UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS

INFLUENCIA DEL TIPO DE COMPUESTO DEL NEUMÁTICO Y LAS CONDICIONES OPERATIVAS EN LA VIDA ÚTIL DE LOS NEUMÁTICOS DE ACARREO EN UNA MINA A CIELO ABIERTO

PRESENTADO POR:

BACH. EDWIN ELIAS MEJIA REYES

PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL:

INGENIERO DE MINAS

MOQUEGUA – PERÚ

2026

UNAM
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

INGENIERÍA DE MINAS

Folio N° 095

ACTA DE SUSTENTACIÓN

I. Modalidad:

Tesis : [X]

Trabajo de Suficiencia Profesional : [ ]

Otro: ..... : [ ]

II. Documento de aprobación para la sustentación:

RCF N° 246-2026-CF-FAIN-UNAM

Fecha: 05-06-2026

III. El Jurado ha dictaminado la (el) TESIS, TITULADO:

INFLUENCIA DEL TIPO DE COMPUESTO DEL NEUMÁTICO Y LAS CONDICIONES OPERATIVAS EN LA VIDA ÚTIL DE LOS NEUMÁTICOS DE ACARREO EN UNA MINA A CIELO ABIERTO.

Bachiller: EDWIN ELIAS INGUIA REYES

Asesor Principal: DR. CHRIST JESUS BARRIGA PARIA

Co-Asesor : .....

IV. Se dictamina:

Como: APROBADO por UNANIMIDAD la sustentación de manera:

Presencial [X] Virtual [ ]

Con nota: DIECISÉIS (16) por lo que; Sí [X] No [ ]

Opta el Título Profesional de INGENIERO DE MINAS.

Siendo las 17:00 horas, del 25 de JUNIO del año 2026 se procede con la firma en conformidad de lo dictaminado por el Jurado.

Presidente
DR. JORGE LUIS FLOREZ SALAS
(Nombres y Apellidos)

Primer Miembro
DR. VICTOR ADRIAN PONCE ESTRADA
(Nombres y Apellidos)

Segundo Miembro
Mg. AGAPITO FLORES JUSTO
(Nombres y Apellidos)

Bachiller
Edwin Elias Inguia Reyes
(Nombres y Apellidos)

RESUMEN

En la minería a cielo abierto, los neumáticos de acarreo representan uno de los componentes más críticos en la estructura de costos operativos, debido a su alta exposición a condiciones extremas de carga, temperatura y abrasión. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo determinar la influencia del tipo de compuesto y las condiciones operativas en la vida útil de los neumáticos en la Unidad Minera Cuajone. El estudio se desarrolló bajo un enfoque de investigación aplicada con diseño correlacional, utilizando datos históricos y mediciones de campo de neumáticos OTR de las marcas Michelin y Bridgestone (59/80R63), correspondientes a un periodo de cinco años. Se analizaron variables relacionadas con el tipo de compuesto, condiciones de la vía de acarreo, presión de inflado y generación de calor. Los resultados evidencian una relación significativa entre el tipo de compuesto y la resistencia al corte y a la generación de calor interno, lo que influye directamente en la extensión de la vida útil del neumático. Se identificó que el estado de las vías de acarreo constituye el principal factor operativo asociado a fallas por cortes en la banda de rodamiento, por encima de la presión de inflado. Se concluye que la selección adecuada del compuesto, junto con una gestión adecuada de las condiciones operativas, permite optimizar el rendimiento de los neumáticos y reducir el costo por tonelada transportada. Finalmente, se recomienda implementar sistemas de monitoreo en tiempo real y programas de auditoría de vías de acarreo para mejorar la toma de decisiones operativas y prevenir fallas prematuras.

Palabras clave: neumáticos OTR, minería a cielo abierto, compuesto, vida útil, condiciones operativas, acarreo.

ABSTRACT

In open-pit mining, haul truck tires are among the most critical components in the operating cost structure due to their high exposure to extreme load, temperature, and abrasive conditions. In this context, the present research aimed to determine the influence of tread compound type and operating conditions on tire service life at the Cuajone Mining Unit. The study was conducted using an applied research approach with a correlational design, based on historical data and field measurements of OTR tires from Michelin and Bridgestone (59/80R63) over a five-year period. Variables such as compound type, haul road conditions, inflation pressure, and heat generation were analyzed. The results show a significant relationship between compound type and resistance to cutting and internal heat generation, directly affecting tire service life extension. Additionally, haul road condition was identified as the most influential operational factor in tread cut failures, surpassing inflation pressure in terms of failure frequency. It is concluded that proper compound selection, combined with adequate operational condition management, improves tire performance and reduces cost per ton hauled. Finally, the implementation of real-time monitoring systems and haul road auditing programs is recommended to enhance operational decision-making and prevent premature failures.

Keywords: OTR tires, open-pit mining, compound, service life, operating conditions, haulage.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I 2

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 2

1.1 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 2

1.1.1 Descripción de la realidad problemática 2

1.1.2 Formulación del problema de investigación 3

1.2.1 Interrogante general 4

1.2.2 Interrogantes especificas 4

1.2 OBJETIVOS 4

1.2.1 Objetivo general 5

1.2.2 Objetivos específicos 5

1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA 5

1.3.1 Justificación Teórica 6

1.3.2 Justificación Práctica 6

1.3.3 Justificación Metodológica 7

1.3.4 Importancia 8

1.4 HIPÓTESIS 9

1.4.1 Hipótesis general 9

1.4.2 Hipótesis especificas 9

1.5 VARIABLES 9

1.5.1 Variable independiente 10

1.5.2 Variable dependiente 10

CAPÍTULO II 12

MARCO TEÓRICO 12

2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA 12

2.1.1 Antecedentes Internacionales 12

2.1.2 Antecedentes Nacionales 23

2.1.3 Antecedentes Locales 36

2.2 BASES TEÓRICAS 40

2.2.1 Neumáticos de acarreo en minería a cielo abierto 40

2.2.2 Compuestos de caucho en neumáticos mineros 41

2.2.3 Vida útil del neumático de acarreo 42

2.2.4 Condiciones operativas en el transporte minero 42

2.2.5 Temperatura y presión de inflado ... *43*
2.2.6 Desgaste de la banda de rodamiento ... *43*
2.2.7 Gestión de neumáticos en minería ... *43*
2.2.8 Impacto económico del desempeño de neumáticos ... *44*
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS ... 44
Neumáticos de acarreo (OTR) ... 44
Compuesto del neumático ... 44
Vida útil del neumático ... 44
Condiciones operativas ... 45
Desgaste del neumático ... 45
Flota de acarreo ... 45
CAPÍTULO III ... 46
METODOLOGÍA ... 46
3.1 TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN ... 46
3.1.1 Tipo de investigación ... *46*
3.1.2 Nivel de investigación ... *47*
3.1.3 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN ... 47
3.2 ÁMBITO TEMPORAL Y ESPACIAL ... 47
3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA ... 49
3.3.1 Población ... *49*
3.3.2 Muestra ... *49*
3.4 INSTRUMENTOS ... 49
3.4.1 Técnicas de recolección de datos ... *50*
3.4.2 Instrumentos de recolección de datos ... *50*
3.5 PROCEDIMIENTOS ... 51
3.6 ANÁLISIS DE DATOS ... 52
CAPÍTULO IV ... 54
RESULTADOS Y DISCUSIÓN ... 54
4.1 ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO HISTÓRICO DE NEUMÁTICOS DE ACARREO ... 54
4.2 ANÁLISIS DEL TIPO DE COMPUESTO Y SU INFLUENCIA EN LA VIDA ÚTIL DE LOS NEUMÁTICOS ... 57
4.2.1 Caracterización de los compuestos evaluados ... *57*
4.2.2 Comparación Michelin vs. Bridgestone: análisis técnico-económico ... *59*
4.3 ANÁLISIS DE LOS MOTIVOS DE ELIMINACIÓN Y SU RELACIÓN CON LAS CONDICIONES OPERATIVAS ... 60
4.3.1 Distribución de causas de retiro ... *60*
4.3.2 Efecto de la velocidad de operación en la generación de fallas ... *62*

4.4 Efecto de las acciones correctivas sobre el rendimiento de neumáticos 64
4.5 Análisis del posicionamiento de neumáticos y su efecto diferencial en el desgaste. 65
4.6 Validación de hipótesis de investigación 66
4.6.1 Hipótesis específica 1: Influencia del tipo de compuesto 66
4.6.2 Hipótesis específica 2: Influencia de las condiciones operativas 67
4.6.3 Hipótesis general: Influencia conjunta del compuesto y las condiciones operativas 67
4.7 Discusión 68
4.7.1 Discusión en torno al efecto del tipo de compuesto 68
4.7.2 Discusión sobre las condiciones operativas y el control de velocidades 69
4.7.3 Discusión sobre las implicancias económicas y de sostenibilidad 70
4.7.4 Limitaciones del estudio y líneas de investigación futura 71
4.8 Síntesis de hallazgos y contribuciones al conocimiento 71

CAPÍTULO V 73

CONCLUSIONES 73

5.1. Conclusión del objetivo general 73
5.2. Conclusión del objetivo específico 1: Tipo de compuesto 73
5.3. Conclusión del objetivo específico 2: Condiciones operativas 73
5.4. Conclusión global 74

CAPÍTULO V 75

RECOMENDACIONES 75

REFERENCIAS 76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01 41

Camiones mineros Caterpillar de gran porte, diseñados para operar en minería a cielo abierto. 41

Figura 02 48

Mapa de Ubicación de la Unidad Minera Cuajone 48

Figura 03: 55

Neumáticos utilizados vc rendimiento promedio 55

Figura 04: 56

Variación interanual del rendimiento 56

Figura 05: 58

Rendimiento promedio por tipo de compuesto – Neumático 59/80R63 58

Figura 06: 61

Análisis de eliminación de neumáticos: Cantidad vs Rendimiento 61

Figura 07: 62

Dashboard para rendimiento histórico de neumáticos 62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01 11

Operacionalización de las Variables 11

Tabla 02: 54

Rendimiento histórico de neumáticos 59/80R63 54

Tabla 03: 57

Rendimiento promedio por tipo de compuesto – Neumáticos 59/80R63, Cuajone 57

Tabla 04: 59

Comparación técnica y económica: Michelin vs. Bridgestone – 59/80R63 59

Tabla 05: 60

Distribución de neumáticos desechados por motivo de eliminación 60

Tabla 06: 63

Velocidades promedio registradas por condición de pendiente y su impacto en vida útil..... 63

Tabla 07: 64

Rendimiento mensual de neumáticos 59/80R63 durante el período de intervención 64

INTRODUCCIÓN

La minería a cielo abierto constituye una de las principales actividades extractivas a nivel mundial, caracterizada por el uso intensivo de equipos de acarreo de gran capacidad. Dentro de estos sistemas, los neumáticos OTR (Off-The-Road) representan un componente fundamental para la continuidad operativa, ya que soportan directamente las cargas dinámicas, las condiciones geométricas de las vías y los efectos térmicos generados durante el transporte de mineral.

En este contexto, los neumáticos de acarreo se han convertido en uno de los insumos de mayor impacto en los costos operativos, debido a su elevada inversión inicial y a su desgaste acelerado bajo condiciones de trabajo severas. Factores como el tipo de compuesto, la calidad de las vías de acarreo, la presión de inflado y los ciclos operativos influyen directamente en su desempeño, generando variaciones significativas en su vida útil.

En la Unidad Minera Cuajone, se ha observado la presencia recurrente de fallas prematuras en neumáticos de gran tamaño, asociadas principalmente a cortes en la banda de rodamiento, separaciones internas y degradación térmica. Estas condiciones evidencian la necesidad de analizar de manera integral los factores técnicos y operativos que influyen en su comportamiento, con el fin de optimizar su rendimiento y reducir el costo por tonelada transportada.

En respuesta a esta problemática, la presente investigación tiene como propósito evaluar la influencia del tipo de compuesto y las condiciones operativas en la vida útil de los neumáticos OTR utilizados en la operación minera. Para ello, se analizan datos históricos y mediciones de campo correspondientes a neumáticos de las marcas Michelin y Bridgestone (59/80R63), durante un periodo de cinco años.

Los resultados de este estudio permiten identificar relaciones significativas entre las variables analizadas, aportando criterios técnicos para la selección adecuada de neumáticos y la gestión eficiente de las condiciones operativas. De esta manera, se busca contribuir a la mejora del desempeño del sistema de acarreo y a la reducción de fallas prematuras en los equipos.

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Descripción y formulación del problema

1.1.1 Descripción de la realidad problemática

En la minería a cielo abierto, los neumáticos de acarreo representan uno de los insumos más críticos dentro de la estructura de costos operativos, debido a su elevado valor unitario y a la severidad de las condiciones en las que operan. Estos neumáticos están expuestos de manera continua a altas cargas dinámicas, ciclos térmicos intensos, superficies abrasivas y largos recorridos, factores que influyen directamente en su desempeño y vida útil. La ocurrencia de fallas prematuras, como separaciones de capas, cortes y sobrecalentamiento, genera paradas no programadas de los equipos, afectando la productividad y la continuidad de las operaciones mineras.

Una de las principales causas de esta problemática es la selección inadecuada del tipo de compuesto del neumático en relación con las condiciones específicas de operación. En muchas operaciones mineras, la elección del compuesto se realiza de forma estandarizada o basada en experiencias previas, sin considerar de manera integral variables como la temperatura de operación, el tipo de material transportado, la severidad de las vías y los ciclos de carga y descarga. Esta falta de adecuación técnica provoca que los neumáticos no trabajen dentro de sus rangos óptimos de diseño, acelerando el desgaste de la banda de rodamiento y reduciendo significativamente su vida útil esperada.

Las condiciones operativas juegan un rol determinante en el rendimiento de los neumáticos de acarreo. Factores como una presión de inflado incorrecta, velocidades de operación superiores a las recomendadas, sobrecarga de los equipos y deficiencias en el mantenimiento de las vías de acarreo contribuyen al incremento de la temperatura interna del neumático y al deterioro de su estructura. La carencia de un control riguroso y sistemático de estas variables limita la capacidad de identificar desviaciones

operativas a tiempo, incrementando el riesgo de fallas catastróficas y pérdidas económicas para la operación minera.

Se evidencia la necesidad de evaluar de manera técnica y objetiva el impacto del tipo de compuesto del neumático y de las condiciones operativas en la vida útil de los neumáticos de acarreo en minería a cielo abierto. Un análisis integral permitirá identificar las combinaciones óptimas entre diseño del neumático y entorno operativo, contribuyendo a la reducción de costos, al incremento de la disponibilidad mecánica de la flota y a una gestión más eficiente y sostenible de los recursos en la operación minera.

1.1.2 Formulación del problema de investigación

En la minería a cielo abierto, la gestión de neumáticos de acarreo constituye un desafío técnico y económico relevante, debido a la elevada inversión que estos representan y a las exigentes condiciones operativas a las que están sometidos. A pesar de los avances en el diseño y fabricación de neumáticos OTR, muchas operaciones mineras continúan registrando reducciones significativas en la vida útil esperada, originadas por fallas prematuras y desgastes acelerados. Esta situación evidencia la existencia de brechas entre las condiciones reales de operación y los criterios técnicos considerados en la selección y uso de los neumáticos.

Una de las principales limitaciones identificadas es la insuficiente evaluación del impacto que tiene el tipo de compuesto del neumático frente a variables operativas como la carga transportada, la temperatura de trabajo, la velocidad de operación y las características de las vías de acarreo. En la práctica, estas variables suelen gestionarse de manera aislada, sin un análisis integral que permita comprender su interacción y efecto conjunto sobre el desempeño del neumático. Como consecuencia, se adoptan decisiones operativas y de selección que no siempre garantizan un aprovechamiento óptimo del recurso ni una adecuada relación costo–beneficio.

Frente a esta realidad, surge la necesidad de formular un problema de investigación orientado a determinar cómo el tipo de compuesto del neumático y las condiciones operativas influyen en el incremento de la vida útil de los neumáticos de acarreo en una minería a cielo abierto. La adecuada formulación de este problema

permitirá establecer una base científica para el desarrollo de estrategias de selección, operación y control que contribuyan a mejorar el rendimiento de los neumáticos, reducir costos operativos y fortalecer la sostenibilidad de las operaciones mineras.

1.2.1 Interrogante general

¿De qué manera el tipo de compuesto del neumático y las condiciones operativas influyen en la vida útil de los neumáticos de acarreo en una mina a cielo abierto?

1.2.2 Interrogantes especificas

- ¿Cómo influye el tipo de compuesto en la vida útil de los neumáticos de acarreo en una mina a cielo abierto?
- ¿De qué manera las condiciones operativas (temperatura, velocidad, presión de inflado y estado de vía) afectan la vida útil de los neumáticos de acarreo en una mina a cielo abierto?

1.2 Objetivos

La presente investigación se orienta a analizar de manera integral los factores técnicos y operativos que influyen en el desempeño y la vida útil de los neumáticos de acarreo utilizados en minería a cielo abierto. Considerando que los neumáticos representan uno de los componentes de mayor impacto económico en la operación de transporte, resulta fundamental establecer objetivos claros que permitan evaluar su comportamiento bajo distintas condiciones operativas y tipos de compuestos. En este contexto, los objetivos planteados buscan generar información técnica confiable que contribuya a la optimización del uso de los neumáticos y a la mejora de la eficiencia operativa.

Los objetivos de la investigación están alineados con la necesidad de fortalecer la gestión de activos mineros mediante un enfoque basado en datos reales de operación. A través del análisis sistemático de variables como carga, temperatura, velocidad y tipo de compuesto, se pretende identificar relaciones causales que permitan sustentar decisiones técnicas y operativas. De esta manera, los objetivos definidos constituyen la guía principal para el desarrollo metodológico del estudio y para la validación de los resultados obtenidos.

1.2.1 Objetivo general

Determinar la influencia del tipo de compuesto del neumático y las condiciones operativas en la vida útil de los neumáticos de acarreo en una mina a cielo abierto.

1.2.2 Objetivos específicos

Analizar la influencia del tipo de compuesto del neumático en la vida útil de los neumáticos de acarreo en la una mina a cielo abierto.

Evaluar el efecto de las condiciones operativas (temperatura, velocidad, presión de inflado y estado de vía) en la vida útil de los neumáticos de acarreo en una mina a cielo abierto.

1.3 Justificación e importancia

La presente investigación se justifica desde una perspectiva técnica, económica y operativa, debido a la alta incidencia que tienen los neumáticos de acarreo en los costos totales de operación de la minería a cielo abierto. Estos componentes representan una de las mayores inversiones dentro del sistema de transporte de material, y su desempeño está directamente relacionado con la productividad, la disponibilidad mecánica de la flota y la seguridad operacional. La reducción de la vida útil de los neumáticos, producto de fallas prematuras o de un desgaste acelerado, genera impactos económicos significativos y limita la eficiencia global de la operación minera.

Desde el punto de vista técnico, resulta fundamental comprender la influencia que ejerce el tipo de compuesto del neumático en su comportamiento frente a las condiciones reales de operación. Las evidencias operativas muestran que neumáticos de distintos compuestos presentan rendimientos variables incluso bajo escenarios similares, lo que sugiere la necesidad de una evaluación sistemática que relacione las características del diseño del neumático con factores como carga, temperatura, velocidad y estado de las vías. Esta investigación permitirá generar conocimiento aplicado que contribuya a una selección más adecuada de los neumáticos, alineando sus propiedades mecánicas con las exigencias específicas de la operación minera.

La investigación se justifica desde una perspectiva estratégica y de sostenibilidad, ya que el incremento de la vida útil de los neumáticos de acarreo

contribuye a la optimización del uso de recursos, a la reducción de residuos industriales y a la disminución del impacto ambiental asociado a la fabricación y disposición de neumáticos OTR. Los resultados del estudio servirán como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en la gestión de neumáticos, permitiendo establecer lineamientos operativos y de control basados en datos reales. De este modo, la investigación aporta valor tanto a la gestión técnica de la operación minera como al fortalecimiento de prácticas más eficientes y sostenibles en la industria.

1.3.1 Justificación Teórica

Desde el punto de vista teórico, la investigación contribuye al fortalecimiento del conocimiento relacionado con el desempeño y la vida útil de los neumáticos de acarreo en minería a cielo abierto, integrando conceptos de mecánica de neumáticos, confiabilidad y gestión de activos mineros. Si bien existen estudios orientados al análisis del desgaste y las fallas de neumáticos OTR, aún se observa una limitada articulación entre el tipo de compuesto del neumático y su comportamiento bajo condiciones operativas reales, particularmente en entornos mineros de alta exigencia. Este estudio busca cubrir dicha brecha, aportando un marco conceptual que relacione el diseño del neumático con variables operativas críticas.

La investigación permite consolidar fundamentos teóricos asociados a la interacción neumático–vía–equipo, incorporando factores como carga dinámica, temperatura de operación, velocidad y posición del neumático. Al analizar de manera conjunta estas variables, el estudio amplía la comprensión del impacto sistémico que tienen las decisiones técnicas y operativas sobre el rendimiento del neumático. De este modo, se generan aportes teóricos que pueden servir como base para futuras investigaciones orientadas a la optimización del transporte minero y a la mejora de la confiabilidad de los equipos de acarreo.

1.3.2 Justificación Práctica

Desde una perspectiva práctica, la investigación se justifica por su aplicación directa en la gestión operativa de neumáticos de acarreo en minería a cielo abierto. Los resultados del estudio permitirán identificar qué tipos de compuestos presentan un mejor desempeño bajo determinadas condiciones operativas, facilitando la toma de

decisiones en la selección, uso y control de los neumáticos. Esto se traduce en una reducción de fallas prematuras, una mayor vida útil de los neumáticos y una disminución de los costos asociados a su reposición y mantenimiento.

Adicionalmente, la investigación aporta herramientas prácticas para el control operativo, al permitir establecer lineamientos sobre velocidades óptimas, cargas adecuadas y buenas prácticas de operación que influyen directamente en el rendimiento del neumático. Estas recomendaciones pueden ser incorporadas en los procedimientos operativos estándar y en los programas de capacitación del personal, contribuyendo a una operación más eficiente, segura y económicamente sostenible. En este sentido, el estudio tiene un impacto directo en la mejora de la productividad y competitividad de la operación minera.

1.3.3 Justificación Metodológica

La investigación se justifica metodológicamente por la aplicación de un enfoque analítico basado en el uso de datos operativos reales, lo que permite evaluar el desempeño de los neumáticos bajo condiciones representativas de operación. La utilización de indicadores de rendimiento, análisis estadístico y comparación entre diferentes tipos de compuestos proporciona un soporte técnico sólido para la evaluación del impacto de las variables estudiadas. Este enfoque permite pasar de una gestión empírica a una gestión basada en evidencia.

La metodología propuesta integra herramientas de análisis de datos y control de desempeño que fortalecen la confiabilidad de los resultados obtenidos. El uso de registros históricos, indicadores clave y análisis comparativos contribuye a una evaluación objetiva y replicable, que puede ser adaptada a otras operaciones mineras con características similares. De esta manera, la investigación no solo valida una metodología aplicable al caso de estudio, sino que también propone un modelo metodológico que puede ser utilizado como referencia en futuros estudios sobre gestión y optimización de neumáticos en minería.

1.3.4 Importancia

La importancia de realizar esta tesis radica en que aborda un problema crítico de la operación minera moderna: el desempeño y la vida útil de los neumáticos de acarreo, un componente que impacta directamente en los costos operativos, la productividad y la seguridad en minería a cielo abierto. Al analizar la influencia del tipo de compuesto del neumático bajo condiciones reales de operación, la investigación permite pasar de decisiones basadas en experiencia empírica a decisiones sustentadas en evidencia técnica, lo que mejora significativamente la eficiencia del sistema de transporte minero.

Su importancia se centra en el aporte de conocimiento aplicado que contribuye a cerrar una brecha técnica existente entre el diseño del neumático y su comportamiento en campo. Esto permite comprender de manera más precisa cómo variables operativas como carga, temperatura, velocidad y condiciones de la vía influyen en su desgaste, generando criterios más sólidos para la selección y gestión de neumáticos en flotas de acarreo.

Desde una perspectiva económica y ambiental, la tesis es relevante porque la extensión de la vida útil de los neumáticos reduce costos de reposición, mantenimiento y paradas operativas no programadas, además de disminuir la generación de residuos industriales asociados a su desgaste y descarte. En consecuencia, contribuye tanto a la rentabilidad de la operación minera como a prácticas más sostenibles dentro de la industria.

Finalmente, su importancia metodológica radica en que propone un enfoque basado en datos reales y análisis comparativo, el cual puede ser replicado y adaptado en otras operaciones mineras. Esto convierte a la investigación no solo en un estudio puntual, sino en una herramienta de referencia para la mejora continua en la gestión de activos críticos dentro de la minería.

1.4 Hipótesis

Las hipótesis de la presente investigación se formulan con el propósito de establecer supuestos verificables que expliquen la relación entre el tipo de compuesto de los neumáticos de acarreo, las condiciones operativas y su vida útil en una operación de minería a cielo abierto. Estas proposiciones permiten orientar el análisis científico del estudio, facilitando la contrastación empírica de los factores que influyen en el desempeño y durabilidad de los neumáticos bajo condiciones reales de trabajo.

Las hipótesis constituyen una base lógica para la aplicación de los métodos de análisis estadístico y técnico, permitiendo evaluar si las variaciones en los compuestos y en las condiciones operativas generan efectos significativos en la vida útil de los neumáticos. Su validación contribuirá a sustentar recomendaciones técnicas orientadas a la optimización del uso de este activo crítico dentro de la gestión de costos y la eficiencia operativa minera.

1.4.1 Hipótesis general

El tipo de compuesto del neumático y las condiciones operativas influyen significativamente en la vida útil de los neumáticos de acarreo en una mina a cielo abierto.

1.4.2 Hipótesis especificas

- El tipo de compuesto del neumático influye significativamente en la vida útil de los neumáticos de acarreo en una mina a cielo abierto.
- Las condiciones operativas (temperatura, velocidad, presión de inflado y estado de vía) influyen significativamente en la vida útil de los neumáticos de acarreo en una mina a cielo abierto.

1.5 Variables

La operacionalización de las variables permite traducir los conceptos teóricos de la investigación en elementos observables y medibles, facilitando la recolección y el análisis de datos en campo. En el presente estudio, se identifican como variables independientes el tipo de compuesto del neumático y las condiciones operativas, mientras que la variable dependiente es la vida útil de los neumáticos de acarreo.

Cada variable ha sido desagregada en dimensiones e indicadores específicos, los cuales se miden mediante registros operativos, reportes de mantenimiento, sistemas de monitoreo y análisis estadístico. Esta estructuración garantiza la coherencia entre los objetivos, las hipótesis y los métodos de análisis.

1.5.1 Variable independiente

La variable independiente en la presente investigación está constituida por los compuestos del neumático y condiciones operativas bajo las cuales se desempeñan los neumáticos de acarreo en una operación de minería a cielo abierto. El tipo de compuesto hace referencia a la formulación del caucho y a sus propiedades mecánicas y térmicas, las cuales determinan la resistencia al desgaste, la disipación de calor y el comportamiento frente a esfuerzos severos propios de la actividad minera.

Por su parte, las condiciones operativas comprenden los factores asociados al entorno y a la operación del equipo de acarreo, tales como la carga transportada, la presión de inflado, la velocidad de operación, la temperatura de trabajo y el estado de las vías de acarreo. Estas condiciones influyen directamente en el nivel de solicitación mecánica y térmica del neumático, por lo que su control y análisis resultan determinantes para evaluar su impacto en el desempeño y la durabilidad del neumático.

1.5.2 Variable dependiente

La variable dependiente de la investigación es la vida útil de los neumáticos de acarreo, entendida como el tiempo o número de horas efectivas de operación que un neumático alcanza desde su instalación hasta su retiro por desgaste, falla o condición límite de seguridad. Esta variable constituye un indicador clave del desempeño técnico y económico del neumático dentro del sistema de transporte minero.

La vida útil se manifiesta a través de indicadores medibles como las horas de operación acumuladas, la profundidad de desgaste de la banda de rodamiento, la frecuencia y tipo de fallas, así como el costo por hora de operación del neumático. Su análisis permite evaluar de manera objetiva el efecto de los diferentes compuestos y condiciones operativas, proporcionando información relevante para la toma de decisiones orientadas a la optimización de costos y a la mejora de la eficiencia operativa en minería a cielo abierto (Ver la Tabla 01).

