UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS

"APLICACIÓN DE LEAN SIX SIGMA PARA REDUCIR EL TIEMPO IMPRODUCTIVO Y COSTOS DE LAS OPERACIONES DE ACARREO DE UNA UNIDAD MINERA A CIELO ABIERTO EN MOQUEGUA"

PRESENTADO POR:

BACH. EDGAR JULIO ALMANZA CRUZ

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

MOQUEGUA – PERÚ

2025

UNAM
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

Folio N° 048

ACTA DE SUSTENTACIÓN

I. Modalidad:

Tesis : [X]

Trabajo de Suficiencia Profesional : [ ]

Otro: ..... : [ ]

II. Documento de aprobación para la sustentación:
Resolución de Facultad N° 0071-2025-D-FACIA-UNAM

Fecha: 11 de Marzo de 2025

III. El Jurado ha dictaminado la (el) La Tesis, TITULADO:
APLICACIÓN DE LEAN SIX SIGMA PARA REDUCIR EL TIEMPO IMPRODUCTIVO Y COSTOS DE LAS OPERACIONES DE ACARREO DE UNA UNIDAD MINERA A CIELO ABIERTO EN MOQUEGUA

Bachiller: Edgar Julio ALMANZA CRUZ

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: Dieciseis (16) por lo que; Sí [X] No [ ]

Opta el Título Profesional de INGENIERO DE MINAS.

Siendo las ..... horas, del 03 de abril del año 2025 se procede con la firma en conformidad de lo dictaminado por el Jurado.

Presidente
Dr. Arquímedes León VARGAS LUQUÉ
(Nombres y Apellidos)

Primer Miembro
Dr. Victor Adrián PONCE ESTRADA
(Nombres y Apellidos)

Segundo Miembro
Mg. Ivan Elías ROJAS CONDORI
(Nombres y Apellidos)

Bachiller
Edgar Julio ALMANZA CRUZ
(Nombres y Apellidos)

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres, quienes siempre han sido mi mayor fuente de inspiración y fuerza. A ellos les debo todo lo que soy y todo lo que he logrado hasta el momento. Gracias por creer en mí, por su amor y por sus sacrificios.

También dedico este trabajo a todos mis compañeros de la carrera de Ingeniería de Minas, quienes, con su apoyo y compañerismo, han hecho de este camino una experiencia inolvidable. A la Universidad Nacional de Moquegua, por brindarme las bases para alcanzar este logro, y a la minería, por ser el campo que me ha permitido descubrir mi verdadera pasión.

AGRADECIMIENTO

A lo largo de este proceso de investigación y desarrollo de mi tesis, he recibido el apoyo de muchas personas y entidades a quienes les agradezco profundamente. En primer lugar, deseo expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Christ Barriga Paria, mi asesor, por su invaluable orientación, apoyo constante y recomendaciones, las cuales han permitido la realización de este trabajo. Gracias por su paciencia y compromiso en todo momento.

A la Universidad Nacional de Moquegua, por brindarme las herramientas necesarias para el desarrollo académico y profesional, y en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, por su formación rigurosa y por ser el entorno en el que pude crecer como estudiante y profesional.

A mi familia, por su amor, comprensión y aliento incondicional, quienes me han apoyado en cada paso de este camino, proporcionándome la fortaleza para continuar en los momentos más difíciles. A mi madre, padre y hermanos, gracias por ser mi mayor fuente de motivación.

Asimismo, agradezco a todos mis amigos y compañeros de carrera, por su apoyo durante los años de estudio y por compartir valiosas experiencias que enriquecieron mi formación profesional.

A todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a la realización de esta tesis, les agradezco por su tiempo y colaboración.

Resumen

Esta investigación titulada “Aplicación de Lean Six Sigma para reducir el tiempo improductivo y costos de las operaciones de acarreo de una unidad minera a cielo abierto en Moquegua” fue realizada con el objetivo de generar una propuesta de mejora para optimizar los procesos de acarreo en el área 4000 de la mina, reduciendo tanto los tiempos improductivos como los costos asociados. La investigación se llevó a cabo en una mina a cielo abierto ubicada en Moquegua, un área donde las operaciones de acarreo enfrentaban desafíos significativos en términos de eficiencia y costos operativos. El estudio tuvo un enfoque cuantitativo y experimental, aplicando la metodología Lean Six Sigma para identificar y eliminar desperdicios dentro del proceso. Para ello, se utilizaron herramientas como lluvia de ideas, el diagrama de Ishikawa, el diagrama de Pareto y el análisis FODA de estrategias, todas con validez teórica y empírica dentro de la optimización de procesos operacionales. Los resultados demostraron que la implementación de Lean Six Sigma en las operaciones de acarreo permitió una reducción del 31.8% en las horas improductivas, lo que se traduce en un ahorro significativo en tiempo. Esta mejora también impactó en los costos, ya que se logró una disminución del 19.8% en el costo promedio por metro cúbico cargado, transportado y rellenado, pasando de 4.65 USD/m^3 a 3.73 USD/m^3.

Palabra clave: Lean six sigma, minería, acarreo, costos, tiempos improductivos.

Abstract

This research, titled "Application of Lean Six Sigma to Reduce Idle Time and Hauling Operation Costs in an Open-Pit Mine in Moquegua," was conducted with the aim of generating an improvement proposal to optimize the hauling processes in the 4000 area of the mine, reducing both idle time and associated costs. The research was carried out at an open-pit mine located in Moquegua, an area where hauling operations faced significant challenges in terms of efficiency and operational costs. The study had a quantitative and experimental approach, applying the Lean Six Sigma methodology to identify and eliminate waste within the process. Tools such as brainstorming, the Ishikawa diagram, the Pareto diagram, and SWOT analysis of strategies were used, all of which have theoretical and empirical validity in operational process optimization. The results showed that the implementation of Lean Six Sigma in hauling operations led to a 31.8% reduction in idle hours, resulting in a significant time savings. This improvement also impacted costs, as the average cost per cubic meter hauled decreased by 19.8%, from 4.65 USD/m³ to 3.73 USD/m³.

Keywords: Lean Six Sigma, mining, hauling, costs, idle time.

Índice

Pág.

I. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 5
1.1. Descripción y formulación del problema 5
1.1.1. Formulación del problema de investigación 8
1.1.2. Interrogante general 8
1.1.3. Interrogantes específicas 8
1.2. Justificación. 8
1.2.1. Justificación económica 8
1.2.2. Justificación operativa 9
1.2.3. Justificación ambiental 9
1.2.4. Justificación social 10
1.2.5. Justificación científica 10
1.3. Objetivos 10
1.3.1. Objetivo general 10
1.3.2. Objetivos específicos 10
1.4. Hipótesis de la investigación 11
1.4.1. Hipótesis general 11
1.4.2. Hipótesis específicas 11
1.5. Variables 11
1.5.1. Variable independiente 11
1.5.2. Variable dependiente 11
1.6. Operacionalización de variables 12
II. MARCO TEÓRICO 13
2.1. Antecedentes 13
2.2. Bases teóricas 29
2.2.1. Metodología Lean Six Sigma 29
2.2.1.1. Metodología Lean 29
2.2.1.2. Principios Lean 30
2.2.1.3. Desperdicios Lean en minería 31
2.2.1.4. Beneficios y desventajas de la metodología Lean 33
2.2.1.5. Metodología Six Sigma 34
2.2.1.6. Origen de Six Sigma 35
2.2.1.7. Lean Six Sigma en minería 36
2.2.2. Tiempos de carguío, transporte y acarreo. 40
2.2.3. Costos y Metodología Lean Six Sigma 41
2.2.3.1. CAPEX 42
2.2.3.2. OPEX 42
2.2.3.3. Costos a considerar en una operación minera 42
2.2.3.4. Costos directos en minería 43
2.2.3.5. Costos indirectos en minería 44
2.3. Definición de términos 44

