilidad de su maquinaria agrícola en función de variables clave, como el tiempo de uso, los costos de mantenimiento y el rendimiento operativo. Esta será una herramienta útil para la empresa, ya que proporcionará una estimación cuantitativa del momento óptimo para la reposición de los equipos, minimizando el riesgo de pérdida de productividad o de incurrir en costos innecesarios. En el marco de la mejora continua, este trabajo de consultoría busca proporcionar una herramienta integral que no solo permita optimizar el uso de los equipos agrícolas en el área de campo, sino que también mejore la rentabilidad global de la empresa.

Dado lo anterior, la innovación en este estudio se centraliza en la implementación de un **Modelo de Clasificación para Reposición de Equipos**, basado en el algoritmo de **Random Forest**. Este modelo permite clasificar la maquinaria agrícola en distintas categorías de tiempo de reposición (1 año, 2 años, 3 años, 4 años y 5 años), en función de variables críticas como la antigüedad, el costo total por hora, la disponibilidad, las horas trabajadas y el horómetro. A través del análisis de datos históricos, el modelo proporciona un sistema de clasificación de los equipos, lo que facilita la toma de decisiones estratégicas y permite priorizar la reposición de maquinaria de acuerdo con su impacto en la productividad y en los costos operativos.

La implementación de este modelo de clasificación representa un avance significativo hacia la adopción de prácticas de mantenimiento preventivo basadas en datos. En el marco de la mejora continua, la aplicación de este modelo no solo contribuirá a la reducción de sus costos operativos, sino que también permitirá al ingenio mantener un alto nivel de competitividad en el sector azucarero. El modelo de predicción es, por lo tanto, un elemento clave en la estrategia corporativa del Ingenio La Cabaña para

maximizar su rentabilidad y mejorar su posición en el mercado, cumpliendo con los objetivos de sostenibilidad y eficiencia que demanda el contexto actual de la agroindustria azucarera en Colombia.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, la agroindustria de la caña de azúcar de Colombia continúa destacándose a nivel internacional por sus importantes logros en materia de productividad, gracias a los esfuerzos de ingenios y cultivadores y que han sido liderados por el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar (CENICAÑA). De acuerdo con GlobalData, una de las más importantes firmas de análisis y seguimiento del mercado de commodities, la agroindustria de la caña colombiana sigue liderando el ranking de productividad agroindustrial, medida como la cantidad de toneladas de azúcar extraídas de una hectárea de caña cosechada, entre los principales países productores de azúcar del mundo (ASOCAÑA, 2024).

Sin embargo, para el año 2023, los resultados de la agroindustria en términos de productividad no fueron los más sobresalientes, puesto que estuvieron altamente afectados por la influencia de los eventos del clima durante el transcurso del año actual y anterior. Al respecto, ASOCAÑA (2024) indica que los efectos del prolongado fenómeno de La Niña, que se extendió hasta el primer semestre de 2023 impidieron a la agroindustria de la caña operar a su máxima capacidad, marcando los resultados en materia de producción y ventas. La saturación de los suelos, causada por la intensidad de las lluvias, dificultó el ingreso a los campos y la realización de las labores agrícolas durante el período 2021-2022 y el primer trimestre de 2023.

A nivel de la productividad en campo, los datos más sobresalientes corresponden al aumento del área cosechada durante el 2023, que alcanzó las 198.957 hectáreas, lo que representó un incremento de 7,7% frente al 2022. Las Toneladas de Caña por Hectárea (TCH) cosechadas pasaron de 117,8 en 2022 a 102,0 en 2023, una disminución de 13,3%. Como consecuencia, la molienda de caña de azúcar de los ingenios azucareros resultó fuertemente impactada, totalizando una producción de 20,9 millones de

toneladas, 9,2% menos que en 2022 (22,6 millones de toneladas). Entretanto las Toneladas de Azúcar por Hectárea (TAH) se ubicaron en 10,8, es decir, 12,5% por debajo de la cifra de 2022 (ASOCAÑA, 2024).

Vale la pena mencionar, que el ingenio La Cabaña no fue ajeno a esta situación, puesto que los resultados de producción (principalmente en términos de TCH y sacarosa) fueron los más bajos en los últimos años e inclusive de toda la agroindustria azucarera (ver **Tabla 1**), esta situación estuvo muy influenciada por el efecto de la variabilidad climática y a la baja mecanización agrícola de sus campos que, por su condición geográfica, tipo de suelos y el aumento considerable de las precipitaciones conllevó a una grave afectación de la productividad de sus campos; y que además asociado al plan de inversiones ejecutado en los últimos años y al aumento inesperado de las tasas de interés, finalmente conllevó a que la empresa generara altas pérdidas económicas y problemas de liquidez financiera. Actualmente, el ingenio enfrenta un alto endeudamiento que asciende a \$944.969 millones, de los cuales el 26% se encuentra vencido por más de 90 días. Al mismo tiempo, tiene registradas garantías mobiliarias, al igual que un crédito sindicado con algunas entidades bancarias; sus obligaciones adeudadas a los acreedores corresponden a un total de \$310.337 millones (Rodríguez, 2024).

| Año de producción | Edad Cosecha (meses) | Molienda (Ton) | TCH | TCHM | SAC (%) | TSHM | Pluviometría (mm) |
|-------------------|----------------------|------------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------------|
| 2023 | 12.28 | 1,331,547 | 70.46 | 5.74 | 11.47 | 0.656 | 1437 |
| 2022 | 13.00 | 1,721,893 | 92.17 | 7.08 | 11.75 | 0.833 | 1826 |
| 2021 | 12.79 | 1,758,520 | 104.02 | 8.13 | 12.18 | 0.990 | 1622 |
| 2020 | 11.99 | 1,771,466 | 89.32 | 7.45 | 12.20 | 0.909 | 1202 |
| 2019 | 12.06 | 1,720,060 | 90.42 | 7.50 | 12.39 | 0.929 | 1423 |
| 2018 | 13.55 | 2,004,989 | 102.5 | 7.56 | 12.89 | 0.975 | 1409 |

Tabla 1: Principales resultados de producción años 2018 - 2023 del Ingenio La Cabaña

Fuente: Elaboración propia

Durante los últimos 5 años, la productividad de ingenio La Cabaña se ha visto muy afectada por diversas causas, impactando directamente en el EBITDA de la empresa y limitando de forma considerable los ingresos de la compañía; llevando a tomar decisiones financieras de endeudamiento que no han visto su retorno en el activo corriente (caña), debido a la disminución de su productividad expresado en TCH (Toneladas de Caña por Hectárea) en el área de campo, quienes son los mayores proveedores de la materia prima para la producción de azúcar y cogeneración de energía. Para el área de campo de ingenio La Cabaña, una de sus líneas iniciales de producción es la disponibilidad de equipos e implementos agrícolas, pues estos mueven cerca del 85% de labores de campo, que aseguran posteriormente la productividad de sus cultivos de caña.

El propósito de esta propuesta de consultoría es desarrollar un modelo metodológico basado en **Random Forest** para el análisis, monitoreo y toma de decisiones en la gestión de los equipos agrícolas en el área de campo. Este modelo clasificará los equipos en intervalos de tiempo para su reposición, evaluando variables clave desde el instante en que entran en operación hasta el momento en que requieren su reemplazo. De esta manera, se asegura la disponibilidad y eficiencia de los equipos, lo cual impactará directamente la productividad y los ingresos del ingenio La Cabaña.

4. JUSTIFICACIÓN

El ingenio La Cabaña es una empresa agroindustrial del sector privado cuya principal materia prima es la caña de azúcar, la cual realiza su proceso de transformación para sus tres líneas de negocio: producción de azúcar, energía y bagazo. En el año 2023, tuvo una producción de 131.185 toneladas de azúcar, 465.947 toneladas de bagazo y generó 256,065.796 kW de energía. Las ventas totales para este año superaron los 524 mil millones de pesos, y en su nómina actualmente cuenta con 1.768 empleados.

Para el año 2023, el informe anual de desempeño del ingenio La Cabaña presenta un resultado económico desfavorable, evidenciado en la disminución de sus ingresos por venta de azúcar, en contravía con el aumento del precio promedio del azúcar en los diferentes mercados y del incremento en el precio de los quintales exportados debido a una tasa de cambio favorable. Esta situación muestra que la rentabilidad de la empresa se ha visto altamente afectada por factores internos en el proceso de producción, lo que resalta la necesidad de evaluar cada componente relacionado con el cultivo y la cosecha de la caña de azúcar.

En este sentido, a medida que transcurre el tiempo, la maquinaria agrícola tiende a perder eficiencia debido a su desgaste, lo que genera un aumento en los costos de mantenimiento, tiempos de inactividad y una reducción en la productividad. Estos factores impactan directamente en la rentabilidad del ingenio, debido a que equipos ineficientes no solo incrementan los costos operativos, sino que también reducen el rendimiento general de la producción de caña de azúcar. Según estudios previos, los costos asociados al mantenimiento de maquinaria obsoleta pueden llegar a ser tan altos que superan los beneficios que estos equipos generan, lo cual hace imperativo un proceso adecuado de reposición (Galárraga Rivera, 2019; Muñoz et al., 2018).

El ingenio La Cabaña, al igual que otros ingenios azucareros, enfrenta el reto de optimizar sus recursos y tomar decisiones informadas sobre cuándo y cómo reponer su maquinaria de campo. La ausencia de un indicador claro que permita evaluar la rentabilidad de los equipos agrícolas dificulta que estas decisiones se realicen de manera oportuna y eficiente. Esta situación se ve agravada por la falta de un análisis riguroso que considere tanto el impacto en la productividad como en la rentabilidad económica. Además, los ingenios que no modernizan sus equipos enfrentan una pérdida de competitividad frente a aquellos que optimizan sus procesos productivos y operativos (Izar Landeta et al., 2017; Mesa Grajales et al., 2006).

En este sentido, el presente trabajo de consultoría busca desarrollar un modelo de clasificación basado en el algoritmo **Random Forest** que permita hacer seguimiento a los equipos de campo que son clave en las labores de producción de caña. Este modelo proporcionará un indicador de rentabilidad para la reposición de los equipos, al clasificar los intervalos de tiempo en los que es necesario reemplazarlos durante su ciclo de vida útil. Esto facilitará la toma de decisiones sobre el momento adecuado para la reposición, ayudando a definir un plan de acción que mejore la disponibilidad de los equipos y, en consecuencia, la rentabilidad y el impacto positivo en los ingresos de la empresa.

5. OBJETIVOS

5.1 General:

- 5.1.1 Proponer un modelo de clasificación que permita mejorar el proceso de reposición de maquinaria para el área de campo, facilitando la toma de decisiones basadas en la rentabilidad de la maquinaria agrícola.

5.2 Específicos:

- 5.2.1 Describir la matriz de riesgo y los factores de mayor impacto en el comportamiento de la productividad y rentabilidad del ingenio La Cabaña.
- 5.2.2 Analizar los estados financieros de ingenio La Cabaña para definir algunas alternativas de reposición de equipos.
- 5.2.3 Desarrollar y evaluar un modelo de clasificación basado en **Random Forest** para la identificación de intervalos de recambio de la maquinaria agrícola de campo.

6. ESTADO DEL ARTE

La reposición de equipos de campo en industrias como los ingenios azucareros es un factor clave para asegurar la continuidad operativa, el aumento en la productividad y la optimización económica. Este proceso implica la evaluación del ciclo de vida de los equipos, el análisis de costos de mantenimiento y la evaluación del retorno de inversión en la adquisición de nuevas tecnologías, la cual requiere un enfoque integral que considere no solo los costos inmediatos de adquisición, sino también los beneficios a largo plazo en términos de eficiencia operativa, sostenibilidad y reducción de tiempos de inactividad. Las investigaciones aquí descritas proporcionan un marco robusto para evaluar y optimizar las decisiones de reposición de maquinaria en este sector, con aplicaciones que van desde el análisis predictivo hasta la toma de decisiones multicriterio. El avance en la digitalización y las herramientas de análisis de datos ofrece nuevas oportunidades para mejorar la toma de decisiones y maximizar el retorno de inversión.

La eficiencia productiva y la optimización de costos están íntimamente ligadas a la adecuada gestión de la maquinaria agrícola utilizada en los cultivos, especialmente en cultivos intensivos como la caña de azúcar (García & Martínez, 2022). Los ingenios azucareros, como el Ingenio La Cabaña, enfrentan desafíos relacionados con el envejecimiento de sus equipos, que afecta negativamente la productividad, los costos de mantenimiento y las pérdidas de tiempo operativo.

El proceso de reposición de equipos de campo tiene un impacto directo en los costos operativos y, por lo tanto, en la rentabilidad de la empresa. Implementar un modelo eficiente para la reposición de maquinaria no solo busca maximizar la vida útil de los equipos, sino también optimizar los recursos financieros y aumentar la productividad (Patel & Kumar, 2020).

Una de las investigaciones clave en este campo es el trabajo de Sharma y Pandey (2020), quienes analizan la vida útil de maquinaria agrícola desde una perspectiva de costos y rendimiento. En este estudio, los autores desarrollan un modelo para determinar el momento óptimo para reemplazar equipos de campo basándose en la frecuencia de fallas y el costo acumulado del mantenimiento en comparación con los costos de inversión en nuevos equipos. Este enfoque ha sido ampliamente utilizado en la agricultura mecanizada y tiene aplicaciones directas en los ingenios azucareros, donde los equipos como tractores y cosechadoras desempeñan un papel crucial en la producción.

Otro estudio desarrollado por Smith & Li (2019) examina cómo las estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo pueden influir en la decisión de reposición de equipos. Utilizando técnicas de análisis de datos y aprendizaje automático, los autores proponen un marco de mantenimiento predictivo que permite anticipar fallas en maquinaria crítica y, por lo tanto, optimizar el tiempo de reemplazo. Este tipo de modelo es particularmente relevante para ingenios azucareros, donde el tiempo de inactividad no planificado puede tener un impacto significativo en los márgenes de ganancia.

Recientemente, los modelos de clasificación como el **Random Forest** han ganado popularidad en el análisis predictivo. Estos modelos permiten clasificar los equipos en categorías de reposición según su estado y rendimiento. A diferencia de los modelos de regresión, que asumen relaciones lineales entre las variables, Random Forest puede capturar relaciones no lineales y complejas, lo cual es especialmente útil en contextos agrícolas donde las variables interrelacionadas, como antigüedad, costos de mantenimiento y horas de uso, no siempre se comportan de manera lineal (Pérez & Fernández, 2021). Esta capacidad de clasificación avanzada mejora la precisión en la toma de decisiones, permitiendo prever los periodos de reposición con mayor exactitud.

Otra investigación desarrollada por López & Morales (2018), proporciona un enfoque detallado del análisis de costos asociados con la reposición de maquinaria industrial en los ingenios azucareros. Su estudio considera tanto los costos directos de adquisición como los costos indirectos relacionados con el mantenimiento, el consumo de combustible y los tiempos de inactividad. La investigación concluye que el análisis del ciclo de vida de los equipos es esencial para tomar decisiones de reposición que sean financieramente viables y mejoren la eficiencia operativa a largo plazo.