Tabla 01

Operacionalización de las Variables

Variable	Tipo de variable	Dimensión	Indicadores	Unidad de medida	Técnica / Instrumento
TIPO DE COMPUESTO DEL NEUMÁTICO Y CONDICIONES OPERATIVAS DEL NEUMÁTICO	Independiente	Carga operativa	Carga por neumático	Toneladas	Analisis documental/ ficha técnica Observación/regsitros Sistema de pesaje / reportes de operación
		Presión de inflado	Presión de trabajo		
		Velocidad de operación	Velocidad promedio del camión	psi / kPa	Sistema de monitoreo de neumáticos Observación/ formato de registro
		Condición de la vía	Estado de la vía (regular, mala, buena)		
		Cararteristicas del compuesto	Resistencia al desgaste Resistencia al corte Resistencia a la traccion	km/h	Medicion de registro/reportes operativos Sistema de despacho / GPS
		Desempeño del neumático	Carga transportada	Cualitativa	Inspección técnica observación/ficha de campo
		Desempeño operativo	Horas totales de operación	Horas (h)	Historial de neumáticos
VIDA ÚTIL DEL NEUMÁTICO	Dependiente	Durabilidad	Horas de operación Kilometraje Tipo de servicio	mm	Medición física Analisis de datos/base de datos
		Rendimiento Operativo - Tasa de Desgaste	Tasa de desgaste Fallas prematuras Frecuencia de reemplazo Disponibilidad	Número de eventos	Reportes de fallas
		Desgaste de banda	Profundidad remanente de la banda	USD/h	Análisis económico Análisis Estadístico/ reporte de mantenimiento
		Fallas	Tipo y frecuencia de fallas Costo por hora de neumático		
		Eficiencia económica	Frecuencia de Reemplazo		

Nota. Elaboración propia.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del Problema

El análisis de los antecedentes del problema constituye un elemento fundamental para contextualizar la presente investigación, ya que permite identificar los principales aportes teóricos y empíricos relacionados con la vida útil de los neumáticos de acarreo en minería a cielo abierto. Diversos estudios nacionales e internacionales han abordado la influencia del tipo de compuesto, el diseño del neumático y las condiciones operativas sobre el desempeño, el desgaste y la confiabilidad de este componente crítico dentro de los sistemas de transporte minero.

La revisión de antecedentes evidencia que la gestión inadecuada de los neumáticos de acarreo genera impactos significativos en los costos operativos, la disponibilidad de los equipos y la seguridad de las operaciones. En este contexto, los trabajos previos permiten establecer criterios técnicos, metodológicos y de control que sirven como base para la evaluación del impacto del tipo de compuesto y las condiciones operativas, orientando el desarrollo de estrategias que contribuyan al incremento de la vida útil de los neumáticos y a la optimización de la eficiencia en minería a cielo abierto.

2.1.1 Antecedentes Internacionales

Según Pascual et al. (2019) en su artículo con título de la investigación: Optimización de la selección y asignación de neumáticos OTR para la reducción de costos operativos en flotas de acarreo minero, con lugar de estudio: Operación minera a cielo abierto de mediana escala, norte de Chile, indican que los neumáticos Off-The-Road (OTR) representan una fracción significativa de los costos operativos en la industria minera, siendo superados únicamente por el consumo de combustible. En una operación típica, se consumen anualmente cientos de neumáticos que, una vez desgastados o dañados, no suelen ser reutilizados, constituyendo un problema relevante para la sostenibilidad del sector. Además de su impacto económico que puede traducirse en varios millones de dólares por año, los neumáticos influyen directamente en el desempeño y la

disponibilidad de los equipos, comprometiendo la capacidad de las flotas de acarreo para cumplir con los objetivos de producción. La vida útil de los neumáticos OTR depende en gran medida de una adecuada selección del tipo de neumático, la cual implica combinar compuestos de caucho y especificaciones geométricas acordes con las características de las rutas de acarreo definidas en la planificación minera de mediano y largo plazo.

Los autores indica que tradicionalmente, la industria adopta un enfoque conservador que considera las condiciones más exigentes y selecciona un único tipo de neumático para toda la flota, lo que otorga flexibilidad operativa, pero incrementa el consumo total de neumáticos. Frente a esta limitación, el presente estudio propone una metodología innovadora que optimiza simultáneamente la selección de neumáticos orientada por ruta y la asignación de camiones a las distintas rutas de acarreo, considerando su influencia en los tiempos de ciclo. La metodología fue evaluada en una operación minera a cielo abierto en el norte de Chile, demostrando una reducción del 7,3 % en el consumo de neumáticos respecto al enfoque tradicional en un horizonte de cinco años. Los costos netos presentes asociados a neumáticos se redujeron en 2,7 millones de dólares estadounidenses, equivalente a una disminución del 7,2 %. Estos resultados evidencian el potencial de la metodología para reducir costos operativos y asegurar el cumplimiento sostenible de los planes de producción a largo plazo.

Según Huang et al. (2025) en su artículo con título de la investigación: Predicción de la vida a fatiga de neumáticos mineros mediante modelos de elementos finitos bajo condiciones operativas severas, con lugar de estudio: Operación minera a cielo abierto, con aplicación a camiones de gran tonelaje, indican que debido a las severas condiciones de trabajo en las que operan los camiones mineros, los neumáticos suelen presentar fallas prematuras que afectan la continuidad operativa y los costos de la operación. En el presente estudio se emplearon neumáticos del tipo 53/80R63 como objeto de investigación, desarrollándose modelos bidimensionales y tridimensionales mediante el método de elementos finitos (FEM). Se realizó un análisis de rodadura en estado estacionario, complementado con ensayos de propagación de grietas en el material de caucho, cuyos datos experimentales fueron ajustados mediante el método

de mínimos cuadrados para obtener los parámetros de fatiga requeridos. A partir de los resultados de simulación, se efectuó la predicción de la vida a fatiga bajo distintas condiciones operativas utilizando el software fe-safe™, permitiendo evaluar de manera integral el comportamiento estructural del neumático.

Los autores también indican que los resultados del análisis evidencian que, manteniendo constante la presión de inflado y la velocidad del vehículo, el incremento de la carga produce una disminución progresiva de la vida útil de la capa de cinturón y del flanco, mientras que la vida del caucho de rodadura presenta una reducción abrupta. Bajo condiciones de carga y velocidad constantes, el aumento de la presión de inflado genera una disminución gradual de la vida de la capa de cinturón y una reducción significativa en la vida del flanco. Cuando la carga y la presión de inflado se mantienen constantes, la velocidad del vehículo muestra una influencia limitada sobre la vida a fatiga del neumático. Estos hallazgos aportan criterios técnicos relevantes para la gestión y operación de neumáticos mineros en ambientes de alta exigencia.

Según Feng et al. (2022) en su artículo con título de la investigación: Optimización integrada de trenes de potencia limpios para camiones mineros de gran tonelaje y reducción de emisiones, con lugar de estudio: Operación minera a cielo abierto representativa, basada en un perfil operativo típico de un camión minero de 240 toneladas, indican que los camiones mineros de gran tonelaje (Mining Haul Trucks, MHT) pueden emitir cientos de veces más contaminantes que un vehículo liviano, lo que, sumado al contexto de calentamiento global, obliga a la industria minera a buscar soluciones de trenes de potencia más limpios. En esta investigación se optimizan diversas alternativas emergentes de propulsión limpia para un MHT típico de 240 toneladas, mediante un enfoque de optimización integrada del diseño y del control. Los resultados se comparan con un camión de referencia equipado con motor diésel y sistema diésel-eléctrico, evaluando la eficiencia energética y las emisiones de dióxido de carbono (CO_2). El estudio se sustenta en modelos de componentes ampliamente validados y en teoría de control óptimo, lo que permite una optimización coherente bajo un perfil de operación previamente definido.

Los autores comprobaron que los resultados indican que la solución eléctrica a baterías puede reducir en un 63 % los costos de uso, considerando la degradación de las baterías de ion-litio, y disminuir en un 21 % las emisiones de CO_2 en el análisis well-to-wheel, posicionándose como una alternativa altamente competitiva. Si bien el sistema basado en celdas de combustible de hidrógeno logra una reducción del 26 % de emisiones respecto al diésel convencional, sus elevados costos de inversión y degradación limitan actualmente su aplicación a gran escala. El estudio destaca que mejoras en la producción de hidrógeno, en los costos de capital y durabilidad de las celdas de combustible, así como en las tecnologías de carga rápida de baterías, podrían liberar un alto potencial para camiones mineros más limpios. Finalmente, la investigación proporciona una metodología cuantitativa para comparar soluciones de propulsión limpia e identificar parámetros óptimos de diseño orientados a la descarbonización del transporte minero.

Según Bellamy y Pravica (2011) en su artículo con título de la investigación: Implicancias técnicas y socioeconómicas de la automatización del acarreo en minería a cielo abierto, en el lugar de estudio: Mina a cielo abierto de gran escala en una zona remota de Australia, indican que se ha consolidado como una de las principales naciones mineras del mundo, atrayendo inversiones significativas gracias a su abundante dotación de recursos minerales, su tradición minera y su elevada base de capital humano especializado. En los últimos años, las empresas mineras australianas han enfrentado un incremento sostenido de los costos laborales, lo que ha generado la necesidad de compensarlos mediante mejoras en eficiencia y productividad. En este contexto, la automatización de la maquinaria en faena surge como una alternativa relevante para la reducción de costos operativos. Si bien la minería subterránea fue pionera en la adopción de tecnologías automatizadas, principalmente por razones de seguridad, accesibilidad y control de costos, su participación relativa en el total de mineral extraído ha disminuido. El desarrollo de nuevas técnicas ha permitido la explotación económica de yacimientos de gran tamaño y menor ley, desplazando el foco hacia la minería superficial. En consecuencia, se prevé que el futuro de la automatización minera esté liderado por operaciones a cielo abierto, donde estas tecnologías continúan madurando y expandiendo su aplicación.

Los autore indican que el estudio evalúa las implicancias de la introducción de camiones de acarreo autónomos en una mina a cielo abierto australiana de gran escala y ubicación remota. La automatización del acarreo permite reducir costos asociados al personal, incrementar las horas efectivas de operación y, en última instancia, disminuir el tamaño de la fuerza laboral en faena. Aunque el número de empleos por operación minera tendería a reducirse, la combinación de menores costos y mayor productividad podría hacer viables y rentables yacimientos previamente considerados antieconómicos. No obstante, el avance de la automatización conlleva importantes implicancias sociales, como la reducción de la población en comunidades mineras remotas y una menor demanda de mano de obra poco calificada. Se observa un aumento de los esquemas de trabajo fly-in fly-out y el establecimiento de centros de control remoto en grandes ciudades. Frente a este escenario, el estudio resalta la necesidad de que el Estado implemente políticas que aseguren una distribución equitativa de la renta económica generada por la explotación de los recursos minerales.

Según Meech y Parreira (2013) en su artículo con título de la investigación: Modelación del desgaste de neumáticos en sistemas de acarreo autónomo para minería a cielo abierto, en el lugar de estudio: Mina a cielo abierto virtual operando de forma continua (24/7), indican que en los últimos años se han desarrollado camiones de acarreo sin conductor para su aplicación en minas a cielo abierto, con el objetivo de mejorar la eficiencia, seguridad y sostenibilidad de las operaciones. Para predecir los beneficios de un sistema de Camiones de Acarreo Autónomos (Autonomous Haulage Trucks, AHT), se ha desarrollado un modelo determinístico–estocástico que permite comparar una flota autónoma con un sistema de operación manual. Dicho modelo estima indicadores clave de desempeño (KPIs) de referencia, tales como productividad, seguridad, frecuencia de fallas, costos de mantenimiento y mano de obra, consumo de combustible, desgaste de neumáticos y tiempos de ciclo. El enfoque propuesto permite evaluar de manera integral el impacto operativo de la automatización del acarreo bajo condiciones controladas y repetibles. En este contexto, la simulación constituye una herramienta fundamental para la toma de decisiones estratégicas en minería moderna.

Los autores se propusieron como objetivo principal del estudio describir el submodelo específico desarrollado para predecir el desgaste de neumáticos en un sistema AHT. Este submodelo opera dentro de una mina virtual a cielo abierto que funciona de manera continua, con una flota compuesta por nueve camiones y dos palas, encargados del transporte de mineral hacia una chancadora y de desmonte hacia un botadero. La integración del modelo de desgaste de neumáticos con el sistema global de simulación permite analizar su interacción con otros factores operativos, como los tiempos de ciclo y las estrategias de despacho. De este modo, se obtiene una estimación más realista del desempeño y los costos asociados a la operación autónoma. Los resultados del enfoque propuesto contribuyen a una mejor comprensión del rol de los neumáticos en sistemas de acarreo autónomo y apoyan la evaluación técnica y económica de su implementación en minería a cielo abierto.

Según Tang et al. (2024) en su artículo con título de la investigación: Optimización de la eficiencia energética en camiones mineros eléctricos mediante control integrado vehículo-nube y lugar de estudio: Operación minera a cielo abierto, basada en condiciones típicas de trabajo fuera de carretera. Indican que el camión minero eléctrico puro con tracción distribuida en las cuatro ruedas, equipado con un sistema híbrido de almacenamiento de energía compuesto por baterías y supercapacitores, se perfila como una solución prometedora para alcanzar emisiones cero en el transporte minero a cielo abierto. No obstante, la coordinación y el control precisos de componentes clave como la batería, el supercapacitor y el motor constituyen un desafío relevante bajo condiciones operativas complejas y severas. En este contexto, la presente investigación propone un enfoque innovador basado en la minimización de las pérdidas globales en la cadena de transferencia de energía. Para ello, se desarrolla un marco de control para la optimización de la eficiencia energética de camiones mineros sustentado en la integración vehículo-nube. Este enfoque permite explotar de manera más eficiente el potencial de ahorro energético del sistema de propulsión eléctrica. El estudio se orienta a mejorar el desempeño energético global del vehículo sin comprometer su capacidad operativa. Así, se sientan las bases para un sistema de transporte minero más limpio y eficiente.

Los autores proponen una estrategia de control que fue evaluada mediante simulaciones y comparada con una estrategia de control base bajo condiciones operativas típicas de camiones mineros. Los resultados demuestran que el enfoque planteado maximiza de manera efectiva la eficiencia energética del vehículo. En términos económicos, se logró una reducción anual de 356 864 RMB en el costo operativo integral por camión minero. La eficiencia económica asociada al ahorro de energía se incrementó en un 2,7 %. Estos resultados evidencian el alto potencial de la estrategia propuesta para optimizar el desempeño energético de camiones mineros eléctricos puros. Además, la metodología contribuye a la reducción de costos operativos y de impactos ambientales. En conjunto, los hallazgos tienen implicancias significativas para el desarrollo de sistemas de transporte minero a cielo abierto limpios y de bajas emisiones de carbono.

Según Jakkula et al. (2019) en su artículo con título de la investigación: Análisis de confiabilidad y mantenimiento preventivo de equipos LHD en minería subterránea, con lugar de estudio: Operación minera en producción continua, indican que el Load Haul Dumper (LHD) es uno de los principales equipos de transporte de mineral en la minería subterránea, y su confiabilidad resulta crítica para el cumplimiento de los objetivos de producción. Mantener el desempeño del equipo en niveles óptimos exige la reducción de fallas repentinas en sus componentes y subsistemas, los cuales conforman un sistema complejo. La identificación de componentes defectuosos puede lograrse mediante el análisis detallado de los tiempos de inactividad, lo que permite reconocer patrones de falla y pérdidas operativas. En este contexto, el desarrollo de estrategias adecuadas de mantenimiento para la reparación o sustitución de dichos componentes resulta fundamental. Una gestión de mantenimiento bien estructurada contribuye directamente a mejorar la disponibilidad y el rendimiento del equipo. Este estudio aborda esta problemática desde un enfoque de confiabilidad aplicada. El objetivo principal es fortalecer la toma de decisiones en mantenimiento preventivo en minería subterránea.

Los autores indican que para el análisis del desempeño del LHD se empleó un enfoque de confiabilidad basado en procesos de renovación. La asignación de las

distribuciones estadísticas que mejor se ajustan a los conjuntos de datos se realizó mediante la prueba de Kolmogorov–Smirnov (K–S). La estimación paramétrica de las distribuciones teóricas de probabilidad se llevó a cabo utilizando el método de máxima verosimilitud (MLE). Los resultados de las pruebas de tendencia y correlación serial validaron el supuesto de independencia e idéntica distribución (IID) de los datos. En función de esta validación, se aplicó el enfoque de proceso de renovación para el análisis posterior. La confiabilidad de cada subsistema fue calculada según la distribución que presentó el mejor ajuste estadístico. Finalmente, con base en los resultados de confiabilidad obtenidos, se determinaron los intervalos de mantenimiento preventivo orientados a alcanzar un nivel de confiabilidad esperado del 90 %, proporcionando un soporte técnico sólido para la planificación del mantenimiento del equipo.

Según Elkhenin y Mrad (2025) con su artículo de título de la investigación: Mantenimiento 4.0 basado en telemetría para la optimización del ciclo de vida de equipos mineros móviles, lugar de estudio: Operación minera industrial, desarrollada en colaboración con una empresa minera. Indican que los equipos mineros móviles son esenciales para la continuidad operativa, pero presentan una alta susceptibilidad a fallas costosas que afectan la productividad y la sostenibilidad. A pesar de la relevancia del mantenimiento predictivo para prevenir este tipo de fallas, la literatura existente carece de marcos integrales que integren eficazmente datos de telemetría en tiempo real con herramientas analíticas avanzadas para apoyar la toma de decisiones en entornos mineros complejos. En este contexto, el presente estudio propone un enfoque de Mantenimiento 4.0, desarrollado en colaboración con un socio minero, que utiliza datos de telemetría para mejorar la gestión del mantenimiento y del ciclo de vida de los equipos, con énfasis en una producción sostenible. La metodología considera la digitalización de los registros de mantenimiento y el desarrollo de paneles interactivos mediante Power BI. Este enfoque facilita una visión integral del desempeño de los equipos. Permite una gestión más proactiva de los activos críticos en minería.

Los autores incorporaron modelos estadísticos y de aprendizaje automático para el análisis en tiempo real de los datos de telemetría, lo que posibilita la detección

temprana de señales de falla y el fortalecimiento del mantenimiento predictivo. La integración de estas tecnologías contribuye a incrementar la disponibilidad de los equipos y a optimizar los costos de mantenimiento, al mismo tiempo que mejora la salud y seguridad de los operadores. Además, el enfoque propuesto impulsa el desarrollo de una cadena de suministro digital e inteligente, alineada con los principios de eficiencia operativa y sostenibilidad. La aplicación del Mantenimiento 4.0 favorece una gestión más resiliente de los activos mineros en entornos desafiantes. En conjunto, los resultados demuestran el potencial de la digitalización y el análisis avanzado de datos para fortalecer la confiabilidad de las operaciones mineras. Este enfoque representa un avance significativo hacia una minería más inteligente y sostenible.

Según Rahimdel (2022) en su artículo con título de la investigación: Análisis de confiabilidad y estimación de la vida remanente de neumáticos en camiones de acarreo minero, con lugar de estudio: Mina de hierro a cielo abierto, Irán. El autor da un análisis de confiabilidad que desempeña un papel fundamental en el soporte operativo de sistemas que funcionan bajo condiciones severas, como las presentes en la minería a cielo abierto. Los camiones de acarreo constituyen uno de los activos más importantes de este tipo de operaciones, al estar directamente vinculados con la continuidad productiva. Estos equipos están conformados por diversos subsistemas, entre los cuales los neumáticos ejercen una influencia decisiva en la economía del acarreo. En este contexto, el presente estudio se centra en la estimación de la vida útil remanente de los neumáticos de camiones mineros, considerando las condiciones ambientales de operación. La investigación se desarrolla en una mina de hierro, donde las variaciones térmicas representan un factor relevante para el desempeño de los neumáticos. El objetivo principal es aportar criterios técnicos para mejorar la gestión de estos componentes críticos. De este modo, se contribuye a una operación más segura y eficiente.

El autor para alcanzar el objetivo aplicó el modelo de riesgos proporcionales con el fin de estimar las funciones de confiabilidad condicional y, posteriormente, la vida media residual de los neumáticos para distintos tiempos iniciales de supervivencia. Los resultados evidencian que la temperatura ambiente tiene un efecto significativo sobre

el desempeño en confiabilidad de los neumáticos. En particular, al incrementar la vida inicial de los neumáticos de 500 a 1000 horas, la vida media residual se reduce en un 21 % bajo temperaturas bajas (inferiores a 15 °C) y en un 30 % bajo temperaturas altas (superiores a 15 °C). Estos hallazgos demuestran la sensibilidad del comportamiento de los neumáticos frente a las condiciones térmicas del entorno. Los resultados permiten definir intervalos adecuados de mantenimiento preventivo. En consecuencia, el estudio proporciona una base técnica para mantener el desempeño de los neumáticos en niveles óptimos durante la operación minera.

Según Ma et al. (2021) con su artículo con título de la investigación: Análisis de las pérdidas por histéresis en compuestos de caucho de neumáticos OTR de gran tamaño bajo condiciones mineras, con lugar de estudio: Sitio minero representativo con condiciones operativas típicas de acarreo. El objetivo de este estudio fue investigar las pérdidas por histéresis en los compuestos de caucho de neumáticos Off-The-Road (OTR) de ultra gran tamaño, considerando condiciones de operación típicas en faenas mineras. Para ello, se realizaron ensayos cíclicos de tracción en compuestos de la banda de rodadura y del flanco del neumático. Las pruebas se desarrollaron en seis niveles de deformación, comprendidos entre 10 % y 100 %, ocho velocidades de deformación entre 10 % y 500 % s^{-1}, y catorce temperaturas del caucho desde −30 °C hasta 100 °C. Este amplio rango experimental permitió reproducir de manera realista las exigencias mecánicas y térmicas a las que se someten los neumáticos en minería. El enfoque experimental adoptado proporciona una base sólida para analizar el comportamiento energético del caucho. De esta manera, se busca contribuir a una mejor comprensión del desempeño de los neumáticos OTR en servicio. El estudio se orienta a optimizar su diseño y operación.

Los autores consiguieron resultados experimentales que muestran que niveles elevados de deformación, como el 100 %, incrementan de manera considerable las pérdidas por histéresis de los compuestos de caucho. Se observó que dichas pérdidas aumentan con el incremento de la velocidad de deformación, siendo este efecto más pronunciado a grandes niveles de deformación. En cuanto a la temperatura, un aumento de la temperatura del caucho produce una disminución de la histéresis, aunque este

efecto se vuelve menos significativo cuando la temperatura supera los 10 °C. Al comparar los distintos compuestos, los materiales del flanco presentan mayores valores de pérdidas por histéresis que los de la banda de rodadura. Además, los compuestos del flanco exhiben incrementos más rápidos de histéresis frente al aumento de la velocidad de deformación. Estos hallazgos aportan información clave para el diseño de compuestos más eficientes y durables. En conjunto, los resultados permiten mejorar el entendimiento del comportamiento energético de los neumáticos OTR en condiciones mineras severas.

Según Wang et al. (2025) e su investigación con título de la investigación: Distribución y transporte del polvo vial inducido por neumáticos mediante métodos experimentales y simulación numérica, con lugar de estudio: Caminos asociados a minas a cielo abierto en la provincia de Hebei y la ciudad de Tianjin, China, indican que para desarrollar medidas de control específicas, resulta esencial comprender la distribución y el transporte del polvo vial bajo la perturbación generada por los neumáticos de los vehículos. En este estudio se integran métodos experimentales y de simulación numérica con el fin de analizar las características espaciales y dinámicas del polvo vial, considerando factores asociados a la vía, al vehículo y a las condiciones meteorológicas. La estructura de la nube de polvo se caracteriza mediante parámetros adimensionales, mientras que el volumen de dicha nube se emplea para evaluar el alcance de la contaminación en el espacio tridimensional cercano al vehículo. Este enfoque permite una descripción integral del fenómeno de resuspensión del polvo inducido por el tránsito. El análisis se centra en escenarios representativos de operación minera a cielo abierto. De este modo, se obtiene una base científica para evaluar impactos ambientales asociados al transporte minero. La investigación aporta elementos clave para la gestión ambiental de caminos mineros.

Los autores resaltan que los resultados indican que la concentración total de polvo es mayor en la posición W/B = 0 debido a la perturbación directa de los neumáticos. La velocidad y la carga del vehículo influyen significativamente en el ancho de la nube de polvo, registrándose tasas máximas de incremento del 82 % y 47 %, respectivamente, dentro de los rangos analizados. Estos efectos evidencian la fuerte

dependencia del fenómeno respecto a las condiciones operativas del transporte. Adicionalmente, se observa que la difusión del polvo proveniente de minas a cielo abierto impacta de manera significativa la calidad ambiental en la provincia de Hebei y la ciudad de Tianjin. Los hallazgos subrayan la necesidad de implementar estrategias de control del polvo en corredores mineros. En conjunto, los resultados proporcionan una guía teórica para la evaluación y mitigación de la contaminación por polvo vial. Este estudio contribuye al diseño de políticas ambientales más efectivas en entornos mineros.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

Según Olarte (2017) en su tesis titulada "Implementación del Mantenimiento de Neumáticos en la Unidad Productiva Uchucchacua – Lima, Compañía de Minas Buenaventura S.A.A." la empresa Mega Representaciones S.A. ha desarrollado, un sistema de gestión y control de neumáticos orientado a la reducción de los costos operativos y a la mejora de la eficiencia operacional. Este sistema se fundamenta en la identificación de las necesidades técnicas y económicas de las unidades mineras, lo que demanda un compromiso conjunto entre el proveedor del servicio y la empresa usuaria. Los neumáticos representan aproximadamente el 30 % del costo operativo total de una operación minera, proporción que puede incrementarse significativamente en ausencia de una gestión técnica adecuada. Ante esta problemática, desde el año 2003 se implementaron talleres especializados en diversas unidades mineras del Perú, sustentados en procedimientos estandarizados y en el cumplimiento de normas de trabajo seguro, en concordancia con los lineamientos del Ministerio de Energía y Minas.

El autor también indica que la aplicación de esta filosofía de gestión se desarrolló en la U. P. Uchucchacua, perteneciente a la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A., una de las principales productoras de plata del país. La unidad minera cuenta con una flota de equipos de bajo perfil, tales como Scooptram, Jumbos, Dumper y Scaler, destinados a operaciones de perforación, desatado, carguío y transporte en condiciones exigentes de minería subterránea. La experiencia acumulada permitió integrar las áreas de Logística y Mantenimiento con el objetivo de incrementar

la vida útil de los neumáticos, optimizar los costos de operación y mejorar la disponibilidad de los equipos. Los mantenimientos aplicados fueron de carácter preventivo e incluyeron actividades de instalación, desmontaje, montaje, inflado y traslado de neumáticos, contribuyendo a la continuidad operativa y a la reducción de riesgos.

Según Mendoza (2016) en la tesis titulada "Tipificación de las causas que influyen en la vida útil de los neumáticos de volquetes y su incidencia en la producción de la mina Toquepala." tiene como objetivo principal identificar los factores que influyen en la prolongación de la vida útil de los neumáticos empleados en las operaciones de la Mina Toquepala, con la finalidad de contribuir a la reducción de los costos asociados a su consumo excesivo. En el contexto de la minería a tajo abierto, si bien las actividades de perforación y voladura constituyen etapas fundamentales del proceso productivo, el transporte del material fragmentado representa una de las operaciones más exigentes desde el punto de vista operativo y económico, debido a los elevados volúmenes de material movilizado y a las extensas distancias recorridas por los equipos de acarreo.

El autor también indica el inadecuado mantenimiento de los neumáticos, el incorrecto control de la presión de inflado y las deficientes condiciones de las vías de acarreo incrementan de manera significativa el desgaste prematuro de estos componentes críticos. Esta situación conlleva a reemplazos anticipados, afectando negativamente la eficiencia operativa y elevando los costos de producción. En ese sentido, el problema abordado por la tesis permite generar información relevante sobre las causas que inciden en el deterioro de los neumáticos, proporcionando una base técnica para el desarrollo de una gestión integral que favorezca la productividad del acarreo, la optimización de recursos y la sostenibilidad económica de la operación minera.