III. METODOLOGÍA **47**
3.1. Tipo y nivel de investigación *47*
3.2. Ámbito temporal y espacial *49*
3.3. Población y muestra *49*
3.3.1. Población 49
3.3.2. Muestra 50
3.4. Instrumentos *50*
3.4.1.1. Lluvia de ideas (Brainstorming) 50
3.4.1.2. Diagrama de Ishikawa 52
3.4.1.3. Diagrama de Pareto 54
3.4.1.4. FODA de Estrategias 55
3.5. Procedimientos *58*
3.5.1.1. Observación directa 58
3.5.1.2. Entrevista 59
3.6. Análisis de datos *59*
3.6.1.1. Comprobación de hipótesis y método estadístico 59
3.6.1.2. Análisis estadístico de los datos 60
3.6.1.3. Diagrama de flujo de la investigación 64
3.6.1.4. Evaluación del flujo operativo del acarreo del Área 4000 65
3.6.1.5. Mapeo de procesos de las operaciones 66
3.6.1.6. Definición del ciclo DMAIC 66
3.6.1.7. Identificación de causas de tiempos improductivos y sobrecostos 67
3.6.1.8. Aplicación de alternativas de mejora 67
3.6.1.9. Implementación de medidas de control 67
3.6.1.10. Comparación de costos 68
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN **70**
4.1.1. Tiempos improductivos y metodología Lean Six Sigma 70
4.1.1.1. Mapa de procesos del Área 4000 e incidencia de problemas 70
4.1.1.2. Priorización de problemas que causan los tiempos improductivos 71
4.1.1.3. FODA de estrategias para reducir los tiempos improductivos en el acarreo de materiales 72
4.1.2. Resultados de reducción de tiempos improductivos 72
4.1.2.1. Comparación de resultados 74
4.1.3. Reducción de costos y Lean Six Sigma 74
4.2. Discusión de resultados *77*
V. CONCLUSIONES **79**
VI. RECOMENDACIONES **80**
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS **81**
VIII. ANEXOS **85**
1.Matriz de consistencia *85*

Índice de Tablas

Pág.

Tabla 1 Tiempos improductivos de los equipos de acarreo del Área 4000 del mes de agosto..... 5

Tabla 2 Costos asociados a la subutilización de equipos de acarreo en el Área 4000 durante el mes de agosto 6

Tabla 3 Costos unitarios de las actividades de acarreo del Área 4000 7

Tabla 4 Operacionalización de variables 12

Tabla 5 Identificación de causas preliminares de tiempos improductivos del Área 4000..... 51

Tabla 6 Estadística descriptiva y prueba de normalidad de Shapiro Wilk para horas improductivas..... 60

Tabla 7 Prueba T para reducción de horas improductivas 61

Tabla 8 Estadística descriptiva y prueba de normalidad para costos por metro cúbico de material removido..... 63

Tabla 9 Prueba T para muestras pareadas para reducción de costos..... 64

Tabla 10 Matriz de priorización de problemas de acuerdo a complejidad, beneficio y costos de la implementación de soluciones al problema..... 71

Tabla 11 Total de horas reducidas de tiempo improductivos 74

Tabla 12 Total de horas de uso requerido por equipo en el Área 4000 75

Tabla 13 Costos de equipo por hora para el cálculo de reducción de costos 75

Tabla 14 Costos de carguío, traslado y relleno de material periodo Abril a Noviembre del 2024..... 76

Índice de Figuras

Pág.

Figura 1 Método DMAIC de Lean Six Sigma 34

Figura 2 Modelo de Uso de Tiempo para el Control de Tiempos Productivos e Improductivos. 40

Figura 3 Ubicación de la unidad minera. 49

Figura 4 Diagrama de Ishikawa de causa raíz de los tiempos improductivos en el Área 4000 52

Figura 5 Diagrama de Pareto de causas de tiempos improductivos de los equipos del Área 4000 54

Figura 6 Matriz de análisis FODA para la identificación de estrategias de mejora de procesos. 56

Figura 7 Comparación de medias de reducción de tiempos improductivos..... 62

Figura 8 Comparación de medias de reducción de tiempos improductivos..... 64

Figura 9 Diagrama de flujo para la implementación de Lean Six Sigma en la investigación 65

Figura 10 Mapa de procesos e incidencia de problemas identificados en las operaciones de carguío del Área 4000 70

Figura 11 Reducción de horas de tiempos improductivos por ralentí de equipos 73

Figura 12 Reducción de horas de tiempos improductivos por fallas mecánicas de equipos 73

Figura 13 Histograma de costos de carguío, acarreo y relleno de material del área 4000..... 76

Figura 14 Distribución de costos por equipo y metro cúbico de material rellenado..... 77

Introducción

En la actualidad, la optimización de procesos en el sector minero ha cobrado una relevancia estratégica, especialmente en un contexto donde la eficiencia operativa y la sostenibilidad económica son esenciales para la competitividad. En el Área 4000 de una unidad minera a cielo abierto en Moquegua, al sur del Perú, las operaciones de acarreo de material de relleno enfrentan problemas relacionados con tiempos improductivos y costos elevados. Estos problemas, derivados principalmente de la falta de eficiencia en la comunicación y coordinación de actividades, generan periodos prolongados de inactividad en maquinaria clave como volquetes, tractores y excavadoras. Esta problemática, además de impactar negativamente en los tiempos y los costos operativos, pone en evidencia una oportunidad significativa para la implementación de soluciones basadas en metodologías como Lean Six Sigma, reconocidas por su capacidad para eliminar desperdicios y optimizar recursos.

El acarreo en el Área 4000 comprende un proceso complejo que abarca la extracción de material de relleno en una cantera, su transporte en volquetes de 20 m^3, y su posterior compactación en la presa de relaves actualmente en la etapa 13. En esta área se vienen utilizando equipos especializados como Tractores D6 y D8, Excavadoras 336, y rodillos de 19 toneladas. No obstante, el análisis de datos como las horas acumuladas de tiempos improductivos y los costos unitarios de las actividades refleja una necesidad urgente de mejorar la planificación y la ejecución operativa. Frente a este panorama, la aplicación de Lean Six Sigma no solo permitirá identificar y abordar las causas raíz de los tiempos improductivos, sino también optimizar los costos asociados al acarreo. Esto, a su vez, contribuirá a incrementar la competitividad de la operación, generando un impacto positivo en el desarrollo de la región y en el cumplimiento de los objetivos estratégicos de la organización minera.