Otro estudio de gran importancia es el de González & Fernández (2021), quienes analizan el impacto económico de la reposición de equipos en los ingenios desde una perspectiva de sostenibilidad. Los autores proponen un modelo basado en la economía circular, que incluye la reutilización y el reciclaje de equipos antiguos, lo que reduce los costos y mejora la sostenibilidad ambiental. Este modelo también destaca la importancia de seleccionar proveedores y tecnologías que maximicen la eficiencia energética y minimicen el desperdicio.

Finalmente, el estudio de Paredes & Escobar (2022) aborda el uso de métodos de toma de decisiones multicriterio (MCDM) para la reposición de maquinaria en ingenios. Este enfoque permite considerar múltiples factores como costos, durabilidad, disponibilidad de repuestos, impacto ambiental y retorno sobre la inversión. Su investigación sugiere que el uso de técnicas MCDM como el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) puede ayudar a los gerentes de planta a tomar decisiones más informadas sobre la sustitución de equipos.

7. MARCO CONCEPTUAL

7.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PRODUCCIÓN DE CAÑA AZUCAR

Las características físico-químicas que determinan la calidad de la caña de azúcar y su potencial de producción en cualquier variedad cultivada son el resultado de un complejo proceso donde intervienen la composición genética, el clima, el manejo agronómico y las labores de cosecha que recibe el cultivo (Castillo & Garcés, 2015). A continuación, se describen los principales factores que influyen en la calidad de la caña de azúcar:



Figura 1: Factores que influyen en la producción de caña de azúcar

Fuente: Castillo et al., 2015.

Es importante entender que las variaciones en la producción, en la mayoría de los casos, obedecen a factores poco controlables que afectan el cultivo y que aparecen en el escenario con un nivel de incertidumbre en la frecuencia y en la magnitud del efecto que puedan tener. Pero esta situación no es exclusiva para la caña de azúcar, sino que también afecta a otros cultivos. Esto significa que la producción no permanece constante en el tiempo, sino que varía de acuerdo con las condiciones ambientales

presentes durante el desarrollo del cultivo, y en la misma manera su crecimiento varía de unos años a otros, en una misma localidad, como respuesta a las diferencias que se presentan en el clima local (Villegas, 2013).

La productividad de la caña de azúcar en el valle del Río Cauca depende de gran medida de las variaciones climáticas de la región. Generalmente, los cambios drásticos en la productividad están asociados a condiciones climáticas extremas como los fenómenos El Niño y La Niña. Sin embargo, no necesariamente cada vez que se presenta uno de estos eventos se afecta la productividad, ya que su efecto depende mucho de la magnitud de estos fenómenos y de la forma como se alternan a través del tiempo (CENICAÑA, 2014).

No obstante, los eventos de La Niña de gran duración son los que más impactan la producción de caña, especialmente en la segunda mitad del suceso y hasta un año después de concluido, como consecuencia del exceso de humedad, el pisoteo y el daño a las cepas durante la cosecha en suelos demasiados húmedos, la dificultad para realizar las labores de cultivo mecánico y la escasa renovación de los campos durante el tiempo del evento (CENICAÑA, 2014).

Por su parte, Chica *et al.* (2021) mencionan que el impacto de la lluvia sobre los sistemas de producción agrícola mecanizada afecta en doble vía. Por una parte, afecta de forma directa, a través del efecto fisiológico sobre las plantas cultivadas y sobre la dinámica poblacional de especies antagonistas. De forma indirecta, la precipitación impacta a través del efecto que ejerce la lluvia sobre la oportunidad de realización de labores en campo. La oportunidad de labor se refiere a la posibilidad de ejecutar itinerarios técnicos, como la cosecha, la fertilización, el laboreo del suelo y el control de malezas, en el

momento indicado. No obstante, la probabilidad de efectuar una labor en el momento requerido depende del estado de humedad del suelo.

Por otro lado, dentro de los factores que son controlables, el manejo agronómico y la condición de la cosecha impactan significativamente la productividad del cultivo. López (2021) menciona que una de las causas de baja producción en la caña de azúcar en el sector agroindustrial es la inoportunidad en las labores culturales. El manejo adecuado del cultivo, desde la preparación del terreno hasta la cosecha, es crucial en cada etapa del desarrollo fisiológico de la caña de azúcar.

Por su parte, Chica *et al.* (2021) indican que las labores mecanizadas aplazadas (o no ejecutadas), por efecto de alta humedad en el suelo, afectan la producción. Tal afección de la productividad se debe al asincronismo entre el momento idóneo para realizar una labor y el momento en que esta se ejecuta.

CENICAÑA (2003) destaca que la cosecha continua de caña a lo largo del año, incluyendo los periodos de lluvia, conduce a la compactación de los suelos y al daño directo en el cultivo por el tráfico de los equipos sobre las cepas. Los estudios indican que esta práctica puede reducir la producción hasta en un 40%, mientras que la compactación del suelo puede disminuirla entre un 10% y 15%, aunque las labores de cultivo permiten en gran medida la restauración de las condiciones del suelo.

Los descensos en la productividad de los campos afectan directamente los ingresos de cada agricultor o proveedor de caña, debido a la reducción en el valor agregado, la producción y los efectos multiplicadores que genera esta actividad agroindustrial a nivel nacional. CENICAÑA (2015) estableció que las variaciones en los índices de ingresos, costos y utilidad en los productores de caña están asociadas a variables económicas clave. Para los ingresos promedio por venta de azúcar, las variables más influyentes

son el TCH (Toneladas de Caña por Hectárea) y el RTO (Rendimiento). En los costos de producción, las variables de mayor influencia son el TCH, el precio del azúcar y los costos de campo, cosecha y fábrica. Para las utilidades promedio, las variables más relevantes son el RTO y el TCH.

Estas variables impactan en cada uno de los indicadores (ingresos, costos de producción y utilidades) con relación a sus resultados promedio. Es decir, si se mantiene constante el RTO y el precio del azúcar, el ingreso puede variar entre -42% y 42% de acuerdo con el TCH. Así mismo, si se mantienen constantes todas las variables, los costos de producción podrían oscilar entre -37% y 37% acorde al TCH. Para la utilidad, se presenta una variación entre -198% y 202% según el comportamiento del rendimiento, siempre y cuando las demás variables permanezcan constantes (ver **Figura 2**). De ahí que para el tomador de decisiones sea importante priorizar el manejo de cada una de estas variables con el fin de lograr iguales o mayores ingresos, menores o iguales costos y por lo tanto mayores utilidades (CENICAÑA, 2015).

Conforme a lo anterior, una de las formas para tornarse competitivo para cualquier productor de caña en el escenario actual, requiere contemplar en cada proceso productivo la eficiencia operativa y la reducción de los costos en las actividades agrícolas durante el ciclo de levantamiento del cultivo. Al respecto Peloia & Milán (2010), mencionan que, en términos de potencial de reducción de costos de producción, la mecanización puede considerarse como el factor principal. Por su parte, Murcia *et al.*, (2006), mencionan que, dentro de los componentes a mejorar en el sistema de producción, se tiene el uso eficiente de las máquinas e implementos agrícolas con que dispone, y en caso de ser necesario, se debe plantear la renovación parcial o total de éstas, según su nivel de obsolescencia. Sin embargo, la rentabilidad del sector agrícola suele limitar drásticamente la renovación, ya sea parcial, de los equipos agrícolas.

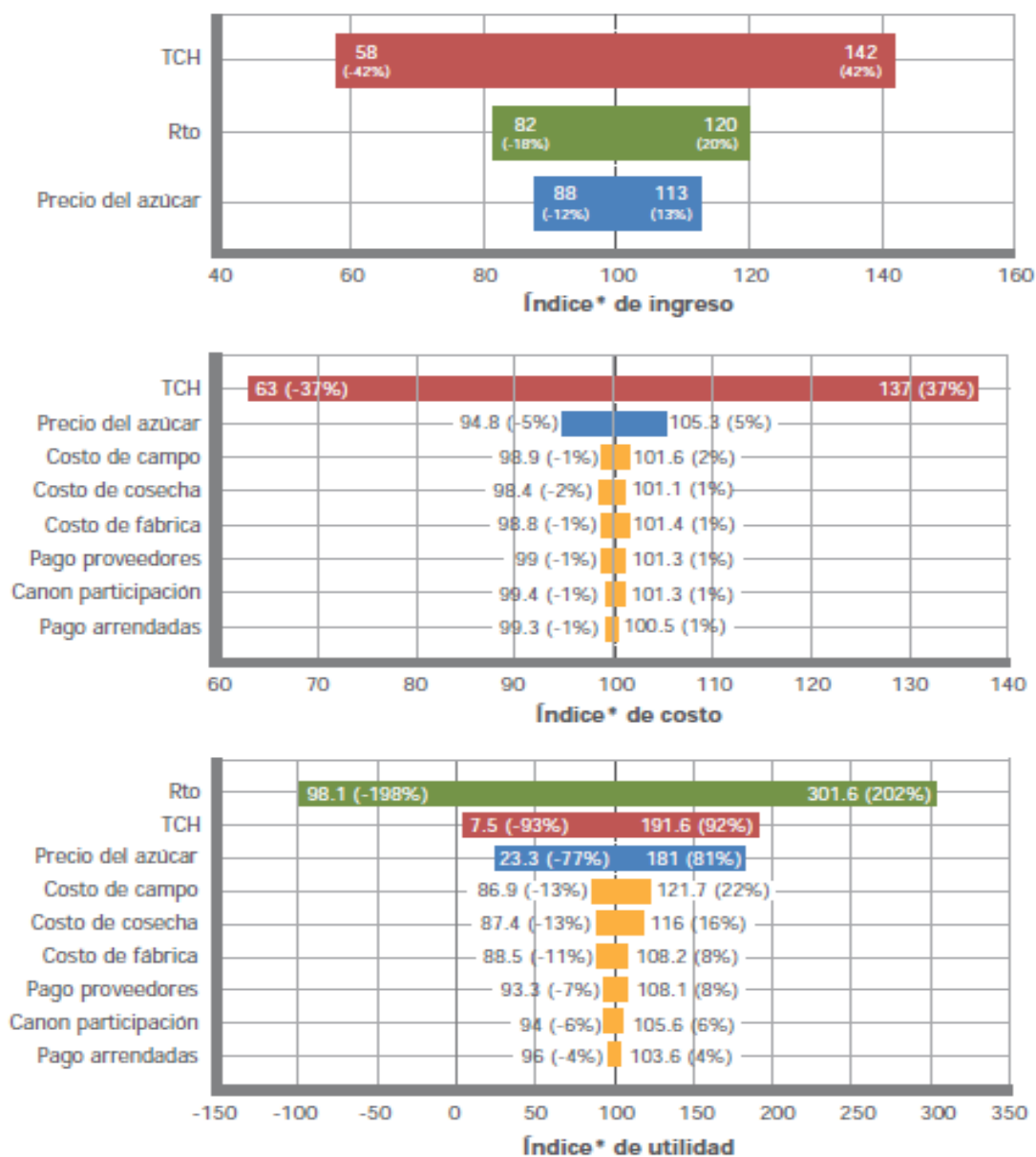


Figura 2: Variación de los índices de ingreso, costo y utilidad según el comportamiento de la variable de interés

Fuente: CENICAÑA, 2014

El uso de la maquinaria agrícola puede representar entre el 20% y el 40% del costo total de la producción (Matos, 2007). En la mayoría de las explotaciones agrícolas resulta ser uno de los de mayor peso específico en el balance global, llegando a suponer en algunos casos hasta el 50% de los costes totales de la actividad. Por tanto, el elegir correctamente el equipamiento resulta ser determinante, no sólo desde el punto de vista técnico sino, sobre todo, económico (Gil, 2001).

Cabe mencionar que el aumento de los costos asociados al uso de maquinaria agrícola a menudo es el resultado de una insuficiencia en el dimensionamiento del sistema mecanizado, lo que justifica la necesidad de una planificación adecuada para que su desempeño brinde mejores retornos a las inversiones realizadas (Matos, 2007).

Desde la perspectiva de reducción de los costos asociados a la maquinaria agrícola, es necesario la ampliación y modernización en la gestión de los sistemas mecanizados (Peloia & Milán, 2010). La adopción de las técnicas administrativas clásicas ya no cumple con las condiciones de sostenibilidad impuesta por el mercado. Estas técnicas se basan en el dimensionamiento del sistema mecanizado, los estudios de tiempos y movimientos y la planificación y control de costos y productividad. Estas son eficaces en tiempos de menor competencia, pero carente de una visión sistémica. La adecuación de la gestión de los sistemas mecanizados debe buscar, además de la productividad y costos, calidad de las operaciones agrícolas, motivación, seguridad y salud de empleados, preservación del medio ambiente y alineación estratégica (Milán, 2004, citado por Peloia & Milán, 2010).

Dado lo anterior, surge la importancia de establecer un mecanismo o sistema que permita dar respuesta oportuna a la ejecución de las labores mecánicas conforme a la variación del clima y a otros factores de gestión administrativa (como el uso y dimensionamiento de la maquinaria agrícola), a fin de

mantener o aumentar la productividad de los campos (TCH) durante el ciclo de desarrollo del cultivo y así mismo, minimizar las posibles pérdidas económicas por los efectos adversos de los factores controlables y no controlables anteriormente expuestos.

7.2 PRINCIPALES LABORES EN EL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR

Para establecer un cultivo de caña de azúcar se deben realizar obras de adecuación del terreno y labores de preparación del suelo, definidas acorde a los levantamientos topográficos previos, y a estudios hidrológicos y agrológicos, principalmente (Ingenio Risaralda, 2006). Por su parte, las labores mecánicas en las cañas socas tienen por objeto disminuir los efectos de la compactación del suelo, ocasionada por la maquinaria agrícola durante la cosecha. La compactación afecta el suelo hasta una profundidad entre 25 y 30 cm y es más severa durante las épocas de lluvia. Con relación a ello, las llantas traseras de los tractores son el principal punto de compactación del suelo. En este punto confluyen el peso del tractor y el componente vertical de la fuerza de tiro de los vagones (CENICAÑA, 1995).