Según Taquima (2017) en su investigación de grado titulada "Eficiencia en el rendimiento de neumáticos de camiones gigantes mediante el sistema de administración de movimiento de tierra Michelin (M.E.M.S. Evolutión 2) Mina Antapaccay" la unidad minera está constituida por los tajos Norte y Sur, cuya

explotación se inició en el primer trimestre de 2012 y a mediados de 2017, respectivamente. El tajo Sur presenta dimensiones aproximadas de 600 m de ancho, 400 m de largo y una profundidad cercana a los 60 m, operando con una flota de carguío compuesta por una pala hidráulica y dos palas eléctricas, con capacidades de 45, 42 y 75 yd^3. El sistema de acarreo emplea camiones de gran capacidad, entre 240 y 400 toneladas cortas, destacando los modelos Caterpillar 797F y Komatsu 930E, los cuales movilizan aproximadamente 200 000 toneladas diarias. Se prevé que, al alcanzar la plena operatividad, el volumen de material transportado se incremente significativamente.

En este contexto el autor resalta que la industria minera, en su búsqueda constante de mayor eficiencia y reducción de costos, demanda equipos de transporte y carguío de capacidades cada vez mayores, lo que ha implicado una evolución sustancial en el diseño y desempeño de los neumáticos OTR. Actualmente, estos componentes alcanzan diámetros superiores a 4 m y soportan cargas mayores a 100 000 kg, lo que exige una adecuada selección técnica en función de las condiciones operativas, tales como tracción, abrasión, velocidad y carga. Un factor crítico para su desempeño es el control de la presión de inflado, directamente relacionada con la capacidad de carga y la vida útil del neumático. En este sentido, el monitoreo continuo de variables como TKPH, temperatura y presión, mediante sistemas electrónicos especializados como el Michelin Earthmover Management System (MEMS), permite optimizar la gestión de neumáticos, reducir detenciones no programadas y mejorar la disponibilidad de los equipos de acarreo.

Según Alvarado y Malpartida (2019) en su tesis titulada “Sistema de gestión de mantenimiento para la durabilidad de los neumáticos O.T.R. para camiones de acarreo en mina con soporte informático. Marcona 2018” se diseñó e implementó un sistema de gestión de mantenimiento orientado a incrementar la durabilidad de los neumáticos OTR empleados en camiones de acarreo en operaciones mineras. La investigación adoptó un diseño cuasi experimental, aplicado a neumáticos de las marcas Bridgestone y Michelin, los cuales operaron en camiones de los modelos Caterpillar 785 y Komatsu HD1500. La evaluación de la durabilidad se realizó mediante un análisis comparativo

en dos etapas: una medición previa a la aplicación del sistema de mantenimiento y una medición posterior a su implementación, con el objetivo de identificar variaciones atribuibles a la gestión propuesta.

Los autores indican que para el análisis estadístico de los resultados se empleó la prueba t de Student, permitiendo contrastar las medias de durabilidad de los neumáticos en las fases pre y post intervención. Los resultados evidenciaron la existencia de una diferencia estadísticamente significativa entre ambas medias, lo que demuestra el impacto positivo del sistema de gestión de mantenimiento implementado. En consecuencia, se concluyó que la aplicación sistemática de estrategias de mantenimiento contribuye de manera significativa al incremento de la vida útil de los neumáticos OTR, constituyéndose en un antecedente relevante para estudios orientados a la optimización de costos y mejora de la eficiencia operativa en el acarreo minero.

Según Cruz (2021) en su investigación de grado titulada “Aplicación del análisis TKPH para determinar los neumáticos OTR óptimos para la operación en la flota de acarreo Caterpillar 793F - Mina Constancia” resalta que la temperatura de operación constituye uno de los principales parámetros que influyen directamente en la vida útil de los neumáticos utilizados en el acarreo minero. La adecuada selección del neumático, en función de las condiciones reales de explotación, permite mejorar el rendimiento operativo, incrementar la producción y fortalecer la seguridad en la operación de los camiones mineros. En este contexto, el estudio tuvo como propósito evaluar la idoneidad de los neumáticos empleados en la flota de acarreo Caterpillar 793F, mediante la aplicación del análisis de TKPH (Toneladas Kilómetro por Hora), considerando los parámetros operativos de la Mina Constancia.

El investigador plantea que para el desarrollo del análisis se utilizó como base la información correspondiente a los ciclos de acarreo registrados entre enero y julio de 2019, recopilándose datos de cargas transportadas, tiempos de ciclo y distancias recorridas. A partir de esta información se evaluó la distribución de cargas y el cumplimiento de los parámetros de producción establecidos, determinándose las cargas y velocidades medias necesarias para el cálculo del TKPH de operación. Posteriormente, se realizó una comparación entre el TKPH de explotación y el TKPH

máximo especificado por el fabricante del neumático, con el fin de identificar posibles desviaciones operativas. Finalmente, el estudio formuló recomendaciones orientadas al control operativo y al incremento de la vida útil de los neumáticos, contribuyendo a una gestión más eficiente del acarreo minero.

Según Valdez (2022) en su tesis titulada “Mantenimiento correctivo de camiones volquetes en los neumáticos en las Minas de Tajo Abierto” presenta como objetivo describir y analizar el mantenimiento correctivo aplicado a los neumáticos de camiones volquetes que operan en minas a tajo abierto, considerando que estos equipos constituyen un componente crítico dentro de la cadena de los procesos productivos mineros. La investigación se enmarca en un enfoque aplicado con una variante tecnológica, dado que no se limita únicamente al diagnóstico del estado de los neumáticos, sino que busca comprender los mecanismos que originan su desgaste durante las operaciones de transporte de relaves y materiales desde las zonas de explotación hacia los puntos de descarga, actividad caracterizada por condiciones operativas severas.

La autora muestra los resultados obtenidos que evidenciaron aproximadamente el 80 % de los camiones volquetes evaluados presentan una reducción significativa en la vida útil de sus neumáticos, lo que conlleva a su retiro total antes de alcanzar el rendimiento esperado. Este comportamiento se asocia al incremento de las horas de operación, lo cual genera un desgaste mecánico progresivo en los equipos y una pérdida de resistencia y durabilidad en los neumáticos. En consecuencia, el estudio resalta la importancia de una gestión técnica del mantenimiento orientada a prolongar el ciclo de vida de los neumáticos, optimizar la disponibilidad de los equipos y reducir los costos asociados a reemplazos prematuros.

Según Vera (2024) en su tesis titulada “Implementación de un sistema de seguridad hidráulico en Scooptram ST-2D para reducir accidentes e incidentes en mantenimiento de neumáticos” indica que de acuerdo con el Artículo 1 del D.S. N.° 024-2016-EM, modificado por el D.S. N.° 023-2017-EM, el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería tiene como finalidad prevenir la ocurrencia de incidentes, accidentes de trabajo y enfermedades ocupacionales, promoviendo una

cultura de prevención de riesgos laborales en la actividad minera. Dicho marco normativo establece la participación articulada de trabajadores, empleadores y el Estado para garantizar su promoción, difusión y cumplimiento, conforme a lo dispuesto en el Diario Oficial El Peruano (2017). En concordancia con este marco legal, la presente investigación se orienta al control y reducción de accidentes asociados a la operación de equipos subterráneos tipo scooptram.

En ese sentido el autor resalta que el estudio tiene como ámbito de aplicación la empresa Minera Volcan y otras operaciones con condiciones similares, ubicadas en la región Pasco, con el objetivo de fortalecer las estrategias de mantenimiento de neumáticos. Para ello, se realizó una revisión de casos de accidentes e incidentes ocurridos en la unidad Volcan – Cerro de Pasco y en otras operaciones mineras comparables, poniendo énfasis en los enfoques de mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo. Se analizó la relación entre el mantenimiento de neumáticos, la disponibilidad y la confiabilidad mecánica de los equipos, como factores clave para el cumplimiento del programa mensual de producción y la mejora de la seguridad operativa.

Según Teran (2016) en su investigación de grado titulada “Optimización de los sistemas de control para mejorar la vida útil de los neumáticos de camiones gigantes en Minera Yanacocha, 2016” tiene como objetivo optimizar la vida útil de los neumáticos empleados en camiones de gran capacidad mediante la aplicación de un sistema integral de control en operaciones de minería a tajo abierto. Para tal fin, se desarrolló un procedimiento técnico de carácter complejo que permitió el monitoreo y la identificación de fallas potenciales en las etapas previas, durante y posteriores a la operación de acarreo. Dicho control se realizó a través de un sistema de despacho operacional tipo Dispatch, complementado con herramientas de software orientadas al seguimiento de variables críticas como presión de inflado, temperatura de operación, velocidad, TKPH óptimo del neumático y condiciones de las vías de acarreo.

De acuerdo con el autor, el estudio incluyó un análisis técnico y una estimación teórica de los niveles de inversión asociados al consumo de neumáticos en camiones gigantes, considerando su desempeño y vida útil en función de parámetros operativos

reales. Como caso de estudio se utilizó el camión Caterpillar 793D, empleando información técnica y operativa como base para una aproximación cuantitativa referencial. Los resultados obtenidos evidenciaron mejoras significativas en la gestión de neumáticos, apoyadas por sistemas de control especializados como el sistema B-TAG de Bridgestone, lo que demuestra el potencial de este enfoque para generar ahorros económicos sustanciales y fortalecer futuras investigaciones de carácter tecnológico aplicadas a las operaciones de carguío y acarreo de material mineral.

Según Pauca (2014) en su tesis titulada "Estudio de temperatura para control de daños y selección de neumáticos gigantes 46/90r57 Sociedad Minera Cerro Verde" tuvo como objetivo principal evaluar el desempeño operativo de estos neumáticos con la finalidad de prolongar su vida útil en la Sociedad Minera Cerro Verde. El estudio se desarrolló a partir de una caracterización integral del contexto minero, que incluyó la ubicación geográfica y las principales características del asiento minero, así como el análisis de la geología local y regional, la mineralización presente y las reservas geológicas y minerales. Se describieron los aspectos técnicos del ciclo de minado a tajo abierto, enfocados en la explotación de cobre y molibdeno.

El autor en el desarrollo del estudio analizó de manera específica el comportamiento térmico de los neumáticos gigantes 46/90R57, considerando la temperatura de operación como un factor crítico para el control de daños y la seguridad en su uso. Los resultados se obtuvieron a partir de análisis comparativos de temperaturas de trabajo, presiones en frío, valores de TKPH, cargas soportadas, daños prematuros y niveles de consumo. A partir de estos parámetros se estimó la vida útil óptima de los neumáticos, evidenciando la importancia de una adecuada selección y control operativo como herramientas fundamentales para mejorar el rendimiento, reducir fallas prematuras y optimizar los costos asociados al acarreo en operaciones de minería a tajo abierto.

Según Mena y Zaa (2017) en su trabajo de investigación para titulación "Análisis de Viabilidad de Importación de Neumáticos para Maquinaria pesada para el Mercado de Madre de Dios, 2016" indican que el Perú posee una reconocida riqueza geológica que lo posiciona como uno de los principales destinos de inversión minera a

nivel mundial, respaldado por una larga tradición extractiva y un entorno de estabilidad económica. El país se sitúa entre los mayores productores de metales como oro, plata, hierro, estaño, molibdeno y plomo, lo que refleja la diversidad y magnitud de sus recursos naturales. En este contexto, la minería constituye una de las actividades económicas de mayor impacto en el desarrollo regional, particularmente en la región Madre de Dios, donde la presencia de numerosas operaciones mineras ha generado una elevada demanda de maquinaria pesada y, consecuentemente, de insumos críticos como los neumáticos especializados.

Bajo este escenario las autoras de la investigación referida tuvieron como objetivo analizar la viabilidad técnica y económica de la importación y comercialización de neumáticos para maquinaria pesada destinados al mercado minero de Madre de Dios, caracterizado por precios elevados y limitada oferta. La evaluación financiera del proyecto evidenció resultados favorables, con una Tasa Interna de Retorno Económica (TIR) de 67,40 % y un Valor Actual Neto Económico (VANE) de S/. 3 169 509,73, indicadores que confirman la rentabilidad de la inversión. El análisis de los flujos de caja netos mostró valores positivos y una ganancia mensual aceptable, lo que ratifica la viabilidad del proyecto y sustenta su potencial como alternativa competitiva en el abastecimiento de neumáticos para el sector minero regional.

Según Pomari y Pomari (2015) en su tesis titulada “Análisis, modelamiento y simulación del transporte neumático en fase densa para su aplicación en procesos industriales” indican que el transporte neumático constituye un proceso de alta relevancia para el movimiento de materiales sólidos a granel, al integrar principios de la mecánica de fluidos, la dinámica de partículas y el diseño de máquinas, entre otras áreas de la ingeniería. El análisis de este proceso resulta complejo debido a la naturaleza multifásica del sistema, en el cual la interacción entre el gas transportador y las partículas sólidas genera fenómenos no lineales difíciles de modelar, tales como colisiones interparticulares y choques contra las paredes de la tubería. Estas interacciones influyen de manera significativa en las pérdidas de energía, el desgaste de los conductos y la eficiencia global del sistema.

Los autores tuvieron como objetivo fundamental un sistema de transporte neumático para movilizar materiales sólidos desde un punto de origen hacia un punto de destino mediante un flujo de gas a presión positiva o negativa a través de una red de tuberías. Este tipo de sistemas permite el transporte de partículas finas, del orden de micrones, hasta materiales con tamaños cercanos a los 20 mm, en trayectorias horizontales y verticales, alcanzando distancias de hasta dos kilómetros y capacidades del orden de 1000 t/h. En este contexto, la presente investigación propone el análisis, modelamiento y simulación del transporte neumático en fase densa, con énfasis en sus aplicaciones industriales y mineras, destacando su potencial como alternativa eficiente y poco explorada en el ámbito nacional.

Según Vizcarra (2025) en su investigación de grado “Gestión de neumáticos en camiones mineros Komatsu 930E en Unidad Minera Las Bambas – MMG” analiza la gestión de neumáticos en camiones mineros Komatsu 930E que operan en la unidad minera Las Bambas, operada por MMG, con el propósito de mejorar el rendimiento operativo, reducir los costos asociados y fortalecer la seguridad en las operaciones de minería a cielo abierto. Los neumáticos constituyen un recurso crítico debido a su elevado costo de adquisición y a su influencia directa en la disponibilidad mecánica y la productividad de la flota de acarreo. En este contexto, la investigación se orienta al análisis integral del ciclo de vida de los neumáticos como un componente estratégico dentro de la gestión de activos mineros.

El autor considera variables clave como la selección técnica del neumático, las prácticas de mantenimiento preventivo, el monitoreo del desgaste, los modos y patrones de falla, así como las estrategias de reutilización o recauchutado. Para ello, se analizan datos operativos, registros históricos de mantenimiento y condiciones reales de trabajo en la mina, con el fin de identificar oportunidades de mejora en la gestión de estos componentes. Los resultados del análisis permiten formular recomendaciones orientadas a prolongar la vida útil de los neumáticos, reducir el índice de fallas, optimizar el consumo de combustible y minimizar los costos operativos, contribuyendo así a una gestión más eficiente y sostenible del acarreo minero en la operación de Las Bambas.

Según Cahuana (2019) en su investigación de grado “Plan de monitoreo para reducir costos de consumo de neumáticos en operación de camiones Komatsu 930e – 4se. Caso: Minera Las Bambas” indica que un plan sistemático de monitoreo de neumáticos OTR para camiones mineros Komatsu 930E-4SE constituye una estrategia técnica orientada a enfrentar el problema del elevado consumo de estos componentes críticos. La formulación de dicho plan requiere, como punto de partida, el análisis de las horas promedio de rendimiento alcanzadas por los neumáticos antes de ser destinados a condición de desecho. El uso de herramientas estadísticas permite identificar y clasificar los distintos tipos de fallas recurrentes, las cuales fueron corroboradas mediante la inspección física de los neumáticos dispuestos en la plataforma de residuos de la operación minera. Este enfoque integral facilita la comprensión de los mecanismos de deterioro predominantes y su relación con las condiciones operativas. De esta manera, se establece una base objetiva para la toma de decisiones orientadas a mejorar la gestión del ciclo de vida del neumático. El análisis técnico contribuye directamente a la optimización de los costos operativos asociados al acarreo minero.

El autor discierne que la implementación de parámetros operativos para la gestión de los neumáticos se definió a partir de indicadores vinculados a variables independientes clave, tales como la temperatura de operación, la presión de inflado, la carga aplicada en cada neumático, la velocidad de desplazamiento y el control del desgaste remanente en la banda de rodamiento. La correcta gestión de estas variables permitió reducir significativamente la incidencia de fallas por arranque de goma y, en consecuencia, incrementar las horas efectivas de operación del neumático en relación con el desgaste de la banda de rodamiento. Como resultado de la aplicación del plan de monitoreo, los indicadores de desempeño obtenidos durante el año 2018 evidenciaron mejoras sustanciales. En particular, se registró una reducción del costo de operación del orden de 3,00 dólares por hora por neumático en comparación con los periodos 2016 y 2017. Estos resultados confirman la efectividad técnica y económica de la estrategia propuesta. En conjunto, el estudio demuestra la relevancia del monitoreo sistemático como herramienta de optimización en la gestión de neumáticos mineros.

Según Tejada (2014) en su investigación de grado “Metodología del cambio de posiciones 1 y 6 de neumáticos gigantes 793-D, para incrementar la vida útil y reducir costos en Sm. Cerro Verde – Arequipa” indica que el problema central de la presente investigación se fundamenta en la escasez de neumáticos gigantes fuera de carretera para camiones CAT 793D, situación que motivó la búsqueda de alternativas técnicas orientadas a incrementar su vida útil. En este contexto, el objetivo general del estudio fue explicar la influencia del cambio sistemático de rotaciones y posiciones de los neumáticos 46-50R57 —desde las posiciones uno y dos, hacia tres y cuatro, y posteriormente a cinco y seis— en la prolongación de su vida útil en camiones Caterpillar 793D. La investigación se desarrolló en la mina Cerro Verde, ubicada en la región Arequipa. La metodología empleada incluyó, en primer lugar, una revisión exhaustiva del marco teórico, la cual evidenció que la rotación de neumáticos constituye una práctica fundamental para prolongar la vida de la banda de rodamiento. Se identificó que, en neumáticos radiales de camiones mineros, no es necesario conservar el mismo sentido de rotación. Estos criterios técnicos sirvieron de base para la propuesta metodológica del estudio.

El autor muestra que la revisión bibliográfica también permitió establecer lineamientos técnicos para la correcta gestión de los neumáticos, tales como la reubicación de neumáticos con desgaste irregular hacia ejes motrices o libres y la inversión de posiciones en conjuntos duales con desgaste diferencial. Para vehículos con neumáticos direccionales en todas las posiciones, se recomienda montar los neumáticos nuevos en el eje delantero y retirarlos antes de alcanzar un desgaste de 4 a 5 milímetros, para su posterior reasignación a otros ejes. Desde el punto de vista estructural, el estudio consideró las características de los neumáticos radiales, cuya arquitectura reduce el roce y el consumo energético, mejora la adherencia y disminuye el desgaste. La carcasa radial, compuesta por capas metálicas y cinturones de acero, permite disociar el trabajo de la cima y los flancos, otorgando mayores prestaciones mecánicas. Esta configuración proporciona mayor resistencia a perforaciones, mayor espesor de goma y una longevidad superior. En conjunto, estas propiedades explican el potencial de los neumáticos radiales para incrementar la vida útil y mejorar la seguridad y eficiencia en operaciones mineras de gran escala.

Según Minaya (2021) en su tesis titulada “Implementación de la metodología Six Sigma para mejorar la vida útil de neumáticos de camiones mineros en el proyecto mina Justa” se expone el planteamiento metodológico del estudio, así como la justificación que sustenta la relevancia técnica y económica de la investigación, aborda la terminología y los conceptos fundamentales asociados a la gestión de neumáticos, incluyendo su definición, funciones, componentes y los tipos de neumáticos empleados en camiones mineros. Se presenta una descripción detallada de la empresa objeto de estudio, acompañada de una reseña histórica de la unidad minera. Se describe el área de mina y los principales procesos unitarios que se desarrollan en la operación. Esta estructura inicial permite contextualizar el estudio dentro del entorno operativo real.

El autor desarrolla la metodología Six Sigma aplicada a la gestión de neumáticos, iniciando con la descripción general del enfoque y continuando con el desarrollo de las fases del proyecto. En la fase Definir se establecen el problema, los objetivos y los requerimientos críticos de calidad. La fase Medir se orienta a la cuantificación de los parámetros críticos, con el fin de determinar el estado actual del desempeño de los neumáticos y sus causas raíz. En la fase Analizar se evalúan los resultados obtenidos mediante herramientas como el diagrama de Pareto y el diagrama causa–efecto. Posteriormente, en la fase Mejorar se proponen oportunidades de optimización empleando técnicas cualitativas y cuantitativas que permitan incrementar el rendimiento de los neumáticos. Finalmente, en la fase Controlar se diseña un sistema de indicadores para el seguimiento continuo del desempeño, cierra el estudio con la evaluación financiera y económica, cuantificando el beneficio neto generado para la organización tras la implementación de las mejoras propuestas.

Según Taquima (2017) en su tesis titulada “Eficiencia en el rendimiento de neumáticos de camiones gigantes mediante el sistema de administración de movimiento de tierra Michelin (M.E.M.S. Evolutión 2) Mina Antapaccay” el análisis se realiza en dos principales frentes de explotación: el tajo Sur y el tajo Norte, cuya puesta en operación se inició en el primer trimestre de 2012 y a mediados del año 2017, respectivamente. El tajo Sur presenta actualmente dimensiones aproximadas de seiscientos metros de ancho, cuatrocientos metros de largo y una profundidad cercana

a los sesenta metros. En esta área operan tres equipos de carguío, compuestos por una pala hidráulica y dos palas eléctricas, con capacidades de 45, 42 y 75 yardas cúbicas. El sistema de acarreo está conformado por camiones de distintas capacidades, que varían entre 240 y 400 toneladas cortas. Entre los equipos de mayor capacidad destacan los modelos Caterpillar 797F y Komatsu 930E, los cuales permiten movilizar alrededor de doscientas mil toneladas diarias. Se proyecta que, al alcanzar la plena operatividad, el volumen de material transportado, tanto de mineral como de desmonte, experimente un incremento significativo. Este contexto operativo refleja la tendencia del sector minero hacia el uso de equipos de mayor capacidad, orientada a mejorar la eficiencia y reducir los costos unitarios de operación.

El autor nota el aumento progresivo en el tamaño y capacidad de los equipos de carguío y transporte ha exigido un desarrollo paralelo en la tecnología de neumáticos fuera de carretera, los cuales han evolucionado considerablemente en dimensiones y capacidad de carga. Actualmente, el desempeño óptimo de los neumáticos depende de una adecuada selección, considerando factores como tracción, abrasión, velocidad y capacidad de carga, siendo la presión de inflado el parámetro más crítico para su funcionamiento. Un control inadecuado de la presión y de indicadores como el TKPH puede generar fallas prematuras y detenciones no programadas. En este contexto, el monitoreo electrónico mediante sistemas como el Michelin Earthmover Management System permite supervisar en tiempo real la presión y temperatura de los neumáticos, ajustando automáticamente las recomendaciones operativas según las condiciones internas. Este sistema posibilita una gestión remota y continua, reduciendo la necesidad de inspecciones manuales y mejorando la disponibilidad de los equipos. La integración del software con plataformas de gestión minera como Modular Mining Systems facilita la visualización y análisis de datos, contribuyendo a una operación más segura, eficiente y confiable.

2.1.3 Antecedentes Locales

Según Cornejo (2020) en su investigación de grado "Análisis del desgaste de neumáticos para reducir costos de operación en volquetes Mercedes Benz Actros 4144k 8x4 en la empresa Aruntani S.A.C. - U.M. Tukari" propone un procedimiento sistemático de control del desgaste de neumáticos orientado a la reducción de los costos de operación en volquetes Mercedes Benz Actros 4144K 8×4, pertenecientes a la Unidad Minera Tukari de la empresa Aruntani S.A.C. El desarrollo del trabajo se inicia con una sección introductoria en la que se establecen los objetivos, la hipótesis de investigación, las variables de estudio y la revisión de antecedentes relacionados. Posteriormente, se construye el marco conceptual, en el cual se presentan definiciones y fundamentos técnicos necesarios para el desarrollo del estudio. Entre estos se incluyen la definición del neumático, sus componentes principales, criterios de selección, prácticas de mantenimiento, procesos de reencauche y verificación de reparaciones. Esta base teórica permite sustentar técnicamente el análisis posterior. Se garantiza la coherencia metodológica del estudio. De este modo, se estructura un marco integral para la evaluación del desempeño de los neumáticos en operación minera.

El autor desarrolla el análisis técnico de los neumáticos, iniciando con el diagnóstico del estado operativo y continuando con la evaluación de las prácticas de mantenimiento y reparación aplicadas. El estudio incluye el análisis del reencauche, la evaluación de los recorridos de transporte y el estado de las vías, factores que influyen directamente en el desgaste de los neumáticos. Con base en este análisis, se formula una propuesta de mejora y se realiza un análisis comparativo con la situación inicial. Posteriormente, se verifican los resultados obtenidos para demostrar la efectividad de la propuesta planteada. Se efectúa un análisis económico con el fin de cuantificar los beneficios y validar la optimización de costos alcanzada. El trabajo concluye con la presentación de las conclusiones generales, los anexos técnicos y la elaboración de la ingeniería de detalle correspondiente. En conjunto, la tesis proporciona una herramienta técnica para mejorar la gestión de neumáticos en operaciones mineras.

Según Cajavilca (2015) en su tesis titulada "Implementación del sistema michelin earthmover management system evolution 2 en la flota de volquetes mina

Cuajone" el autor puede deducir que el inflado de neumáticos en volquetes mineros suele ejecutarse sin la certeza de que la presión aplicada sea la óptima para las condiciones reales de operación, particularmente frente a variaciones de temperatura y carga. La inspección de presión y temperatura se realiza de manera manual, lo que incrementa la probabilidad de errores operativos. Esta práctica provoca que los neumáticos trabajen sobrecargados, especialmente en pendientes negativas, generando daños estructurales como separaciones entre capas internas. Como consecuencia, se reduce significativamente la vida útil del neumático y se incrementan los costos asociados a su reposición. Adicionalmente, el sobrecalentamiento ocasiona paradas no programadas de los equipos con la finalidad de enfriar los neumáticos. Estas detenciones impactan negativamente en la disponibilidad mecánica de la flota. En conjunto, dichas deficiencias operativas generan pérdidas económicas relevantes para la operación minera.

En este contexto, el autor aborda una solución tecnológica orientada a la gestión eficiente de neumáticos mineros. La investigación integra criterios técnicos y económicos enfocados en el control en tiempo real de la presión y temperatura de los neumáticos de los volquetes. Para ello, se evalúa la aplicación del sistema Michelin Earthmover Management System Evolution 2, el cual utiliza sensores instalados en los neumáticos para la recopilación continua de datos operativos. Esta información permite una toma de decisiones oportuna y fundamentada, reduciendo el riesgo de fallas prematuras. La implementación del sistema contribuye a mejorar la seguridad, optimizar la vida útil de los neumáticos y disminuir las pérdidas económicas asociadas a paradas no programadas. De este modo, se fortalece la eficiencia global de la gestión de la flota minera.

Según Gil (2020) en su investigación titulada "Mejora del sistema de gestión en seguridad y salud en el trabajo para el cambio de neumáticos off the road en la empresa Neuma Perú unidad minera Cuajone", se llevó a cabo en la unidad minera Cuajone, ubicada en la región Moquegua, Perú, en el contexto de operaciones de mantenimiento de neumáticos en minería a cielo abierto. El estudio tuvo como objetivo mejorar el sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo, tomando como base el

cumplimiento de la Ley N.° 29783 y la RM 050-2013-TR. Para ello, se realizó un diagnóstico inicial del estado de la empresa Neuma Perú, evaluando el nivel de cumplimiento normativo y la ocurrencia de accidentes en el periodo analizado. Se desarrolló un marco metodológico basado en mejora continua, sustentado en la identificación de riesgos y en la elaboración de procedimientos operativos seguros.

Los resultados de la investigación evidenciaron que la implementación de un sistema estructurado de gestión en seguridad y salud en el trabajo permite reducir riesgos asociados a las actividades de cambio de neumáticos OTR, una de las tareas más críticas en operaciones mineras. Se concluye que la aplicación de políticas, planes, procedimientos y registros, alineados a la normativa vigente, mejora significativamente el control de riesgos y fortalece la cultura de seguridad en la organización. La validación del sistema mediante listas de verificación e indicadores permitió demostrar su efectividad en el cumplimiento de estándares exigidos por entidades fiscalizadoras. Finalmente, el estudio resalta que la mejora continua y la gestión preventiva son fundamentales para minimizar accidentes y optimizar las condiciones laborales en el sector minero.