Esta investigación tiene relevancia debido a sus implicaciones económicas, operativas, ambientales, sociales y científicas, relacionadas a la mejora del proceso de acarreo de material de relleno en la unidad minera, específicamente en el Área 4000. Desde una perspectiva económica, la fluctuación de costos operativos afecta directamente la rentabilidad de la mina, por lo que mejorar la eficiencia de estos

procesos podría generar ahorros significativos y estabilidad financiera. Operativamente, la implementación de la metodología Lean Six Sigma permite identificar y eliminar ineficiencias, asegurando un uso óptimo de los recursos y reduciendo tiempos improductivos. En términos ambientales, esta optimización contribuirá a disminuir las emisiones de gases contaminantes y la huella de carbono, promoviendo prácticas más sostenibles. Desde el ámbito social, la mejora en la seguridad laboral y la posibilidad de reinversión en programas comunitarios fortalece el impacto positivo en los trabajadores y la región. Finalmente, desde un enfoque científico, el análisis y la aplicación de Lean Six Sigma en un contexto real proporcionan nuevos conocimientos y estrategias que pueden beneficiar a otras operaciones mineras, llenando un vacío en el conocimiento práctico de la gestión de procesos en industrias de gran escala.

La hipótesis general del estudio plantea que la implementación de la metodología Lean Six Sigma en el Área 4000 permitirá reducir los tiempos improductivos y los costos asociados a las operaciones de acarreo. Esta metodología, al integrar herramientas de análisis como la definición, medición, análisis, mejora y control (DMAIC), facilita la identificación de las causas raíz de las ineficiencias operativas. En particular, se espera que Lean Six Sigma permita abordar dos aspectos principales: primero, la identificación y optimización de los procesos responsables de los tiempos improductivos, lo que redundará en una mayor eficiencia operativa; y segundo, la eliminación de actividades y recursos que generan costos innecesarios, contribuyendo así a una reducción significativa de los costos totales. De este modo, la hipótesis predice que la implementación de mejoras basadas en Lean Six Sigma conducirá a un impacto positivo y medible en los indicadores clave de tiempo y costos de las operaciones de acarreo.

En el presente estudio, se definen las variables a partir de la relación entre la implementación de la metodología Lean Six Sigma en minería y su impacto en los tiempos improductivos y los costos de acarreo. La variable independiente es Lean Six Sigma, una metodología de mejora continua que integra principios Lean, enfocados en la eliminación de desperdicios y optimización del flujo de trabajo, y Six Sigma, orientado a reducir la variabilidad y defectos en los procesos. Esta variable se operacionaliza a través de su dimensión de Enfoque Lean, medido mediante el ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), como

un indicador categórico. Por otro lado, la variable dependiente se centra en los tiempos improductivos y los costos de acarreo, desglosados en dos dimensiones principales: la reducción de tiempos improductivos, medidos como el tiempo total de demora (en minutos y segundos) y la reducción de costos, evaluada mediante los costos totales asociados al acarreo en el Área 4000, también con un indicador numérico expresado en USD. Ambas variables son relevantes, ya que permiten evaluar cómo la aplicación del enfoque Lean Six Sigma puede optimizar los procesos operativos, reducir tiempos no productivos y generar ahorros significativos en costos operativos dentro del sector minero.

Se adoptó un enfoque cuantitativo, aplicado y experimental, con el objetivo de optimizar los procesos operativos en el Área 4000, utilizando la metodología Lean Six Sigma. Se busca resolver un problema específico y práctico: la identificación y reducción de los tiempos improductivos y costos asociados al acarreo. Para ello, se desarrollan estrategias basadas en la implementación de mejoras en procesos, que se evalúan en condiciones controladas para determinar su impacto directo en la eficiencia operativa. La metodología incluye un diseño experimental que permite identificar, analizar y mejorar procesos mediante herramientas como el ciclo DMAIC y el mapeo de procesos, complementadas con técnicas de análisis de datos estadísticos. Además, se incorporaron elementos exploratorios para delimitar los procesos más relevantes, utilizando entrevistas, observación en campo y análisis de flujos operativos. Los resultados obtenidos serán medidos y comparados mediante la evaluación de indicadores clave de desempeño, análisis de brechas y simulaciones, garantizando un enfoque sistemático y estructurado en la implementación y control de mejoras, reforzando así su carácter de investigación aplicada y práctica.

La tesis está estructurada en seis capítulos para garantizar un análisis exhaustivo y ordenado del problema planteado. El Capítulo I aborda el Planteamiento del problema, en el que se describe problema y se formulan los objetivos generales y específicos. Se presenta la relevancia del estudio y se desarrollan las hipótesis relacionadas con la aplicación de Lean Six Sigma y define las variables. El Capítulo II Marco Teórico presenta los antecedentes relevantes y sustenta el estudio con bases teóricas sobre Lean Six Sigma, junto con una definición de términos clave,

que facilitará la comprensión de los aspectos técnicos y metodológicos involucrados.

El Capítulo III trata la Metodología de esta investigación, describe el enfoque aplicado con diseño experimental y nivel exploratorio, especificando el ámbito de estudio, la población y la muestra. También describe los instrumentos de recolección de datos, como guías de entrevistas y sistemas de control interno, y los procedimientos para analizar los datos recolectados. En el Capítulo IV Resultados y discusión, se interpreta la efectividad de la metodología Lean Six Sigma en la reducción de tiempos improductivos y costos asociados al acarreo en el Área 4000. Finalmente, los Capítulos V y VI exponen las Conclusiones y Recomendaciones, consolidando los resultados del estudio de acuerdo a los objetivos y proponiendo estrategias prácticas para implementar mejoras en las operaciones de acarreo de la unidad minera.

I. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En este capítulo se describe el problema general y los problemas específicos de la investigación. Se formula el objetivo general y específicos presentando hipótesis para cada caso, se expone la justificación y relevancia y, finalmente, se describen las variables independiente y dependiente incluyendo su operalización.

1.1. Descripción y formulación del problema

Se han identificado oportunidades de mejora y problemas transversales en las operaciones de acarreo de material de relleno del Área 4000 de una unidad minera a cielo abierto en la zona sur del Perú. Primero, uno de los principales problemas identificados son los tiempos improductivos significativos, debido a que existen actividades que no se ejecutan de manera eficiente causadas por ineficiente comunicación y coordinación. Este problema se manifiesta a través de maquinarias y equipos parados por periodos prolongados entre las tareas de acarreo. Esto señala una necesidad urgente de mejorar la organización y la planificación operativa, lo cual se busca mejorar a través de la aplicación de la metodología Lean Six Sigma. En este sentido se plantea el primer objetivo específico de la investigación relativo a definir las principales causas y factores que generan tiempos improductivos a través de la metodología Lean Six Sigma, con el fin de incrementar la eficiencia de las operaciones de acarreo del Área 4000. La Tabla 1 presenta el cuadro de horas acumuladas de tiempos improductivos durante el mes de agosto por equipo.

Tabla 1

Tiempos improductivos de los equipos de acarreo del Área 4000 durante el mes de agosto

Equipo	Horas mínimas mensuales según contrato	Horas acumuladas	Brecha
VOLQUETE	220.00	181.00	39.00
VOLQUETE	220.00	170.00	50.00
VOLQUETE	220.00	16.00	204.00
VOLQUETE	220.00	198.00	22.00
VOLQUETE	220.00	100.00	120.00
VOLQUETE	220.00	177.00	43.00
VOLQUETE	220.00	202.00	18.00
VOLQUETE	220.00	143.00	77.00
Total			573.00

Nota. La brecha corresponde a la diferencia entre las horas operativas acumuladas y las mínimas que los equipos deberían haber alcanzado. Elaboración propia.