A continuación, se describen las principales labores de levante del cultivo de caña de azúcar que permiten disminuir los efectos de la compactación, los tiempos de ejecución de estas y la potencia de la maquinaria a emplear:

| Labor | Plantilla | Soca | Objetivo de la labor | Maquina a emplear |
|--|-----------------------------------|-------------------------------|---|--|
| | (dds: días después de la siembra) | (ddc: días después del corte) | | |
| Resiembra con trozos | 30 a 60 dds | 15 a 20 ddc | Asegurar una buena densidad de población de tallos, ubicando semilla en los sitios donde no hubo germinación o daños por la operación de cosecha | Tractor: 100 - 150 HP |
| Resiembra con macollos o plántulas | 90 a 120 dds | 90 a 120 ddc | | |
| Riego de germinación | 3 a 5 dds | - | Suministrar al cultivo el volumen de agua necesario en el momento oportuno, lograr un buen desarrollo de las plantas y obtener alta productividad | Movimiento tubería y accesorios riego |
| Riego de levantamiento (cosecha entre 12 y 14 meses) | 45 a 60 dds a 10 meses | 60 dds a 10 meses | | Tractor: 80 - 100 HP |
| Roturación: escarificación o subsuelo | 40 dds | 15 a 30 ddc | Roturar y descompactar el suelo para mejorar sus condiciones físicas y de aireación. | Escarificación: Tractor de 120 a 150 HP |
| | | | | Subsuelo: Tractor de 200 a 280 HP |
| Cultivo-abono o fertilización mecánica | 45 a 75 dds | 45 a 60 ddc | Depositar e incorporar el fertilizante en la zona radicular y contribuir a mejorar las condiciones físicas del suelo | Tractor: 150 - 170 HP |
| Fertilización manual (levantamiento) | 45 a 90 dds | 45 a 90 ddc | Aplicar el fertilizante al suelo para complementar los requerimientos de nutrientes o suplir el déficit de ellos | Movimiento Tolvas, vagones y Otros |
| Fertilización líquida | 30 a 120 dds | 30 a 120 ddc | | Tractor: 100 – 150 HP |

| Labor | Plantilla | Soca | Objetivo de la labor | Maquina a emplear |
|---|--|--|--|-----------------------|
| | (dds: días después de la siembra) | (ddc: días después del corte) | | |
| Aporque o desterronada | 50 a 80 dds | 45 a 60 ddc | Mejorar el anclaje de la planta, adecuar los entresurcos para el riego, mejorar el drenaje y controlar las malezas. | Tractor: 80 - 120 HP |
| Mantenimiento de orilleras | Después del aporque y hasta los 10 meses | Después del aporque y hasta los 10 meses | Limpiar y/o rectificar las orilleras de la suerte, a fin de adecuarlas para evacuar los excesos de agua. | Tractor: 100 HP |
| Mantenimiento de canales de riego y drenaje | 120 dds a 10 meses | 1 ddc a 10 meses | | Retroexcavadora |
| Fertilización manual (durante la siembra) | Antes de depositar semilla | - | Depositar e incorporar abono en la zona radicular para contribuir a mejorar las características fisicoquímicas y microbiológicas de los suelos | - |
| Abonamiento orgánico (durante la siembra) | | | | Tractor: 150 - 170 HP |
| Abonamiento orgánico (levantamiento) | | | | 45 a 90 dds |
| Control químico de malezas | 8 a 60 dds | 45 a 120 ddc | Controlar las malezas (arvenses) para evitar que compitan por luz, espacio, nutrientes y agua con el cultivo | Tractor: 100 - 150 HP |
| Control manual | 60 a 150 dds | 60 a 150 ddc | | - |
| Encalle mecánico de residuos de cosecha | - | 1 a 8 ddc | Despejar la cepa y acomodar los residuos de cosecha en los entresurcos, con el fin de garantizar buen rebrote y acondicionar las suertes para la realización de las labores. | Tractor: 80 - 100 HP |
| Encalle manual de residuos de cosecha | - | 1 a 8 ddc | | - |

Tabla 2: Cronograma de labores para el levantamiento del cultivo

Fuente: Ingenio Risaralda, 2016

7.3 SELECCIÓN Y ADMINISTRACIÓN DE LA MAQUINARIA AGRICOLA

El uso de la maquinaria agrícola genera costos operativos de alta importancia; por ello, resulta necesario establecer una selección adecuada de los equipos a emplear. La primera decisión a la que se ve enfrentado el productor agrícola, referido a la planificación y administración del uso de la maquinaria, es a utilizar equipos propios o recurrir a la alternativa de arrendamiento (contratar servicios con terceros) de los equipos agrícolas, por ello se hace trascendental calcular con sencillez y precisión los costos asociados a la operación (Velasco & González, 2015).

El objetivo de la selección de la maquinaria agrícola es determinar con exactitud el tamaño y capacidad de los equipos requeridos para satisfacer las necesidades de producción, con el fin de optimizar el sistema de producción y maximizar los ingresos al menor costo posible (Murcia et al., 2006). Dado el elevado costo de los equipos y de las labores de mecanización, la selección debe ser cuidadosa, ya que un error en la elección de los equipos, máquinas y herramientas puede ocasionar pérdidas considerables e, incluso, el fracaso de una compañía (Polanco, 2007).

En zonas tropicales, como en nuestro caso, el proceso de selección de maquinaria resulta más complejo debido a las variaciones en los factores de clima y suelo, la intensidad y distribución de la precipitación y la topografía del terreno (Murcia et al., 2006). Es fundamental analizar si las características de la maquinaria se adaptan tanto a la topografía de los suelos como a los sistemas de producción. Según Murcia et al. (2006), los agricultores de todo el mundo suelen considerar los siguientes aspectos al seleccionar maquinaria:

- Confiabilidad
- Consumo de combustible
- Adaptación a las necesidades

- Costo de adquisición
- Responsabilidad del fabricante y de la casa comercial
- Tradición de la marca
- Costo de los repuestos

En cuanto a la administración de la maquinaria agrícola, esta consiste básicamente en la determinación y comparación de los costos con el valor de los trabajos realizados, acompañado con el estudio de las decisiones derivadas de aquellas operaciones con el fin de lograr su máximo beneficio (Murcia *et al.*, 2006). El costo de uso u operación de cualquier maquinaria agrícola o equipo depende principalmente de cinco factores o condiciones de utilización relacionados entre sí, estos son: La inversión inicial, intensidad de uso, mantención, el estado de conservación y su antigüedad. En general, cuanto mayor es la inversión inicial el costo operacional tiende a elevarse; para contrarrestarlo es importante generar con la maquinaria una intensidad de uso lo más cercana posible a su potencial, realizando, durante su vida útil, de la mejor forma posible las labores de mantención y reparación, de forma tal que el estado de conservación de la maquinaria se mantenga acorde a su antigüedad (Velasco & González, 2015).

Dentro de la administración de la maquinaria agrícola, existen aspectos de vital importancia que se deben tener en cuenta como, por ejemplo, la planeación de las actividades, la organización y el control; por lo tanto, se requiere de información veraz y oportuna que permita tomar decisiones adecuadas. Para ello, es necesario llevar algunos registros, o un sistema de normas y procedimientos para el control y uso de las máquinas e implementos agrícolas. El buen manejo de la maquinaria agrícola requiere que las operaciones individuales en un sistema de máquinas deban ajustarse y combinarse de tal manera que su rendimiento total genere las máximas ganancias para la empresa (Murcia *et al.*, 2006).

Un aspecto fundamental en la administración de la maquinaria es determinar el momento adecuado para reemplazar un equipo. Realizar el reemplazo de manera tardía ocasionará altos costos de mantenimiento, mientras que hacerlo de forma anticipada incrementa el costo de adquisición de equipos nuevos. Para determinar el tiempo apropiado de reemplazo, se utiliza el concepto de vida económica de los equipos, que se define como el periodo en el que debe reemplazarse un equipo para que el costo total, que incluye adquisición y mantenimiento, sea mínimo (Izar Landeta et al., 2017).

Al respecto, existen algunos parámetros teóricos que permiten determinar el momento adecuado para gestionar el cambio de la maquinaria. Álvarez (1985), establece un promedio de vida económicamente útil en años u horas de la maquinaria agrícola, en este caso (tractores) y del monto que alcanzan los costos de mantenimiento y conservación durante dicho periodo (dado en % de su valor original):

| DESCRIPCIÓN | AÑOS | HORAS | % |
|--|--------|---------------|----------|
| TRACTORES | | | |
| De oruga con motor diésel | | | |
| De 20 a 52 H.P. en la barra de tiro | 8 - 10 | 10000 - 12000 | 60 - 120 |
| De 53 a 135 H.P. en la barra de tiro | 8 - 10 | 10000 - 12000 | 75 - 120 |
| De oruga con motor de gasolina | | | |
| De 20 a 41 H.P. en la barra de tiro | 8 - 10 | 10000 - 12000 | 50 - 100 |
| De 42 a 66 H.P. en la barra de tiro | 8 - 10 | 10000 - 12000 | 60 - 120 |
| De 67 a 105 H.P. en la barra de tiro | 8 - 10 | 10000 - 12000 | 75 - 120 |
| Con 4 ruedas de caucho y motor diésel * | | | |
| De 38 a 47 H.P. en la volante | 8 - 10 | 10000 - 12000 | 50 - 120 |
| De 48 a 60 H.P. en la volante | 8 - 10 | 10000 - 12000 | 60 - 120 |
| De 93 a 300 H.P. en la volante | 8 - 10 | 10000 - 12000 | 75 - 120 |
| *Ampliamente utilizados en la agroindustria caña de azúcar | | | |

Tabla 3: Indicadores teóricos para cambio de maquinaria y porcentaje de costo de mantenimiento

Fuente: Álvarez, 1985

Asimismo, Murcia et al. (2006) indican que, tras 10,000 horas de operación o 10 años de uso, la maquinaria agrícola (como tractores) se tornaría inutilizable y anticuada, con un promedio de operación de 1,000 horas de trabajo por año.

7.4 GESTIÓN DE LA REPOSICIÓN DE MAQUINARIA AGRÍCOLA

La reposición de maquinaria agrícola en empresas como los ingenios azucareros es un proceso clave para la optimización de la productividad y la rentabilidad. Según Mínguez (2019), la reposición de maquinaria debe basarse en un análisis detallado que incluya indicadores de eficiencia económica, valor residual y costos de mantenimiento. Un mal manejo de la reposición puede generar ineficiencias operativas que impacten negativamente en la rentabilidad y competitividad.

La gestión adecuada de la maquinaria agrícola implica también la implementación de un Indicador de Rentabilidad de Maquinaria (IRM), que evalúe la capacidad de cada equipo de generar ingresos en comparación con sus costos operativos y de mantenimiento. García *et al.* (2021) proponen un modelo de indicadores compuestos por el costo por hora de operación y el costo acumulado del mantenimiento, ambos ajustados al ciclo de vida útil del equipo (Ver **Tabla 4**):

| Indicador | Descripción | Fórmula/Elemento Clave | Objetivo |
|---|--|--|---|
| Costo por Hora de Operación (CHO) | Evalúa el costo generado por hora efectiva de uso de la maquinaria. | $\text{CHO} = \frac{\text{Horas de Operación}}{\text{Costos Totales}}$ | Determinar si el costo por hora es competitivo y justificado en términos de ingresos generados. |
| Costo Acumulado de Mantenimiento (CAM) | Mide el costo total acumulado en mantenimiento durante el ciclo de vida del equipo. | $\text{CAM} = \sum(\text{Costo de Mantenimiento por Ciclo})$ | Identificar el punto en el que los costos de mantenimiento indican la necesidad de reposición. |
| Ajuste por Ciclo de Vida Útil | Relaciona los indicadores (CHO y CAM) con las etapas del ciclo de vida del equipo (inicio, óptimo, declive). | Comparación del desempeño según la etapa del ciclo de vida. | Permitir análisis dinámicos y predictivos basados en la edad y uso del equipo. |
| Valor Residual | Estima cuánto del valor de adquisición puede recuperarse al final del ciclo de vida de la maquinaria. | Estimación basada en la depreciación y el estado del equipo. | Complementar el análisis económico para decisiones de reposición. |

Tabla 4: Modelo de indicadores para determinar el seguimiento y cambio de maquinaria agrícola

Fuente: García et al. (2021)

De igual forma, diversos autores han desarrollado algunos modelos que abordan esta problemática desde el punto de vista técnico, económico y estadístico, muy destacados en la industria de caña de azúcar. A continuación, se describen los modelos más empleados:

7.5 MODELOS ESTADÍSTICOS Y DE PREDICCIÓN

La aplicación de modelos estadísticos para la predicción del desempeño y la rentabilidad de maquinaria agrícola ha ganado relevancia en los últimos años. Según Torres y Ramírez (2020), el uso de análisis de regresión y modelos de series temporales permite anticipar el comportamiento de los costos de mantenimiento y el rendimiento operativo de los equipos, lo cual es esencial para planificar su reposición de manera estratégica. Estos modelos integran variables como la antigüedad de los equipos, las condiciones de trabajo y las horas de operación acumuladas.

7.5.1 Componentes del Modelo.

7.5.1.1 Técnicas Estadísticas Utilizadas:

Análisis de regresión múltiple: Relaciona variables independientes, como la antigüedad de los equipos y las horas de operación acumuladas, con variables dependientes como los costos de mantenimiento y el rendimiento operativo.

Modelos de series temporales (ARIMA): Predicen el comportamiento futuro de las variables basándose en patrones históricos, lo que permite identificar tendencias y puntos de inflexión en los costos y el desempeño.

7.5.1.2 Variables Clave:

- **Antigüedad de los equipos:** Representa el impacto del tiempo de uso en la eficiencia y el desgaste del equipo.
- **Horas de operación acumuladas:** Indicador del desgaste físico y mecánico derivado del uso intensivo.
- **Condiciones de trabajo:** Factores como tipo de terreno, clima y carga de trabajo, que afectan el desempeño y los costos operativos.
- **Costo acumulado de mantenimiento:** Cálculo de los costos acumulados por servicios preventivos, correctivos y reparaciones.
- **Rendimiento operativo:** Relación entre la capacidad productiva real del equipo y su capacidad teórica.

7.5.1.3 Resultados Esperados:

- **Anticipación de costos:** Identificación de patrones de aumento en los costos de mantenimiento que justifiquen la reposición.
- **Optimización de recursos:** Reducción de tiempos de inactividad por fallas mecánicas y mejora de la productividad agrícola.
- **Toma de decisiones basada en datos:** Uso de predicciones confiables para establecer prioridades en la inversión.

| Componente | Descripción |
|---------------------------------|--|
| Técnicas estadísticas | Análisis de regresión múltiple y modelos de series temporales (ARIMA). |
| Variables independientes | - Antigüedad de los equipos. - Horas de operación acumuladas. - Condiciones de trabajo. |
| Variable dependiente | Costos acumulados de mantenimiento y rendimiento operativo |
| Propósito del modelo | - Predecir el momento óptimo para la reposición de maquinaria agrícola. - Identificar tendencias de costos crecientes que indiquen pérdida de eficiencia operativa. - Proveer una base estadística sólida para respaldar decisiones estratégicas de inversión en nuevos equipos. |
| Resultados esperados | Identificación de tendencias de costos, optimización del uso de recursos y decisiones informadas en reposición. |
| Aplicabilidad | Industria de la caña de azúcar y otras áreas agrícolas con alta dependencia de maquinaria en condiciones de trabajo exigentes. |

Tabla 5: Descripción del Modelo Estadístico y de Predicción para determinar el desempeño y rentabilidad de maquinaria agrícola

Fuente: Torres y Ramírez (2020)

7.6 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN

En el ámbito de la optimización, Martínez et al. (2018) desarrollaron un modelo basado en programación lineal para determinar el momento óptimo de reposición de maquinaria en la industria azucarera. Este modelo considera factores como los costos de oportunidad, el tiempo de inactividad por fallas y el impacto en la productividad agrícola. La ventaja de este enfoque es su capacidad para integrar múltiples variables y restricciones, adaptándose a las necesidades específicas de cada operación.