Según Davila (2022) en su investigación titulada “Optimización de costos de acarreo y transporte de mineral mediante el incremento de tiempo de vida de los neumáticos en una unidad minera superficial – 2021”, se llevó a cabo en una unidad minera Cuajone, en el contexto de operaciones de acarreo de mineral. El estudio tuvo como objetivo principal evaluar el rendimiento de los neumáticos mediante el parámetro tonelada-kilómetro por hora (TKPH), considerando variables como distancia, velocidad, tonelaje y temperatura. Para ello, se analizaron tres rutas de acarreo durante un periodo de siete semanas, utilizando datos obtenidos del sistema de administración de flota. Se determinó el comportamiento operativo de los volquetes en función de las condiciones de trabajo, permitiendo identificar desviaciones respecto a los límites de operación recomendados.

Los resultados de la investigación demostraron que el control del TKPH y la adecuada asignación de rutas permiten optimizar el rendimiento de los neumáticos, evitando sobrecargas térmicas que reducen su vida útil. Se concluye que la

redistribución de los volquetes hacia rutas con menor exigencia operativa contribuyó a reducir en un 33% el retiro de neumáticos por fallas asociadas a separación térmica, generando además una disminución significativa en los costos unitarios de acarreo. Se evidenció una reducción de hasta 10% en costos durante el primer mes y 8.86% en el segundo mes de aplicación. Finalmente, el estudio resalta que la gestión eficiente de variables operativas es clave para mejorar la productividad y sostenibilidad económica en operaciones mineras a cielo abierto.

Según Torres (2024) en su investigación titulada “Análisis de criticidad y mejora del mantenimiento en equipos de carguío mediante el método AMEF en una operación minera”, desarrollada en Cuajone, en el contexto de optimización de la gestión de mantenimiento de equipos pesados. El estudio tuvo como objetivo principal evaluar los modos y efectos de falla en componentes críticos del sistema de carguío, empleando el método AMEF para identificar riesgos operacionales y establecer prioridades de intervención. Para ello, se analizaron variables como frecuencia de fallas, impacto en la producción y condiciones de operación, integrando información técnica del equipo y registros de mantenimiento. Se planteó un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad, orientado a mejorar la disponibilidad mecánica y reducir paradas no programadas.

Los resultados de la investigación evidenciaron que la aplicación del método AMEF permite identificar de manera sistemática los componentes críticos y establecer estrategias de mantenimiento más eficientes. Se concluye que la implementación de un plan de mantenimiento estructurado mejora significativamente indicadores como el tiempo medio entre fallas (MTBF), el tiempo medio de reparación (MTTR) y la disponibilidad del equipo, alcanzando niveles cercanos al 95%. Se determinó que la priorización de riesgos contribuye a reducir costos operativos y mejorar la seguridad en las operaciones. Finalmente, el estudio resalta la importancia del monitoreo continuo y la gestión preventiva como herramientas clave para optimizar el desempeño de equipos en minería a cielo abierto.

Según Eyzaguirre (2022) en su investigación titulada “Optimización de la disponibilidad mecánica de una flota de camiones grúa aplicando la metodología RCM en la Minera Quellaveco, en el 2022”, se llevó a cabo en la unidad minera Quellaveco, ubicada en la región Moquegua, Perú, en el contexto de la gestión del mantenimiento de equipos auxiliares. El estudio tuvo como objetivo optimizar la disponibilidad mecánica mediante la aplicación de la metodología RCM, identificando modos de falla y estableciendo estrategias de mantenimiento eficientes. Para ello, se analizaron registros históricos de fallas, tiempos de inactividad y criticidad de componentes, considerando además variables operativas como carga, condiciones de vía y exigencia del equipo. En este contexto, los neumáticos forman parte de los componentes críticos del sistema de acarreo, ya que están directamente expuestos a las condiciones operativas y al esfuerzo mecánico continuo durante el transporte de material.

Los resultados evidenciaron que la aplicación del RCM incrementó la disponibilidad mecánica de los equipos, reduciendo fallas no programadas y optimizando la confiabilidad operativa. Se concluye que una adecuada gestión del mantenimiento permite controlar factores que inciden directamente en el desempeño de los neumáticos, como la correcta operación del equipo, la estabilidad en los ciclos de trabajo y la reducción de sobrecargas. Al minimizar paradas imprevistas y condiciones de operación inadecuadas, se evita el deterioro acelerado de los neumáticos, prolongando su vida útil. Finalmente, el estudio resalta que la optimización del mantenimiento no solo mejora la productividad, sino que también contribuye a una gestión más eficiente de los neumáticos, reduciendo costos asociados al desgaste prematuro en operaciones mineras a cielo abierto.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Neumáticos de acarreo en minería a cielo abierto

Los neumáticos de acarreo constituyen uno de los componentes más críticos de los camiones mineros utilizados en operaciones a cielo abierto, debido a que soportan elevadas cargas, trabajan bajo condiciones severas y tienen una incidencia directa en la continuidad operativa y los costos de producción. Según Barlow et al. (2017), el neumático es el único punto de contacto entre el camión y la vía de acarreo, por lo que

su desempeño influye directamente en la eficiencia del transporte de material como se ve en la Figura 01.

Figura 01

Camiones mineros Caterpillar de gran porte, diseñados para operar en minería a cielo abierto.



Nota: Caterpillar reconoció el récord global de disponibilidad operativa alcanzado por los camiones 797F. Este hito se logró en la Unidad Minera Cuajone.

En minería a cielo abierto, los neumáticos OTR (Off-The-Road) están diseñados para operar bajo altas presiones, elevadas temperaturas y condiciones variables de terreno. Su desempeño está condicionado por factores como el tipo de compuesto de caucho, la estructura interna, el diseño de la banda de rodamiento y las condiciones operativas del camión, una gestión inadecuada puede derivar en fallas prematuras, pérdidas económicas y riesgos operacionales (Gent & Walter, 2006).

2.2.2 Compuestos de caucho en neumáticos mineros

El compuesto del neumático es una mezcla compleja de caucho natural, caucho sintético, negro de humo, aditivos químicos y agentes de vulcanización, cuya formulación determina propiedades clave como resistencia al desgaste, generación de calor, elasticidad y resistencia a cortes. De acuerdo con Mark (2014), la selección del compuesto es un factor determinante para la vida útil del neumático en aplicaciones mineras.

Los compuestos diseñados para minería a cielo abierto buscan un equilibrio entre resistencia a la abrasión y control térmico. Un compuesto con alta resistencia al desgaste puede presentar mayores pérdidas por histéresis, incrementando la temperatura interna del neumático y acelerando su degradación (Persson, 2000). Por ello, la evaluación del tipo de compuesto debe realizarse considerando las condiciones específicas de operación.

2.2.3 Vida útil del neumático de acarreo

La vida útil del neumático de acarreo se define como el período durante el cual este puede operar de forma segura y eficiente hasta alcanzar el límite mínimo de diseño de la banda de rodamiento o presentar daños estructurales irreparables. Según Naderi y Jalali (2018), la vida útil no depende únicamente del diseño del neumático, sino de la interacción entre el compuesto, la carga, la temperatura y el entorno operativo.

En minería a cielo abierto, la vida útil suele expresarse en horas de operación o en toneladas-kilómetro por hora (TKPH), indicador que relaciona la carga transportada con la velocidad y el tiempo de operación. Un control inadecuado del TKPH puede provocar sobrecalentamiento, separación de capas y fallas catastróficas del neumático (Michelin, 2020).

2.2.4 Condiciones operativas en el transporte minero

Las condiciones operativas comprenden el conjunto de variables que influyen en el desempeño del neumático durante su ciclo de vida, entre ellas: carga por eje, presión de inflado, velocidad de operación, temperatura ambiente y estado de las vías de acarreo. De acuerdo con Thompson y Visser (2003), estas variables tienen un impacto directo en la tasa de desgaste y en la generación de calor del neumático.

Una sobrecarga constante incrementa las tensiones internas del neumático y acelera el deterioro del compuesto, mientras que una presión de inflado incorrecta puede generar desgaste irregular, fallas por fatiga y reducción significativa de la vida útil. Por ello, el control operativo constituye un elemento clave dentro de la gestión de neumáticos en minería.

2.2.5 Temperatura y presión de inflado

La temperatura interna del neumático es uno de los principales factores que condicionan su desempeño y durabilidad. Estudios realizados por Barlow et al. (2017) demuestran que el aumento excesivo de temperatura acelera los procesos de envejecimiento del caucho y reduce la resistencia mecánica del compuesto.

La presión de inflado cumple la función de soportar la carga del camión; por tanto, debe ajustarse de acuerdo con el peso transportado y las recomendaciones del fabricante. Una presión inferior a la adecuada incrementa la flexión del neumático y la generación de calor, mientras que una presión excesiva reduce el área de contacto y acelera el desgaste de la banda de rodamiento (Gent & Walter, 2006).

2.2.6 Desgaste de la banda de rodamiento

El desgaste de la banda de rodamiento es el principal criterio para evaluar el estado del neumático durante su vida útil. Este desgaste puede presentarse de forma uniforme o irregular, dependiendo de las condiciones de operación y del compuesto utilizado. Según Persson (2000), el desgaste abrasivo está directamente relacionado con la interacción entre el neumático y la superficie de rodadura.

En minería a cielo abierto, el estado de las vías de acarreo juega un rol fundamental, ya que superficies con alta rugosidad, presencia de rocas angulares y deficiente mantenimiento incrementan el desgaste acelerado del neumático, reduciendo su rendimiento económico.

2.2.7 Gestión de neumáticos en minería

La gestión de neumáticos comprende el conjunto de estrategias técnicas, operativas y económicas orientadas a maximizar la vida útil del neumático y minimizar los costos asociados. Según Parra et al. (2019), una gestión eficiente debe integrar monitoreo continuo, análisis de desempeño y toma de decisiones basada en indicadores.

El uso de sistemas de monitoreo de presión y temperatura en tiempo real permite detectar condiciones anómalas y aplicar acciones correctivas oportunas, reduciendo fallas prematuras y mejorando la disponibilidad de los equipos de acarreo.

2.2.8 Impacto económico del desempeño de neumáticos

Los neumáticos representan uno de los mayores costos operativos en el transporte minero, solo superados por el combustible y el mantenimiento del equipo. De acuerdo con Naderi y Jalali (2018), una reducción marginal en la vida útil del neumático puede traducirse en pérdidas económicas significativas a escala anual.

Por ello, evaluar el impacto del tipo de compuesto y las condiciones operativas resulta fundamental para optimizar costos, mejorar la productividad y garantizar la sostenibilidad económica de las operaciones mineras a cielo abierto.

2.3 Definición de términos

Neumáticos de acarreo (OTR)

Los neumáticos de acarreo, también conocidos como OTR (Off-The-Road tires), son componentes diseñados específicamente para vehículos de gran tonelaje utilizados en minería a cielo abierto, construcción y movimiento de tierras. Se caracterizan por soportar cargas extremadamente elevadas, operar en condiciones severas de abrasión, temperatura y deformación, y garantizar la tracción y estabilidad del equipo en condiciones no pavimentadas. Su desempeño influye directamente en la productividad y seguridad de las operaciones mineras (Yamaguchi & Nishimura, 2019).

Compuesto del neumático

El compuesto del neumático es la formulación de materiales elastoméricos (principalmente caucho natural y sintético) junto con aditivos como negro de humo, aceites, azufre y agentes de refuerzo, que determinan sus propiedades mecánicas y térmicas. La variación en la composición del compuesto influye directamente en la resistencia al desgaste, la generación de calor y la durabilidad del neumático bajo condiciones operativas exigentes (Gent, 2012).

Vida útil del neumático

La vida útil del neumático se define como el periodo de operación o cantidad de horas de servicio desde su instalación hasta su retiro, condicionado por criterios de desgaste, fallas estructurales o pérdida de eficiencia operativa. Este indicador es fundamental en

la gestión de activos mineros, ya que permite evaluar el desempeño económico y técnico del neumático dentro del ciclo de operación (Smith, 2018).

Condiciones operativas

Las condiciones operativas hacen referencia al conjunto de variables que afectan el desempeño del neumático durante su funcionamiento, tales como la carga transportada, velocidad de operación, temperatura de trabajo, condiciones del camino (rugosidad, pendiente, material suelto) y hábitos de conducción. Estas variables tienen una relación directa con la tasa de desgaste y la probabilidad de falla del neumático (ISO 15222, 2011).

Desgaste del neumático

El desgaste del neumático es el proceso progresivo de pérdida de material en la banda de rodadura debido a la fricción con la superficie de rodamiento y a las condiciones de operación. Este fenómeno reduce la profundidad del dibujo, afecta la tracción y finalmente limita la vida útil del neumático (Gent, 2012).

Flota de acarreo

La flota de acarreo está compuesta por los equipos móviles utilizados para el transporte de material en operaciones mineras, principalmente camiones mineros de gran capacidad. Su eficiencia depende en gran medida del estado mecánico de sus componentes, siendo los neumáticos uno de los elementos más críticos en términos de costo y disponibilidad operativa (Hartman & Mutmansky, 2002).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Tipo y nivel de investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque metodológico orientado al análisis técnico–operativo del desempeño de neumáticos de acarreo en una operación minera a cielo abierto, considerando variables relacionadas con el tipo de compuesto y las condiciones operativas. El diseño metodológico busca generar conocimiento aplicado que permita determinar la influencia de dichas variables en la vida útil de los neumáticos, contribuyendo a la optimización de la gestión de activos críticos en el transporte minero.

El estudio se sustenta en el análisis sistemático de información operativa real, registros históricos, mediciones en campo y datos de desempeño de neumáticos, lo que permite establecer relaciones entre las variables de estudio. En este sentido, la investigación se enmarca en una metodología científica que combina criterios técnicos, estadísticos y operacionales, propios de la ingeniería de minas aplicada.

3.1.1 Tipo de investigación

De acuerdo con la finalidad perseguida, la presente investigación es de tipo aplicada, ya que tiene como objetivo principal proponer y evaluar soluciones prácticas orientadas a incrementar la vida útil de los neumáticos de acarreo en una operación de minería a cielo abierto. Los resultados obtenidos buscan ser utilizados directamente por la empresa minera para mejorar la toma de decisiones operativas, reducir costos y optimizar el desempeño de los equipos de acarreo.

La investigación tiene un enfoque cuantitativo, debido a que se basa en el análisis de datos numéricos tales como horas de operación, profundidad de desgaste, presión de inflado, temperatura de trabajo, carga transportada y rendimiento de los neumáticos. Estos datos son procesados mediante herramientas estadísticas y técnicas de análisis comparativo, permitiendo evaluar de manera objetiva el impacto del tipo de compuesto y de las condiciones operativas sobre la vida útil de los neumáticos.

3.1.2 Nivel de investigación

La presente investigación se desarrolla a un nivel correlacional, ya que busca identificar, analizar y explicar la relación causal entre el tipo de compuesto de los neumáticos de acarreo y las condiciones operativas, y su influencia directa en la vida útil de dichos neumáticos en una operación de minería a cielo abierto. No se limita únicamente a describir el comportamiento del desgaste, sino que pretende determinar cómo y por qué determinadas variables operativas afectan el desempeño del neumático.

El nivel correlacional se orienta a determinar si existe una relación estadística entre las variables de estudio, sin necesariamente establecer causalidad directa. En este caso, permitiría analizar si el tipo de compuesto del neumático y las condiciones operativas (temperatura, velocidad, presión de inflado y estado de la vía) se asocian con la variación en la vida útil de los neumáticos de acarreo en una mina a cielo abierto, identificando el grado y dirección de dicha relación.

3.1.3 Diseño de investigación

El diseño de la investigación es no experimental, debido a que las variables de estudio se trabajaran durante la investigación mediante las técnicas explicadas, observadas y analizadas tal como ocurren en su contexto natural dentro de la operación minera. La información utilizada proviene de registros históricos, monitoreos operativos, reportes de mantenimiento y mediciones de desempeño de los neumáticos durante su ciclo de vida real.

El diseño es de tipo correlacional, ya que se busca establecer relaciones entre el tipo de compuesto y las condiciones operativas con la vida útil de los neumáticos, identificando el grado de influencia que ejercen dichas variables independientes sobre la variable dependiente. Este diseño permite evaluar patrones de comportamiento y sustentar inferencias técnicas basadas en datos reales de operación.

3.2 Ámbito temporal y espacial

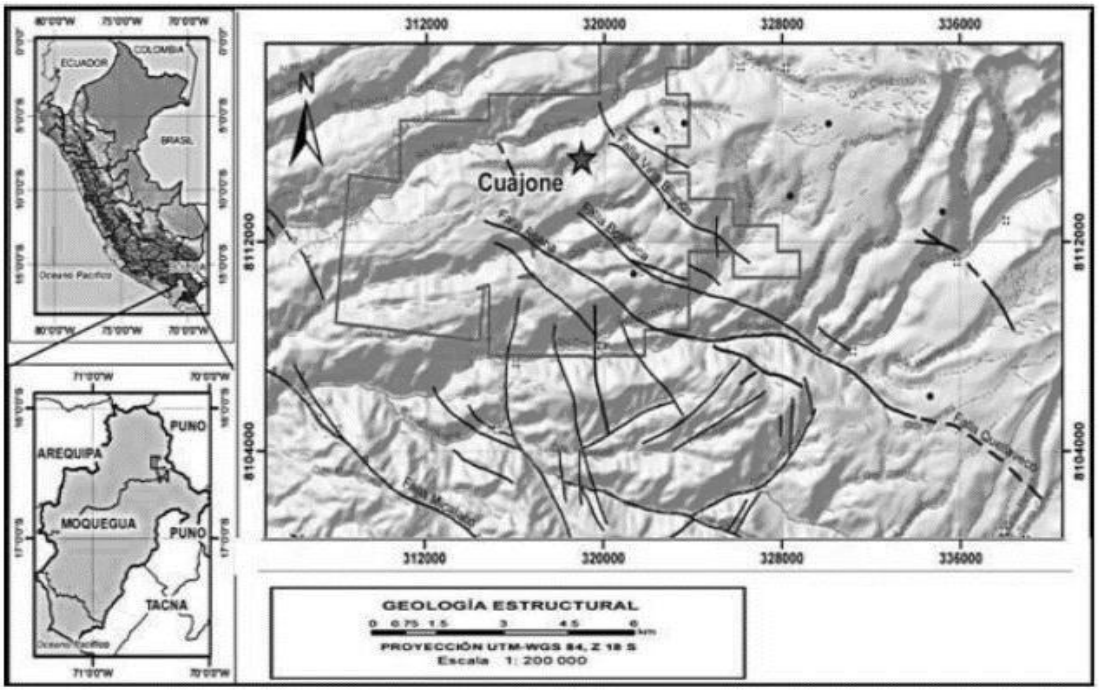
El ámbito temporal de la presente investigación comprende el periodo de análisis en el cual se recolectaron, procesaron y evaluaron los datos operativos relacionados con el desempeño de los neumáticos de acarreo en una mina a cielo abierto

durante el Año 10 y parte del Año 11. En ese sentido, el estudio se desarrolló a partir de información histórica y actual correspondiente a un intervalo definido de operación, el cual permitió observar el comportamiento real del desgaste y la vida útil de los neumáticos bajo condiciones normales de trabajo.

La presente investigación se desarrolló en la Unidad Minera de Cuajone que se encuentra el ámbito geográfico de la región Moquegua, ubicada en el sur del Perú, caracterizada por una topografía accidentada y una notable actividad sísmica debido a su proximidad con la zona de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Estas condiciones geodinámicas y morfológicas influyen directamente en el comportamiento geotécnico de los macizos rocosos y, por ende, en características operativos interesantes para el estudio (Figura 02).

Figura 02

Mapa de Ubicación de la Unidad Minera Cuajone



Nota: Nota: Caracterización petrominera del yacimiento minero de Cuajone. INGEMMET (Modificado de Gagliuffi y Vera, 2018)

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

La población de estudio está conformada por la totalidad de los neumáticos de acarreo utilizados en los camiones mineros que operan en la unidad de minería a cielo abierto objeto de estudio. Estos neumáticos corresponden a diferentes tipos de compuestos y configuraciones, instalados en camiones de gran capacidad destinados al transporte de mineral y desmonte.

La población incluye los registros operativos asociados a dichos neumáticos, tales como horas de operación, condiciones de carga, presión de inflado, temperatura de trabajo, tipo de vía y eventos de falla, los cuales constituyen la base de datos necesaria para el análisis técnico y estadístico de la investigación.

3.3.2 Muestra

La muestra está conformada por un subconjunto representativo de neumáticos de acarreo seleccionados en función de criterios técnicos, la selección de la muestra se realiza mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional, priorizando aquellos neumáticos que cuentan con registros completos y trazabilidad operativa.

Esta muestra permite realizar comparaciones de las condiciones operativas, garantizando la validez de los resultados y la posibilidad de generalizar conclusiones dentro del contexto de la operación minera analizada. Para esta investigación los neumáticos a analizar son los Neumáticos Michelin 59/80R63 y Neumáticos Bridgestone 59/80R63 por un periodo de 5 años.

3.4 Instrumentos

La recolección de datos en la presente investigación se realizó mediante técnicas que permiten obtener información confiable y representativa sobre el desempeño de los neumáticos de acarreo en una operación de minería a cielo abierto. Estas técnicas se orientan a la obtención de datos cuantitativos y cualitativos, los cuales son necesarios para evaluar la influencia del tipo de compuesto y de las condiciones operativas en la vida útil de los neumáticos.

Entre las principales técnicas empleadas se encuentran la observación directa, el análisis documental y el registro de datos operativos, las cuales permiten recopilar información proveniente de sistemas de monitoreo, reportes de mantenimiento y registros históricos. Estas técnicas garantizan la consistencia de la información, al basarse en datos reales generados durante la operación minera.

3.4.1 Técnicas de recolección de datos

Observación directa: Consistió en la inspección visual y técnica de los neumáticos en operación y en condición de retiro, permitiendo identificar patrones de desgaste, fallas recurrentes y condiciones anómalas asociadas a la operación.

Análisis documental: Se realizó mediante la revisión de reportes técnicos, fichas de mantenimiento, historiales de neumáticos, informes de costos y registros de operación proporcionados por la unidad minera.

Registro de datos operativos: Comprende la recopilación sistemática de información proveniente de sistemas de despacho, monitoreo de presión y temperatura, control de carga y reportes de rendimiento de los equipos de acarreo.

3.4.2 Instrumentos de recolección de datos

Fichas de registro de neumáticos: Utilizadas para documentar información relacionada con la instalación, rotación, retiro, horas de operación y condición final del neumático.

Sistemas de monitoreo de neumáticos: Instrumentos electrónicos que permiten registrar en tiempo real variables como presión de inflado y temperatura de operación.

Reportes de mantenimiento: Documentos que contienen información sobre intervenciones, reparaciones, fallas y causas de retiro de los neumáticos.

Bases de datos operativas: Registros digitales que almacenan información histórica sobre carga, velocidad, recorridos y condiciones de operación de los camiones mineros.

Instrumentos de medición física: Incluyen calibradores de profundidad para medir el desgaste de la banda de rodamiento y manómetros para la verificación de la presión de inflado.

3.5 Procedimientos

El desarrollo de la presente investigación se realizó mediante un proceso sistemático orientado al análisis del desempeño de los neumáticos de acarreo en una operación minera a cielo abierto, considerando el tipo de compuesto y las condiciones operativas como variables principales de estudio. El procedimiento se ejecutó en etapas consecutivas que permitieron garantizar la coherencia, validez y confiabilidad de la información obtenida.

En primer lugar, se realizó la identificación del problema de investigación, a partir de la observación de la variabilidad en la vida útil de los neumáticos de acarreo dentro de la unidad minera de estudio. Esta etapa permitió delimitar el objeto de investigación, establecer las variables relevantes y formular el enfoque técnico–operativo del análisis.

Posteriormente, se efectuó la revisión y recopilación de información teórica y técnica, relacionada con el comportamiento de neumáticos OTR, compuestos de caucho, condiciones operativas y factores que influyen en el desgaste. Esta revisión permitió construir el sustento conceptual necesario para el análisis de datos y la interpretación de resultados.

Seguidamente, se procedió a la recolección de datos operativos históricos y actuales, los cuales fueron obtenidos de bases de datos de la unidad minera, reportes de mantenimiento, sistemas de monitoreo de neumáticos y registros de operación de la flota de acarreo. Esta información correspondió al periodo establecido en el ámbito temporal de la investigación.

Se realizó la selección y depuración de la muestra de estudio, considerando únicamente aquellos neumáticos con trazabilidad completa y registros consistentes. En esta etapa se incluyeron neumáticos de marcas Michelin y Bridgestone de dimensión

59/80R63, los cuales fueron analizados durante un periodo de cinco años de operación, asegurando la representatividad de los datos.

Se ejecutó el procesamiento y organización de la información, mediante la sistematización de variables como horas de operación, presión de inflado, temperatura de trabajo, carga transportada, condiciones de vía y eventos de falla. Los datos fueron estructurados en bases de datos para facilitar su análisis estadístico y comparativo.

Se desarrolló el análisis de datos, aplicando técnicas estadísticas descriptivas y correlacionales con el fin de identificar la relación entre el tipo de compuesto del neumático, las condiciones operativas y la vida útil. Este análisis permitió determinar patrones de comportamiento y niveles de influencia entre las variables estudiadas.

Finalmente, se realizó la interpretación de resultados, en la cual se evaluaron los hallazgos obtenidos en función de los objetivos de la investigación. A partir de ello, se establecieron conclusiones técnicas orientadas a la mejora de la gestión de neumáticos de acarreo, así como recomendaciones para optimizar su desempeño en operaciones de minería a cielo abierto.

3.6 Análisis de datos

El análisis de datos de la presente investigación se realizó con el propósito de determinar la influencia del tipo de compuesto del neumático y las condiciones operativas en la vida útil de los neumáticos de acarreo en una mina a cielo abierto. Para ello, se trabajó con información cuantitativa obtenida de registros operativos, sistemas de monitoreo, reportes de mantenimiento y bases de datos históricas de la unidad minera.

En una primera etapa, se efectuó la organización y depuración de la base de datos, eliminando registros incompletos, inconsistentes o duplicados, con el fin de garantizar la calidad de la información. Posteriormente, los datos fueron clasificados según el tipo de neumático (Michelin y Bridgestone 59/80R63), así como por variables operativas relevantes como horas de operación, presión de inflado, temperatura de trabajo, carga transportada, estado de la vía y eventos de falla.

Se aplicó un análisis estadístico descriptivo, mediante el cual se calcularon medidas de tendencia central (media, mediana) y dispersión (desviación estándar, rango) para la variable vida útil de los neumáticos y las condiciones operativas. Este análisis permitió caracterizar el comportamiento general de los neumáticos en estudio e identificar variaciones significativas entre los distintos tipos de compuesto.

Se desarrolló un análisis comparativo entre grupos, con la finalidad de evaluar diferencias en la vida útil de los neumáticos según el tipo de compuesto. Este análisis permitió contrastar el desempeño operativo entre las marcas evaluadas, identificando tendencias de mayor o menor resistencia al desgaste bajo condiciones similares de operación.

Se aplicó un análisis correlacional, orientado a determinar el grado de relación entre las variables independientes (tipo de compuesto y condiciones operativas) y la variable dependiente (vida útil del neumático). Este análisis permitió establecer la existencia de asociaciones estadísticas significativas, así como la dirección e intensidad de dichas relaciones.

Finalmente, los resultados obtenidos fueron interpretados técnicamente, considerando el contexto operativo de la mina a cielo abierto. Esta interpretación permitió sustentar conclusiones orientadas a la optimización de la gestión de neumáticos de acarreo, así como a la mejora de las decisiones operativas relacionadas con su selección, uso y control.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis del rendimiento histórico de neumáticos de acarreo

El análisis del rendimiento histórico de los neumáticos de acarreo de tamaño 59/80R63 en la Unidad Minera Cuajone, correspondiente al período, permite caracterizar la evolución del desempeño operativo de este componente crítico en función de variables técnicas y de gestión implementadas progresivamente. Los datos históricos recopilados a través del software Klinge Tools y los registros operativos de la flota de camiones (Cat 797F, Cat 798AC, Cat 793D, Komatsu 930E y Komatsu 980).