En segundo lugar, se presenta un problema referente a los costos asociados a la generación de desperdicio en las actividades de acarreo de acuerdo a Lean Six Sigma. Cabe mencionar que en la metodología Lean Six Sigma los desperdicios son cualquier actividad que consume recursos, pero no agrega valor al producto desde la perspectiva del cliente, por tanto, estos desperdicios generan costos innecesarios. En tal sentido, se ha observado una subutilización e ineficiencia en la asignación de recursos, tanto de materiales, equipos como humanos. Costosas maquinarias permanecen inactivas o son empleados de manera ineficiente, lo que evidencia una gran oportunidad de mejora y reducción de costos. La comunicación y definición de tareas inadecuadas contribuyen a la confusión y a la redundancia de tareas, aumentando los tiempos improductivos por encima de los indicadores establecidos y generando desperdicio de recursos. Estas brechas de comunicación y coordinación provocan esfuerzos duplicados, lo que impacta negativamente en la eficiencia general y los costos operativos. En este sentido, se ha planteado el segundo objetivo específico de investigación que es mejorar los procesos que contribuyen a la generación de desperdicios a través de la metodología Lean Six Sigma con el fin de reducir costos en el acarreo del Área 4000 de la unidad minera. La Tabla 2 muestra los costos asociados a la subutilización de los equipos de acarreo en el Área 4000 durante el mes de agosto.

Tabla 2

Costos asociados a la subutilización de equipos de acarreo en el Área 4000 durante el mes de agosto

Descripción de Equipo	Horas mínimas mensuales según contrato	Horas acumuladas	Brecha	Costo incurrido ($)	Ubicación	Operatividad
Volquete	220.00	181.00	- 39.00	- 836.55	Cantera 5	Operativo
Volquete	220.00	170.00	- 50.00	- 1,072.50	Yarito C2	Operativo
Volquete	220.00	16.00	- 204.00	- 4,375.80	Cantera 5	Operativo
Volquete	220.00	198.00	- 22.00	- 471.90	Yarito C2	Operativo
Volquete	220.00	100.00	- 120.00	- 2,574.00	Cantera 5	Operativo
Volquete	220.00	177.00	- 43.00	- 922.35	Arenas	Operativo
Volquete	220.00	202.00	- 18.00	- 386.10	Arenas	Operativo
Volquete	220.00	143.00	- 77.00	- 1,651.65	Cantera 5	Operativo
Total				**- 12,290.85**		

Nota. Costos en dólares derivados de las brechas y un costo incurrido de 21.45 USD por hora improductiva. Elaboración propia.

La zona de estudio es el Área 4000 donde se realiza el acarreo de material de relleno desde la cantera hasta su destino final, que es la presa de relaves, actualmente en la etapa 13. El material extraído, clasificado como tipo 1a, se utiliza para rellenar y elevar la estructura de la presa. Para la extracción del material en la cantera, se emplean equipos como Tractores D8, Excavadoras 336 y una cisterna de agua de 5000 galones para el regado del material. El transporte se efectúa con volquetes de 20 m³ de capacidad. En la presa de relaves, para la conformación y compactación del relleno, se utilizan equipos como Tractores D6 y D8, Motoniveladora 140K, cisterna de agua de 5000 galones, retroexcavadora, rodillos de 19 toneladas y excavadoras de largo alcance modelo 352. La Tabla 3 muestra los costos unitarios de las actividades de acarreo realizadas en el Área 4000.

Tabla 3

Costos unitarios de las actividades de acarreo del Área 4000

Rellenos del recrecimiento	**Unidad**	**Costo Unitario**
Relleno masivo con Material Tipo 1a	m^3	4.97
Transporte de material después del 1km (d = 4.5 km) – Cantera Yarito	m^3-km	0.35
Relleno de transición Material Tipo 3a	m3	7.51
Transporte de material después del 1km (d = 4.5 km) – Cantera Yarito	m^3-km	0.5
Relleno tipo 1c	m^3	5.75
Transporte de material después del 1km (d = 4.5 km) – Cantera Yarito	m^3-km	0.41

Nota. Costos unitarios en USD, en base a costos del año 2024, meses de enero a agosto. Elaboración propia.

Para abordar la problemática identificada en el Área 4000, la investigación estudia la aplicación de la metodología Lean Six Sigma, para reducir los tiempos improductivos y los costos en las operaciones de acarreo, lo cual conforma el problema central de esta investigación. Se ha seleccionado esta metodología por ser ampliamente utilizada en los procesos industriales y porque Lean Six Sigma busca identificar y eliminar desperdicios para optimizar procesos, mejorar la eficiencia y reducir costos. Su aplicación permite identificar causas, cuellos de botella y

desperdicios con el fin de implementar una mejora de los procesos que disminuyan los tiempos improductivos y reduzcan los costos. Esta metodología ayudó a definir con claridad las causas de los tiempos improductivos y los costos asociados por la generación de desperdicios, y facilitó la implementación de mejoras sustanciales en los procesos de acarreo del Área 4000.

1.1.1. Formulación del problema de investigación

La investigación aplica la metodología Lean Six Sigma para identificar, medir, analizar, mejorar y controlar los procesos problemáticos hallados. Esta metodología permite definir con claridad las causas de los tiempos improductivos y los costos elevados en los procesos de acarreo del Área 4000, y facilitando la implementación de mejoras sustanciales.

1.1.2. Interrogante general

¿Cómo la aplicación de Lean Six Sigma reduce los tiempos improductivos y los costos asociados a las operaciones de acarreo del Área 4000 de la unidad minera en el año 2024?

1.1.3. Interrogantes específicas

¿Cómo reducir la acumulación de tiempos improductivos a través de la metodología Lean Six Sigma en las operaciones de acarreo del Área 4000 de la unidad minera?

¿Cuáles son los principales procesos que contribuyen a la generación de sobrecostos de acuerdo a la metodología Lean Six Sigma en la etapa de acarreo del Área 4000 de la unidad minera?

1.2. Justificación.

1.2.1. Justificación económica

Los costos operativos de una mina están sujetos a fluctuaciones significativas debido a factores externos como la estabilidad económica global y los cambios de los precios internacionales. Si bien en el Área 4000 se realiza la extracción de material tipo 1a y 1c para el recrecimiento de la presa de relaves, estos costos influyen en la rentabilidad y estabilidad económica de la unidad minera. Situaciones adversas de ineficiencia y sobrecostos pueden provocar aumentos repentinos en los costos de operación global de la mina lo cual afecta directamente a los presupuestos

destinados a la extracción y acarreo aumentando la importancia de optimizar eficiencias operativas para mitigar estos riesgos económicos. Además, los costos de acarreo representan una gran parte de los costos de una mina superficial, por lo que la mejora de procesos para la reducción de costos conlleva ahorros significativos, incrementando la rentabilidad de la unidad minera (Davila, 2022).

1.2.2. Justificación operativa

En operaciones mineras a gran escala, como las realizadas en tajo abierto, el movimiento eficiente de materiales es un factor significativo para la rentabilidad. En este sentido, la eficiencia del proceso de acarreo de material de relleno del Área 4000 depende de la gestión de maquinarias, principalmente volquetes y excavadoras, que se ve afectado por factores como la comunicación, estándares internos y la organización del proceso.

La metodología Lean Six Sigma es un enfoque probado y extensamente difundido para abordar desafíos operativos, ya que permite identificar ineficiencias en los procesos a través del análisis de datos y la implementación de mejoras continuas. En el caso de esta investigación será útil para reducir los tiempos improductivos y reducir costos ya que Lean se centra en eliminar el desperdicio y maximizar el valor de cada operación, mientras que Six Sigma permite asegurar un desempeño más consistente y predecible. En esta mina a cielo abierto la implementación de Lean Six Sigma permite mejorar el proceso de acarreo de material de relleno desde el Área 4000 hasta la presa de relaves, como la asignación de maquinaria, la coordinación de tareas y la comunicación.