| Componente | Descripción |
|---------------------------------|---|
| Enfoque del modelo | Programación lineal para determinar el momento óptimo de reposición de maquinaria en la industria azucarera, utilizando un enfoque matemático que combina la maximización de beneficios con la minimización de costos asociados a la maquinaria. |
| Factores considerados | <ul style="list-style-type: none"> - Costos de oportunidad: Cuantifica las ganancias perdidas al mantener maquinaria ineficiente en lugar de optar por equipos más productivos. - Tiempo de inactividad por fallas: Evalúa el impacto económico de los periodos en los que la maquinaria no está operativa debido a reparaciones o mantenimiento. - Impacto en la productividad agrícola: Calcula cómo las fallas y la antigüedad de los equipos afectan la producción total de la operación |
| Restricciones del modelo | <ul style="list-style-type: none"> - Disponibilidad presupuestaria de la organización para inversiones en maquinaria nueva. - Vida útil estimada de cada equipo agrícola, definida por condiciones de uso y desgaste. - Necesidades operativas de campo, como áreas de cultivo y tiempos de cosecha. - Costo de adquisición y mantenimiento de nuevas maquinarias. |
| Metodología utilizada | <ul style="list-style-type: none"> - Formulación de una función objetivo para maximizar la productividad y minimizar los costos totales. - Implementación de restricciones específicas del sistema productivo, como el flujo de efectivo disponible y los tiempos de operación. - Uso de software especializado para resolver el modelo matemático, como MATLAB o LINGO |

| Componente | Descripción |
|----------------------------|---|
| Ventajas del modelo | <ul style="list-style-type: none"> - Adaptabilidad: Permite ajustar las variables y restricciones según las necesidades específicas de cada operación agrícola. - Integración: Combina factores financieros, técnicos y operativos en un único marco de análisis. - Optimización económica: Identifica el momento más rentable para la reposición, reduciendo costos de ineficiencia y fallas. |
| Aplicación práctica | <ul style="list-style-type: none"> - El modelo se probó en una operación de la industria azucarera, logrando una mejora del 15% en la productividad agrícola y una reducción del 10% en los costos operativos relacionados con maquinaria obsoleta. - Es aplicable a otras industrias agrícolas que utilicen maquinaria intensiva, siempre que se ajusten las variables del modelo a las características del sistema analizado. |

Tabla 6: Descripción del modelo de Optimización para determinar el momento óptimo de reposición de maquinaria agrícola

Fuente: Martínez et al. (2018)

7.7 ENFOQUES INTEGRALES PARA LA REPOSICIÓN DE MAQUINARIA

Un enfoque integral es el planteado por López et al. (2022), quienes combinan indicadores económicos y análisis de sostenibilidad para evaluar el impacto de la reposición de maquinaria no solo en términos de rentabilidad, sino también en el uso eficiente de recursos y la reducción de emisiones de carbono. Este modelo es especialmente relevante en el contexto actual, donde la sostenibilidad juega un papel crucial en la competitividad de la industria cañera. A continuación, se describe el modelo planteado:

| Componente | Descripción |
|--------------------------------------|---|
| Enfoque del modelo | Modelo integral que combina indicadores económicos con análisis de sostenibilidad para evaluar el impacto de la reposición de maquinaria en términos de rentabilidad, eficiencia en el uso de recursos y reducción de emisiones de carbono. |
| Objetivo principal | Lograr un equilibrio entre la rentabilidad económica y el impacto ambiental positivo mediante decisiones óptimas de reposición de maquinaria en la industria cañera. |
| Indicadores económicos | - Costo total de propiedad (TCO): Considera los costos de adquisición, mantenimiento, operación y disposición de maquinaria. |
| | - Retorno sobre la inversión (ROI): Mide la rentabilidad de reemplazar la maquinaria en comparación con mantener los equipos actuales. |
| | - Costo por hora de operación: Calcula la relación entre el costo operativo y la productividad de los equipos. |
| Indicadores de sostenibilidad | - Huella de carbono: Cuantifica las emisiones de CO ₂ asociadas al uso de maquinaria antigua frente a maquinaria más moderna y eficiente. |
| | - Eficiencia energética: Evalúa el consumo de combustible por hora de operación y la reducción lograda con tecnologías más avanzadas. |
| | - Uso eficiente de recursos: Analiza cómo la maquinaria nueva puede optimizar la utilización de insumos agrícolas como agua y fertilizantes. |
| Metodología utilizada | - Aplicación de un enfoque multicriterio para ponderar los indicadores económicos y de sostenibilidad. |
| | - Uso de herramientas de análisis como el método Analytic Hierarchy Process (AHP) para priorizar alternativas. |
| | - Modelación de escenarios futuros considerando variables como el costo del combustible, regulaciones ambientales y proyecciones de productividad. |
| Ventajas del modelo | - Integralidad: Integra aspectos económicos y ambientales en un solo análisis. |
| | - Adaptabilidad: Puede aplicarse a diferentes cultivos y contextos agrícolas ajustando las variables específicas del sistema. |
| | - Sostenibilidad: Promueve prácticas más amigables con el medio ambiente, mejorando al mismo tiempo la competitividad económica. |
| Resultados esperados | - Reducción significativa de emisiones de carbono, hasta un 20% en operaciones que reemplazan maquinaria antigua por tecnologías más modernas. |
| | - Incremento en la rentabilidad operativa, con mejoras de hasta un 12% en el ROI. |
| | - Uso más eficiente de recursos agrícolas clave, como el agua, logrando ahorros del 10-15%. |
| Aplicación práctica | - El modelo ha sido probado en ingenios azucareros de América Latina, mostrando su efectividad para mejorar la sostenibilidad y la rentabilidad en operaciones agrícolas intensivas. |

Tabla 7: Descripción del Modelo Integral de Reposición de Maquinaria agrícola

Fuente: López et al. (2022)

7.8 MATRIZ DE RIESGO Y SU IMPACTO EN LA PRODUCTIVIDAD

La matriz de riesgo es una herramienta crucial para la toma de decisiones en el proceso analizar causas de riesgo de negocio y definir la necesidad de reposición de maquinaria. Según Pérez *et al.* (2017), el análisis de riesgos en la maquinaria agrícola debe incluir factores operacionales, financieros y ambientales que puedan afectar la productividad y la rentabilidad.

López y Medina (2020) destacan que los riesgos relacionados con el mantenimiento y las fallas inesperadas representan el mayor impacto en la reducción de la productividad agrícola. Por ello, la matriz de riesgo debe clasificar los riesgos en términos de probabilidad de ocurrencia y gravedad de las consecuencias, lo que permite priorizar las acciones correctivas necesarias.

La implementación de esta herramienta permite una toma de decisiones fundamentada y alineada con los objetivos estratégicos de las organizaciones.

7.8.1 Riesgos Estratégicos

Los riesgos estratégicos en la industria azucarera están relacionados con factores externos que pueden alterar la capacidad de las organizaciones para alcanzar sus metas a largo plazo. Según Ramírez y López (2021), estos riesgos incluyen la volatilidad en los precios del azúcar, los cambios en las políticas gubernamentales y las fluctuaciones en los mercados internacionales; en este sentido, una matriz de riesgos estratégica permite evaluar la exposición a estos factores y proponer estrategias de mitigación, como la diversificación de productos y mercados.

7.8.2 Riesgos Operativos

En cuanto a los riesgos operativos, López y Medina (2020) destacan que las fallas inesperadas y el mantenimiento inadecuado de la maquinaria agrícola representan los mayores desafíos en la productividad de la industria azucarera. La implementación de tecnologías como sensores IoT y sistemas de mantenimiento predictivo ha demostrado ser efectiva para mitigar estos riesgos, optimizando los costos operativos y reduciendo los tiempos de inactividad; la clasificación de los riesgos operativos en términos de probabilidad y severidad es clave para priorizar las inversiones en infraestructura y capacitación técnica.

7.8.3 Riesgos de Cumplimiento

Los riesgos de cumplimiento están relacionados con el incumplimiento de normativas legales, ambientales y laborales aplicables al sector agrícola. Según Martínez y Gómez (2021), el endurecimiento de las regulaciones ambientales y las exigencias en la sostenibilidad de las operaciones representan desafíos significativos para la industria cañera, la matriz de riesgos de cumplimiento debe incluir un análisis detallado de las normativas locales e internacionales, así como la implementación de auditorías internas para garantizar el cumplimiento y evitar sanciones.

7.8.4 Riesgos Financieros

Por otro lado, los riesgos financieros en la reposición de maquinaria agrícola es un tema crítico. García y Torres (2019), señalan que factores como el aumento de los costos de mantenimiento, la

depreciación acelerada y el acceso limitado a financiamiento afectan la capacidad de las empresas para renovar su maquinaria. La evaluación de estos riesgos debe incluir el análisis de indicadores financieros como el costo total de propiedad (TCO) y el retorno de la inversión (ROI), además, las proyecciones financieras basadas en modelos predictivos pueden ayudar a identificar el momento óptimo para realizar inversiones en maquinaria.

Rojas et al. (2022) resaltan el uso de modelos estadísticos y herramientas tecnológicas que permite integrar los distintos tipos de riesgos en un marco de decisión consolidado, esto incluye el uso de simulaciones y análisis de sensibilidad para evaluar el impacto combinado de los riesgos estratégicos, operativos, de cumplimiento y financieros en los resultados de la industria azucarera.

Para Pérez et al. (2017), una matriz integral de riesgos no solo clasifica los riesgos según su probabilidad de ocurrencia y severidad, sino que también establece estrategias específicas de mitigación para cada tipo de riesgo. Por ejemplo, una organización podría priorizar la adquisición de maquinaria más eficiente en términos de consumo energético para abordar simultáneamente los riesgos financieros (reducción de costos operativos) y los de cumplimiento (cumplimiento con normativas ambientales), se convierte en una herramienta versátil y crucial para la gestión integral de los riesgos en la industria cañera, su implementación no solo mejora la eficiencia operativa y la sostenibilidad

económica, sino que también fortalece la capacidad de las organizaciones para adaptarse a un entorno cambiante.

7.9 ANÁLISIS FINANCIERO EN LA TOMA DE DECISIONES DE REPOSICIÓN

El análisis financiero permite establecer la salud económica de una compañía y, en el contexto de la reposición de maquinaria agrícola, es fundamental para determinar la viabilidad de adquirir nuevos equipos. Rojas y Camargo (2018), destacan que el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) son herramientas fundamentales para evaluar la rentabilidad de reemplazar maquinaria antigua con equipos nuevos, el VPN permite determinar el valor actual de los beneficios futuros netos de una inversión, descontando los costos iniciales y proyectando el ahorro en mantenimiento y eficiencia operativa. Por otro lado, la TIR facilita comparar alternativas de inversión al calcular la tasa de retorno esperada. Rojas y Camargo (2018), enfatizan que estos indicadores no solo proporcionan información financiera, sino que también soportan la justificación técnica de la decisión.

Por su parte, Castañeda (2019), profundiza en el análisis de flujos de caja proyectados como herramienta central para evaluar la viabilidad de una inversión en maquinaria nueva, argumenta que, además de los costos iniciales de adquisición, es crucial considerar costos futuros como mantenimiento, reparaciones y depreciación, propone incluir también un análisis de costos de oportunidad, que evalúa las pérdidas potenciales al continuar utilizando maquinaria obsoleta frente a la inversión en equipos más modernos y eficientes; además, sugiere que los flujos de caja deben actualizarse regularmente con base en las condiciones del mercado, como fluctuaciones en precios de insumos agrícolas.

Para González et al. (2020), el uso del Costo Total de Propiedad (CTP) como un indicador que integra los costos directos e indirectos asociados a la maquinaria agrícola, permite calcular con precisión la viabilidad de la reposición al considerar factores como:

- Costos de adquisición: Precio inicial de compra.
- Costos de operación: Combustible, mano de obra y otros insumos.
- Costos de mantenimiento: Reparaciones preventivas y correctivas.
- Costo de disposición: Valor residual o costo de desecho al final de la vida útil.

Según los autores, el CTP es especialmente relevante en contextos agrícolas donde los márgenes de ganancia son reducidos y la eficiencia operativa es crítica.

Hernández y Pérez (2021), subrayan la relevancia de los ciclos de vida de los activos agrícolas como una variable clave en la toma de decisiones, afirman que la maquinaria agrícola con ciclos de vida más cortos genera mayores costos de mantenimiento y una depreciación acelerada, lo cual afecta negativamente la rentabilidad. Estos autores proponen modelos de cálculo que proyectan el impacto de la edad de los equipos en la eficiencia productiva, argumentando que reemplazar maquinaria obsoleta puede reducir significativamente los costos operativos y aumentar la productividad.

Por su parte, Smith et al. (2022), introducen el concepto de optimización financiera en la reposición de maquinaria, integrando factores como eficiencia energética, emisiones de carbono y sostenibilidad operativa, sus estudios indican que incluir variables ambientales en los análisis financieros no solo mejora la percepción de la empresa ante los consumidores, sino que también contribuye a una reducción de costos a largo plazo, además, proponen el uso de modelos matemáticos y simulaciones para evaluar diferentes escenarios de inversión, permitiendo a las empresas tomar decisiones más informadas y adaptadas a las condiciones del mercado.

Finalmente Álvarez (2023), respalda la implementación de simulaciones financieras para evaluar los riesgos asociados con la reposición de maquinaria agrícola, su propuesta se centra en el uso de análisis de sensibilidad, una herramienta que permite evaluar cómo cambios en variables críticas (como costos de mantenimiento, tasas de interés y precios de venta) pueden impactar en la rentabilidad de la inversión; además, sugiere la integración de software especializado para automatizar el análisis de escenarios, lo que reduce errores y mejora la precisión de las proyecciones.

Las herramientas y modelos propuestos no solo contribuyen a la viabilidad financiera de las inversiones, sino que también promueven la sostenibilidad operativa y la mejora de la productividad en el sector agrícola.

7.10 MODELOS ESTADÍSTICOS PARA PREDECIR LA RENTABILIDAD

Los modelos estadísticos ofrecen un enfoque basado en datos para predecir la rentabilidad y determinar el momento óptimo para la reposición de maquinaria agrícola. Martínez et al. (2020) sugieren el uso de modelos de regresión lineal múltiple para correlacionar variables como la edad de la maquinaria, los costos de mantenimiento y la productividad generada por el equipo. Estos modelos permiten prever cuándo una máquina dejará de ser rentable y recomendar su sustitución.

Por otro lado, Rodríguez y Fernández (2021) emplean modelos de análisis de supervivencia para estimar la vida útil restante de la maquinaria. Estos modelos se basan en datos históricos de mantenimiento y operación, ayudando a las empresas agrícolas a optimizar el tiempo de reposición y evitar interrupciones en la producción.

La revisión de la literatura destaca la relevancia de la reposición de equipos de campo como un factor determinante para el mejoramiento productivo y económico de los ingenios azucareros. En este sentido, la implementación de modelos de toma de decisiones, como el análisis costo-beneficio y la simulación de Monte Carlo, permite a los ingenios planificar mejor sus inversiones y optimizar sus operaciones. A largo plazo, la renovación de equipos no solo aumenta la productividad, sino que también contribuye a la sostenibilidad económica y ambiental del ingenio.

En la actualidad, el interés por la gestión de activos agrícolas ha crecido debido a la necesidad de optimizar la productividad y reducir costos en la operación de la maquinaria agrícola. Diversos estudios subrayan que la planificación eficiente de la reposición de equipos es esencial para mantener altos niveles de productividad. Así, García et al. (2020) proponen un enfoque basado en el ciclo de vida de la maquinaria, analizando factores como el mantenimiento preventivo, el tiempo de uso, el costo por hora y la disponibilidad, para determinar el momento óptimo de reposición. El análisis de la vida útil y el impacto del envejecimiento de la maquinaria en la eficiencia operativa es clave en este proceso.