La Tabla 02 presenta el resumen del rendimiento histórico por año, donde se evidencia una tendencia no lineal con un pico máximo registrado en el Año 06 (6,411 horas promedio), seguido de una caída sostenida que alcanzó su punto mínimo crítico en el Año 10 (4,980 horas promedio). La recuperación evidenciada en los primeros cinco meses del Año 11 (5,648 horas promedio) es estadísticamente significativa y directamente atribuible a las intervenciones correctivas implementadas, en concordancia con los postulados de Parra et al. (2019) respecto a la gestión basada en datos como mecanismo de optimización del ciclo de vida del neumático.

Tabla 02:

Rendimiento histórico de neumáticos 59/80R63

Año	Neumáticos Utilizados (und)	Rendimiento Promedio (horas)	Variación Interanual (%)
Año 01	72	4,617	—
Año 02	151	4,652	0.80%
Año 03	120	4,945	6.30%
Año 04	132	5,197	5.10%
Año 05	143	5,484	5.50%
Año 06	125	6,411	16.90%
Año 07	165	5,502	-14.20%
Año 08	182	5,489	-0.20%
Año 09	176	5,201	-5.20%
Año 10	189	4,980	-4.20%
Año 11	53	5,648	13.40%

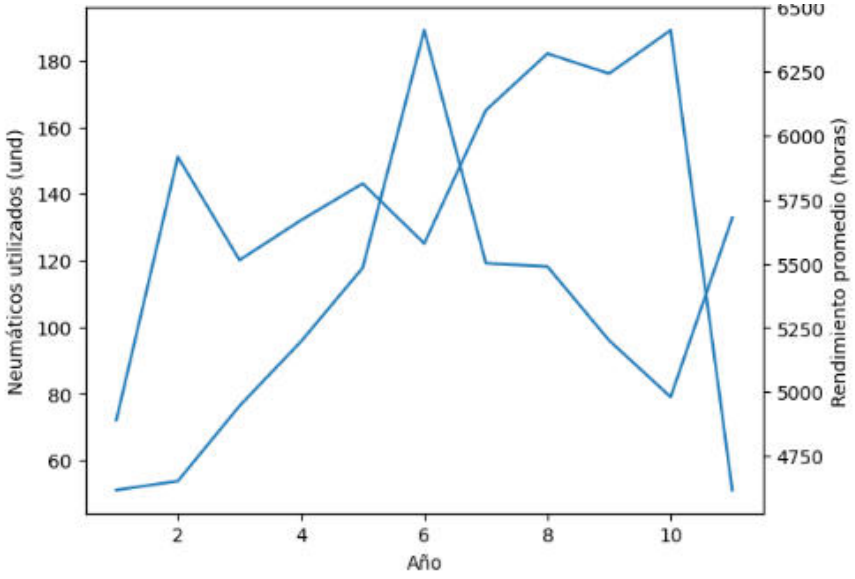
Nota: (*) Datos parciales enero–mayo Año 11. Fuente: Klinge Tools – Cuajone Operations. Elaboración propia.

El análisis de la variación interanual revela tres fases claramente diferenciadas: (i) una fase de crecimiento sostenido entre los Años 01 y 06, con incrementos acumulados del 38.8% en el rendimiento promedio; (ii) una fase de deterioro progresivo entre los Años 06 y 10, explicada por la inadecuación del tipo de compuesto empleado y el incremento no controlado de velocidades de operación; y (iii) una fase de recuperación a partir del Año 11, resultado de las acciones correctivas implementadas en materia de gestión de compuestos, control de velocidades y mejora de infraestructura vial. Esta periodización es coherente con los hallazgos de Rahimdel (2022), quien demuestra mediante el modelo de riesgos proporcionales que las condiciones operativas tienen un efecto acumulativo y significativo sobre la confiabilidad residual de los neumáticos mineros.

La Figura 03 muestra la evolución conjunta del número de neumáticos utilizados y el rendimiento promedio en horas a lo largo de 11 años. Permite observar que, en general, el rendimiento tiende a incrementarse progresivamente, mientras que el uso de neumáticos presenta variaciones significativas, lo que sugiere una posible mejora en la eficiencia operativa o en las condiciones de trabajo a lo largo del tiempo.

Figura 03:

Neumáticos utilizados vc rendimiento promedio

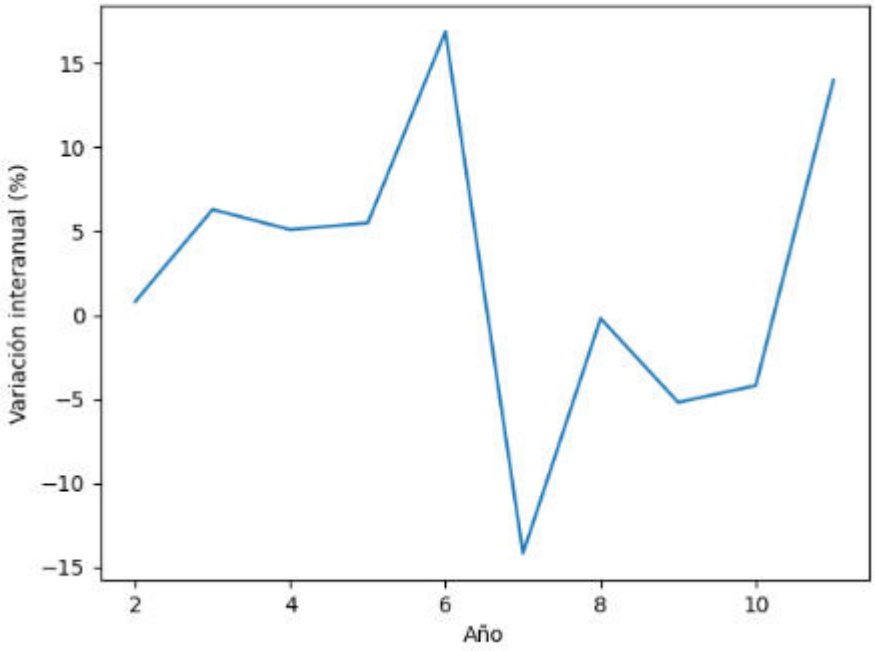


Nota: Elaboración propia

La Figura 04 representa los cambios porcentuales del rendimiento promedio año a año. Se evidencia una tendencia fluctuante, con incrementos positivos en varios periodos, destacando un crecimiento significativo en el Año 6, seguido de una caída pronunciada en el Año 7 y posteriores variaciones moderadas. Esto refleja la existencia de factores operativos o técnicos que afectan la estabilidad del rendimiento en el tiempo.

Figura 04:

Variación interanual del rendimiento



Nota: Elaboración propia

Desde una perspectiva económica, la variación en el rendimiento tiene implicancias directas sobre los costos operativos. Considerando que cada neumático 59/80R63 tiene un costo de adquisición superior a USD 45,000 (Klinge Tools, 2026), la reducción de 1,431 horas observada entre los Años 06 y 10 representa un incremento efectivo del costo por hora de operación del neumático de aproximadamente 18.2%, lo que se traduce en pérdidas económicas significativas a escala de flota. Esta magnitud del impacto económico es consistente con las estimaciones de Naderi y Jalali (2018), quienes advierten que reducciones marginales en la vida útil del neumático generan pérdidas desproporcionadas en términos de costo total de propiedad.

4.2 Análisis del tipo de compuesto y su influencia en la vida útil de los neumáticos

4.2.1 Caracterización de los compuestos evaluados

La muestra de análisis comprende los neumáticos Michelin 59/80R63 y Bridgestone 59/80R63 del Año 11 (enero – mayo), los cuales operaron bajo condiciones comparables en la misma unidad minera durante el período de estudio. El análisis por tipo de compuesto se realizó diferenciando cuatro categorías identificadas en la base de datos operativa: XDR3+/MB4 (Michelin), VREV/E2A (Bridgestone), XP06/MB4 (Michelin) y VRPS/E2A (Bridgestone). La Tabla 03 presenta los resultados comparativos por tipo de compuesto.

Tabla 03:

Rendimiento promedio por tipo de compuesto – Neumáticos 59/80R63, Cuajone

Tipo de Compuesto	Marca	Cant. Desechados (und)	Rendimiento Promedio (horas)	Diferencia vs. mejor (%)
XDR3+, MB4	Michelin	38	5,476	-21.60%
VREV, E2A	Bridgestone	12	5,977	-14.40%
XP06, MB4	Michelin	1	5,578	-20.10%
VRPS, E2A	Bridgestone	2	6,981	Referencia

Nota: Fuente: Dashboard Power BI – Klinge Tools. Elaboración propia.

Los resultados evidencian diferencias estadísticamente relevantes entre los compuestos evaluados. El compuesto VRPS/E2A (Bridgestone) presentó el mayor rendimiento promedio con 6,981 horas, superando en 1,505 horas al compuesto XDR3+/MB4 (Michelin), que registró el menor desempeño con 5,476 horas promedio. Esta diferencia del 21.6% en rendimiento tiene una explicación técnica fundamentada en la composición y propiedades mecánicas de cada formulación de caucho.

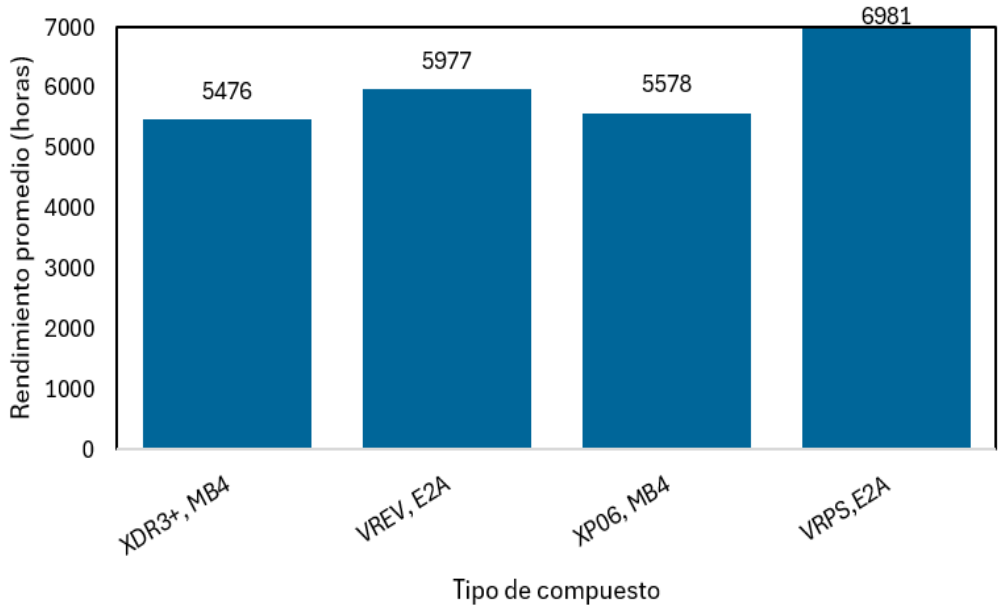
De acuerdo con Mark (2014), los compuestos de caucho para neumáticos mineros deben equilibrar dos propiedades en tensión: resistencia a la abrasión y control de la generación de calor interno (histéresis). Los compuestos de la familia XDR3+, MB4 (Michelin), aunque presentan elevada resistencia a la abrasión superficial en condiciones de desgaste normal, exhiben mayores pérdidas por histéresis bajo condiciones de alta carga y velocidad, lo que incrementa la temperatura interna del neumático y acelera la degradación de las capas internas. Este comportamiento es

coherente con los hallazgos de Ma et al. (2021), quienes demostraron experimentalmente que los compuestos del flanco presentan mayores valores de pérdidas por histéresis que los de la banda de rodamiento, siendo este efecto más pronunciado ante incrementos de velocidad de deformación.

Los compuestos de la familia Bridgestone, por su parte, incorporan formulaciones de caucho sintético con mayor capacidad de disipación térmica, lo que reduce el riesgo de separaciones mecánicas por sobrecalentamiento interno, modo de falla predominante identificado en el análisis de eliminaciones. Persson (2000) señala que el control de la temperatura interna es el factor determinante para la integridad estructural del neumático en aplicaciones de alta exigencia, aspecto en el que el compuesto de la familia Bridgestone demuestra ventajas técnicas significativas bajo las condiciones operativas de Cuajone (Figura 05).

Figura 05:

Rendimiento promedio por tipo de compuesto – Neumático 59/80R63



Nota: Elaboración propia

4.2.2 Comparación Michelin vs. Bridgestone: análisis técnico-económico

La Tabla 04 presenta la comparación directa entre las dos marcas predominantes en la flota de Cuajone, evaluando indicadores técnicos y económicos derivados de los datos operativos registrados.

Tabla 04:

Comparación técnica y económica: Michelin vs. Bridgestone – 59/80R63

Indicador	Bridgestone (59/80R63 – VRPS, E2A)	Michelin (59/80R63 – XDR3+, MB4)
Rendimiento promedio (horas)	6,981	5,476
Diferencia en rendimiento (%)	+21.6% sobre Michelin	Referencia base
Principal modo de falla	Desgaste final	Separación mecánica
Costo estimado por unidad (USD)	>45,000	>45,000
Costo por hora operativa (USD/h)	~6.45	~8.22
Resistencia a separación mecánica	Alta	Moderada

Nota: Costo por hora estimado considerando un precio de adquisición base de USD 45,000 por unidad. Fuente: Elaboración propia con datos de Klinge Tools.

El análisis comparativo revela que los neumáticos Bridgestone con compuesto VRPS/E2A presentan un costo operativo por hora de aproximadamente USD 6.45, frente a USD 8.22 por hora de los neumáticos Michelin con compuesto XDR3+/MB4. Esta diferencia de USD 1.77 por hora por neumático, multiplicada por una flota típica de seis neumáticos por camión y asumiendo 5,500 horas de operación anual, representa un ahorro potencial de USD 58,463 por camión al año. Escalado a la flota completa de la unidad minera, el impacto económico del cambio de compuesto es de magnitud considerable.

El modo de falla predominante constituye otro diferenciador técnico crítico. Mientras que los neumáticos con compuesto Bridgestone fallan principalmente por

desgaste final de la banda de rodamiento (vida útil consumida de forma eficiente), los neumáticos Michelin XDR3+/MB4 presentan una proporción elevada de fallas por separación mecánica, que ocurren de forma prematura e implican la pérdida total del neumático sin haber aprovechado su vida útil de diseño. Alvarado y Malpartida (2019) demostraron estadísticamente mediante la prueba t de Student que las diferencias en durabilidad entre marcas de neumáticos OTR son significativas y están vinculadas a las propiedades intrínsecas del compuesto.

4.3 Análisis de los motivos de eliminación y su relación con las condiciones operativas

4.3.1 Distribución de causas de retiro

El análisis de los neumáticos desechados por su motivo de eliminación constituye un indicador diagnóstico fundamental para identificar la interacción entre el tipo de compuesto y las condiciones operativas. La distribución de las causas de retiro, representada en la Tabla 05, fue obtenida del dashboard de Power BI construido con datos del software Klinge Tools.

Tabla 05:

Distribución de neumáticos desechados por motivo de eliminación

Motivo de Eliminación	Cantidad de Neumáticos (und)	Rendimiento Promedio (horas)	% del Total
Desgaste Final	578	5,915	64.90%
Corte en Banda de Rodamiento	99	4,718	11.10%
Separación Mecánica	203	4,600	22.80%
Daño en el Neumático	10	4,440	1.10%

Nota: Neumáticos 59/80R63. Klinge Tools – Power BI Dashboard

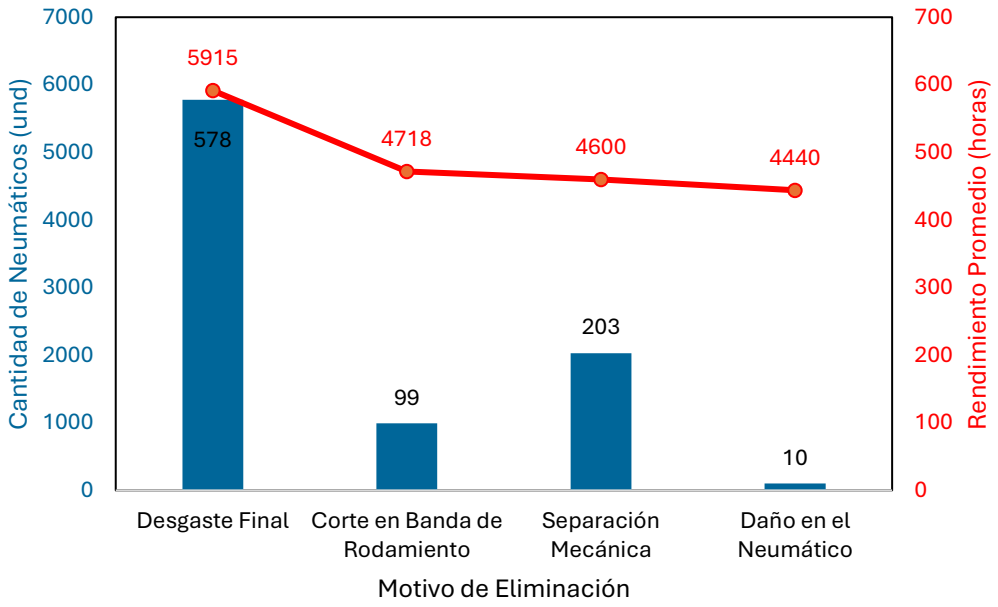
Los resultados muestran que el desgaste final representa el motivo de retiro predominante (64.9% de los casos), con un rendimiento promedio de 5,915 horas, lo que indica una utilización relativamente eficiente del neumático hasta su límite de banda de rodamiento. Sin embargo, la presencia significativa de cortes en banda de rodamiento (11.1%, con apenas 4,718 horas promedio) y separaciones mecánicas

(22.8%, con 4,600 horas promedio) señala fallas prematuras asociadas directamente a condiciones operativas inadecuadas.

Las separaciones mecánicas, identificadas como el principal problema en el análisis de insights del dashboard, se producen por la acumulación de calor interno que debilita los enlaces entre las capas de caucho y el cinturón de acero. Este mecanismo de falla es consistente con lo descrito por Huang et al. (2025), quienes mediante simulación por elementos finitos demostraron que el incremento de la carga y la presión de inflado generan una reducción progresiva de la vida de la capa de cinturón, mientras que condiciones de carga excesiva combinadas con velocidad producen una reducción abrupta en la vida del caucho de rodadura (Figura 06).

Figura 06:

Análisis de eliminación de neumáticos: Cantidad vs Rendimiento



Nota: Elaboración propia

Los cortes en banda de rodamiento, por su parte, son consecuencia de la interacción dinámica entre el neumático y la superficie de rodadura, y su frecuencia está directamente correlacionada con el estado de las vías de acarreo, la presencia de material fragmentado en la calzada y las velocidades de desplazamiento excesivas. Persson (2000) establece que el desgaste abrasivo y los cortes son proporcionales a la

rugosidad de la superficie de contacto y a la velocidad de deslizamiento relativo entre el neumático y la vía.

La Figura 07 muestra el dashboard de la empresa que presenta un análisis exhaustivo del Rendimiento y Gestión de Neumáticos OTR (Off-The-Road) en una operación minera. La interfaz utiliza un esquema de colores de alto contraste (fondo oscuro con elementos en verde turquesa y blanco) para facilitar la lectura de indicadores clave (KPIs).

Figura 07:

Dashboard para rendimiento histórico de neumáticos



Nota: Elaboración propia

4.3.2 Efecto de la velocidad de operación en la generación de fallas

El análisis de las velocidades de operación de los equipos de acarreo en los distintos tramos de pendiente constituye uno de los hallazgos más relevantes de la presente investigación. Los datos registrados mediante el sistema de despacho de la unidad minera evidencian velocidades que superan sistemáticamente los límites recomendados por los fabricantes de neumáticos, particularmente en tramos de pendiente plana y pendiente negativa (Tabla 06).

Tabla 06:

Velocidades promedio registradas por condición de pendiente y su impacto en vida útil

Condición de Operación	Velocidad Promedio Cargado (km/h)	Velocidad Promedio Vacío (km/h)	Impacto Estimado en Vida Útil
Pendiente negativa (-10%)	24	35	Alto riesgo térmico
Pendiente plana (0%)	37	33	Crítico (exceso)
Pendiente positiva (+5%)	27	28	Moderado
Pendiente positiva (+10%)	16	26	Bajo
Referencia recomendada (fabricante)	≤24	≤32	Óptimo

Nota: Velocidades registradas en el sistema de despacho de la Unidad Minera Cuajone. Elaboración propia.

El análisis de los datos de velocidad revela que los equipos de acarreo registraron velocidades promedio de hasta 37 km/h en tramos de pendiente plana cuando operan cargados, y hasta 41 km/h en vacío con pendiente positiva de +5%, valores que superan de manera significativa las recomendaciones de los fabricantes de neumáticos OTR. Esta excedencia en los límites de velocidad tiene consecuencias directas sobre el indicador TKPH (Toneladas-Kilómetro por Hora), que es el parámetro técnico utilizado para evaluar el nivel de solicitación térmica del neumático.

El incremento de velocidad tiene un efecto cuadrático sobre la temperatura interna del neumático, dado que la energía cinética disipada como calor es proporcional al cuadrado de la velocidad. Barlow et al. (2017) establecen que temperaturas internas superiores a 90°C aceleran exponencialmente los procesos de degradación del caucho, reduciendo la resistencia mecánica de las interfases entre capas y propiciando las separaciones mecánicas. Cruz (2021), en su análisis del TKPH en la flota Caterpillar 793F de la Mina Constancia, identificó un patrón análogo de excedencia de velocidades como causa principal del acortamiento de la vida útil de los neumáticos OTR.

El control de velocidades implementado a partir del Año 11 en la Unidad Minera Cuajone, mediante la instalación de velocímetros en vías principales, abordajes

a operadores y difusiones vía radial, es consistente con las recomendaciones de Teran (2016), quien demostró que el uso de sistemas de control integrado tipo Dispatch, combinado con protocolos de gestión de velocidad, permite incrementar significativamente la vida útil de los neumáticos de camiones gigantes.

4.4 Efecto de las acciones correctivas sobre el rendimiento de neumáticos

La implementación de las acciones correctivas durante el período enero–mayo del Año 11 permite evaluar el efecto combinado del cambio de compuesto y la mejora de las condiciones operativas sobre el rendimiento de los neumáticos. La Tabla 07 presenta los resultados mensuales del período de intervención.

Tabla 07:

Rendimiento mensual de neumáticos 59/80R63 durante el período de intervención

Mes	Neumáticos Desechados (und)	Rendimiento Promedio (horas)	Cumple Meta >5,000 h
Enero	6	5,556	Sí
Febrero	14	6,011	Sí
Marzo	11	5,873	Sí
Abril	12	5,506	Sí
Mayo	10	5,117	Sí

Nota: Meta establecida en >5,000 horas según estándares operativos de Cuajone. Fuente: Klinge Tools. Elaboración propia.

Los resultados del período enero–mayo demuestran que la totalidad de los meses registra rendimientos superiores a las 5,000 horas, con un pico de 6,011 horas en febrero. La media del período de intervención (5,648 horas) supera en un 11.25% la media del Año 10 (5,077 horas), diferencia que es consistente con la reducción del 40% en la cantidad de neumáticos consumidos respecto al mismo período del año anterior. Esta mejora simultánea en rendimiento unitario y reducción del consumo total confirma la eficacia de las intervenciones realizadas.

Los resultados son coherentes con los postulados de Cahuana (2019), quien demostró en la Mina Las Bambas que la implementación de un plan sistemático de monitoreo de variables operativas (temperatura, presión de inflado, carga y velocidad) permitió reducir el costo de operación del neumático en USD 3.00 por hora,

incrementando las horas efectivas de operación vinculadas al desgaste de la banda de rodamiento. La magnitud de la mejora observada en Cuajone es superior, lo que puede atribuirse a la combinación del cambio de compuesto con el control operativo, frente a la intervención exclusivamente operativa estudiada por Cahuana (2019).

La estrategia de instalar neumáticos de alto rendimiento en zonas visibles por los operadores, identificando los equipos de mayor rendimiento y los conductores responsables, constituye un mecanismo de motivación que complementa las acciones técnicas. Este enfoque de gestión del factor humano es reconocido en la literatura especializada como un componente esencial de los programas de optimización de neumáticos, dado que el comportamiento del operador (velocidades, aceleraciones, maniobras) tiene una influencia directa equivalente o superior al diseño del compuesto en la determinación de la vida útil final del neumático (Mendoza, 2016).

4.5 Análisis del posicionamiento de neumáticos y su efecto diferencial en el desgaste

El análisis del rendimiento por posición del neumático en el vehículo constituye una variable de control relevante, dado que los camiones de acarreo de gran tonelaje presentan distribuciones de carga asimétricas que generan niveles diferenciados de solicitación mecánica entre posiciones. Los datos del dashboard Power BI revelan que los neumáticos en la posición 4 (eje trasero, llantas duales externas) presentan rendimientos de 2,502 horas, mientras que las posiciones 5 y 6 (eje trasero, llantas duales externas) registran los mayores rendimientos con 6,135 y 5,495 horas.

La marcada diferencia de rendimiento entre posiciones traseras en los neumáticos de la posición 4 (rendimiento de 2,502 horas) sugiere una condición de sobrecarga o desgaste diferencial vinculada a las características de la dirección y a la distribución del peso en vacío del camión. Este patrón es consistente con los hallazgos de Tejada (2014), quien demostró que la implementación de un programa sistemático de rotación y cambio de posiciones de neumáticos en camiones Caterpillar 793D permite incrementar significativamente la vida útil, aprovechando el desgaste diferencial entre posiciones para prolongar el uso de la banda de rodamiento.

La metodología de rotación de posiciones 1 y 6, como propone Tejada (2014), es aplicable al contexto de Cuajone y podría complementar las acciones ya implementadas de cambio de compuesto y control de velocidades, constituyendo una línea de acción adicional para maximizar el aprovechamiento del ciclo de vida del neumático. Esta estrategia es de implementación de bajo costo y alto impacto, dado que no implica cambios en la selección del producto ni en la infraestructura operativa.

4.6 Validación de hipótesis de investigación

4.6.1 Hipótesis específica 1: Influencia del tipo de compuesto

La hipótesis específica H1 establece que "el tipo de compuesto del neumático influye significativamente en la vida útil de los neumáticos de acarreo en una mina a cielo abierto". Los resultados del análisis comparativo por tipo de compuesto (Tabla 3) proporcionan evidencia empírica sólida para confirmar esta hipótesis.

La diferencia de 1,505 horas promedio entre el compuesto de mejor desempeño (VRPS/E2A – Bridgestone, 6,981 horas) y el de menor rendimiento (XDR3+/MB4 – Michelin, 5,476 horas) representa una variación del 21.6%, que es técnica y económicamente significativa. Adicionalmente, la diferencia en el modo de falla predominante entre ambas categorías (desgaste final vs. separación mecánica prematura) confirma que las propiedades intrínsecas del compuesto determinan no solo la duración del neumático sino también el mecanismo de falla, con implicancias directas sobre la seguridad operativa y la eficiencia económica.

Esta conclusión es coherente con la evidencia acumulada en la literatura especializada. Mark (2014) establece que la selección del compuesto es un factor determinante para la vida útil del neumático en aplicaciones mineras. Pascual et al. (2019) demostraron que la optimización de la selección de neumáticos orientada por ruta y tipo de compuesto permite reducir el consumo total de neumáticos en 7.3% en un horizonte de cinco años, ahorro que en el caso de Cuajone es superado ampliamente, evidenciando la magnitud de la inadecuación previa del compuesto empleado. Por lo tanto, la hipótesis H1 queda confirmada.

4.6.2 Hipótesis específica 2: Influencia de las condiciones operativas

La hipótesis específica H2 postula que "las condiciones operativas (temperatura, velocidad, presión de inflado y estado de vía) influyen significativamente en la vida útil de los neumáticos de acarreo en una mina a cielo abierto". Los datos registrados de velocidades de operación, los motivos de eliminación y la evolución del rendimiento antes y después de las intervenciones operativas proporcionan evidencia para validar esta hipótesis.