1.2.3. Justificación ambiental

La aplicación de Lean Six Sigma en las operaciones de acarreo del Área 4000 de la unidad minera puede tener impactos ambientales positivos significativos. Al reducir los tiempos improductivos y optimizar los procesos de transporte, se puede disminuir el consumo de combustible y la emisión de gases contaminantes asociados con la maquinaria pesada utilizada en el acarreo. Además, una operación más eficiente puede reducir la huella de carbono global de la mina, promoviendo así prácticas más sostenibles y alineadas con las normativas ambientales vigentes.

1.2.4. Justificación social

Desde el punto de vista social, la implementación de Lean Six Sigma en la unidad minera puede tener múltiples beneficios. Primero, al optimizar los procesos de acarreo, se puede mejorar la seguridad de los trabajadores al reducir el tiempo de exposición a condiciones potencialmente peligrosas. Segundo, una operación más eficiente puede generar un ambiente de trabajo más estable y predecible, mejorando la calidad de vida de los empleados y sus familias. Finalmente, al reducir los costos operativos, la empresa podría potencialmente reinvertir en programas sociales para la comunidad local, promoviendo el desarrollo y el bienestar regional.

1.2.5. Justificación científica

Desde una perspectiva científica, la investigación aplicada con enfoque cuantitativo mediante la metodología Lean Six Sigma proporciona una oportunidad única para analizar y mejorar los procesos de acarreo en una mina de gran escala como la unidad minera estudiada. Especialmente cuando esta metodología se caracteriza por ser altamente dinámica y adaptable a distintos tipos de industrias y procesos. La experimentación exploratoria permite identificar y cuantificar los principales factores que contribuyen a los tiempos improductivos y los costos asociados, utilizando datos reales y observaciones directas. Esto no solo contribuye al avance del conocimiento en gestión de operaciones mineras, sino que también proporciona conocimientos prácticos y aplicables para otras operaciones similares a nivel global.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Generar una propuesta de mejora para reducir los tiempos improductivos y costos través de la metodología Lean Six Sigma en las operaciones de acarreo en el área 4000 de la unidad minera.

1.3.2. Objetivos específicos

Definir las principales causas y factores que generan tiempos improductivos a través de la metodología Lean Six Sigma, con el fin de establecer mejoras que reduzcan estos tiempos improductivos en las operaciones de acarreo del Área 4000 de la unidad minera.

Mejorar los procesos que contribuyen a la generación de sobrecostos (desperdicios) a través de la metodología Lean Six Sigma con el fin de reducir costos en el acarreo del Área 4000 de la unidad minera a cielo abierto.

1.4. Hipótesis de la investigación

1.4.1. Hipótesis general

La aplicación de la metodología Lean Six Sigma permitirá identificar las causas de los tiempos improductivos y los sobrecostos con el fin de implementar una mejora de los procesos que reduzca los tiempos improductivos y reduzca los costos en las operaciones de acarreo del Área 4000 de la unidad minera.

1.4.2. Hipótesis específicas

La metodología Lean Six Sigma permitirá definir, medir, analizar, mejorar y controlar aquellos procesos que están generando tiempos improductivos en la etapa de acarreo y permitirá implementar medidas efectivas que reduzcan los tiempos improductivos del Área 4000 de la unidad minera.

El enfoque Lean permitirá identificar aquellos procesos que generan costos innecesarios, permitiendo establecer mejoras y reducir el costo total de las operaciones de acarreo en el Área 4000 de la unidad minera.

1.5. Variables

1.5.1. Variable independiente

Lean Six Sigma en minería.

Dimensión: Enfoque Lean.
Indicador: Ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar).

1.5.2. Variable dependiente

Tiempos improductivos y costos de acarreo

Dimensión: Reducción de tiempos improductivos.

Indicador: Gestión de tiempos de carguío y acarreo.

Dimensión: Reducción de costos.

Indicador: Costos de acarreo

1.6. Operacionalización de variables

En la Tabla 4 se presentan las variables de la presente investigación, su definición conceptual, dimensiones e indicadores.

Tabla 4

Operacionalización de variables

Variables	Definición	Dimensiones	Indicador	Numérica/ Categórica	Unidad de Medida
Variable Independiente					
Lean Six Sigma	Es una metodología de mejora continua que combina los principios Lean (eliminación de desperdicios y la optimización del flujo de trabajo) y Six Sigma (orientado a la reducción de la variabilidad y defectos en los procesos). Juntas, buscan mejorar la eficiencia, reducir costos, y aumentar la calidad en los procesos organizacionales. Su herramienta principal es el ciclo DMAIC.	Enfoque Lean	Ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar)	Categórica	-
Variable Dependiente					
Tiempos improductivos y costos de acarreo	Categoría de gestión de tiempo que incluyen demoras, actividades de soporte inevitable, tiempos de espera controlables, y cualquier actividad que no contribuya directamente al ciclo productivo de acarreo de material, así como sus costos asociados.	Tiempos improductivos	Tiempo total de demora por Stand-by, Delays, Relenting. (Minutos y segundos).	Numérica	Minutos y segundos.
		Costos de acarreo	Costos totales asociados con el acarreo del Área 4000.	Numérica	USD

Nota. Elaboración propia en base a los antecedentes de la investigación.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Antecedentes a nivel internacional

Kęsek et al. (2019) realizaron un estudio para comprender la implementación de herramientas de gestión Lean y Six Sigma en empresas mineras con el objetivo de exponer y analizar los dos métodos predominantes para la optimización de procesos productivos: Lean Management, Six Sigma y su combinación, Lean Six Sigma. Los autores eligieron como campo de estudio a varias empresas mineras de renombre internacional, incluyendo RAG AG en Alemania, KGHM Polska Miedź en Polonia, el Grupo Rio Tinto en Australia, BHP Billiton y la Mina de Diamantes Diavik en Canadá, así como Quadra FNX Mining, ahora conocida como KGHM International. Se utilizaron diversas herramientas y metodologías propias de Lean Management y Six Sigma, enfocándose en cómo se adaptan y aplican estas en el contexto específico de la industria minera. La metodología empleada consistió en una revisión exhaustiva de cómo estas grandes empresas mineras han implementado Lean Six Sigma, tomando en cuenta las peculiaridades de cada ubicación y las necesidades operativas y estratégicas de cada empresa.

Los resultados hallaron reducción de costos, mejora de la calidad y un incremento en la seguridad de las operaciones mineras que adoptaron Lean Six Sigma. Estos beneficios evidencian la efectividad de integrar estas metodologías para optimizar los procesos en un sector tan crítico como el minero. Los autores encontraron que las implementaciones de Lean en minería necesitan un enfoque individualizado debido a las características únicas de esta industria, que incluye procesos altamente automatizados y costos fijos elevados. El efecto de sinergia entre Lean y Six Sigma se mostró particularmente efectivo en este contexto, facilitando un modelo de manufactura en constante transformación y adaptación a las nuevas realidades del sector. Además, se señaló que las empresas mineras están ajustando Lean Six Sigma a sus necesidades específicas, creando programas bajo nombres individuales, lo que ha demostrado ser un camino correcto y fructífero para el desarrollo en el ámbito minero.