En el contexto de este trabajo, el desarrollo de un modelo de reposición de maquinaria agrícola para el Ingenio La Cabaña tiene como objetivo mejorar la productividad y rentabilidad. Este enfoque se basa en la identificación y análisis de las variables clave que afectan el desempeño económico y operativo de la maquinaria agrícola en el área de campo. Para estructurar este análisis, se abordan conceptos relevantes en torno a la gestión de activos, la evaluación de riesgos, la rentabilidad y el uso de modelos predictivos, particularmente el modelo de clasificación **Random Forest**, en la toma de decisiones de reposición.

8 METODOLOGÍA

La metodología propuesta para este estudio se centra en desarrollar un modelo que optimice la gestión de maquinaria agrícola en el Ingenio La Cabaña, buscando mejorar la eficiencia operativa y reducir los costos asociados a la reposición y mantenimiento de equipos en el área de campo teniendo como base, la salud financiera de la empresa para desarrollar estrategias de recambio de equipos. Esta metodología se estructura en varios pasos, que incluyen la caracterización de riesgos de tipo financiero, estratégicos, cumplimiento y operativos, el análisis financiero y la implementación de un modelo estadístico para la predicción de la necesidad de reposición de los equipos.

8.1 Descripción de la Matriz de Riesgo

El primer objetivo de este estudio es construir una matriz de riesgo que permita identificar y clasificar los principales factores de riesgo que afectan la productividad y rentabilidad en el Ingenio La Cabaña. Este análisis permitirá comprender los riesgos asociados al modelo de negocio actual y el impacto del uso maquinaria obsoleta en la productividad y costos del ingenio.

8.2 Recolección de Información

8.2.1 Revisión documental:

Se realizó una revisión exhaustiva de documentos internos que incluyeron informes de gestión, políticas de administración de riesgos y reportes de siniestros y fallos.

8.2.2 Entrevistas con expertos:

Se llevó a cabo entrevistas con gerentes e ingenieros de taller y el área de campo, para identificar los riesgos principales y entender su impacto en la operación diaria.

8.3 Construcción de la Matriz de Riesgos

8.3.1 Identificación de riesgos:

Se identificaron riesgos dentro del modelo de negocio actual de Ingenio La Cabaña; estos riesgos fueron clasificados en estratégicos, operativos, financieros y de cumplimiento.

8.3.2 Evaluación de la frecuencia e impacto:

La evaluación de cada riesgo se realizó utilizando una escala diferencial semántica del 1 al 5, donde 1 representa la menor frecuencia o impacto posible y 5 corresponde a la mayor frecuencia o impacto potencial en la operación y los resultados. Estos riesgos se clasificaron en cuatro categorías de acuerdo con su nivel de severidad, identificadas mediante un código de colores: verde (riesgo bajo: 1 a 2), amarillo (riesgo medio: 2,01 a 3), naranja (riesgo alto: 3,01 a 3,99) y rojo (riesgo crítico: >4).

8.3.3 Cálculo de la calificación de riesgo:

Se obtuvo la calificación de cada riesgo promediando la frecuencia por el impacto, lo que permitió priorizar aquellos con mayor efecto negativo que se encontraban en la escala promedio >4 , enfocando nuestro proceso de consultoría en entender la relación de los riesgos más críticos con una propuesta de impacto global.

8.4 Análisis del Impacto de los Riesgos en la Productividad y Rentabilidad

8.4.1 Cuantificación:

Se emplearon técnicas de análisis cualitativo y cuantitativo para analizar de qué manera los riesgos identificados afectan la productividad y rentabilidad. Se utilizó un análisis de correlación entre los riesgos operativos y sus posibles resultados financieros, y se analizaron casos representativos para entender el nivel de riesgo en el que se encuentra la empresa.

| # | RIESGO | Tipo de Riesgo | Frecuencia | Impacto | Calificación |
|---|--|-----------------|------------|---------|--------------|
| 1 | Aumento de costos por cambios en política económica del gobierno | Estratégico | 5 | 2 | 3,5 |
| 2 | Pérdida económica por cambios en la legislación ambiental (madurante, quema, transportes, combustible, etc.) | Estratégico | 2 | 4 | 3 |
| 3 | Sanciones legales e indemnizaciones por daños ocasionados a terceros. | De cumplimiento | 3 | 3 | 3 |
| 4 | Pérdidas económicas por bloqueos y paros (corteros, comunidades, camioneros, carretilleros y sindicatos) | Estratégico | 2 | 4 | 3 |
| 5 | Pérdidas de productividad por cosecha no oportuna de caña con madurante | Estratégico | 2 | 4 | 3 |
| 6 | Incrementos de los costos por los cambios en la legislación laboral | De cumplimiento | 2 | 3 | 2,5 |
| 7 | Pérdidas económicas por quemas accidentales | Estratégico | 4 | 3 | 3,5 |
| 8 | Pérdidas económicas por desastres naturales (terremoto, inundaciones, etc.) | Estratégico | 2 | 4 | 3 |

| # | RIESGO | Tipo de Riesgo | Frecuencia | Impacto | Calificación |
|----|--|-----------------|------------|---------|--------------|
| 9 | Pérdidas económicas por daños en la operación al usar maquinaria obsoleta | Operativo | 4 | 4 | 4 |
| 10 | Pérdida de productividad de la cosecha por inadecuados diseños y nivelaciones del campo | Operativo | 2 | 2 | 2 |
| 11 | Pérdida de sacarosa por incrementos en los tiempos en la recogida de la caña y en los contenidos de materia extraña | Operativo | 3 | 3 | 3 |
| 12 | Pérdida económica por la baja calidad en los cortes manual y mecánico | Operativo | 2 | 2 | 2 |
| 13 | Pérdida económica por la alta permanencia de la caña en patios | Operativo | 2 | 2 | 2 |
| 14 | Pérdidas por incumplimiento de las políticas de gobierno corporativo (filtración de información y tarifas mal aplicadas) | Operativo | 1 | 2 | 1,5 |
| 15 | Pérdidas económicas por afectación de los fenómenos ambientales (cambio climático: fenómeno de El Niño y La Niña) | Estratégico | 4 | 4 | 4 |
| 16 | Pérdidas económicas por asignación de labores a contratistas sin disponibilidad de equipos o implementos | Operativo | 1 | 2 | 1,5 |
| 17 | Disminución de ingresos por ineficiencia en la gestión de permisos legales | De cumplimiento | 1 | 3 | 2 |
| 18 | Pérdidas económicas por aumento de costos de financiación | Operativo | 2 | 4 | 3 |

| # | RIESGO | Tipo de Riesgo | Frecuencia | Impacto | Calificación |
|----|--|----------------|------------|---------|--------------|
| 19 | Sobrecostos por ineficiencia en la ejecución de labores por horas/ha. | Operativo | 2 | 3 | 2,5 |
| 20 | Sobrecostos por Incumplimiento de obligaciones laborales por parte del contratista | Operativo | 1 | 3 | 2 |
| 21 | Pérdida económica por pago de labores con tarifa incorrecta (préstamo de implementos) | Financiero | 1 | 2 | 1,5 |
| 22 | Subestimación o sobreestimación de los ingresos por ventas con precios no autorizados | Financiero | 2 | 4 | 3 |
| 23 | Pérdidas económicas por precios de venta menores a los costos de producción | Financiero | 2 | 3 | 2,5 |
| 24 | Pérdidas económicas por fluctuación de precios de venta en los mercados interno y externo | Financiero | 3 | 5 | 4 |
| 25 | Pérdidas económicas por aumento de competidores | Estratégico | 3 | 4 | 3,5 |
| 26 | Pérdidas económicas por la alta volatilidad de las tasas de cambio (diferencia en cambio) | Financiero | 3 | 4 | 3,5 |
| 27 | Fugas de información confidencial que puedan afectar el poder de negociación con clientes | Operativo | 1 | 4 | 2,5 |
| 28 | Sobrecosto por reprocesos administrativos | Operativo | 1 | 3 | 2 |
| 29 | Pérdidas económicas por concentración de ventas en unos pocos clientes (diversificación de clientes) | Estratégico | 1 | 3 | 2 |
| 30 | Pérdida de negocio en marcha por la no inversión en desarrollo de nuevos productos | Estratégico | 2 | 4 | 3 |

| # | RIESGO | Tipo de Riesgo | Frecuencia | Impacto | Calificación |
|----|---|-----------------|------------|---------|--------------|
| 31 | Pérdida de mercado por precios no competitivos | Estratégico | 2 | 3 | 2,5 |
| 32 | Sanciones económicas por incumplimiento en características del producto establecidas con los clientes | De cumplimiento | 1 | 4 | 2,5 |
| 33 | Sanciones económicas y legales por el no cumplimiento de los requisitos de transporte y ventas exigidos por el Ministerio de Justicia y el Derecho (MinDerecho) | Financiero | 1 | 4 | 2,5 |
| 34 | Sobrecostos por contaminación de los productos por un mal almacenamiento | Operativo | 1 | 3 | 2 |
| 35 | Sanciones económicas por incumplimiento de la normatividad SARLAFT (Sistema de Administración de Riesgo de Lavado de Activos y de la Financiación del Terrorismo) | De cumplimiento | 1 | 4 | 2,5 |
| 36 | Sobrestimación en los precios de venta por no tener precios competitivos en las materias primas | Operativo | 2 | 4 | 3 |
| 37 | Desabastecimiento por la no diversificación de proveedores | Estratégico | 1 | 4 | 2,5 |
| 38 | Pérdida de Good-Will por incumplimiento en los estándares de calidad del producto | Estratégico | 1 | 5 | 3 |
| 39 | Pérdida de negocio en marcha por no realizar las revelaciones de acuerdo con los principios de contabilidad generalmente aceptados | Operativo | 2 | 3 | 2,5 |
| 40 | Pérdidas económicas por mala calificación crediticia | Financiero | 1 | 4 | 2,5 |
| 41 | Pérdidas económicas por cambios en la legislación tributaria | Financiero | 3 | 4 | 3,5 |

| # | RIESGO | Tipo de Riesgo | Frecuencia | Impacto | Calificación |
|----|---|-----------------|------------|---------|--------------|
| 42 | Pérdida de talento humano por falta de prebendas o adecuadas condiciones para el trabajador | Financiero | 2 | 3 | 2,5 |
| 43 | Pérdidas económicas por problemas de liquidez | De cumplimiento | 3 | 5 | 4 |
| | | | 2 | 3 | 2,7 |

Tabla 8: Clasificación de riesgos y su impacto en la productividad y rentabilidad del ingenio La Cabaña

Fuente: *Elaboración propia*

8.5 Análisis Financiero para la Toma de Decisiones de Reposición

Para el desarrollo de la metodología del análisis financiero de la empresa, esta se dividió en varias etapas enfocadas en comprender a fondo tanto el estado actual de la empresa como su desempeño a lo largo del tiempo. Esta metodología ayudará a identificar las áreas críticas que afectan la salud financiera de la empresa y será esencial para tomar decisiones informadas sobre la reposición de maquinaria. Dicho análisis se centró en evaluar la viabilidad económica de la reposición de maquinaria agrícola mediante el uso de indicadores de rentabilidad y métricas de evaluación de inversiones. Para ello, se analizaron los estados financieros y el balance general (**2022 – 2023**) del Ingenio La Cabaña, haciendo énfasis en la salud financiera de la empresa y el impacto que generan los equipos obsoletos en los resultados económicos.

8.6 Recopilación y Preparación de Datos:

8.6.1 Recolección de Informes Financieros:

Se obtuvo los estados financieros de los años **2022 y 2023**, incluyendo el Estado de Resultados y el Balance General. Estos documentos permitieron comprender la evolución financiera de la empresa y el comportamiento de los principales indicadores de rentabilidad y solvencia.

8.6.2 Ajustes y Normalizaciones:

Para asegurar la comparabilidad de los datos a lo largo del tiempo, se realizaron ajustes, tales como la actualización por inflación y modificaciones contables. Esto permite analizar las variaciones financieras de forma precisa y contextualizar los resultados obtenidos

8.7 Análisis del Estado de Resultados

8.7.1 Análisis de Tendencias de Ingresos y Gastos:

Se evaluó el comportamiento de los ingresos, costos de ventas, gastos operativos y otros gastos, con el fin de identificar las tendencias a lo largo del tiempo y determinar las áreas de mayor impacto financiero en la rentabilidad de la empresa.

8.7.2 Análisis de Variabilidad y Crecimiento:

Se identificaron patrones de crecimiento o decrecimiento en los ingresos y gastos, evaluando su efecto en la rentabilidad de la empresa. Este análisis ayuda a entender la estabilidad financiera del ingenio y la eficiencia en la administración de recursos.

8.8 Análisis del Balance General

8.8.1 Análisis de Composición de Activos y Pasivos:

Se estudió la distribución de los activos y pasivos entre corrientes y no corrientes, lo que permitió evaluar la estructura financiera de la empresa y su capacidad para cubrir sus obligaciones a corto y largo plazo.

8.8.2 Evaluación de Liquidez y Solvencia:

Se calcularon indicadores de liquidez, como la razón corriente y el ratio de solvencia, para evaluar la capacidad de la empresa de cumplir con sus compromisos financieros. Este análisis es fundamental para determinar la resiliencia financiera del ingenio en situaciones de alta demanda de liquidez.

8.9 Análisis de Ratios Financieros

8.9.1 Ratios de Rentabilidad:

Se calculó y analizó el Margen Bruto, el Margen Operacional y el Margen Neto, con el objetivo de evaluar la eficiencia de la empresa en la generación de utilidades en relación con sus ingresos y costos.

8.9.2 Ratios de Liquidez:

Se utilizó indicadores como la razón corriente, la prueba ácida y la razón de tesorería, para medir la capacidad de la empresa en cubrir sus obligaciones inmediatas. Estos ratios permiten evaluar la salud financiera en términos de disponibilidad de recursos para afrontar deudas a corto plazo.

8.9.3 Ratios de Endeudamiento:

Para determinar el nivel de apalancamiento de la empresa, se calculó los ratios como el de endeudamiento total, la financiación a largo plazo y la cobertura de intereses. Estos indicadores ayudan a entender la proporción de recursos propios y ajenos en la estructura financiera y el nivel de riesgo financiero asociado.

8.9.4 Ratios de Actividad:

Se analizaron ratios de actividad, como la rotación de cuentas por cobrar, inventarios y cuentas por pagar, para evaluar la eficiencia operativa de la empresa. Este análisis permite entender la rapidez con la que la empresa convierte sus activos en ingresos, lo cual es un indicador clave de eficiencia en la gestión de recursos.

8.10 Evaluación de Desempeño y Diagnóstico Financiero

8.10.1 Análisis Horizontal y Vertical:

Se realizaron análisis financieros horizontales y verticales para comprender la estructura financiera del Ingenio La Cabaña y las tendencias de desempeño a lo largo del tiempo. Estos análisis permiten identificar cambios significativos en los activos, pasivos, ingresos y gastos, facilitando así la evaluación de la estabilidad financiera de la empresa.

8.10.2 Uso de Modelos Predictivos: Altman Z-Score:

Para evaluar el riesgo de insolvencia de la empresa, se aplicó el modelo Altman Z-Score. Este modelo predictivo calcula una puntuación basada en indicadores financieros clave y estima la probabilidad de quiebra en el corto y mediano plazo, proporcionando una herramienta de diagnóstico valiosa para la toma de decisiones estratégicas.