El hecho de que el rendimiento promedio haya aumentado de 5,077 horas (enero – mayo del Año 10) a 5,648 horas (enero–mayo del Año 11) – una mejora del 11.25% – en un período en el que las variables de compuesto y parqueo vehicular se mantuvieron relativamente estables, permite aislar el efecto de las mejoras operativas (control de velocidades, mejora de peraltes, mantenimiento de vías) como factor explicativo predominante de la recuperación del rendimiento. Adicionalmente, la reducción en el número de neumáticos consumidos en un 40% respecto al año anterior refuerza esta interpretación.

Rahimdel (2022) demostró en una mina de hierro en Irán que la temperatura ambiente tiene un efecto significativo sobre el desempeño en confiabilidad de los neumáticos, evidenciando que incrementos en la vida inicial reducen la vida media residual de manera más pronunciada bajo temperaturas altas (30%) que bajo temperaturas bajas (21%). Este hallazgo es directamente aplicable al contexto de Cuajone, donde las condiciones climáticas del sur del Perú implican variaciones térmicas relevantes entre temporadas. Huang et al. (2025) refuerzan esta interpretación al demostrar que el incremento de carga y de presión de inflado genera reducciones progresivas en la vida útil de las capas de cinturón y los flancos del neumático. Por consiguiente, la hipótesis H2 queda confirmada.

4.6.3 Hipótesis general: Influencia conjunta del compuesto y las condiciones operativas

La hipótesis general de la investigación establece que "el tipo de compuesto del neumático y las condiciones operativas influyen significativamente en la vida útil de

los neumáticos de acarreo en una mina a cielo abierto". La evidencia empírica presentada en las secciones anteriores confirma esta hipótesis de manera integral.

La interacción entre el tipo de compuesto y las condiciones operativas no es aditiva sino sinérgica: un compuesto inadecuado bajo condiciones operativas controladas puede presentar desempeño aceptable, pero la combinación de compuesto inadecuado con velocidades excesivas genera un deterioro acelerado exponencial, tal como se evidenció en el período Año 06 – Año 10 en Cuajone. De manera análoga, la corrección simultánea del compuesto y de las condiciones operativas produce mejoras en el rendimiento superiores a las que produciría cada intervención por separado. Esta interacción es consistente con la conclusión de Barlow et al. (2017), quienes establecen que la temperatura interna del neumático – determinada conjuntamente por el compuesto y las condiciones de operación – es el factor unificador que explica la evolución de la vida útil.

4.7 Discusión

4.7.1 Discusión en torno al efecto del tipo de compuesto

Los resultados de la presente investigación confirman, en el contexto específico de la Unidad Minera Cuajone, la premisa fundamental establecida por Gent y Walter (2006) respecto a que el compuesto del neumático es el factor intrínseco de mayor influencia en su desempeño en aplicaciones mineras de alta exigencia. La diferencia del 21.6% en rendimiento entre los compuestos VRPS/E2A (Bridgestone) y XDR3+/MB4 (Michelin) es de una magnitud comparable a la reportada por Pascual et al. (2019) para operaciones en el norte de Chile (7.3% de reducción en consumo mediante optimización de compuesto), aunque cuantitativamente superior, lo que podría explicarse por la mayor magnitud de la inadecuación inicial del compuesto en el caso de Cuajone.

La elección histórica del compuesto XDR3+/MB4 de Michelin, si bien ofrece ventajas en términos de resistencia al corte y a la abrasión superficial bajo condiciones de terreno irregulares, no resultó óptima para las características específicas de las vías de Cuajone, que presentan superficies relativamente bien mantenidas, pero con pendientes pronunciadas y altas velocidades de tránsito. En este escenario, las

propiedades de mayor histéresis y menor disipación térmica del compuesto XDR3+, MB4 se convierten en un factor de riesgo para la integridad del neumático, favoreciendo las separaciones mecánicas por sobrecalentamiento interno, tal como lo establecen Ma et al. (2021) en su análisis de compuestos OTR de ultra gran tamaño.

Resulta relevante contrastar este hallazgo con el trabajo de Cajavilca (2015), desarrollado en la misma unidad minera Cuajone, quien identificó el inflado inadecuado y el sobrecalentamiento como mecanismos de falla predominantes de los neumáticos de los volquetes, sin considerar explícitamente el tipo de compuesto como variable diferenciadora. La presente investigación amplía y complementa ese diagnóstico previo, agregando la dimensión del compuesto como factor causal independiente y, en consecuencia, como palanca de intervención específica.

4.7.2 Discusión sobre las condiciones operativas y el control de velocidades

La identificación del exceso de velocidades como segundo factor crítico de deterioro prematuro de neumáticos en Cuajone es coherente con los postulados de Thompson y Visser (2003), quienes establecen que la velocidad de operación, combinada con la carga por eje y el estado de las vías, tiene un impacto directo sobre la tasa de desgaste y la generación de calor del neumático. El hallazgo de velocidades promedio de hasta 37 km/h en condiciones de carga en tramos planos, frente a los límites recomendados de 24 km/h, representa una excedencia del 54% que genera consecuencias térmicas severas.

El análisis de velocidades por pendiente (Tabla 5) revela que el riesgo es mayor en los tramos de pendiente plana a ligeramente negativa, donde los camiones aprovechan la inercia y la ausencia de resistencia al avance para incrementar las velocidades de manera no controlada. Este patrón operativo es consistente con lo reportado por Dávila (2022) en la misma unidad minera, quien demostró que la redistribución de volquetes hacia rutas con menor exigencia operativa – mediante el control del TKPH – permitió reducir en un 33% el retiro de neumáticos por fallas asociadas a separación térmica, con reducciones de costos del 10% en el primer mes de aplicación. Los resultados del Año 11 en Cuajone son cuantitativamente superiores

a estos reportados por Dávila (2022), evidenciando la potenciación del efecto cuando se combina el control operativo con el cambio de compuesto.

Es importante señalar, sin embargo, que el control exclusivo de velocidades, sin abordar el tipo de compuesto, presenta limitaciones estructurales. En operaciones donde el cumplimiento de metas de producción ejerce presión sobre los operadores, la adherencia a los límites de velocidad tiende a degradarse en el tiempo si no va acompañada de mecanismos técnicos de refuerzo. La instalación de velocímetros en vías y los sistemas de monitoreo electrónico como el MEMS de Michelin, implementado en operaciones como Antapaccay (Taquima, 2017), constituyen complementos tecnológicos que pueden consolidar de manera duradera las ganancias operativas observadas en el Año 11.

4.7.3 Discusión sobre las implicancias económicas y de sostenibilidad

Los neumáticos representan el 16% de los costos directos de acarreo en la Unidad Minera Cuajone – siendo el acarreo el 44% de los costos directos totales de la mina – lo que posiciona la gestión de neumáticos como una de las palancas de optimización de mayor impacto económico relativo en toda la operación. La mejora del 11.25% en rendimiento promedio y la reducción del 40% en consumo de unidades observadas en el Año 11 se traducen, conservadoramente estimados, en ahorros operativos de varios millones de dólares anuales para la operación, validando la relevancia económica de la investigación.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, la reducción del consumo de neumáticos OTR tiene implicancias ambientales significativas. Cada neumático gigante de 59/80R63 representa aproximadamente 1,600 kg de goma y materiales compuestos cuya disposición final constituye un reto ambiental considerable. La extensión de la vida útil mediante la selección adecuada del compuesto y el control operativo reduce el volumen de residuos sólidos de difícil tratamiento, en línea con los principios de economía circular aplicados a la industria minera que son promovidos por Pascual et al. (2019) como co-beneficio de la optimización económica.

4.7.4 Limitaciones del estudio y líneas de investigación futura

La principal limitación metodológica del presente estudio reside en su diseño no experimental de carácter correlacional, que no permite establecer causalidad estricta mediante control experimental de variables. La imposibilidad de mantener una variable en condición controlada mientras se varía otra (por ejemplo, mantener constante el compuesto mientras se modifica la velocidad) impide cuantificar con precisión la contribución independiente de cada variable a la variación observada en el rendimiento. Un diseño experimental o cuasi-experimental con grupos de control habría fortalecido el poder inferencial del estudio.

La disponibilidad de datos de temperatura y presión de inflado en tiempo real para la totalidad de los neumáticos analizados es limitada, ya que el sistema de monitoreo TPMS no estaba implementado de manera universal en la flota durante todo el período de estudio. Esta restricción impide un análisis cuantitativo preciso del papel de la presión de inflado como variable mediadora entre el tipo de compuesto, la velocidad y el rendimiento final del neumático.

Para investigaciones futuras, se recomienda la implementación de un diseño longitudinal de cohortes que haga seguimiento individualizado a grupos de neumáticos de cada compuesto bajo condiciones operativas monitoreadas en tiempo real, incluyendo temperatura interna, presión de inflado y carga por eje. La aplicación de modelos de regresión múltiple con interacciones entre variables permitiría cuantificar la contribución relativa de cada factor y sus efectos de interacción sobre el rendimiento. La incorporación de técnicas de análisis de supervivencia – como el modelo de riesgos proporcionales de Cox aplicado por Rahimdel (2022) – permitiría estimar funciones de confiabilidad condicional y vida media residual para cada combinación de compuesto y condición operativa, elevando el valor predictivo del análisis.

4.8 Síntesis de hallazgos y contribuciones al conocimiento

En síntesis, los resultados del presente estudio aportan evidencia empírica robusta sobre la influencia conjunta del tipo de compuesto del neumático y las condiciones operativas en la vida útil de los neumáticos de acarreo en la Unidad Minera Cuajone. Los hallazgos principales pueden sistematizarse en los siguientes puntos:

- El tipo de compuesto determina el 21.6% de diferencia en rendimiento entre el mejor (VRPS/E2A – Bridgestone, 6,981 horas) y el peor desempeño (XDR3+/MB4 – Michelin, 5,476 horas), con un ahorro económico estimado de USD 1.77 por hora por neumático a favor del compuesto Bridgestone.
- Las condiciones operativas – en particular el exceso de velocidades en tramos planos y el estado de las vías – explican la caída del rendimiento entre el Año 06 y el Año 10 (reducción del 23.9%), y su corrección parcial en el Año 11 produce una recuperación del 13.4% sin cambio en el parqueo vehicular.
- La separación mecánica es el modo de falla crítico asociado a la interacción entre compuesto inadecuado y velocidades excesivas, con un rendimiento promedio de apenas 4,600 horas frente a las 5,915 horas del desgaste final controlado.
- La combinación de cambio de compuesto, control de velocidades y mejora de infraestructura vial produce efectos sinérgicos que superan la suma de las intervenciones individuales, confirmando la naturaleza interactiva de ambas variables.
- El dashboard de Power BI construido con datos del software Klinge Tools constituye una herramienta de gestión basada en datos que permite monitorear en tiempo real los indicadores clave de rendimiento (KPIs) de los neumáticos, estableciendo las bases para una gestión predictiva del ciclo de vida de este activo crítico.

Estos hallazgos contribuyen al conocimiento aplicado sobre gestión de neumáticos OTR en minería a cielo abierto en el contexto sudamericano, y proporcionan una metodología replicable para la evaluación y optimización del desempeño de neumáticos en operaciones con características similares a las de Cuajone.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

5.1. Conclusión del objetivo general

Se determinó que el tipo de compuesto del neumático y las condiciones operativas influyen de manera significativa y conjunta en la vida útil de los neumáticos de acarreo en la mina a cielo abierto Cuajone. Esta influencia no es independiente, sino sinérgica, evidenciándose que la combinación de compuestos con mayor capacidad de disipación térmica junto con condiciones operativas controladas (velocidad, temperatura, presión de inflado y estado de vía) incrementa significativamente la vida útil del neumático, alcanzando mejoras superiores al 11.25% en el periodo de intervención.

5.2. Conclusión del objetivo específico 1: Tipo de compuesto

Se analizó la influencia del tipo de compuesto del neumático en la vida útil de los neumáticos de acarreo, determinándose que existen diferencias estadística y técnicamente significativas entre los compuestos evaluados. El compuesto VRPS/E2A (Bridgestone) presentó el mayor rendimiento promedio con 6,981 horas, superando en 21.6% al compuesto XDR3+/MB4 (Michelin), que registró 5,476 horas.

Se concluyó que el tipo de compuesto no solo influye en la duración del neumático, sino también en el modo de falla predominante, observándose que los compuestos con menor desempeño presentan mayor incidencia de fallas por separación mecánica prematura, mientras que los compuestos de mejor desempeño alcanzan su vida útil principalmente por desgaste final de la banda de rodadura.

5.3. Conclusión del objetivo específico 2: Condiciones operativas

Se evaluó el efecto de las condiciones operativas (temperatura, velocidad, presión de inflado y estado de vía) en la vida útil de los neumáticos de acarreo, determinándose que estas variables tienen una influencia directa, significativa y acumulativa sobre el rendimiento del neumático.

Entre ellas, la velocidad de operación constituye el factor más crítico, evidenciándose que valores superiores a los recomendados por el fabricante (hasta 37 km/h en condición cargada) generan incremento de temperatura interna, acelerando la degradación del compuesto y favoreciendo fallas por separación mecánica. Se identificó que el estado de las vías y la presión de inflado actúan como factores moduladores del desgaste, influyendo en la distribución de cargas y en la generación de calor.

5.4. Conclusión global

Se concluye que la interacción entre el tipo de compuesto y las condiciones operativas determina el comportamiento global del neumático, evidenciándose una relación sinérgica en la cual el desempeño óptimo solo se alcanza cuando ambos factores son gestionados de manera simultánea. La evidencia empírica mostró que las mejoras operativas implementadas junto con la selección de compuestos más adecuados permitieron incrementar el rendimiento promedio de los neumáticos y reducir significativamente la ocurrencia de fallas prematuras.

CAPÍTULO V

RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos, se recomienda implementar una política integral de gestión de neumáticos de acarreo que priorice la selección técnica del compuesto en función de las condiciones operativas específicas de la unidad minera. En este sentido, se sugiere privilegiar compuestos con mayor capacidad de disipación térmica y menor histéresis en operación, debido a su mejor desempeño frente a escenarios de alta velocidad y carga. Esta selección debe estar respaldada por un análisis técnico-económico continuo que permita optimizar el costo por hora del neumático y maximizar su vida útil efectiva.

Se recomienda fortalecer el control de las condiciones operativas mediante la implementación de sistemas tecnológicos de monitoreo en tiempo real, tales como control de velocidad mediante sistemas Dispatch, monitoreo de presión de inflado (TPMS) y control de temperatura del neumático. De forma complementaria, es necesario mejorar las condiciones de las vías de acarreo, especialmente en tramos de alta velocidad y pendientes planas, debido a su influencia directa en la generación de sobre velocidades y aumento de temperatura interna. Estas acciones deben estar acompañadas de un programa permanente de mantenimiento vial y control operativo.

Finalmente, implementar un sistema de gestión predictiva de neumáticos basado en análisis de datos, que permita anticipar fallas mediante indicadores de desgaste, horas de operación y eventos críticos. Este sistema debe complementarse con programas de capacitación continua para operadores, orientados a la conducción eficiente, control de velocidad y buenas prácticas operativas. Se sugiere incorporar estrategias de rotación de posiciones de neumáticos en los camiones de acarreo, con el fin de equilibrar el desgaste y maximizar el aprovechamiento del ciclo de vida del activo.

REFERENCIAS

Alvarado, A., & Malpartida Z. (2019). *Sistema de gestión de mantenimiento para la durabilidad de los neumáticos O.T.R. para camiones de acarreo en mina con soporte informático. Marcona 2018*. Universidad Nacional Hermilio Valdizán.

Barlow, F., Lambourn, L., & Lindley, P. (2017). *The science of rubber compounding.* Elsevier. https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/pii/B9780080516677500147

Bellamy D., Pravica L., (2011), *Assessing the impact of driverless haul trucks in Australian surface mining*. Resources Policy, Volume 36, Issue 2, Pages 149-158, ISSN 0301-4207, https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2010.09.002

Cahuana, C. (2019). *Plan de monitoreo para reducir costos de consumo de neumáticos en operación de camiones Komatsu 930e – 4se. Caso: Minera Las Bambas*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

Cajavilca, G. (2015). *Implementacion del sistema michelin earthmover management system evolution 2 en la flota de volquetes mina Cuajone*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

Cornejo, E. (2020). *Análisis del desgaste de neumáticos para reducir costos de operación en volquetes Mercedes Benz Actros 4144k 8x4 en la empresa Aruntani S.A.C. - U.M. Tukari*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

Cruz, C. (2021). *Aplicación del análisis TKPH para determinar los neumáticos OTR óptimos para la operación en la flota de acarreo Caterpillar 793F - Mina Constancia*. Universidad Nacional de Moquegua.

Dávila, E. (2022). *Optimización de costos de acarreo y transporte de mineral mediante el incremento de tiempo de vida de los neumáticos en una*

unidad minera superficial – 2021 [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Moquegua]. Repositorio Institucional UNAM. https://repositorio.unam.edu.pe/handle/UNAM/471

Elkhenin N., Mrad H., (2025). *Maintenance 4.0 in Mining Trucks: Data Digitalization and Advanced Protocols*. Procedia Computer Science, Volume 253, Pages 2147-2155, ISSN 1877-0509, https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.01.275.

Eyzaguirre, G. (2022). *Optimización de la disponibilidad mecánica de una flota de camiones grúa aplicando la metodología RCM en la Minera Quellaveco, en el 2022* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. Repositorio Institucional UNJBG. https://repositorio.unjbg.edu.pe/items/16594bbc-1051-4da9-a4ac-8bf338fb74be

Feng Y., Liu Q., Li Y., Yang J., Dong Z. (2022). *Energy efficiency and CO2 emission comparison of alternative powertrain solutions for mining haul truck using integrated design and control optimization*. Journal of Cleaner Production, Volume 370, 133568, ISSN 0959-6526, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133568.

Gagliuffi, P., Vera, M. (2018). *Caracterización petromineralógica de los yacimientos Toquepala y Cuajone - [Boletín B 49*]. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET.

Gent, A., & Walter, J. (2006). *The pneumatic tire.* National Highway Traffic Safety Administration.

Gent, A. (2012). *Engineering with rubber: How to design rubber components*. Hanser Publishers.

Gil, F. (2020). *Mejora del sistema de gestión en seguridad y salud en el trabajo para el cambio de neumáticos off the road en la empresa Neuma Perú unidad minera Cuajone* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de

Moquegua]. Repositorio Institucional UNAM. https://repositorio.unam.edu.pe/handle/UNAM/162

Hartman, H., & Mutmansky, J. (2002). *Introductory mining engineering* (2nd ed.). Wiley.

Huang, Li Z., Jiang X., Guo J., Yang X., Zhu H., Huang Z., Ruan X., Gao J., Wang S. (2025). *Study on fatigue life of mining tires based on fatigue crack propagation theory.* Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Volume 138, 104964, ISSN 0167-8442, https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2025.104964.

ISO. (2011). *ISO 15222: Earth-moving machinery — Tires and rims — Maintenance and inspection*. International Organization for Standardization.

Jakkula B., Raj G., Murthy, S. (2019). *Maintenance management of load haul dumper using reliability analysis*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, Volume 26, Issue 2, Pages 290-310, ISSN 1355-2511, https://doi.org/10.1108/JQME-10-2018-0083.

Ma, S, Huang G, Obaia K, Moon SW, Liu WV. (2021). *Hysteresis loss of ultra-large off-the-road tire rubber compounds based on operating conditions at mine sites*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 236(2-3):439-450. doi:10.1177/09544070211015525.

Mark, J. (2014). Science and technology of rubber (4th ed.). Academic Press.

Meech, J., Parreira J., (2013). *Predicting Wear and Temperature of Autonomous Haulage Truck Tires*. IFAC Proceedings Volumes, Volume 46, Issue 16, Pages 142-147, ISSN 1474-6670, ISBN 9783902823427, https://doi.org/10.3182/20130825-4-US-2038.00078.

Mena, Y., & Zaa, M. (2017). *Análisis de Viabilidad de Importación de Neumáticos para Maquinaria pesada para el Mercado de Madre de Dios, 2016*. Universidad Católica de Santa María.

Mendoza, M. (2016). *Tipificación de las causas que influyen en la vida útil de los neumáticos de volquetes y su incidencia en la producción de la mina Toquepala*.

Michelin. (2020). *Mining tire technical data book*. Michelin Earthmover.

Minaya C., M. A. (2021). *Implementación de la metodología Six Sigma para mejorar la vida útil de neumáticos de camiones mineros en el proyecto mina Justa*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

Naderi, M., & Jalali, S. (2018). *Reliability analysis of mining truck tires considering operating conditions*. International Journal of Mining Science and Technology, 28(3), 487–495.

Olarte Ll., B. (2017). *Implementación del Mantenimiento de Neumáticos en la Unidad Productiva Uchucchacua – Lima, Compañía De Minas Buenaventura S.A.A*. Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur

Parra, J., Rojas, F., & Sánchez, M. (2019). *Gestión integral de neumáticos OTR en minería a cielo abierto*. Revista Minería y Desarrollo, 15(2), 45–58.

Pascual R., Román M., López-Campos M., Hitch M., Rodovalho E. (2019). *Reducing mining footprint by matching haul fleet demand and route-oriented tire types.* Journal of Cleaner Production, Volume 227, Pages 645-651, ISSN 0959-6526, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.069.

Pauca, J. (2014). *Estudio de temperatura para control de daños y selección de neumaticos gigantes 46/90r57 Sociedad Minera Cerro Verde*. Universidad Nacional de San Agustín.

Persson, B. (2000). *Sliding friction: Physical principles and applications*. Springer.

Pomari, Y., & Mamani, W. (2015). *Análisis, modelamiento y simulación del transporte neumático en fase densa para su aplicación en procesos industriales*. Universidad Andina Néstor Cáceres Velasquez.

Rahimdel MJ. (2022). *Residual lifetime estimation for the mining truck tires*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 237(13):3232-3244. doi:10.1177/09544070221121855

Smith, M. (2018). *Tire management in mining operations*. Mining Engineering Handbook, SME.

Tang, Q., Hu M., Bian Y., Wang Y., Lei Z., Peng X., Li K., (2024). *Optimal energy efficiency control framework for distributed drive mining truck power system with hybrid energy storage: A vehicle-cloud integration approach*. Applied Energy, Volume 374, 123989, ISSN 0306-2619, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123989.

Taquima, M. (2017). *Eficiencia en el rendimiento de neumáticos de camiones gigantes mediante el sistema de administración de movimiento de tierra Michelin (M.E.M.S. Evolutión 2) Mina Antapaccay*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

Taquima Cc., M. A. (2017). *Eficiencia en el rendimiento de neumáticos de camiones gigantes mediante el sistema de administración de movimiento de tierra Michelin (M.E.M.S. Evolutión 2) Mina Antapaccay*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

Tejada, A. (2014). *Metodología del cambio de posiciones 1 y 6 de neumáticos gigantes 793-D, para incrementar la vida útil y reducir costos en Sm. Cerro Verde – Arequipa*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

Terán, R. (2016). *Optimización de los sistemas de control para mejorar la vida útil de los neumáticos de camiones gigantes en Minera Yanacocha*. Universidad Cesar Vallejo.

Thompson, R., & Visser, A. T. (2003). *Mine haul road maintenance management systems*. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 103(5), 303–312. Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga.

Torres, D. (2024). *Análisis de criticidad y mejora del mantenimiento en equipos de carguío mediante el método AMEF en una operación minera* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. Repositorio Institucional UNJBG. https://repositorio.unjbg.edu.pe/items/165101ce-2bdd-455e-a193-3038f57beda9

Valdez, N. (2022). *Mantenimiento correctivo de camiones volquetes en los neumáticos en las Minas de Tajo Abierto*. Universidad Autónoma San Francisco.

Vera, C. (2024). *Implementación de un sistema de seguridad hidráulico en Scooptram ST-2D para reducir accidentes e incidentes en mantenimiento de neumáticos*. Universidad Nacional del Centro del Perú.

Vizcarra A., A. J. (2025). *Gestión de neumáticos en camiones mineros Komatsu 930E en Unidad Minera Las Bambas – MMG*. Universidad José Carlos Mariátegui.

Wang J., Luo Z., Zhang G., Chen J., Du C., Wang Y., Ding X. (2025). *Experimental and numerical simulation of road dust distribution and transport characteristics under disturbance of automobile tire in open pit mine.* Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 266, 106214, ISSN 0167-6105, https://doi.org/10.1016/j.jweia.2025.106214.

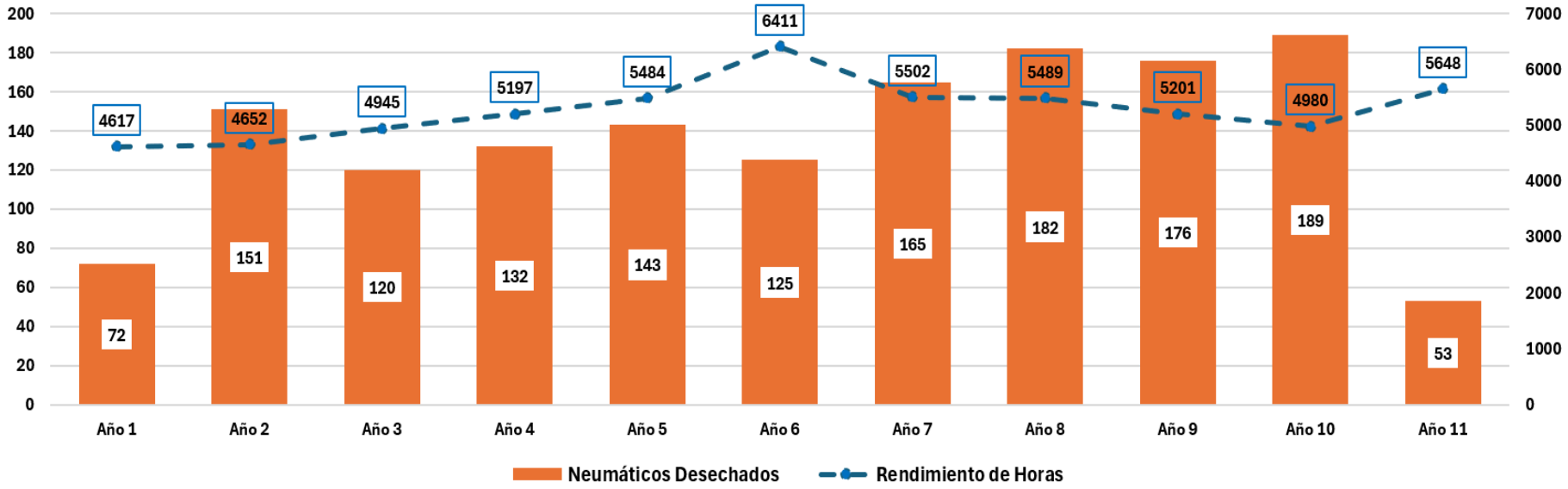
Yamaguchi, T., & Nishimura, S. (2019). *Performance analysis of off-the-road tires under severe mining conditions.* Journal of Terramechanics, 83, 1–12.

ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

	INTERROGANTES	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGIA
GENERAL	¿De qué manera el tipo de compuesto del neumático y las condiciones operativas influyen en la vida útil de los neumáticos de acarreo en una mina a cielo abierto?	Determinar la influencia del tipo de compuesto del neumático y las condiciones operativas en la vida útil de los neumáticos de acarreo en una mina a cielo abierto.	El tipo de compuesto del neumático y las condiciones operativas influyen significativamente en la vida útil de los neumáticos de acarreo en una mina a cielo abierto.	Tipo de compuesto del neumático y condiciones operativas del neumático (Variable independiente) Carga operativa Presión de inflado" Velocidad de operación Condición de la vía" Cararteristicas del compuesto Desempeño del neumático	La presente investigación es de tipo aplicada, debido a que se orienta a la resolución de un problema práctico y específico identificado en una operación real de minería a cielo abierto. La investigación es de enfoque cuantitativo, ya que se basa en la obtención y análisis de datos geotécnicos medibles, tales como parámetros de resistencia al corte, permeabilidad, factores de seguridad y condiciones de saturación del terreno.
ESPECIFICA	• ¿Cómo influye el tipo de compuesto en la vida útil de los neumáticos de acarreo en una mina a cielo abierto?	Analizar la influencia del tipo de compuesto del neumático en la vida útil de los neumáticos de acarreo en la una mina a cielo abierto.	• El tipo de compuesto del neumático influye significativamente en la vida útil de los neumáticos de acarreo en una mina a cielo abierto.	Vida útil del neumático (Variable dependiente) Desempeño operativo Durabilidad Rendimiento Operativo - Tasa de Desgaste Desgaste de banda Fallas Eficiencia económica	La presente investigación es de nivel correlacional. El diseño es no experimental, debido a que la recolección y el análisis de los datos se realizan en un periodo determinado. La investigación se desarrolla en una operación de minería a cielo abierto ubicada en la ciudad de Moquegua, región Moquegua, al sur del Perú, en la Unidad Minera de Cuajone.
	• ¿De qué manera las condiciones operativas (temperatura, velocidad, presión de inflado y estado de vía) afectan la vida útil de los neumáticos de acarreo en una mina a cielo abierto?	Evaluar el efecto de las condiciones operativas (temperatura, velocidad, presión de inflado y estado de vía) en la vida útil de los neumáticos de acarreo en una mina a cielo abierto.	• Las condiciones operativas (temperatura, velocidad, presión de inflado y estado de vía) influyen significativamente en la vida útil de los neumáticos de acarreo en una mina a cielo abierto.		