Cuevas (2021) realizó un estudio con el objetivo de implementar la metodología Lean Six Sigma en un proceso de barrenación y voladura en minería subterránea. La investigación se llevó a cabo en una unidad minera ubicada en el estado de Sonora, México. El autor empleó el modelo DMAIC (Definir-Medir-Analizar-Mejorar-Controlar) como marco metodológico para desarrollar un proyecto de mejora que buscaba reducir aproximadamente un 10% el costo del cuele de la obra y mejorar entre un 10% y 25% la eficiencia de disparo en los topes de desarrollo. Aunque el proyecto se encontraba en etapa de revisión al momento del estudio, el análisis financiero preliminar sugería una posible reducción del 7% en los costos de cuele de obra en los rebajes de desarrollo, lo que representaría un ahorro mensual de $4,664.40 dólares. Además, se identificó un tiempo improductivo de 1 hora, 26 minutos y 49 segundos en el proceso de barrenación, señalando una oportunidad de mejora a corto plazo para incrementar la eficiencia del proceso. La utilización de un marco de referencia facilita la implementación de la metodología Lean Six Sigma en el contexto minero, sin embargo, enfatizó que el éxito de la implementación depende en gran medida de las decisiones acertadas tomadas por el líder del proyecto, quien debe tener un alto nivel de experiencia tanto en la metodología (preferiblemente Master Belt o Black Belt) como en la industria minera. Este estudio demuestra el potencial de aplicar herramientas estadísticas y administrativas para mejorar procesos en la minería subterránea, aunque se requiere un seguimiento para confirmar los resultados a largo plazo.

El estudio internacional realizado por Rajini et al. (2018) tuvo como objetivo principal implementar un modelo integrado de Lean, Six Sigma y Teoría de Restricciones (TOC) para mejorar el logro de metas en una empresa minera. Los autores emplearon un modelo matemático empírico y un sistema dinámico de seguimiento de metas, fundamentados en una metodología de revisión literaria segmentada en tres subsecciones para profundizar en la implementación de Lean, Six Sigma y TOC, ya sea combinando dos de estas técnicas o implementándolas de manera individual junto con técnicas generales que beneficien al sistema.

Los resultados obtenidos con el método propuesto fueron significativamente positivos, destacándose una mejora del 2-8% en el logro de las metas más importantes en comparación con el método convencional. Este enfoque integrado permitió la creación de un tablero de control con metas y niveles de logro

ponderados, además de la aplicación iterativa del modelo matemático para recalibrar los factores de ponderación de las metas y orientar el enfoque del equipo. Así mismo, se redujo la varianza en el logro de metas de hasta 10% en el método convencional a menos de 2% en el método propuesto, logrando alcanzar todas las metas establecidas, en contraste con el método convencional donde 10 metas no se lograron. La calificación general de desempeño del equipo mejoró en un 7%. Se hallo que el seguimiento dinámico de las metas incrementales y el cálculo de sus correspondientes rangos por subequipos fue efectivo. Se demostró que las métricas de desempeño de los subequipos alcanzaron el rendimiento óptimo en comparación con otros equipos. Esta transformación del modelo de trabajo, que incorpora la ideología Lean para minimizar tiempos de espera, investigación de inventarios y variaciones en los procesos, maximizando el rendimiento, ha permitido que los objetivos ahora sean flexibles y orientados al cliente para adaptarse a un entorno empresarial dinámico. Con una fórmula empírica, este nuevo enfoque contribuyó a un aumento del 7% en la eficiencia del grado de clasificación del equipo para alcanzar las metas con menos variación.

Soto (2022) se propuso definir una propuesta de mejora del proceso de moliendas en una planta concentradora, con el objetivo de reducir la variabilidad del tonelaje de tratamiento y optimizar la calidad del proceso. La investigación se llevó a cabo en la División Andina, una operación minera de Codelco ubicada en la región de Valparaíso, Chile, que comprende una mina subterránea y otra a rajo abierto. Se empleó un enfoque metodológico basado en herramientas Lean, como el Método 5S, Single-Minute Exchange of Die (SMED), Value Stream Mapping (VSM), y la metodología Six Sigma (6σ). El estudio se centró en determinar las causas de la variabilidad de producción en las líneas MSAG y MUN2 de la planta concentradora, proponiendo un modelo para reducirla y mejorar la calidad del proceso de moliendas. Se identificaron problemas como la contaminación por material particulado en la bodega y el impacto de las huelgas y condiciones climáticas en el tratamiento de la planta. Además, se destacó la necesidad de priorizar los equipos para mantenimientos, especialmente los no programados, considerando las horas de operación y el impacto económico de las detenciones.

Soto concluyó que el método 5S, a pesar de su aparente simplicidad, puede tener un gran efecto positivo en las áreas de trabajo cuando se aplica correctamente. El

estudio enfatizó la urgencia de una intervención que involucre el compromiso de todos los trabajadores y directivos para lograr una estandarización interna y una disciplina consistente. Además, el análisis Seis Sigma reveló que los procesos estudiados no alcanzaban estándares de calidad mundial, por lo que se debe evaluar los procesos desde una perspectiva de calidad, paralelamente a la productiva. Como punto de partida, se sugirió analizar el correcto funcionamiento de las máquinas con problemas mecánicos, eléctricos e hidráulicos.

En el artículo internacional de Both y Dimitrakopoulos (2020) se presenta un enfoque de optimización estocástica simultánea para optimizar conjuntamente los cronogramas de producción minera a corto plazo y la gestión de flotas en complejos mineros industriales. Este enfoque se lleva a cabo en una mina de oro a cielo abierto en Canadá y extiende desarrollos anteriores para la planificación de la producción minera a largo plazo. Para abordar el complejo problema de optimización, se emplea un método de solución metaheurístico que permite resolver el problema en un tiempo razonable. El tiempo total del ciclo de camiones se mide como una combinación de dos componentes: el tiempo requerido para transportar material desde su posición en la mina, medido por ciclos, hasta la salida de la rampa más cercana conectada, y el tiempo requerido para transportar el material desde la salida de la mina hasta su destino.

Los resultados demuestran que, en comparación con un enfoque convencional de dos pasos, donde primero se optimiza el cronograma de producción y luego la asignación de la flota minera, el enfoque propuesto reduce los costos generados por los movimientos de pala en un 56% y la producción perdida debido a la reubicación de palas en un 54%. Además, el número requerido de camiones muestra un perfil más equilibrado, reduciendo los costos operativos totales de los camiones en un 3.1% durante un horizonte de planificación anual, así como la capacidad de transporte requerida en los períodos más intensos de transporte en un 25%. El modelo propuesto optimiza simultáneamente la secuencia de extracción a corto plazo, la asignación de palas considerando costos y producción perdida por reubicación, la programación de una flota de transporte heterogénea, y la asignación de materiales extraídos a múltiples instalaciones de procesamiento y acopios a lo largo de la cadena de valor mineral.