8.11 Desarrollo del Modelo Estadístico de Reposición de Equipos

El Modelo Estadístico de Reposición de Equipos fue desarrollado con el propósito de establecer el momento óptimo para la reposición de maquinaria agrícola en el Ingenio La Cabaña. Para ello, se utilizó un enfoque de aprendizaje automático (**Machine Learning**) basado en el algoritmo de clasificación **Random Forest**, implementado en el software R. Este modelo permite predecir el "tiempo de reposición" de los equipos según su antigüedad, costos de mantenimiento, disponibilidad y horas de uso, entre otros factores.

8.11.1 Recolección de Datos:

Para el desarrollo del modelo, se utilizaron registros históricos del Ingenio La Cabaña, que incluyen:

- Tiempo de uso acumulado de cada equipo.
- Costos de mantenimiento y operación.
- Potencia (HP) y rendimiento operativo de los equipos.
- Horas trabajadas y nivel de disponibilidad. Estos datos fueron preparados y procesados para asegurar que estuvieran completos y sin valores faltantes, lo cual es crítico para la precisión del modelo.

8.11.2 Implementación del Modelo *Random Forest* en R

El modelo fue implementado en R con los siguientes pasos:

8.11.2.1 Selección de Variables:

Las variables predictoras incluyeron antigüedad, costo total por hora, disponibilidad, horas trabajadas y horómetro.

8.11.2.2 División de Datos:

Se dividió el conjunto de datos en un conjunto de entrenamiento (80%) y un conjunto de prueba (20%) utilizando una semilla aleatoria fija para asegurar la reproducibilidad.

8.11.2.3 Entrenamiento con Random Forest:

Se entrenó el modelo Random Forest con 500 árboles, ajustando automáticamente el número de variables seleccionadas en cada división para maximizar la precisión.

8.11.3 Validación del Modelo:

La validación del modelo se realizó utilizando el conjunto de prueba. A continuación, se presentan los resultados clave de la evaluación:

8.11.3.1 Matriz de Confusión:

La matriz de confusión mostró un buen desempeño, con una **exactitud global** del 86.21%, lo que indica que el modelo es preciso en la clasificación de los tiempos de reposición.

8.11.3.2 Kappa:

0.8085, lo cual indica una concordancia fuerte entre los datos de las predicciones y los valores reales, incluso después de ajustar por el azar.

8.11.4 Métricas por Clase:

8.11.4.1 Sensibilidad y Especificidad:

Los valores de sensibilidad y especificidad fueron altos en casi todas las clases, especialmente en las predicciones para "1 año", "2 años" y "4 años", lo que sugiere que el modelo predice bien los casos extremos de reposición temprana o tardía.

8.11.4.2 Valor predictivo positivo (Pos Pred Value) y Valor predictivo negativo (Neg Pred Value):

Las predicciones en cada clase fueron confiables, con valores predictivos positivos y negativos elevados, especialmente en las categorías de mayor frecuencia, como "2 años".

8.11.4.3 Importancia de Variables:

Las variables de mayor importancia en el modelo fueron **disponibilidad, horómetro y horas trabajadas**, lo que implica que estas características influyen significativamente en el tiempo de reposición. La antigüedad y el costo total por hora también aportaron información relevante, aunque en menor medida.

8.11.4.4 Evaluación de Importancia de Variables:

Se utilizaron dos métricas para evaluar la importancia de las variables: **Mean Decrease Accuracy** y **Mean Decrease Gini**. La **disponibilidad** y el **horómetro** fueron las variables que

mostraron el mayor impacto en la precisión y pureza de los nodos del modelo, seguidas por las horas trabajadas y el costo por hora.

8.11.4.5 Predicciones Agrupadas por Rango de Potencia:

Para mejorar la interpretación de las predicciones, se agruparon los equipos según su rango de potencia y se generaron conteos de predicciones para cada categoría de reposición (1 año a 5 años). Esto permite identificar patrones en la necesidad de reposición según las capacidades operativas de los equipos, ayudando a priorizar decisiones de inversión en maquinaria.

8.11.5 Categorización en Intervalos de Reposición (1 a 5 años)

El modelo clasifica cada equipo en una de las cinco categorías de tiempo de reposición, según su estado actual y los parámetros evaluados:

8.11.5.1 1 año:

Equipos que requieren reposición inmediata debido a los altos costos de mantenimiento y baja disponibilidad.

8.11.5.2 2 años:

Equipos que presentan un deterioro significativo y se espera que necesiten reposición en el corto plazo.

8.11.5.3 3 años:

Equipos con desgaste moderado, proyectados para reposición a mediano plazo.

8.11.5.4 4 años:

Equipos en condiciones aceptables, con una vida útil restante suficiente para mantenerse en operación.

8.11.5.5 5 años:

Equipos en buen estado que no requieren reposición en el corto plazo.

8.11.6 Priorización y Plan de Acción para la Reposición de Maquinaria

Con base en los resultados del modelo Random Forest y el análisis financiero, se estableció un plan de acción para optimizar la reposición de maquinaria en el Ingenio La Cabaña. Este plan busca maximizar la eficiencia y rentabilidad, al tiempo que minimiza los costos operativos. Las recomendaciones son las siguientes:

8.11.6.1 Priorización de Equipos Críticos:

Se recomienda dar prioridad a los equipos clasificados en la categoría de "1 año", que presentan mayores necesidades de reposición y un impacto crítico en la operación debido a su baja disponibilidad y demás factores.

8.11.6.2 Redistribución del Presupuesto:

Se sugiere ajustar el presupuesto asignado a mantenimiento, dirigiendo una mayor parte hacia la adquisición de nuevos equipos, especialmente aquellos con alta frecuencia de fallas y altos costos operativos.

8.11.6.3 Monitoreo Continuo y Actualización del Modelo:

Implementar un sistema de monitoreo continuo que permita actualizar el modelo con nuevos datos de costos y uso. Este sistema ayudará a anticipar las necesidades de reposición y adaptarse a cambios en las condiciones operativas.

Este enfoque integral (basado en datos) refuerza la estrategia de reposición de equipos del Ingenio La Cabaña, proporcionando un marco estructurado para tomar decisiones fundamentadas que maximicen la productividad y aseguren la sostenibilidad de las operaciones en el largo plazo.

9 RESULTADOS

La implementación del Modelo Estadístico de Reposición de Equipos mediante el algoritmo **Random Forest** permitió identificar los equipos de maquinaria agrícola del Ingenio La Cabaña que requieren reposición en el corto, mediano y largo plazo. Este enfoque, basado en aprendizaje automático, empleó variables clave como **antigüedad, costos de mantenimiento, disponibilidad y horas de uso** para clasificar los equipos según su tiempo de reposición estimado.

9.1 Evaluación de la Matriz de Riesgo

El análisis de la matriz de riesgo permitió identificar y clasificar los riesgos que afectan la productividad y rentabilidad del ingenio, encontrando en total 43 riesgos agrupados en 4 categorías (operativos, financieros, financieros y de cumplimiento). En general, el ingenio La Cabaña se encuentra en una categoría de riesgo moderado, con una **frecuencia de ocurrencia de 2 y un impacto de 3**:

| | | | | | |
|-------------------|-----------------------|--------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| <u>FRECUENTE</u> | | 1 | | | |
| <u>PROBABLE</u> | | | 7 | 9 13 | |
| <u>OCASIONAL</u> | | | 3 11 * | 25 26 41 | 43 24 |
| <u>POSIBLE</u> | 10 12 13 | | 6 19 22 31 39 42 * | 2 4 5 8 18 23 30 36 | |
| <u>IMPROBABLE</u> | 14 16 21 | | 17 20 28 29 34 | 27 32 33 35 37 40 | 38 |
| | <u>INSIGNIFICANTE</u> | <u>MEJOR</u> | <u>MODERADO</u> | <u>MAJOR</u> | <u>CATASTROFICO</u> |
| | <u>IMPACTO</u> | | | | |

Figura 3: Ubicación de los riesgos por frecuencia e impacto en umbrales de criticidad.

Fuente: Elaboración propia.

9.1.1 Riesgos operativos:

Se encontraron en total 15 riesgos, que involucran fallas no previstas en la operación diaria y problemas de índole diario. La calificación de impacto mostró que el riesgo referente a “Pérdidas económicas por daños en la operación al usar maquinaria obsoleta” representa el riesgo más crítico y se ubicó en la escala roja.

9.1.2 Riesgos financieros:

Se encontraron en total 9 riesgos de tipo financiero, la calificación mostró que el riesgo asociado a “Pérdidas económicas por fluctuación de precios de venta en los mercados interno y externo” es un riesgo que requiere atención por su frecuencia de ocurrencia.

9.1.3 Riesgos estratégicos:

Se encontraron en total 13 riesgos de tipo estratégico, la calificación mostros que el riesgo asociado a “Pérdidas económicas por afectación de los fenómenos ambientales (cambio climático: fenómeno de El Niño y La Niña)” es un riesgo que requiere atención por su frecuencia de ocurrencia.

9.1.4 Riesgos de cumplimiento:

Se encontraron en total 6 riesgos de cumplimiento, la calificación mostró que el riesgo asociado a “Pérdidas económicas por problemas de liquidez” es un riesgo que requiere atención por su frecuencia de ocurrencia y el impacto que ha dejado en la salud financiera del ingenio en los últimos años. La insuficiencia de flujo de caja puede generar dificultades para cumplir con obligaciones financieras, pagar proveedores y sostener la producción.

9.2 Resultados del Análisis Financiero

El análisis de costo-beneficio evidenció que la reposición de maquinaria agrícola tiene un impacto significativo en la reducción de costos operativos. Se estimó que, al reemplazar los equipos que generan altos costos de mantenimiento, es posible reducir los costos operativos hora hasta en un 17% en modelo Renting y hasta un 40% en inversión de compra en tractores mayores a 300HP (ver anexo D). Además, el análisis de flujo de caja proyectado mostró una mejora en la rentabilidad a largo plazo al redistribuir los recursos hacia la adquisición de nuevos equipos.

9.2.1 Análisis Vertical y Horizontal de estado de resultados y Balance

General

Al realizar el análisis horizontal del estado de resultados, se observa que los ingresos de las actividades ordinarias de la empresa disminuyeron en un 15.8% entre los años 2022 y 2023, pasando de 623,135 millones de COP a 524,381 millones. Esta reducción en las ventas impactó significativamente el resultado bruto, que sufrió una caída del 61.3%, de 108,536 millones a 41,953 millones, evidenciando que los costos de ventas no disminuyeron al mismo ritmo que los ingresos, ya que solo se redujeron un 6.3%. En términos verticales, el margen bruto se redujo del 17.4% al 8.0%, indicando una menor eficiencia en la gestión de los costos directos en relación con las ventas.

Por otro lado, los gastos operativos presentaron comportamientos mixtos: mientras que los costos de distribución disminuyeron un 25.0%, los gastos de administración aumentaron un 15.6% y otros gastos se incrementaron notablemente en un 166.2%. Esto, sumado a un incremento del 24.0% en los costos financieros, contribuyó a que el resultado operacional pasara de una

utilidad de 55,655 millones a una pérdida de 17,013 millones, y el resultado neto se deteriorara de una pérdida de 10,822 millones a una pérdida de 68,426 millones. Verticalmente, esto se refleja en que el resultado neto pasó de representar el -1.7% de los ingresos en el año 2022 al -13.0% en el 2023, indicando un empeoramiento en la rentabilidad neta.

En cuanto al estado de situación financiera, el activo total aumentó un 3.9%, impulsado principalmente por un incremento del 9.6% en el activo corriente. Sin embargo, el pasivo total aumentó en mayor proporción, un 15.9%, lo que llevó a una disminución del patrimonio en un 11.0%. Verticalmente, el pasivo pasó de representar el 55.2% del total del activo al 61.6%, mientras que el patrimonio disminuyó su participación del 44.8% al 38.4%. Este cambio en la estructura financiera sugiere un aumento en el apalancamiento de la empresa y una posible disminución en su solvencia, lo cual, junto con la disminución en la rentabilidad, podría indicar la necesidad de revisar las **estrategias operativas y financieras** para mejorar su posición en el mercado. Cabe resaltar que estos márgenes afectan negativamente la posición de crédito de la empresa, reflejando una capacidad limitada para cumplir con sus obligaciones financieras. Se requiere la necesidad de mejorar su **estructura de capital y su eficiencia operativa** para mejorar la estabilidad financiera y competitiva en el sector.

9.2.2 Rentabilidad y Operación

La empresa ha experimentado una considerable disminución en el resultado bruto y operacional, donde el margen bruto se redujo de 17.4% a 8.0% y el margen operacional cambió de positivo (8.9%) a negativo (-3.2%). Esta reducción en la rentabilidad puede limitar la capacidad de reinvertir en nueva maquinaria.

El resultado neto también ha empeorado significativamente, pasando de un -1.7% a -13.0%. Esto indica que la empresa está enfrentando problemas más profundos, posiblemente aumentos en los costos o una disminución en la eficiencia operativa.

| Rentabilidad | 2022 | 2023 |
|-------------------------------------|-------|--------|
| Margen Bruto | 17.4% | 8.0% |
| Margen Operacional | 8.9% | -3.2% |
| Margen Antes de Impuestos | -0.7% | -15.7% |
| Margen Neto | -1.7% | -13.0% |
| Rentabilidad Sobre Activo (ROA) | -0.8% | -4.8% |
| Rentabilidad Sobre Patrimonio (ROE) | -1.8% | -12.5% |

Tabla 9: Indicadores financieros de rentabilidad Ingenio La Cabaña

Fuente: *Elaboración propia*

Por su parte, la rentabilidad sobre los activos ha disminuido considerablemente, lo que implica que la empresa no está utilizando sus activos de manera eficiente para generar ingresos. En cuanto al ROE muestra que la empresa está destruyendo valor para los accionistas, ya que la rentabilidad sobre el capital invertido es negativa y empeoró en el 2023.

9.2.3 Liquidez

La razón corriente y la prueba ácida han disminuido, lo que señala una peor posición en cuanto a la liquidez a corto plazo. Esto podría dificultar la capacidad de la empresa para cubrir obligaciones a corto plazo sin recurrir a un financiamiento adicional. Así mismo, lo refleja su capital de trabajo negativo, el cual ha empeorado, lo que indica una mayor presión sobre la liquidez.

| Liquidez | 2022 | 2023 |
|-----------------------------------|---------|----------|
| Capital de Trabajo (Millones COP) | -86,493 | -165,904 |
| Razón Corriente | 0.72x | 0.59x |
| Prueba Ácida | 0.67x | 0.56x |
| Razón de Tesorería | 0.002x | 0.001x |

Tabla 10: Indicadores financieros de liquidez Ingenio La Cabaña

Fuente: Elaboración propia

9.2.4 Endeudamiento

El endeudamiento total ha aumentado del 55.2% al 61.6%, indicando un mayor uso de deuda en la estructura de capital de la empresa. Esto podría ser una señal de que se está recurriendo más a la deuda para financiar operaciones debido a la insuficiencia de fondos internos.

| Endeudamiento | 2022 | 2023 |
|---------------------------|-------|--------|
| Endeudamiento Total | 55.2% | 61.6% |
| Financiación LP | 77.5% | 71.3% |
| Concentración | 40.7% | 46.6% |
| Solvencia Patrimonial | 1.81x | 1.62x |
| Apalancamiento Financiero | 1.23x | 1.61x |
| Cobertura de Intereses | 0.92x | -0.23x |

Tabla 11: Indicadores financieros de endeudamiento Ingenio La Cabaña

Fuente: Elaboración propia

Por su parte, la solvencia patrimonial ha disminuido, lo que indica una menor capacidad para cubrir las deudas totales con el patrimonio. Esta disminución refleja la pérdida de capital y el aumento del apalancamiento.