ANEXO 02:

Rendimientos históricos promedios de horas trabajadas y cantidad de consumo de neumáticos desechados 59/80R63



Se realizó un análisis histórico del rendimiento promedio de horas trabajadas y de la cantidad de neumáticos desechados correspondientes a neumáticos tamaño **59/80R63**, utilizados en los volquetes mineros de la operación Cuajone. El objetivo fue identificar tendencias operativas y períodos críticos asociados al desempeño y vida útil de los neumáticos.

Los resultados evidencian variaciones en el comportamiento histórico del rendimiento. Se observa que el **Año 10 constituye un período crítico**, debido a la reducción del rendimiento promedio a **4 980 horas**, en comparación con el **Año 9 (5 201 horas)**, presentando una disminución aproximada de **4,2 %**. Esta caída adquiere relevancia debido a que ocurre simultáneamente con un incremento en la cantidad de neumáticos desechados (**189 unidades**), lo que sugiere la presencia de factores operacionales, mecánicos o de gestión que afectaron negativamente el desempeño.

Debido a esta condición, el presente estudio toma como base el **Año 10**, al representar el escenario donde la problemática se manifiesta con mayor claridad. Asimismo, el **Año 11 evidencia una recuperación significativa**, alcanzando un rendimiento promedio de **5 648horas**, equivalente a una mejora aproximada de **13,4 %** respecto al Año 10, lo que demuestra resultados favorables posteriores a la implementación de acciones correctivas o mejoras operativas.

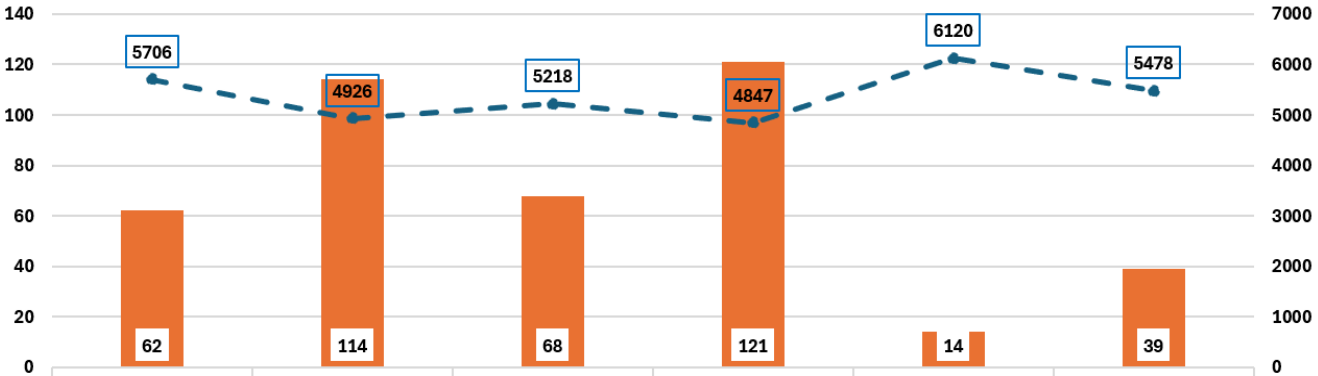
En la operación minera Cuajone se trabaja principalmente con neumáticos de las marcas Bridgestone y Michelin, ambos en la medida **59/80R63**, utilizados en la flota de volquetes mineros de gran capacidad. Estas condiciones convierten al análisis del rendimiento y consumo de neumáticos en un factor crítico para la optimización de costos y la mejora de la disponibilidad operativa.

- Máximo rendimiento: Año 6 → **6411 hr**
- Mínimo rendimiento: Año 10 → **4980 hr**
- Incremento Año 10 → Año 11: **+13,4 %**
- Mayor descarte: Año 10 → **189 neumáticos**
- Relación observada: aumento de descartes asociado a reducción del rendimiento.

Esta lectura fortalece el sustento técnico de por qué el Año 10 fue seleccionado como período de estudio.

ANEXO 03:

COMPARACIÓN DE NEUMÁTICOS POR MARCA



	BRIDGESTONE	MICHELIN	BRIDGESTONE	MICHELIN	BRIDGESTONE	MICHELIN
	Año 9		Año 10		Año 11	
Neumáticos Desechados	62	114	68	121	14	39
Rendimiento de Horas	5706	4926	5218	4847	6120	5478

El comportamiento histórico de las marcas **Bridgestone** y **Michelin** durante los **Años 9, 10 y 11**, considerando dos indicadores operativos: el **rendimiento promedio de horas trabajadas** y la **cantidad de neumáticos desechados (scrap)** en la operación minera Cuajone. Estos neumáticos corresponden a la medida **59/80R63**, utilizada en la flota de volquetes mineros de gran capacidad.

El presente estudio toma como base los **Años 9 y 10**, debido a que en este periodo se evidencia la problemática asociada a la disminución del rendimiento y al incremento del consumo de neumáticos. Los datos muestran que durante el **Año 10** se presenta una reducción en el rendimiento promedio respecto al Año 9, especialmente en la marca **Michelin**, la cual registra **4 847 horas promedio**, valor inferior al obtenido por **Bridgestone (5 218 horas)**. Asimismo, Michelin presenta el mayor número de neumáticos enviados a descarte (**121 unidades**), evidenciando un mayor consumo operacional.

Posteriormente, en el **Año 11** se observa una mejora significativa en ambas marcas. **Bridgestone alcanza un rendimiento promedio de 6 120 horas**, mientras que **Michelin registra 5 473 horas**, representando incrementos importantes respecto a

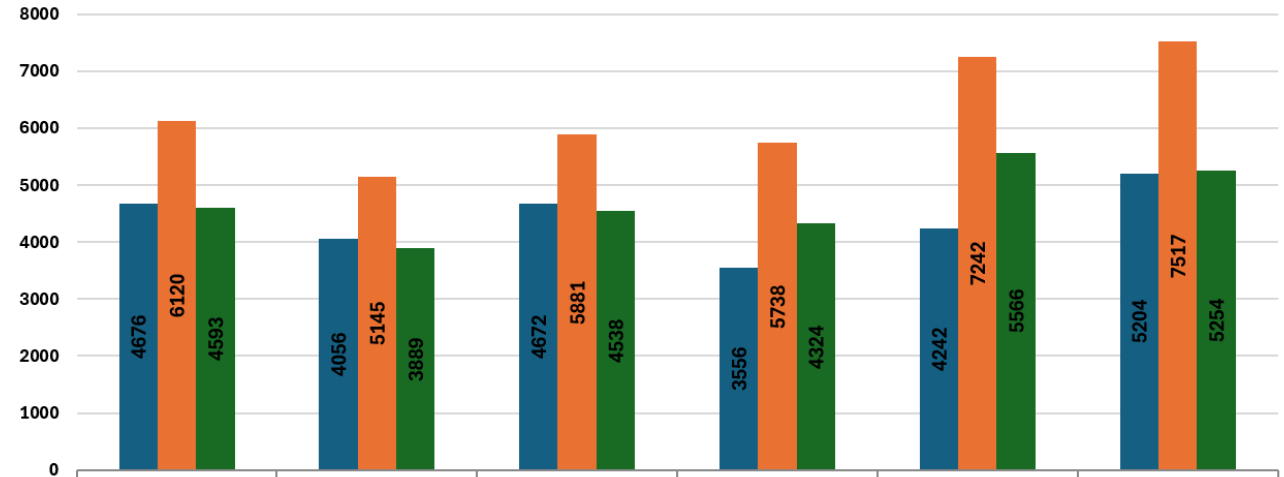
los años anteriores. De manera simultánea, la cantidad de neumáticos desechados disminuye, especialmente en Bridgestone, que reduce su consumo a **14 unidades** (enero – mayo), lo que refleja una mejora en la gestión y desempeño operativo.

En términos comparativos, se observa que la marca **Michelin presenta históricamente un mayor consumo de neumáticos y menores rendimientos promedio de horas trabajadas**, mientras que **Bridgestone evidencia un comportamiento más eficiente**, con mayores horas de servicio y menores cantidades de descarte. Este comportamiento permite inferir una posible relación entre las prácticas operativas, condiciones de uso y desempeño por marca, aspectos que justifican el análisis y planteamiento de mejoras dentro de la investigación.

- Mayor rendimiento: **Bridgestone – Año 11: 6 120 hr**
- Menor rendimiento: **Michelin – Año 10: 4 847 hr**
- Mayor consumo: **Michelin – Año 10: 121 neumáticos**
- Menor consumo: **Bridgestone – Año 11: 14 neumáticos (enero – mayo)**
- Tendencia observada: **a menor consumo de neumáticos, mayor rendimiento operativo**.

ANEXO 04:

RENDIMIENTOS PROMEDIOS DE HORAS TRABAJADAS DE NEUMÁTICOS DESECHADOS POR SU MOTIVO DE ELIMINACIÓN



	BRIDGESTONE (Año 9)	MICHELIN (Año 9)	BRIDGESTONE (Año 10)	MICHELIN (Año 10)	BRIDGESTONE (Año 11)	MICHELIN (Año 11)
CORTE EN BANDA DE RODAMIENTO	4676	4056	4672	3556	4242	5204
DESGASTE FINAL	6120	5145	5881	5738	7242	7517
SEPARACION MECANICA	4593	3889	4538	4324	5566	5254

El comportamiento del **rendimiento promedio de neumáticos 59/80R63** según el **motivo de eliminación** para las marcas **Bridgestone** y **Michelin**, durante los **Años 9, 10 y 11** en la operación minera Cuajone. Se analizan tres causas principales de retiro: **corte en banda de rodamiento**, **desgaste final** y **separación mecánica**, indicadores que permiten identificar los factores que afectan la vida útil y desempeño operacional de los neumáticos.

Los resultados muestran que el **desgaste final** presenta los mayores rendimientos promedio en ambas marcas y en todos los años evaluados, debido a que representa el escenario ideal de operación donde el neumático alcanza el final de su vida útil. Durante el **Año 11**, ambas marcas alcanzan los valores más altos: **Bridgestone registra 7 242 horas** y **Michelin 7 517 horas**, evidenciando una mejora significativa respecto a los Años 9 y 10.

Por otro lado, el **corte en banda de rodamiento** constituye la causa con menor rendimiento promedio, especialmente en la marca **Michelin durante el Año 10**, donde se registra un valor de **3 556 horas**, siendo el rendimiento más bajo del análisis. Este comportamiento sugiere pérdidas prematuras relacionadas con condiciones operacionales adversas, estado de vías, prácticas de conducción o factores externos asociados a la operación minera.

Asimismo, la **separación mecánica** presenta rendimientos intermedios entre las causas evaluadas, aunque también muestra mejoras durante el Año 11. Bridgestone alcanza **5 566 horas**, mientras Michelin obtiene **5 254 horas**, evidenciando una recuperación del desempeño operacional.

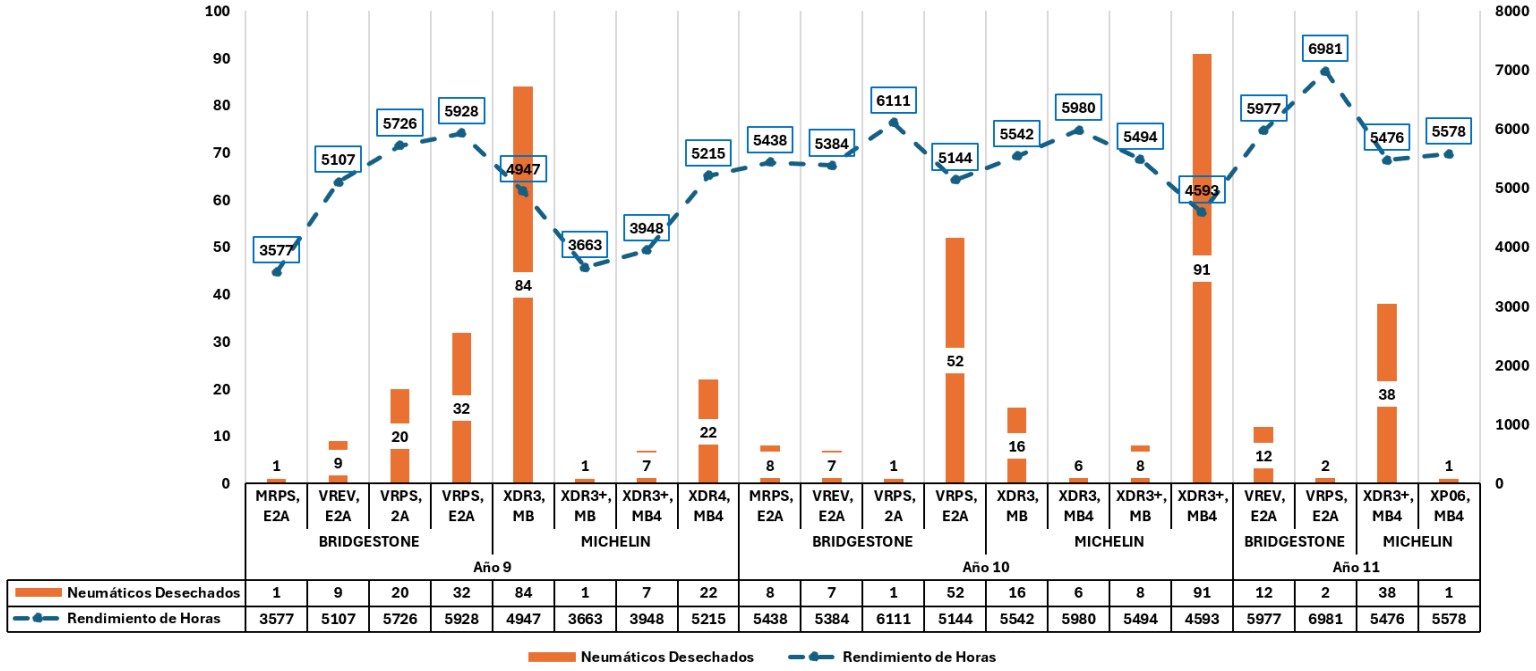
Comparativamente, **Bridgestone presenta un comportamiento más estable y mayores rendimientos promedio en la mayoría de los escenarios evaluados**, mientras que **Michelin evidencia una mayor variabilidad y menores horas de servicio**, particularmente en los eventos asociados a fallas prematuras.

- Mayor rendimiento observado:
  - **Bridgestone – Desgaste final – Año 11: 7 242 hr**
- Menor rendimiento observado:
  - **Michelin – Corte en banda – Año 10: 3 556 hr**
- Tendencia identificada:
  - El **desgaste final** representa el comportamiento óptimo esperado.
  - Las fallas prematuras (**corte y separación**) reducen significativamente la vida útil.
  - El **Año 11 evidencia mejoras consistentes** en ambas marcas.

Los resultados sugieren que las acciones implementadas posteriormente al Año 11 generaron un impacto positivo en el rendimiento, incrementando la vida útil promedio y reduciendo las pérdidas prematuras de neumáticos.

ANEXO 05:

Rendimientos Promedios de Horas Trabajadas y Cantidades de Neumáticos Desechados por su Tipo de Compuestos

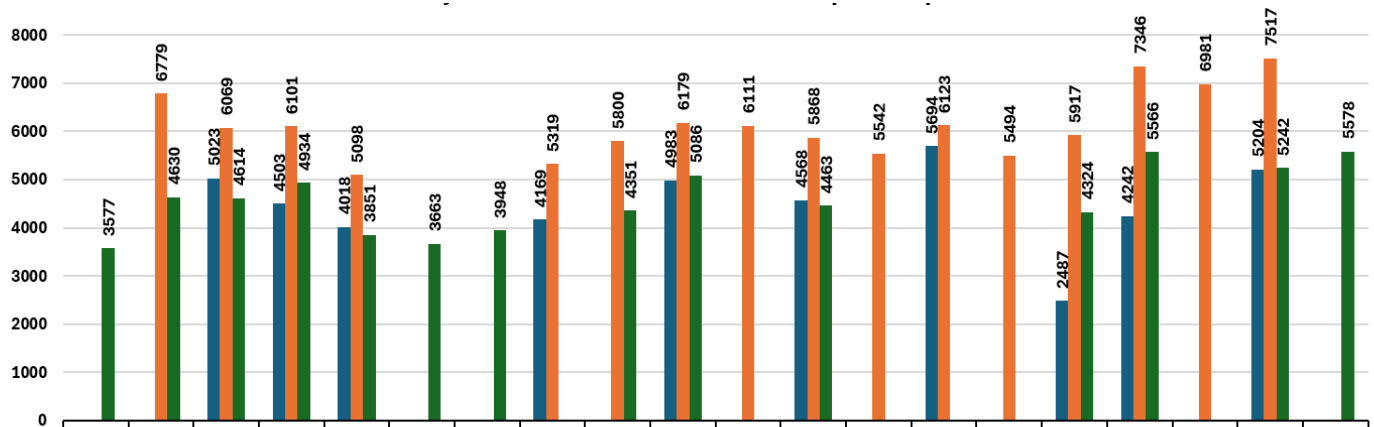


Neumáticos Desechados	1	9	20	32	84	1	7	22	8	7	1	52	16	6	8	91	12	2	38	1
Rendimiento de Horas	3577	5107	5726	5928	4947	3663	3948	5215	5438	5384	6111	5144	5542	5980	5494	4593	5977	6981	5476	5578

Se realizó un análisis comparativo de los diferentes tipos de compuestos utilizados por cada marca de neumáticos. Hasta el Año 10 se trabajó con cuatro tipos de compuestos por marca. Los resultados evidencian que los compuestos con menor rendimiento y mayor nivel de consumo corresponden a la marca Michelin. En particular, se identifica una tendencia crítica asociada al compuesto **XDR3+ MB4**, el cual presenta un desempeño significativamente inferior respecto a los demás compuestos evaluados. Este comportamiento permite inferir que dicho compuesto constituye la principal fuente de desviación en los indicadores de desempeño. Sus bajos rendimientos impactan negativamente en el promedio general de horas de vida útil de los neumáticos, afectando directamente los indicadores consolidados que son reportados a la gerencia para la toma de decisiones operativas y de gestión.

ANEXO 06:

Rendimiento Promedio de Horas Trabajadas de Neumáticos Desechados por su Tipo de Eliminación

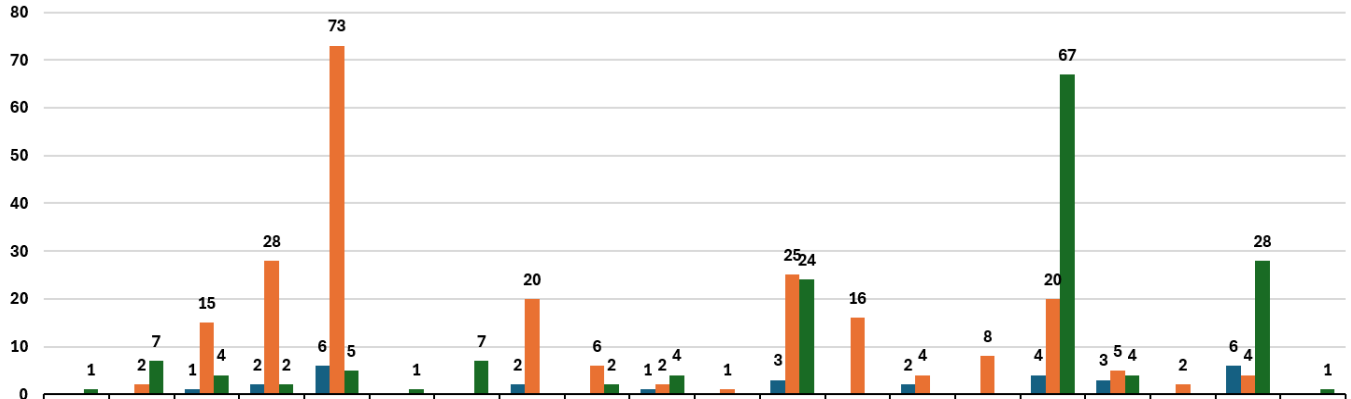


	MRPS, E2A	VREV, E2A	VRPS, 2A	VRPS, E2A	XDR3, MB	XDR3+, MB	XDR3+, MB4	XDR4, MB4	MRPS, E2A	VREV, E2A	VRPS, 2A	VRPS, E2A	XDR3, MB	XDR3, MB4	XDR3+, MB	XDR3+, MB4	VREV, E2A	VRPS, E2A	XDR3+, MB4	XP06, MB4
	BRIDGESTONE				MICHELIN				BRIDGESTONE				MICHELIN				BRIDGESTONE		MICHELIN	
	Año 9								Año 10								Año 11			
CORTE EN BANDA DE RODAMIENTO			5023	4503	4018			4169		4983		4568		5694		2487	4242		5204	
DESGASTE FINAL		6779	6069	6101	5098			5319	5800	6179	6111	5868	5542	6123	5494	5917	7346	6981	7517	
SEPARACION MECANICA	3577	4630	4614	4934	3851	3663	3948		4351	5086		4463				4324	5566		5242	5578

Se observa que el compuesto **XDR3+ MB4** fue el único que presentó neumáticos desechados por fallas asociadas a **separaciones mecánicas** durante el Año 9; este mismo comportamiento continuó registrándose en los Años 10 y 11. Sin embargo, pese a la persistencia de esta condición, se evidencia una mejora progresiva en los rendimientos alcanzados, atribuida a la implementación de propuestas de mejora y acciones correctivas desarrolladas en la operación. Estos resultados indican que las estrategias aplicadas contribuyeron favorablemente a optimizar el desempeño del compuesto, reduciendo el impacto operacional y mejorando sus indicadores de vida útil y productividad.

ANEXO 07:

Cantidad de Neumáticos Desechados por su Tipo de Eliminación

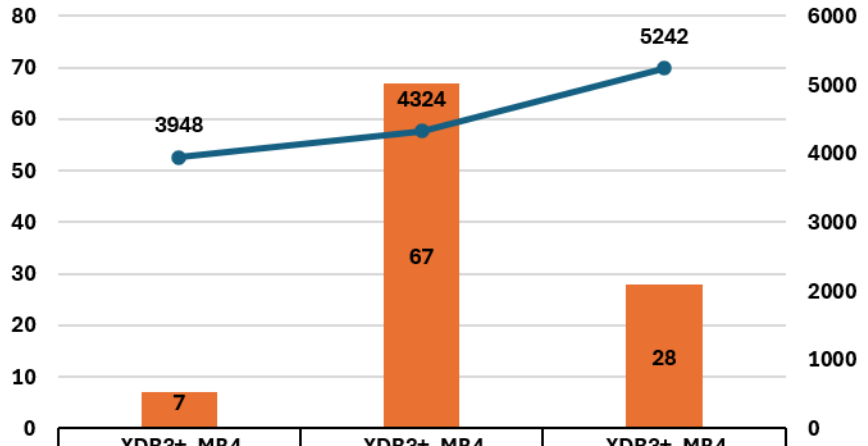


	MRPS, E2A	VREV, E2A	VRPS, 2A	VRPS, E2A	XDR3, MB	XDR3+, MB	XDR3+, MB4	XDR4, MB4	MRPS, E2A	VREV, E2A	VRPS, 2A	VRPS, E2A	XDR3, MB	XDR3, MB4	XDR3+, MB	XDR3+, MB4	VREV, E2A	VRPS, E2A	XDR3+, MB4	XP06, MB4
CORTE EN BANDA DE RODAMIENTO			1	2	6			2		1		3		2		4	3		6	
DESGASTE FINAL		2	15	28	73			20	6	2	1	25	16	4	8	20	5	2	4	
SEPARACION MECANICA	1	7	4	2	5	1	7		2	4		24				67	4		28	1

Se evidencia que la cantidad de neumáticos desechados por **separaciones mecánicas** en el compuesto **XDR3+ MB4** es significativamente mayor en comparación con los demás motivos de eliminación registrados. Este comportamiento sugiere que la principal problemática se encuentra asociada a las características o desempeño de este tipo de compuesto. En consecuencia, se requiere un análisis más detallado y específico para identificar las causas que originan su bajo rendimiento en horas trabajadas, evaluando factores operacionales, condiciones de aplicación, variables geomecánicas de la vía y posibles limitaciones inherentes al compuesto. Este análisis permitirá determinar las causas raíz y establecer estrategias orientadas a mejorar su desempeño y vida útil operacional.

ANEXO 08:

Neumáticos Desechados por Separaciones Mecánicas en el compuesto XDR3+ MB4 -Michelin

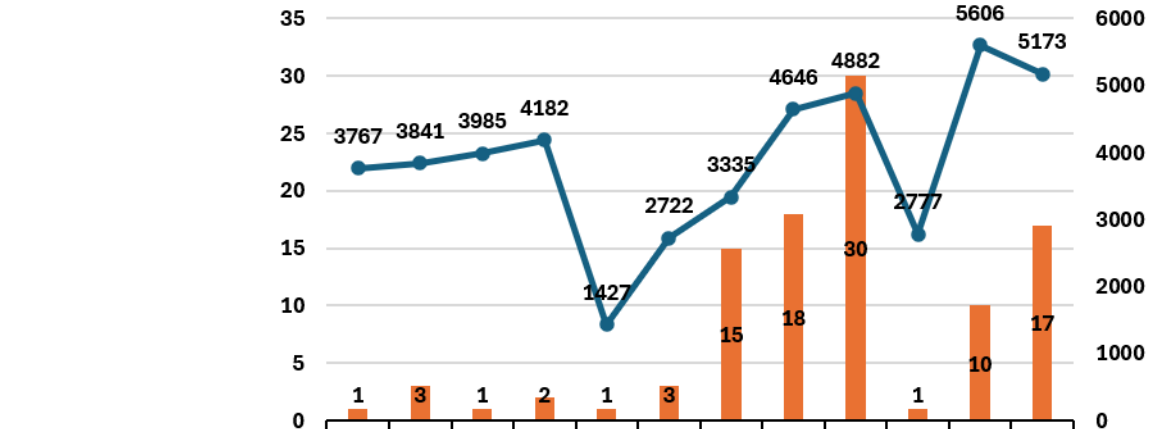


	XDR3+, MB4 MICHELIN Año 9	XDR3+, MB4 MICHELIN Año 10	XDR3+, MB4 MICHELIN Año 11
Neumáticos Desechados	7	67	28
Rendimiento de Horas	3948	4324	5242

La cantidad de neumáticos desechados por **separaciones mecánicas** correspondientes al compuesto **XDR3+ MB4** presenta un incremento de **60 unidades en el Año 10** respecto al Año 9, evidenciando un aumento considerable en este tipo de falla. Asimismo, se observa que el rendimiento alcanzado por este compuesto permanece por debajo de los valores estimados por el proveedor, lo que confirma la existencia de una desviación significativa en su desempeño operacional. Este comportamiento sugiere la presencia de factores operativos y/o condiciones específicas de aplicación que afectan su vida útil, generando un impacto negativo en los indicadores de rendimiento y en la eficiencia global de la operación minera.

ANEXO 09:

Neumáticos Desechados con el tipo de compuesto XDR3+ MB4 por su última posición -Michelin



	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5	Pos. 6	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5	Pos. 6	Pos. 4	Pos. 5	Pos. 6
	Año 9				Año 10					Año 11		
Neumáticos Desechados	1	3	1	2	1	3	15	18	30	1	10	17
Rendimiento de Horas	3767	3841	3985	4182	1427	2722	3335	4646	4882	2777	5606	5173

Es necesario analizar la **última posición operativa** en la que el neumático fue desechado, con el objetivo de desarrollar una evaluación más detallada de su comportamiento y determinar posibles patrones asociados a fallas prematuras o bajo desempeño. Este aspecto influye directamente en los rendimientos promedio globales reportados en la operación. Bajo condiciones normales de desempeño y rotación adecuada, los neumáticos deberían alcanzar su ciclo de vida útil y ser desechados en las **posiciones 5 y 6**, ya que estas representan las etapas finales esperadas de operación. Desviaciones respecto a este patrón podrían indicar problemas relacionados con la estrategia de rotación, condiciones operativas o factores específicos que afectan la vida útil del neumático.