Quiroz (2016) realizó un estudio para evaluar la implementación y resultados de la metodología LEAN aplicada en uno de los sectores productivos de la Gerencia de Minas de División El Teniente, específicamente en la mina Esmeralda, ubicada en Chile. El objetivo fue analizar los efectos de esta metodología en términos de costos, KPI y cumplimiento de metas del plan minero. Se realizó la implementación de los principios de la filosofía LEAN en cada uno de los procesos productivos asociados a la operación de la mina y se evaluaron los estándares y metas definidas, así como las mejoras y KPI propuestos. El método incluyó la revisión de las actividades y trabajos establecidos por la metodología LEAN para cada principio y estándar, además de determinar si se alcanzaron las promesas y el nuevo estilo de gestión, junto con el nivel de adherencia LEAN esperado. También se buscó cuantificar y cualificar el aporte al negocio y la sustentabilidad en términos de costos de operación y utilización de activos. La metodología LEAN requiere invariablemente de mecanismos técnicos de sistemas de monitoreo y control, así como el uso masivo de tecnologías de información e internet de las cosas. Se destacó la importancia de medir y conocer en detalle lo que ocurre en todos los niveles de la operación.

Además, se encontró que el apoyo, compromiso y disciplina de los líderes es fundamental para generar un cambio conductual en el equipo de trabajo y contribuir al alineamiento de toda la organización. El manejo comunicacional se identificó como un factor clave que debe fomentarse continuamente con todo el personal. La investigación concluye que Lean generó valor al negocio minero y contribuyó positivamente a un mayor desempeño en la organización. Se observó una nueva estructura y lógica de operación basada en una cultura de desempeño, lo que se reflejó en una mayor utilización de activos, reducción de costos de operación y cumplimiento de los planes de producción mediante la gestión y seguimiento de KPI. La implementación de LEAN demostró ser una estrategia efectiva para mejorar la eficiencia en el contexto de la minería subterránea.

Lööw (2018) investigó cómo la industria minera ha implementado y practica la producción Lean, así como la forma en que se lleva a cabo esta práctica. La investigación se llevó a cabo en Suecia y se centró en revisar la literatura científica sobre producción lean en la industria minera, así como en la práctica reportada del concepto en una empresa minera.

Los resultados obtenidos fueron analizados utilizando análisis de contenido y se encontró que Lean no ha sido completamente implementada en la industria minera en tanto se enfoca en prácticas selectas. Los hallazgos sugieren que la forma y la extensión de la producción Lean en la minería difieren de otras industrias debido a las características propias de esta debido a que esta no se define por herramientas o prácticas específicas, sino más bien por una filosofía que busca proporcionar valor al cliente. No obstante, la aplicación de esta filosofía genera, o requiere, ciertas características o herramientas. En este sentido, no se puede afirmar que la industria minera practique la producción lean en el sentido tradicional. El enfoque en la filosofía o principios no puede excluir por completo las prácticas o características, ya que los objetivos de una filosofía de producción Lean deben lograrse mediante algún enfoque. Sigue existiendo la necesidad de determinar qué busca lograr la producción Lean en la minería y qué herramientas pueden ayudar en esto.

Antecedentes a nivel nacional

En 2022, Espinoza y Carreño realizaron un estudio significativo en una unidad minera ubicada en Perú, titulado "Control operativo de los metros de avance por disparo mediante la metodología Lean Six Sigma". Su objetivo fue desarrollar y aplicar la herramienta de gestión Lean Six Sigma para reducir la variación en el cumplimiento de los metros de avance diarios programados, enfocándose específicamente en las actividades de perforación y voladura. Para lograr esto, los autores identificaron los procesos claves (en perforación y voladura), realizaron un diagrama SIPOC y un mapeo de procesos para detallar todas las variables de entrada y salida. Esto les permitió clasificar y recopilar información cuantitativa y cualitativa para el análisis posterior del proyecto. Además, desarrollaron un análisis de la matriz CT, destacando que el KPI de metros de avance por disparo tenía el mayor impacto en el proceso. Paralelamente, implementaron un análisis FMEA, identificando cuatro ítems de alto riesgo de doce, y propusieron acciones preventivas para evitar inconvenientes o retrasos en el proyecto.

Desde mayo de 2021, el KPI de metros de avance por disparo mostró una reducción significativa de la variabilidad y un aumento en la eficacia del cumplimiento del avance diario. La prueba piloto del nuevo diseño de malla implementado entre enero y febrero redujo el porcentaje fuera de especificación en un 51%. El proceso

mejoró, aumentando la media de avance de 3.12 metros por disparo a 3.44 metros, lo que representa un incremento del 10.25%. Además, una evaluación económica mostró un saldo neto positivo de $71,571.21, con una tasa interna de retorno del 22% para el período de octubre, lo que indica la rentabilidad del proyecto. El estudio demuestra la eficacia de la metodología Lean Six Sigma en minería para mejorar la eficiencia operativa y la rentabilidad económica. El proyecto no solo alcanzó el objetivo de cumplir con los metros de avance programados, sino que también fue crítico para el costo y la entrega, satisfaciendo al cliente con la calidad de las labores realizadas después de la implementación.

Agüero y Ramírez (2022), llevaron a cabo un estudio con el objetivo de aplicar la metodología Lean Six Sigma para reducir los tiempos improductivos en las etapas de acarreo y transporte de mineral en la mina Canta, ubicada en la provincia de Canta, departamento de Lima. Esta investigación se centró en evaluar el flujo operativo actual de estas etapas, definir las variables y parámetros iniciales, medir los tiempos de las actividades críticas e indicadores de productividad, analizar las causas de los tiempos improductivos, aplicar alternativas de mejoras, y proponer medidas y herramientas de control. La metodología utilizada sigue las directrices de Lean Six Sigma, empleando el ciclo DMAIC. En el análisis inicial, se identificó que las principales causas de las demoras en los ciclos de acarreo y transporte eran la variabilidad en el desempeño de los lamperos, debido a factores de fatiga y ocio, y la dificultad de maniobra de la retroexcavadora, que retrasaba las labores de carguío.

Tras la implementación de las propuestas de mejora, se logró incrementar los rendimientos de los minidumper en un promedio del 4.5%. La gestión del tiempo permitió clasificar el ciclo operativo en tiempos efectivos (productivos) e improductivos (contributorios y no contributorios). En el acarreo de mineral, se hallaron un 82% de tiempo efectivo, 12% de tiempo contributorio y 6% de tiempo no contributorio. Para el transporte, estos porcentajes fueron 86%, 9% y 5%, respectivamente. Las conclusiones del estudio subrayan la efectividad de la principal propuesta de mejora: la implementación de un modelo de gestión de tiempos, que incluye un análisis de brechas para organizar las operaciones y establecer metas a corto plazo. Además, se eliminó actividades que no agregaban valor y se gestionó la inserción de un lampero adicional. Estas medidas

incrementaron los rendimientos efectivos para el acarreo en el tajo Vanessa de 3.52 Ton/hr a 3.68 Ton/hr, y en el tajo Milagros de 3.96 Ton/hr a 4.13 Ton/hr. Asimismo, se aumentó el tonelaje de mineral movido en Vanessa de 176 TM a 191 TM y en Milagros de 185 TM a 194 TM. En conclusión, la aplicación de la metodología Lean Six Sigma redujo significativamente los tiempos improductivos en los ciclos de acarreo y transporte de mineral en la mina Canta.

Pineda (2023) realizó un estudio para demostrar cómo la implementación de la metodología Lean Six Sigma contribuyó al logro de los objetivos de producción en la Ampliación Mina Marcona y su nuevo Sistema de Chancado y Transferencia. El estudio se llevó a cabo en una mina de capital extranjero ubicada en el distrito de Marcona, provincia de Nazca, Departamento de Ica, Perú. Se enmpleó una metodología cuantitativa con un alcance correlacional, buscando relacionar la implementación de Lean Six Sigma con el incremento de producción. Se utilizó un diseño de investigación experimental, específicamente un experimento puro.