9.2.5 Actividad

El ciclo operativo ha aumentado de 76 a 101 días, y la rotación de activos totales ha disminuido, lo que sugiere que la empresa está tardando más en convertir sus operaciones en efectivo. Esto es crítico para la reposición de maquinaria, ya que un ciclo operativo más largo puede afectar la capacidad de generar el efectivo necesario para nuevas inversiones.

| Actividad | 2022 | 2023 |
|---------------------------|-------|-------|
| Rotación CxC (Días) | 64 | 91 |
| Rotación Inv. (Días) | 11 | 10 |
| Ciclo Operativo (Días) | 76 | 101 |
| Rotación CxP (Días) | 177 | 238 |
| Ciclo del Efectivo (Días) | -102 | -137 |
| Rotación Activos Totales | 0.45x | 0.37x |
| Rotación Activos Fijos | 1.05x | 0.87x |

Tabla 12: Indicadores financieros de Actividad Ingenio La Cabaña

Fuente: Elaboración propia

Por su parte, en cuanto a la rotación de cuentas por pagar, permite indicar que la empresa tarda más en pagar a sus proveedores, lo que puede inferir problemas de liquidez, lo que la obliga a retrasar sus pagos. Este retraso puede tener efectos negativos en las relaciones con los proveedores y, eventualmente, podría llevar a la pérdida de descuentos por pronto pago o incluso a restricciones de crédito. A largo plazo, esta estrategia podría ser insostenible si los proveedores exigen términos de pago más estrictos.

9.2.6 Modelo Predictivo Altman Z-Score

| Insolvencia | 2022 | 2023 |
|--|------------------------|------------------------|
| X1 - Capital de Trabajo / Activos Totales | -0.05 | -0.08 |
| X2 - Utilidades Retenidas / Activos Totales | 0.01 | 0.00 |
| X3 - EBIT / Activos Totales | 0.13 | -0.04 |
| X4 - Valor del Patrimonio / Pasivo Total | 0.34 | 0.26 |
| X5 - Ventas / Activos Totales | 0.45 | 0.37 |
| Puntaje Altman Z-Score | 0.88 | 0.51 |
| Insolvencia | Zona de Peligro | Zona de Peligro |

Tabla 13: Modelo predictivo Z-SCORE para Ingenio La Cabaña

Fuente: *Elaboración propia*

Del **Modelo de Z-Score** se puede concluir lo siguiente:

- El capital de trabajo negativo refleja problemas severos de liquidez.
- La falta de acumulación de utilidades retenidas indica que la empresa ha perdido gran parte de su capacidad de generar valor propio.
- Las pérdidas operativas son un claro indicio de que la empresa está fallando en su capacidad operativa para generar beneficios a partir de sus activos.
- El creciente apalancamiento financiero aumenta la dependencia de la deuda, lo que incrementa el riesgo financiero.
- La disminución de las ventas en relación con los activos demuestra que la empresa está utilizando ineficazmente sus recursos para generar ingresos.

- Finalmente, el puntaje Altman Z-Score indica que la empresa está en la zona de peligro de insolvencia. Una caída en este puntaje a 0,51 en el año 2023 refleja un mayor **riesgo de quiebra o de insolvencia financiera**.

9.3 Aplicación y Predicción del Modelo de Random Forest para la Reposición de Equipos

Para evaluar la precisión del modelo, se utilizó un conjunto de datos correspondiente al año 2023, lo cual permitió verificar su capacidad de predicción en condiciones reales. Este conjunto de datos incluyó características operativas y de uso de los equipos en dicho año. El modelo de Random Forest aplicado predijo que 13 equipos requerían reposición inmediata, mientras que, en la práctica, el ingenio reemplazó 15 equipos. Esta cercanía entre las predicciones y las decisiones efectivas de reposición demuestra la alta precisión del modelo en la identificación de equipos críticos, validando su utilidad como herramienta de apoyo para la toma de decisiones estratégicas en la gestión de activos.

9.3.1 Importancia de las Variables en la Predicción

El modelo de Random Forest permitió evaluar la importancia de cada variable en la predicción del tiempo de reposición. A continuación, se describen las variables clave:

9.3.1.1 Disponibilidad:

La variable más influyente en el modelo. Una menor disponibilidad está altamente correlacionada con la necesidad de reposición.

9.3.1.2 Horómetro y horas trabajadas:

Indicadores de la intensidad de uso de los equipos y su desgaste operativo.

9.3.1.3 Costo total por hora:

Refleja los costos operativos asociados y ayuda a priorizar equipos menos rentables de mantener.

9.3.1.4 Antigüedad:

Contribuye a la predicción del tiempo de reposición, ya que los equipos más antiguos tienen una mayor probabilidad de fallos.

9.3.2 Resultados de Validación del Modelo

La validación del modelo con el conjunto de prueba arrojó los siguientes indicadores:

9.3.2.1 Precisión general:

86.21%, lo que demuestra que el modelo es confiable para clasificar los tiempos de reposición.

9.3.2.2 Kappa:

0.8085, lo cual indica una fuerte concordancia entre las predicciones y los valores reales.

9.3.2.3 Matriz de Confusión:

Las predicciones más precisas fueron para los equipos clasificados en las categorías de "1 año" y "2 años", confirmando la eficacia del modelo para identificar equipos con necesidad de reposición urgente.

9.4 Clasificación de la Disponibilidad de Equipos

En función de los resultados del modelo, los equipos se clasificaron en las siguientes categorías de tiempo de reposición:

9.4.1 1 año:

Equipos con baja disponibilidad y altos costos de mantenimiento, lo cual sugiere una necesidad de reposición inmediata.

9.4.2 2 a 3 años:

Equipos que requieren reposición en el mediano plazo debido a sus costos operativos y disponibilidad moderada.

9.4.3 4 a 5 años:

Equipos con buena disponibilidad y bajo costo operativo, por lo cual pueden continuar en uso.

| Resumen de Predicciones por Rango de Potencia | | | | | |
|---|--------------|-----------|-----------|----------|----------|
| Rango_Potencia | Predicciones | | | | |
| | 1 año | 2 años | 3 años | 4 años | 5 años |
| 75-95 | 4 | 8 | 4 | 2 | 0 |
| 110-125 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 |
| 150-165 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 |
| 155HC | 0 | 1 | 1 | 2 | 0 |
| 170-235 | 5 | 6 | 1 | 2 | 0 |
| 23-36 | 0 | 5 | 1 | 0 | 0 |
| 280-300 | 4 | 10 | 3 | 0 | 1 |
| Total | 13 | 35 | 11 | 7 | 1 |

Figura 4: Resumen de predicciones por rango de potencia.

Fuente: Elaboración propia.

| Equipos a Reponer en 1 Año por Rango de Potencia | | | | | | | |
|--|---------------------|------------|------------------|----------------|------------------|-----------|--|
| referencia_ingenio | Detalles del Equipo | | | | | | |
| | rango_potencia | antiguedad | costo_total_hora | disponibilidad | horas_trabajadas | horometro | |
| 315810006 TRACTOR Ford - 3181006 - (42110) | 75-95 | 67 | 41319.73 | 0.5596 | 788.9 | 3671 | |
| 315820843 TRACTOR J.D 6415-3182843-42120 | 75-95 | 16 | 133909.12 | 0.2785 | 713.0 | 26623 | |
| 315820844 TRACTOR J.D 6415-3182844-42120 | 75-95 | 16 | 118080.50 | 0.3202 | 523.6 | 33049 | |
| 315820845 TRACTOR J.D 6415-3182845-42120 | 75-95 | 16 | 331045.35 | 0.1653 | 286.9 | 29137 | |
| 315830002 TRACTOR J.D 7815-3183002-42520 | 170-235 | 13 | 227793.71 | 0.3756 | 639.6 | 17609 | |
| 315840324 John Deere Mod-7210J-3184324 | 170-235 | 10 | 213488.97 | 0.4852 | 963.2 | 18163 | |
| 315830004 TRACTOR J.D 7205J-4583004-42520 | 170-235 | 12 | 199009.67 | 0.4889 | 985.1 | 18329 | |
| 315840307 TRACTOR CASE 9230-3184307-42140 | 170-235 | 30 | 149734.23 | 0.3492 | 501.1 | 27650 | |
| 315840310 TRACTOR CASE 9210-3184310-42580 | 170-235 | 29 | 211204.24 | 0.5015 | 485.6 | 16596 | |
| 315850003 TRACTOR CASE STX275-5485003-42250 | 280-300 | 22 | 0.00 | 0.0082 | 0.0 | 27710 | |
| 315850005 TRACTOR CASE STX275-3185005 | 280-300 | 22 | 188873.63 | 0.3593 | 824.0 | 27840 | |
| 315850014 TRACTOR CASE STX275-3185014-42150 | 280-300 | 19 | 226903.73 | 0.3698 | 505.9 | 15045 | |
| 315850011 TRACTOR CASE STX280-3185011-42150 | 280-300 | 16 | 373284.51 | 0.3128 | 383.9 | 16013 | |

Figura 5: Equipos a reponer en 1 año por rango de potencia

Fuente: Elaboración propia.

9.5 Impacto del Modelo en la Estrategia de Reposición del Ingenio La Cabaña

La implementación del modelo de **Random Forest** ha optimizado la estrategia de reposición de equipos agrícolas en el Ingenio La Cabaña. Con base en los resultados obtenidos, se elaboró un plan de acción para la reposición de maquinaria que incluye:

9.5.1 Reemplazo de equipos críticos:

Priorización de la reposición de maquinaria con menor disponibilidad y altos costos operativos.

9.5.2 Reasignación de presupuesto:

Orientación del presupuesto de mantenimiento hacia la adquisición de nuevos equipos para aquellos clasificados en la categoría "1 año".

9.5.3 Monitoreo continuo:

Implementación de un sistema de monitoreo regular para actualizar el modelo con nuevos datos operativos y mejorar la precisión en la toma de decisiones.

Estos resultados confirman que el modelo desarrollado es una herramienta eficaz para la toma de decisiones estratégicas en la gestión de activos, asegurando una asignación eficiente de recursos y contribuyendo a la sostenibilidad económica y operativa del Ingenio La Cabaña a largo plazo.

10 CONCLUSIONES

Conforme a los resultados del análisis de la matriz de riesgo, se logró identificar, clasificar y priorizar los principales factores que afectan la productividad y rentabilidad del Ingenio La Cabaña, los riesgos críticos, como el uso de maquinaria obsoleta y el impacto de las condiciones climáticas adversas (como el fenómeno de La Niña), ha ocasionado una disminución significativa en el rendimiento de las hectáreas cosechadas y el contenido de sacarosa; así como también el alto endeudamiento y los costos de mantenimiento asociados a la maquinaria agrícola obsoleta, demostraron tener un impacto significativo en los costos operativos y en la eficiencia productiva. Este análisis destacó la importancia de implementar medidas estratégicas que mitiguen estos riesgos, facilitando una toma de decisiones más informada y alineada con la sostenibilidad económica y operativa de la empresa.

Por su parte, el análisis financiero de la empresa durante los años 2022-2023 reveló un deterioro significativo en la mayoría de los indicadores financieros clave. La rentabilidad se redujo drásticamente, lo que indica que los ingresos generados son insuficientes para cubrir los costos operativos. La liquidez empeoró, sugiriendo dificultades para cumplir con las obligaciones a corto plazo, mientras que el aumento del endeudamiento incrementa el riesgo financiero y compromete la estabilidad económica a largo plazo. La ralentización de la actividad afectó negativamente la eficiencia operativa, y los indicadores de insolvencia señalan una situación financiera crítica que requiere medidas urgentes para evitar problemas mayores como una posible quiebra en el corto plazo.

En respuesta a estos desafíos, se implementó un Modelo Estadístico de Reposición de Equipos utilizando el algoritmo de **Random Forest**. Esta herramienta basada en datos históricos proporcionó una base sólida para optimizar la gestión de la maquinaria agrícola en el ingenio La Cabaña. Al analizar variables críticas como disponibilidad, horómetro, horas trabajadas, costo por hora y antigüedad, se

obtuvo conclusiones valiosas que orientarán las decisiones futuras en reposición, mantenimiento y asignación de recursos en el área de campo.

El modelo de **Random Forest** demostró una alta precisión en la clasificación de los equipos según su tiempo de reposición, alcanzando una exactitud global del **86.21%**. Esto permitió identificar con claridad los equipos que requieren reemplazo en el corto, mediano y largo plazo, optimizando la toma de decisiones en la gestión de activos y asegurando una planificación más efectiva. **Las variables de disponibilidad y horas trabajadas** emergieron como los factores más influyentes en la predicción del tiempo de reposición, subrayando la importancia de monitorear continuamente estos indicadores para planificar la reposición de manera oportuna y evitar interrupciones en las operaciones.

El modelo clasificó los equipos en cinco categorías de reposición: 1, 2, 3, 4 y 5 años. Se concluye que el 19% de los equipos evaluados deben ser reemplazados en el plazo de un año, lo que indica una necesidad urgente de reposición para evitar costos operativos elevados y asegurar la continuidad de las operaciones. Esta clasificación facilita la priorización en la asignación de recursos y la planificación estratégica a mediano y largo plazo.

El análisis financiero proyectado evidenció que la reposición de los equipos más antiguos y costosos podría reducir los costos operativos del ingenio entre el 17% hasta el 40%. Este impacto económico positivo es significativo, ya que una adecuada reposición de equipos no solo disminuye los costos de mantenimiento, sino que también mejora la disponibilidad y eficiencia de los equipos, aumentando la productividad y rentabilidad de la empresa.

La aplicación del modelo de **Random Forest** permitió identificar con precisión los equipos con mayores costos operativos y menores niveles de disponibilidad. Esta información fue crucial para optimizar la asignación de recursos financieros, orientando el presupuesto hacia la adquisición de nuevos equipos en lugar de invertir en mantenimientos costosos y poco rentables en equipos obsoletos. Esta estrategia financiera contribuye a mejorar la salud económica de la empresa y a reducir el riesgo financiero asociado con altos niveles de endeudamiento. La adopción de este modelo va a permitir mejorar la disponibilidad y eficiencia operativa de los equipos y contribuye a una gestión financiera optimizada, reduciendo costos y aumentando la competitividad de la empresa en el mercado azucarero.

Por otro lado, para maximizar los beneficios de este modelo, es esencial implementar un sistema de monitoreo continuo que permita actualizar regularmente el modelo con nuevos datos operativos. Esto facilitará ajustes periódicos a la estrategia de reposición en función de las condiciones cambiantes del negocio y del mercado, asegurando una gestión sostenible y eficiente de los activos en el largo plazo. La adaptación continua es clave para mantener la relevancia y eficacia del modelo en un entorno empresarial dinámico.

Es imperativo que la empresa continúe invirtiendo en tecnologías avanzadas y en la capacitación del personal para maximizar el potencial de estas herramientas. La cultura de mejora continua y adaptación tecnológica será un factor determinante en el éxito sostenido de la empresa. La experiencia positiva con el modelo de **Random Forest** puede servir como catalizador para la implementación de otras innovaciones que impulsen la eficiencia y rentabilidad, fortaleciendo la posición del ingenio La Cabaña en el mercado y contribuyendo a su misión de operar de manera eficiente y sostenible.