ANEXO 10:

Especificaciones Técnicas del Neumático Michelin 59/80R63 modelo XDR3+, MB4

COMMERCIAL DESCRIPTION	CAI *MSPN*	Max. dist./ hour km *mile*	TKPH [1] *TMPH*	e mm *inch*	D mm *inch*	R' mm *inch*	RC mm *inch*	Tread depth mm *32rd*	Dual Spacing mm *inch*	Cap. liter *gallon*	Measuring [2] [3] Recommended Rim	Other Approved [2] [3] Rims
XDR3 + MB4 E4R ** 59/80 R 63 Tubeless	417433 *16577*	20 *12.4*	1600 *1096*	1467 *57.8*	4030 *158.7*	1742 *68.6*	11974 *471.4*	110 *138.6*	1834 *72.2*	9840 *2599.7*	**44.00/5.0 [6.0]**	41.00/5.0 [6.0]
Bar *Psi*	**5** *73*	**5.5** *80*	**6** *87*	**6.5** *94*	**6.7** *97*	**6.8** *99*						
Machine - Use (kg - *lbs*)	**TRANSPORT LOAD PER TIRE 41" RIM**											
STANDARD	82920 *182839*	89460 *197259*	96000 *211680*	98900 *218075*	100000 *220500*							
Machine - Use (kg - *lbs*)	**TRANSPORT LOAD PER TIRE 44" RIM**											
STANDARD			100000 *220500*	102100 *225131*		104000 *229320*						

Especificaciones Técnicas del Neumático Michelin 59/80R63 modelo XP06, MB4

COMMERCIAL DESCRIPTION	CAI *MSPN*	Max. dist./ hour km *mile*	TKPH [1] *TMPH*	e mm *inch*	D mm *inch*	R' mm *inch*	RC mm *inch*	Tread depth mm *32rd*	Dual Spacing mm *inch*	Cap. liter *gallon*	Measuring [2] [3] Recommended Rim	Other Approved [2] [3] Rims
XP06 MB4 E4R* 59/80 R 63 tubeless	663402 *16577*	20 *12.4*	1600 *1096*	1467 *57.8*	4030 *158.7*	1742 *68.6*	11974 *471.4*	115 *138.6*	1834 *72.2*	9840 *2599.7*	**44.00/5.0 [6.0]**	41.00/5.0 [6.0]
Bar *Psi*	**5** *73*	**5.5** *80*	**6** *87*	**6.5** *94*	**6.7** *97*	**6.8** *99*						
Machine - Use (kg - *lbs*)	**TRANSPORT LOAD PER TIRE 41" RIM**											
STANDARD	82920 *182839*	89460 *197259*	96000 *211680*	98900 *218075*	100000 *220500*							
Machine - Use (kg - *lbs*)	**TRANSPORT LOAD PER TIRE 44" RIM**											
STANDARD			100000 *220500*	102100 *225131*		104000 *229320*						

ANEXO 11:

Especificaciones Técnicas del Neumático Bridgestone 59/80R63 modelo VREV, E2A

SIZE	PLY/STAR RATING	COMPOUND / CONSTRUCTION	TRA / APPLICATION	ARTICLE #	TMPH/TKPH	AVERAGE WEIGHT [LB/KG]	OTD [32ND/MM]	OVERALL DIAMETER [IN/MM]	OVERALL WIDTH [IN/MM]	LOAD CAPACITY AT 102 PSI [LB/KG]
53/80R63	2*	E1A	E-4	12315	874 1,276	10,937 4,961	139 110	150.2 3,814	51.6 1,311	209,500 95,000
53/80R63	2*	E2A	E-4	12316	740 1,080	11,010 4,994	139 110	150.2 3,814	51.6 1,311	209,500 95,000
53/80R63	2*	E3A	E-4	12317	1,070 1,562	10,911 4,949	139 110	150.2 3,814	51.6 1,311	209,500 95,000
59/80R63	2*	E1A	E-4	1266	1,192 1,740	12,932 5,866	148 118	150.3 4,021	57.8 1,467	253,500 115,000
59/80R63	2*	E2A	E-4	1268	966 1,410	13,025 5,908	148 118	158.3 4,021	57.8 1,467	253,500 115,000
59/80R63	2*	E3A	E-4	4739	1,395 2,036	12,897 5,850	148 118	150.3 4,021	57.8 1,467	253,500 115,000

Especificaciones Técnicas del Neumático Bridgestone 59/80R63 modelo VRPS, E2A

SIZE	PLY/STAR RATING	COMPOUND / CONSTRUCTION	TRA / APPLICATION	ARTICLE #	TMPH/TKPH	AVERAGE WEIGHT [LB/KG]	OTD [32ND/MM]	OVERALL DIAMETER [IN/MM]	OVERALL WIDTH [IN/MM]	LOAD CAPACITY AT 102 PSI [LB/KG]
59/80R63	2*	E1A	E-4	11614	1,038 1,515	12,621 5,725	146 116	158.1 4,017	57.8 1,467	253,500 115,000
59/80R63	2*	E2A	E-4	11615	841 1,228	12,687 5,755	146 116	158.1 4,017	57.8 1,467	253,500 115,000
59/80R63	2*	E3A	E-4	11617	1,215 1,773	12,595 5,713	146 116	158.1 4,017	57.8 1,467	253,500 115,000

FORMATO DE AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UNAM

Formulario de autorización para la publicación electrónica en la página web del Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Moquegua, de conformidad con la Ley N° 30035 Ley que regula el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto y Resolución de Comisión Organizadora N° 041-2022-UNAM que aprueba el Reglamento que regula el Repositorio Institucional Digital de la UNAM.

1. DATOS DEL AUTOR

Nombres y Apellidos	: Edwin Elías Mejía Reyes
DNI/Carnet de Extranjería/Pasaporte N°	: 71974266
Correo electrónico	: edwinmr0597@gmail.com
Teléfono/Celular	: 953482522

2. GRADO, TITULO O ESPECIALIZACIÓN (Marque con una X)

Bachiller	Titulo Profesional	Magister	Doctor	Segunda Especialidad
	X			

3. TIPO DE PUBLICACIÓN (Marque con una X)

a) Articulo ( )
b) Tesis de pregrado (X)
c) Tesis de Maestría ( )
d) Tesis de Doctorado ( )
e) Monografía ( )
f) Reporte de caso científico o hallazgos ( )
g) Libro ( )
h) Parte de un libro ( )
i) Revisión ( )
j) Conferencia ( )
k) Presentación ( )
l) Artículo preliminar ( )
m) Artículo antes de ser publicado ( )
n) Artículo de prensa ( )
o) Documentos internos ( )
p) Imagen ( )
q) Documentos técnicos ( )
r) Ponencias presentadas en eventos científicos (Jornada, Congreso, Simposio Conferencias, etc.) ( )
s) Informes de suficiencia profesional ( )
t) Patentes producidas por académicos/as ( )

4. **TIPO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (Marque con una X)**

   a) Tesis (X)
   b) Trabajo de Investigación ( )
   c) Trabajo de suficiencia profesional ( )
   d) Trabajo académico ( )

5. **DATOS DE LA PUBLICACION**

   a) Título : INFLUENCIA DEL TIPO DE COMPUESTO DEL NEUMÁTICO Y LAS CONDICIONES OPERATIVAS EN LA VIDA ÚTIL DE LOS NEUMÁTICOS DE ACARREO EN UNA MINA A CIELO ABIERTO
   b) Campo del conocimiento OCDE (Indicar el código de clasificación OCDE de la obra : https://catalogos.concytec.gob.pe/vocabulario/ocde_ford.html) : 2.07.05
   c) Fecha de publicación : 23/06/2025

6. **DATOS DEL ASESOR:**

   a) Nombres y Apellidos : Dr. Christ Jesus Barriga Paria
   b) DNI/Pasaporte/Cédula : 44331713
   c) ORCID : 0000-0002-7130-9297

FIRMA : .....

DOCUMENTO DE IDENTIDAD : 71974266
NOMBRES Y APELLIDOS : Edwin Elias Mejia Reyes

LICENCIAS

Licencia Estándar

Bajo los siguientes términos, autorizo el depósito de mi trabajo de investigación en el Repositorio Institucional Digital de la UNAM.

Con la autorización de depósito da mi trabajo de investigación, otorgo a la Universidad Nacional de Moquegua, una Licencia No Exclusiva para reproducir. distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi trabajo de investigación (incluido el resumen), en formato físico o digital, en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios provistos por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Institucional Digital de la UNAM, Colección de Tesis, entre otros, en el Perú y en el extranjero, por el tiempo y veces que considere necesarias, y libre de remuneraciones.

En virtud de dicha Licencia, la UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA, podrá reproducir mi trabajo de investigación en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con los propósitos de seguridad, respaldo y preservación.

Declaro que el trabajo de investigación es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, o coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicho trabajo de investigación no infringe derechos de autor de terceras personas.

La UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA consignara el nombre del/los autor/es del trabajo de investigación, y no le hará ninguna modificación más de la permitida en la presente licencia.

Autorizo el depósito (marque con una X).

(X) SI autorizo que se deposite inmediatamente.

FIRMA : .....



DOCUMENTO DE IDENTIDAD : 71974266
NOMBRES Y APELLIDOS : Edwin Elias Mejia Reyes
FECHA : 10 de agosto del 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN / TESIS / TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Yo, Edwin Elias Mejia Reyes, bachiller de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, de la Universidad Nacional de Moquegua, identificado (a) con DNI: Nº 71974266, autor(a) de la Tesis / Trabajo de suficiencia profesional titulado INFLUENCIA DEL TIPO DE COMPUESTO DEL NEUMÁTICO Y LAS CONDICIONES OPERATIVAS EN LA VIDA ÚTIL DE LOS NEUMÁTICOS DE ACARREO EN UNA MINA A CIELO ABIERTO
Declaro bajo juramento que:

1. El trabajo de investigación es auténtico, siendo resultado de mi trabajo personal, que no se ha copiado, que no se ha utilizado ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones diversas, sacadas de cualquier tesis, obra, artículo, memoria, etc., (en versión digital o impresa), sin mencionar de forma clara y exacta su origen o autor, tanto en el cuerpo del texto, figuras, cuadros, tablas u otros que tengan derechos de autor. Por tanto, el trabajo de investigación no ha sido plagiado total ni parcialmente.
2. El trabajo de investigación no ha sido autoplagiada, es decir, no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
3. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados y por tanto los resultados que se presentan en el trabajo de investigación constituirán aporte a la realidad investigada.

Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales, por lo que asumo cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de irregularidades en el trabajo de investigación, así como de los derechos sobre la obra presentada.

Moquegua, 10 de agosto del 2026.



Huella digital

Nombres y Apellidos: Edwin Elias Mejia Reyes
DNI: 71974266

Base legal: RESOLUCIÓN DIRECTORAL N° 194-2020-SUNEDU-02-15

EDWIN ELIAS MEJIA REYES

TESIS FINAL

TESIS

CONFORMIDAD DE TESIS FINAL

Universidad Nacional de Moquegua

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::1:3645633164

Fecha de entrega
10 sep 2026, 5:22 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
10 sep 2026, 5:27 p.m. GMT-5

Nombre del archivo
TESIS_DE_EDWIN_MEJIA_FINAL.pdf

Tamaño del archivo
1.7 MB

103 páginas

27.700 palabras

168.862 caracteres

19% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado

Fuentes principales

17% Fuentes de Internet
5% Publicaciones
7% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

17% Fuentes de Internet
5% Publicaciones
7% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional de Moquegua 3%

2 Internet
repositorio.uncp.edu.pe 1%

3 Internet
repositorio.ucsm.edu.pe 1%

4 Internet
repositorio.unsa.edu.pe <1%

5 Internet
alicia.concytec.gob.pe <1%

6 Internet
repositorio.unam.edu.pe <1%

7 Internet
www.coursehero.com <1%

8 Internet
repositorio.ujcm.edu.pe <1%

9 Trabajos del estudiante
Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC <1%

10 Internet
repositorio.continental.edu.pe <1%

11 Internet
hdl.handle.net <1%

12 Internet
repositorio.unjbg.edu.pe <1%

13 Internet
tesis.ucsm.edu.pe <1%

14 Internet
repositorio.unheval.edu.pe <1%

15 Internet
repositorio.udh.edu.pe <1%

16 Internet
de.slideshare.net <1%

17 Internet
repositorio.uchile.cl <1%

18 Internet
repositorio.unfv.edu.pe <1%

19 Internet
repositorio.uasf.edu.pe <1%

20 Internet
repositorioacademico.upc.edu.pe <1%

21 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional de Ingenieria <1%

22 Internet
worldwidescience.org <1%

23 Internet
dspace.unitru.edu.pe <1%

24 Internet
intranet.cip.org.pe <1%

25 Trabajos del estudiante
Universidad Andrés Bello <1%

26 Internet
www.researchgate.net <1%

27 Internet
repositorio.udec.cl <1%

28 Internet
repositorio.ucv.edu.pe <1%

29 Internet
repositorio.unap.edu.pe <1%

30 Internet
repositorio.unah.edu.pe <1%

31 Internet
repositorio.unsaac.edu.pe <1%

32 Internet
prezi.com <1%

33 Internet
moam.info <1%

34 Internet
documentop.com <1%

35 Internet
www.pirelli.com <1%

36 Trabajos del estudiante
Universidad EAN <1%

37 Internet
pt.scribd.com <1%

38 Internet
repositorio.unjfsc.edu.pe <1%

39 Internet
repositorio.usm.cl <1%

40 Internet
repositorio.uta.edu.ec <1%

41 Internet
www.eurchembull.com <1%

42 Publicación
Ortiz Duarte, Diana Paola. "Alineación curricular de los saberes propios wayuu y l... <1%

43 Publicación
Rodriguez , Daniel Esteban. "Modelo Analitico Para El Dimensionamiento De Flota... <1%

44 Trabajos del estudiante
Universidad Católica de Honduras Nuestra Señora Reina de la Paz <1%

45 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo <1%

46 Internet
repositorio.uap.edu.pe <1%

47 Trabajos del estudiante
Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez <1%

48 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional de Piura <1%

49 Internet
repositorio.ulc.edu.pe <1%

50 Internet
repositorio.unasam.edu.pe <1%

51 Internet
repositorio.unica.edu.pe <1%

52 Internet
repositorio.upn.edu.pe <1%

53 Internet
www.cienciayeducacion.com <1%

54 Trabajos del estudiante
Universidad Continental <1%

55 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional de Cajamarca <1%

56 Trabajos del estudiante
Universidad Politécnica del Perú <1%

57 Internet
www.slideshare.net <1%

58 Internet
patents.google.com <1%

59 Internet
repositorio.upeu.edu.pe <1%

60 Trabajos del estudiante
ufidelitas <1%

61 Internet
www.theibfr.com <1%

62 Internet
dspace.unl.edu.ec <1%

63 Internet
www.ehowenespanol.com <1%

64 Publicación
Alfaro Sesa, Elizabeth Lorelein|Corvera Diaz, Alonso Angel Junior|Cruz, Lenin Ana... <1%

65 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional de Educacion Enrique Guzman y Valle <1%

66 Internet
investigacionuft.net.ve <1%

67 Internet
repositorio.ingemmet.gob.pe <1%

68 Internet
repositorio.unu.edu.pe <1%

69 Internet
repository.eafit.edu.co <1%

70 Trabajos del estudiante
Universidad Católica de Santa María <1%

71 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann <1%

72 Trabajos del estudiante
Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC <1%

73 Internet
repositorio.pucp.edu.pe <1%

74 Internet
repositorio.unc.edu.pe <1%

75 Internet
www.portalfruticola.com <1%

76 Internet
lareferencia.info <1%

77 Internet
logisticasud.enfasis.com <1%

78 Internet
noesis.uis.edu.co <1%

79 Internet
ojs.brazilianjournals.com.br <1%

80 Internet
repositorio.unaj.edu.pe <1%

81 Internet
repositorio.unal.edu.co <1%

82 Internet
tr-ex.me <1%

83 Internet
www.claroshop.com <1%

84 Internet
www.iiss.es <1%

85 Trabajos del estudiante
Universidad Cesar Vallejo <1%

86 Internet
campbellcollaboration.org <1%

87 Internet
core.ac.uk <1%

88 Internet
kipdf.com <1%

89 Internet
pmc.ncbi.nlm.nih.gov <1%

90 Internet
repositorioslatinoamericanos.uchile.cl <1%

91 Internet
www.cuencarural.com <1%

92 Internet
www.laka.org <1%

93 Internet
www.rec.uba.ar <1%

94 Internet
www.wiseguyreports.com <1%

95 Internet
yh75.co-aol.com <1%

96 Internet
zaguan.unizar.es <1%

97 Trabajos del estudiante
Blackboard <1%

98 Internet
apirepositorio.unu.edu.pe <1%

99 Internet
dspace.unach.edu.ec <1%

100 Internet
dspacetest.cgiar.org <1%

101 Internet
e-journal.unair.ac.id <1%

102 Internet
es3zado.blogspot.com <1%

103 Internet
get.slack.help <1%

104 Internet
lookformedical.com <1%

105 Internet
proactivo.com.pe <1%

106 Internet
repositoriodspace.unipamplona.edu.co:8080 <1%

107 Internet
revistas.um.es <1%

108 Internet
wiki2.org <1%

109 Internet
www.bridgestone.com.ar <1%

110 Internet
www.editorial.unican.es <1%

111 Internet
www.jove.com <1%

112 Internet
www.monografias.com <1%

113 Internet
www.telefonica.es <1%

114 Internet
www.unsl.edu.ar <1%

115 Internet
www.victoria.co.cu <1%

116 Publicación
" Spanish Abstracts Volume 20, Number 6 ", Journal of Industrial Ecology, 2016 <1%

117 Internet
1library.co <1%

118 Publicación
ECOLOGIA Y TECNOLOGIA AMBIENTAL S.A.C. "MEIA para la Implementación del P... <1%

119 Publicación
Nadal Gisbert, Antonio V. "Investigation of the recycling of tires to elastomeric re... <1%

120 Publicación
Rosa Karina Gonzales Medina, Rudy Alder Daga Saravia. "Trabajo remoto y desco... <1%

121 Internet
aaep.org.ar <1%

122 Internet
bioone.org <1%

123 Internet
docplayer.es <1%

124 Internet
dspace.espoch.edu.ec <1%

125 Internet
educalingo.com <1%

126 Internet
eujournal.org <1%

127 Internet
fr.scribd.com <1%

128 Internet
issuu.com <1%

129 Internet
repositorio.uancv.edu.pe <1%

130 Internet
repositorio.udd.cl <1%

131 Internet
repositorio.uni.edu.pe <1%

132 Internet
repositorio.utc.edu.ec <1%

133 Internet
repositorio.utp.edu.co <1%

134 Internet
repositorio.utp.edu.pe <1%

135 Internet
revistas.ubiobio.cl <1%

136 Internet
revistaschilenas.uchile.cl <1%

137 Internet
riunet.upv.es <1%

138 Internet
upc.aws.openrepository.com <1%

139 Internet
www.bbc.com <1%

140 Internet
www.cap-semfyc.com <1%

141 Internet
www.evven.netfirms.com <1%

142 Internet
www.grafiati.com <1%

143 Internet
www.iksadamerica.org <1%

144 Internet
www.mexico.embassy.gov.au <1%

145 Internet
www.scribd.com <1%

146 Internet
www.tdx.cat <1%

147 Internet
www.worldcat.org <1%

148 Publicación
INSIDEO SOCIEDAD ANONIMA CERRADA - INSIDEO S.A.C.. "ITS Mejora Tecnológica... <1%

149 Internet
vsip.info <1%

150 Trabajos del estudiante
Escuela de Posgrado Newman <1%

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO
N° 645-2026-CU

Moquegua, 23 de setiembre de 2026

VISTOS:

La Resolución de Consejo de Facultad N° 453-2026-CF-FAIN-UNAM, emitida por la Facultad de Ingenierías; el Informe N° D0492-2026-UNAM-R-FAIN, emitido por la Decana de la Facultad de Ingenierías, el Informe Técnico N° D0133-2026-SG-GT, emitido por la Especialista Administrativo II de Grados y Títulos; el Informe N° D0488-2026-UNAM-R-SG, emitido por el Secretario General de la UNAM; el Proveído N° 4733-2026-R, emitido por el señor Rector; el Acuerdo del Pleno del Consejo Universitario de Sesión Extraordinaria N° 39-2026-SE-CU-UNAM, de fecha 23 de setiembre de 2026; y,

CONSIDERANDO:

Que, conforme al cuarto párrafo del artículo 18 de la Constitución Política del Perú, dispone que cada Universidad es autónoma en su régimen normativo, de gobierno, académico, administrativo y económico. Y el artículo 8° de la Ley N° 30220-Ley Universitaria, establece que la referida autonomía inherente a las Universidades, se ejerce de conformidad con la Constitución y demás normativa aplicable. Concordante con el artículo 1, de la Ley N° 31520, Ley que restablece la autonomía y la institucionalidad de las universidades peruanas, así como la Ley N° 32141, Ley que modifica la Ley N° 30220-Ley Universitaria, a fin de fortalecer la institucionalidad de las Universidades Públicas licenciadas;

Que, el artículo 58 de la Ley N° 30220-Ley Universitaria, establece que el Consejo Universitario es el máximo órgano de gestión, dirección y ejecución académica y administrativa de la Universidad. Concordante con el artículo 18° del Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, aprobado bajo Resolución de Asamblea Universitaria N° 015-2025-AU-UNAM;

Que, el artículo 59 de la Ley Universitaria-Ley N° 30220, establece las atribuciones del Consejo Universitario, y específicamente el numeral 59.9 establece; Conferir los grados académicos y los títulos profesionales aprobados por las Facultades y Escuela de Posgrado, así como otorgar distinciones honoríficas y reconocer y revalidar los estudios, grados y títulos de universidades extranjeras, cuando la universidad está autorizada por la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria. Concordante con el numeral 14, del artículo 20° del Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua;

Que, mediante Resolución de Asamblea Universitaria N° 006-2026-AU, de fecha 20 de abril de 2026, se aprobó la incorporación de la Disposición Transitoria N° 22 al Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, referida a la excepción para la emisión de los grados académicos de bachiller y títulos profesionales consignando la denominación de "Facultad de Ingeniería y Arquitectura";

Que, mediante la Resolución de Consejo de Facultad N° 453-2026-CF-FAIN-UNAM, de fecha 03 de setiembre de 2026, el Consejo de Facultad de Ingenierías aprobó el otorgamiento del Título Profesional de Ingeniero de Minas, por la modalidad de Tesis, a tres (03) Bachilleres de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Nacional de Moquegua, de acuerdo al siguiente detalle: EDWIN ELIAS MEJIA REYES, MANUEL ALEJANDRO AREOS JIMENEZ LASTEROS y RONALDO KENER SICHA JIHUALLANCA;

Que, mediante Informe N° D0492-2026-UNAM-R-FAIN, de fecha 08 de setiembre de 2026, la Decana de la Facultad de Ingenierías remite a Secretaría General la Resolución de Consejo de Facultad N° 453-2026-CF-FAIN-UNAM, de fecha 03 de setiembre de 2026;

Que, mediante Informe Técnico N° D0133-2026-SG-GT de fecha 10 de setiembre de 2026, e Informe N° D0488-2026-UNAM-R-SG de fecha 11 de setiembre de 2026, el Secretario General de la UNAM, remite al Rectorado los expedientes para el trámite de Título Profesional de Ingeniero de Minas a favor de los Bachilleres: EDWIN ELIAS MEJIA REYES, MANUEL ALEJANDRO AREOS JIMENEZ LASTEROS y RONALDO KENER SICHA JIHUALLANCA de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, quienes se encuentran aptos para la expedición del Título Profesional de Ingeniero de Minas, al haber cumplido satisfactoriamente con los requisitos legales y reglamentarios exigidos en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, razón por la cual, el señor Secretario General incluye dichos expedientes como punto de agenda para ser tratado en Sesión Extraordinaria de Consejo Universitario de fecha 23 de setiembre de 2026;

Que, el artículo 44° de la Ley N° 30220, Ley Universitaria señala que las universidades otorgan los grados académicos de Bachiller, Maestro, Doctor y los Títulos Profesionales que correspondan, a nombre de la Nación (...). Asimismo, la Ley N° 31803, modifica el artículo en mención adicionando; La Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria (SUNEDU) determina los criterios, así como establece y supervisa el procedimiento administrativo para el reconocimiento de grados y títulos otorgados en el extranjero, en el marco de la normativa vigente;

Domicilio Legal: Prolongación Av., Ancash S/N - Moquegua
RUC: 20449347448 - Teléfono: (053) 670168
Página Web: www.unam.edu.pe

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO
N° 645-2026-CU

Moquegua, 23 de setiembre de 2026

Que, el numeral 45.2 del artículo 45° de la Ley N° 30220, Ley Universitaria, precisa los requisitos mínimos para la obtención del título profesional, como son: el grado de Bachiller y la aprobación de una tesis o trabajo de suficiencia profesional. Asimismo, establece que el título profesional solo se puede obtener en la universidad en la cual se haya obtenido el grado de bachiller;

Que, mediante Resolución de Comisión Organizadora N° 1153-2021-UNAM, se aprobó el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, el mismo que fue modificado a través de las Resoluciones de Comisión Organizadora N° 410; 453 y 890-2022, N° 880-2023-UNAM y N° 081, 484-2024-UNAM el cual establece los requisitos y norma los procedimientos para la obtención de los grados académicos y títulos profesionales conferidos por esta Casa Superior de Estudios;

Que, bajo el amparo de los considerandos precedentes, el Pleno del Consejo Universitario en Sesión Extraordinaria N° 39-2026-SE-CU-UNAM, de fecha 23 de setiembre de 2026, emitió el siguiente acuerdo: POR UNANIMIDAD: CONFERIR, a nombre de la Nación el Título Profesional de Ingeniero de Minas por la modalidad de Tesis a los Bachilleres: EDWIN ELIAS MEJIA REYES, MANUEL ALEJANDRO AREOS JIMENEZ LASTEROS y RONALDO KENER SICHA JIHUALLANCA, de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Nacional de Moquegua;

En uso de las facultades y atribuciones conferidas por el artículo 18 de la Constitución Política del Perú, la Ley N° 30220 Ley Universitaria, el Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, y a lo acordado por el pleno del Consejo Universitario;

SE RESUELVE:

ARTÍCULO 1°: CONFERIR A NOMBRE DE LA NACIÓN, a los Bachilleres:

- **EDWIN ELIAS MEJIA REYES**
- **MANUEL ALEJANDRO AREOS JIMENEZ LASTEROS**
- **RONALDO KENER SICHA JIHUALLANCA**

El **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS.**

Por la modalidad de TESIS, de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Nacional de Moquegua.

ARTÍCULO 2°: ENCARGAR al Secretario General de la UNAM, para que realice las acciones pertinentes relacionadas con la inscripción correspondiente en el Registro de Grados y Títulos de la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria - SUNEDU.

ARTÍCULO 3°: DISPONER el cumplimiento de la presente Resolución a todas las dependencias de la Universidad Nacional de Moquegua.

ARTÍCULO 4°: DISPONER la publicación de la presente resolución en el Portal Institucional de la Universidad Nacional de Moquegua www.unam.edu.pe

REGÍSTRESE, PUBLÍQUESE Y CÚMPLASE;

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA SECRETARIA GENERAL

MTRO. JOSE LUIS PACHECO CACERES
SECRETARIO GENERAL

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA CONSEJO UNIVERSITARIO

DR. HUGO RUBEN MARCA MAQUERA
RECTOR
PRESIDENTE DEL CONSEJO UNIVERSITARIO

DISTRIBUCIÓN: VRA, VRI, FAIN, EPIM, GyT, DASA, OTI, Interesados, C.c. Arch.
SVR

Domicilio Legal: Prolongación Av., Ancash S/N - Moquegua
RUC: 20449347448 - Teléfono: (053) 670168
Página Web: www.unam.edu.pe