11 RECOMENDACIONES

Es esencial llevar a cabo una auditoría exhaustiva de la maquinaria actual para evaluar su eficiencia operativa y comparar los costos de mantenimiento con los de adquirir nuevas unidades. Este análisis permitirá determinar si es más rentable mantener la maquinaria existente o invertir en equipos nuevos. Además de ello, se propone implementar un plan de monitoreo y capacitación que incluya la definición de indicadores clave de rendimiento para supervisar la efectividad de la nueva maquinaria en términos de productividad, costos de operación y mantenimiento. Establecer un sistema de revisión periódica garantizará que la maquinaria continúe alineada con las necesidades operativas y financieras, mientras que la capacitación adecuada de los operadores maximizará la eficiencia y prolongará la vida útil de los equipos.

Paralelamente, es importante explorar opciones de financiamiento externo o arrendamiento como alternativas a la compra directa para preservar la liquidez de la empresa. Negociar mejores condiciones de pago o buscar financiamiento a largo plazo para nuevas máquinas permitirá alinear los pagos con los flujos de efectivo generados por la mejora en eficiencia que proporcionarán estos equipos. Se recomienda considerar una capitalización por parte de los accionistas para la compra o leasing de maquinaria; si esto no es viable, iniciar negociaciones para obtener alternativas de **arrendamiento bajo la modalidad de Renting** puede ser una solución efectiva.

Por otro lado, la priorización en la reposición de maquinaria es otro aspecto crucial. Es necesario enfocarse en aquellas máquinas esenciales cuya ineficiencia afecta significativamente los costos operativos y de productividad. Esto implica analizar la demanda anual de horas de trabajo en relación con los equipos que deben ser reemplazados, siguiendo la dinámica propuesta en el modelo para los dos primeros años.

| LABOR | HP | INVENTARIO HOY | BAJA | N° TRACTORES REQUERIDOS | N° TRACTORES FALTANTES |
|--|---------|----------------|-----------|-------------------------|------------------------|
| CULTIVO CAÑA ORGANICA | 23 -36 | 6 | 5 | 6 | 1 |
| CQM, TRANSPORTE RIEGOS | 75-95 | 18 | 12 | 8 | 2 |
| DESPAJE CORTE QUEMADO, DESPAJE CORTE VERDE, MTO CALLEJONES GUADAÑA, MTO PALA TRACTOR, MTO PALA RASTRILLO | 110-125 | 3 | 2 | 10 | 9 |
| TAPE DE ACEQUIAS, ACEQUIAS, SIEMBRA | 150-165 | 4 | 3 | 12 | 11 |
| SURCO, FERTILIZACION CONVENCIONAL, COMPOST | 170-235 | 15 | 11 | 8 | 4 |
| DESCEPADA, SUBSUELO (preparación), RASTROARADO, RASTRILLADA, SUBSUELO (levante), FERTILIZACIÓN INTEGRADA | 280-300 | 18 | 14 | 17 | 13 |
| CULTIVO APORQUE (HC) | 155 HC | 4 | 1 | 8 | 5 |
| TOTAL | | 68 | 48 | 69 | 45 |

Tabla 14: Propuesta de renovación de maquinaria a 2 años

Fuente: *Elaboración propia*

En la tabla anterior, se muestra una guía basada en las necesidades operativas y el inventario de equipos que se pueden dar de baja, facilitando una planificación estratégica en la renovación de activos.

Se debe además considerar la venta de la maquinaria menos eficiente o que no se utiliza frecuentemente, puesto que es una estrategia que puede liberar recursos financieros adicionales. Estos fondos pueden ser reinvertidos en la adquisición de unidades más modernas y eficientes, optimizando la asignación de recursos y mejorando la productividad general. La redistribución interna de equipos también puede ser considerada si existen áreas donde la maquinaria antigua aún pueda ser útil sin afectar significativamente la eficiencia operativa.

Invertir en tecnología que mejore la eficiencia del uso de la maquinaria es igualmente fundamental. La implementación de sistemas de gestión de mantenimiento puede reducir los tiempos muertos y aumentar la productividad al permitir un mantenimiento preventivo y programado. Estas herramientas tecnológicas facilitan el monitoreo en tiempo real de los equipos, ayudando a prevenir fallos inesperados y prolongando la vida útil de la maquinaria.

Finalmente, es importante destacar que la implementación de un programa de reposición de maquinaria agrícola debe estar alineada con una estrategia más amplia destinada a mejorar la rentabilidad y la eficiencia operativa. Una planificación cuidadosa asegurará que las inversiones en nueva maquinaria sean sostenibles y contribuyan a los objetivos financieros y operativos a largo plazo de la empresa. Integrar estas acciones dentro de una visión estratégica garantizará que las decisiones tomadas no solo resuelvan desafíos inmediatos, sino que también fortalezcan la posición competitiva y la viabilidad futura de la organización en el mercado.

12 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Álvarez C., A. (1985). Costos proyectados y valoración de maquinaria agrícola. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 38(2), 71–97.

Álvarez, L. (2023). Simulación financiera y análisis de sensibilidad en la toma de decisiones agrícolas. Cali: Editorial UAO.

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/28322>

ASOCAÑA - Asociación de cultivadores de caña de azúcar de Colombia. (2024). *Informe anual 2023-2024*.

Recuperado el 29 de julio de 2024, de

<https://www.asocana.org/modules/documentos/17710.aspx>

Castañeda, J. (2019). Análisis financiero en la toma de decisiones de reposición de maquinaria agrícola. *Revista de Economía y Finanzas Agrícolas*, 32(4), 101-118.

Castillo, R., & Garces, F. (2015). Factores que afectan la calidad de la caña de azúcar. Carta Informativa CINCAE, 17(1). Centro de Investigación de la Caña de Azúcar del Ecuador (CINCAE).

CENICAÑA - Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. (1995). *El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia*. Cassalet, C., Torres, J., & Isaacs, C. (eds.). Cali, Colombia.

CENICAÑA - Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. (2003). *Informe anual 2002*. Cali, Cenicaña.

CENICAÑA - Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. (2014). *Informe anual 2013*. Cali, Cenicaña.

CENICAÑA - Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. (2015). *Informe anual 2014*. Cali, Cenicaña.

Chica Ramírez, H. A., Bravo Bastidas, J. J., & Peña Quiñones, A. J. (2021). Análisis de rachas de lluvia para el manejo de cultivos de caña, *Saccharum officinarum*, en el valle del río Cauca, Colombia. *Acta Agronómica*, 70(2), 119-132.

- Galarraga Rivera, Y. O. (s. f.). *Análisis de reposición de equipos para maquinaria agrícola en un ingenio azucarero*. Facultad de Ciencias Económicas Administrativas y Contables, Universidad Libre Seccional Pereira. Recuperado de <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/22416>
- García, J., & Torres, R. (2019). Gestión financiera aplicada a la renovación de maquinaria agrícola: Análisis y estrategias. *Revista de Ciencias Agroindustriales*, 5(2), 112-125.
- García, A., Díaz, L., & Martínez, R. (2021). Modelos de reposición óptima de maquinaria agrícola en ingenios azucareros. *Journal of Agricultural Economics*, 27(3), 235-247.
- García, A., Sánchez, L., & Méndez, F. (2020). Gestión del ciclo de vida de la maquinaria agrícola: un enfoque integrado para la toma de decisiones. *Journal of Agricultural Engineering*, 35(2), 65-75.
- García, C., & Martínez, D. (2022). Análisis económico de la reposición de maquinaria agrícola en la industria azucarera. *Revista de Economía y Producción*, 34(2), 45-62.
- Gil, E. (2001). Elección correcta de la maquinaria agrícola. *Agrotécnica*, (4), 167-175.
- Gómez, M., García, S., & Rojas, P. (2021). Gestión de activos y optimización de maquinaria agrícola en el sector azucarero. *Journal of Agricultural Engineering*, 17(2), 58-70.
- González, A., Martínez, R., & López, C. (2020). Evaluación del costo total de propiedad como herramienta en la reposición de activos agrícolas. *Revista de Ingeniería Agrícola*, 32(1), 25-35.
- González, M., & Fernández, A. (2021). Economic and environmental impact of equipment replacement in sugar mills: A circular economy approach. *Journal of Sustainable Industrial Systems*, 6(1), 12-27.
- Hernández, J., & Pérez, M. (2021). Ciclos de vida de activos agrícolas: Implicaciones económicas en la toma de decisiones. Ciudad de México: Alfaomega.
- Ingenio Risaralda S.A. (2006). *Guía para el control de calidad de las labores del cultivo de la caña de azúcar*. Ingenio Risaralda S.A.

- Izar Landeta, J. M., Garnica González, J., & Ynzunza Cortés, C. B. (2017). Determinación de la vida económica de un equipo. *Conciencia Tecnológica*, 3-7. Recuperado de <https://www.redalyc.org/jatsRepo/944/94453640003/html/index.html>
- López, F., & Morales, C. (2018). Cost analysis of machinery replacement in the sugar industry. *Sugar Industry Journal*, 45(4), 350-368.
- López, J., & Medina, P. (2020). Análisis de riesgos en la gestión de maquinaria agrícola: Impacto en la productividad. *Agricultural Risk Management Journal*, 19(1), 45-60.
- López Trujillo, L. A. (2021). *Efecto de la oportunidad en labores culturales para la producción de caña de azúcar (Saccharum officinarum) en el sector agroindustrial azucarero en el Valle Geográfico del Río Cauca* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Facultad de Ingeniería y Administración, Palmira, Valle del Cauca, Colombia
- Martínez, P., Silva, J., & Gómez, T. (2018). Programación lineal para la optimización de reposición de maquinaria en la industria azucarera. *Optimization in Agriculture*, 34(2), 78-92.
- Martínez, C., & Gómez, L. (2021). Factores ambientales y normativas en la industria cañera. *Sustainability and Agribusiness Journal*, 9(3), 78-91.
- Martínez, S., Gómez, T., & Rojas, F. (2020). Modelos estadísticos para la predicción de la rentabilidad de maquinaria agrícola en ingenios azucareros. *International Journal of Agricultural Engineering*, 13(2), 101-114.
- Mesa Grajales, D., Ortiz Sánchez, Y., & Pinzón, M. (2006). La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento. *Scientia et Technica*, XII, 3-6.
- Mínguez, C. (2019). Gestión eficiente de la reposición de equipos agrícolas: Teoría y prácticas. *Agronomía y Maquinaria*, 34(2), 75-89.

- Muñoz, E. C., Arévalo, C. A., & León Gómez, A. (2018). Análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de cosechadoras de caña de azúcar y su efecto sobre la cosecha. *Centro de Investigación de la caña de Azúcar - Cenicaña*.
- Murcia, G. A., Rivera, J. J., & Pinzón, N. (2006). Administración de maquinaria agrícola para el manejo sostenible de los suelos en el Valle Cálido del Alto Magdalena. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica)*.
- Patel, S., & Kumar, A. (2020). Models for decision-making in equipment replacement in the sugarcane industry. *Industrial Engineering Journal*, 16(4), 123-135.
- Paredes, J., & Escobar, E. (2022). Multicriteria decision-making for machinery replacement in agro-industrial settings. *Operations Research Perspectives*, 9(3), 445-462.
- Peloia, P. R., & Milan, M. (2010). Propuesta de un sistema de medición de desempeño aplicado a la mecanización agrícola. *Engenharia Agrícola*, 30(4), 681-691.
- Pérez, D., Rodríguez, M., & Sánchez, L. (2017). Análisis de riesgos en la gestión de maquinaria agrícola. *Ingeniería y Agricultura Moderna*, 8(4), 98-110.
- Polanco, F. (2007). *Modulo: Maquinaria y mecanización agrícola*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, Colombia.
- López, A., & Medina, P. (2020). Impacto del mantenimiento en la productividad agrícola: Evaluación de riesgos operativos. *Revista Latinoamericana de Ingeniería Agrícola*, 12(1), 45-58.
- Ramírez, E., & López, R. (2021). Riesgos estratégicos en el sector azucarero: Un análisis para la toma de decisiones. *Agricultural Business Review*, 7(4), 123-140.
- Rojas, F., Ortega, E., & Vargas, H. (2022). Modelos estadísticos para la predicción de rentabilidad en maquinaria agrícola. *Journal of Agricultural Innovation*, 15(1), 34-49.
- Rodríguez T, D. (2024). Admiten proceso de reorganización empresarial de ingenio La Cabaña. *Portafolio.co*. Recuperado el 18 de julio de 2024, de

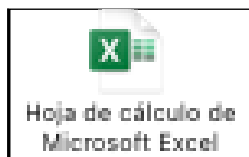
<https://www.portafolio.co/negocios/empresas/admiten-proceso-de-reorganizacion-empresarial-de-ingenio-la-cabana-supersociedades-607422>

- Rodríguez, C., & Fernández, J. (2021). Modelos predictivos de supervivencia para maquinaria agrícola. *Statistical Agricultural Models*, 18(3), 134-150.
- Rojas, E., & Camargo, F. (2018). Métodos de evaluación financiera en la reposición de equipos agrícolas: VPN y TIR. *Journal of Finance and Agricultural Economics*, 26(5), 88-102.
- Rojas, F., Ortega, E., & Vargas, H. (2022). Modelos estadísticos para la predicción de rentabilidad en maquinaria agrícola. *Journal of Agricultural Innovation*, 15(1), 34-49.
- Ruiz-Sánchez, D., Castro, A., & Morales, L. (2020). Optimización de maquinaria agrícola: Impacto en costos y productividad en ingenios azucareros. *International Journal of Agricultural Management*, 8(3), 100-113.
- Sharma, R., & Pandey, A. (2020). Optimal replacement time of agricultural machinery: A cost-benefit analysis. *Journal of Agricultural Engineering*, 57(3), 203-215.
- Smith, J. (2019). Sustainable replacement strategies for field equipment in agriculture. *Journal of Agricultural Engineering*, 42(7), 89-97.
- Smith, J., & Li, Z. (2019). Predictive maintenance and equipment replacement strategies: A machine learning approach. *Journal of Operations Management*, 47(2), 105-120.
- Smith, T., Johnson, D., & Baker, P. (2022). Financial optimization models for agricultural machinery replacement. *Journal of Agricultural Economics*, 67(2), 150-165.
- Torres, H., & Ramírez, P. (2020). Predicción de rentabilidad de maquinaria agrícola mediante modelos estadísticos. *Agricultural Forecasting*, 8(2), 89-104.
- Velasco, R., & González, J. (2015). Costo de operación o uso de maquinaria agrícola: Cómo evaluarlo. I. Conceptos y aspectos metodológicos. *INIA Quilamapu*.

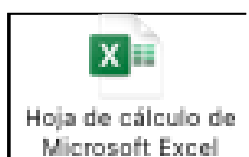
Villegas Trujillo, F. (2013). Variaciones en la producción en el sector agroindustrial de la caña de azúcar del valle del río Cauca (Documento de trabajo No. 736). *Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña)*.

13 ANEXOS

Anexo A: Análisis y estado actual financiero de ingenio la cabaña.



Anexo B: Supuestos modelo de valoración ingenio la cabaña.



Anexo C: Estados financieros proyectados ingenio la cabaña.



Anexo D: Análisis Renting 2024.



Anexo E: Modelos financieros para reposición de equipos.