Se obtuvo una mejora significativa en la producción diaria, con un incremento del 12% al reducir la sobrecarga del sistema y se identificaron problemas en equipos subdimensionados, principalmente en la planta de zarandas y la faja 014-003, que causaban pérdidas de producción del 33% y 28% respectivamente. La reducción de la sobrecarga benefició tanto a la operación de la planta como a la mina, aumentando la productividad en el tajo y además, se logró reducir la variabilidad de la fragmentación del mineral, ajustándola a los requerimientos de la chancadora (P80 = 45 cm). Esto resultó en una disminución de los tiempos perdidos por atoros y una mejor fluidez del proceso, con menor recirculación de mineral en la chancadora secundaria. Se implementó un sistema de monitoreo permanente de granulometría en fajas transportadoras para corroborar los resultados del monitoreo en campo. Lean Six Sigma permitió reducir significativamente las pérdidas expresadas en tiempos de parada de planta por diversos factores, incluyendo cambios de turno, mantenimiento y abastecimiento de mineral. Estas mejoras mitigaron las tres principales limitantes de la producción, logrando un incremento notable en la producción de la Ampliación Marcona.

Bazo y Loayza (2021) realizaron un estudio con el objetivo de desarrollar una metodología para generar valor en la formulación del Proyecto Trinidad, aplicando

herramientas del Lean Six Sigma. La investigación se llevó a cabo en el distrito de Sartimbamba, provincia de Sánchez Carrión, departamento de La Libertad, Perú. Los autores emplearon la metodología Lean Six Sigma, utilizando principalmente cuatro herramientas: Just In Time (JIT), Business Project Management (BPM) y Quality Functional Deployment (QFD). Estas herramientas se aplicaron para reducir tareas innecesarias o duplicadas y optimizar el tiempo del proceso de elaboración mediante un Diagrama de Gantt. Como resultado de la implementación del proceso, se identificaron recursos de 38,444.00 toneladas con un promedio de 0.55 onzas de oro. Se estimó una inversión inicial de $1,500,000 dólares, con un tiempo de preparación de 1 mes y una producción progresiva desde 30 ton/día hasta 210 ton/día. Los índices de rentabilidad calculados mostraron un Valor Actual Neto de $202,636.64, con una tasa de descuento del 0.84% en un período de 12 meses, una Tasa Interna de Retorno del 4% y un payback de 12 meses, lo que determinó la viabilidad del proyecto Trinidad. En conclusión, el estudio cumplió con las expectativas de la empresa, basándose en los requerimientos establecidos durante el desarrollo del House of Quality. La información generada permitió establecer el estado del proyecto y proporcionar un producto de fácil entendimiento para buscar fuentes de financiamiento o vender la concesión.

En un estudio realizado por Cruz (2019), se buscó optimizar el proceso de perforación primaria utilizando el método Lean Six Sigma en la Unidad Minera Antapaccay, ubicada en el distrito de Marquiri, provincia de Espinar, departamento del Cusco, Perú. El objetivo principal fue desarrollar y aplicar una herramienta de gestión para mejorar la utilización de los equipos de perforación primaria en dicha unidad minera y la metodología empleada fue Lean Six Sigma y el enfoque DMAIC. Inicialmente, se definió el problema mediante una evaluación de los KPI's de operaciones mineras y se identificaron los factores que afectaban la utilización de las perforadoras primarias utilizando un "modelo de uso de tiempos". Para el análisis de datos, se emplearon herramientas como DISPATCH – MODULAR, que recolecta tiempos asignados por el operador en tiempo real, y el sistema MISA, que proporciona reportes de las asignaciones de todos los equipos de perforación. Se calcularon métricas como la utilización, disponibilidad mecánica y física. El análisis incluyó gráficas R, gráficas de media, gráfica de subgrupos, histograma de capacidad, gráfica de normalización y gráficos de capacidad.

La aplicación del método Lean Six Sigma permitió aumentar efectivamente la utilización de las perforadoras primarias en la Unidad Minera Antapaccay. Las demoras programadas y no programadas eran significativamente altas de enero a mayo, lo cual se reflejaba en la baja utilización de las perforadoras y a partir de junio hasta noviembre, se observó un aumento progresivo en la utilización de estos equipos. Se implementaron cartillas de control diario para reducir la variabilidad de las demoras programadas y no programadas. La implementación de cartillas de control y la reducción de la variabilidad en las demoras resultaron en un aumento en la utilización de las perforadoras primarias, evidenciado por un incremento en la sigma del proceso. Se identificó que las demoras programadas y no programadas no estaban bajo un sistema de control adecuado y se determinó que el estado de *Stand-By* de las perforadoras primarias no afectaba significativamente su utilización.

Mendoza y Liberato (2023) realizaron un estudio cuyo objetivo fue evaluar la etapa de perforación de taladros largos en vetas angostas mediante el enfoque Lean Six Sigma, con la finalidad de incrementar la productividad operacional de una mina subterránea al sur del Perú. Este estudio se llevó a cabo en la mina Caylloma, ubicada en el distrito de Caylloma, Arequipa, Perú. La metodología empleada fue de tipo explicativo cuantitativo, aplicativo y práctico, fundamentada en el enfoque Lean Six Sigma que permitió observar sistemáticamente el proceso de perforación, identificar fallas, registrar variables de impacto, analizarlas estadísticamente, aplicar correcciones y llevar a cabo un control del proceso. El enfoque Lean Six Sigma facilitó la mejora continua a corto y mediano plazo en el proceso de perforación, mejorando su eficiencia y calidad.

Los resultados obtenidos confirmaron la existencia de variables relevantes que afectan directamente el proceso de perforación, como las presiones de rotación y percusión, y factores de posicionamiento del cabezal del taladro, incluyendo la inclinación en sus tres ejes (X, Y y Z). Además, se encontró que los aceros de perforación evaluados no cumplían con el tiempo de vida útil estimado, lo que obligó a disminuir su vida útil para evitar desviaciones en los taladros desarrollados. También se concluyó que la empresa contratista no consideró la ausencia de personal para el proceso de perforación, resultando en el incumplimiento de los metros perforados programados. La evaluación del programa piloto de perforación

bajo el enfoque Lean permitió identificar los principales factores que incurren en los problemas del proceso. El fracturamiento es un factor determinante en el avance de las perforaciones y en el uso adecuado de los materiales, influenciando los principales parámetros operativos. Por último, se identificaron fallas mecánicas y eléctricas en el equipo de perforación Mini Simba (Rayol H2R), como la fuga de aceite por rotura del acumulador, la rotura de la cadena que moviliza el cabezal de perforación y la rotura del pistón de percusión, que ocasionaron demoras debido a la falta de repuestos en el taller de mantenimiento mecánico, lo que requirió obtenerlos desde Lima.

Alcarraz y Legoas (2023), implementaron el método Lean Six Sigma para corregir la subestimación de costos en la construcción de chimeneas Raise Boring por parte de una empresa contratista especializada. El estudio tuvo lugar en una mina situada en el centro del Perú, a 1,500 metros sobre el nivel del mar. Se determinaron las herramientas del Lean Six Sigma aplicables a esta estimación, identificar y validar las variables a emplear, comparar la estimación de costos utilizando métodos tradicionales versus el método Lean Six Sigma, e implementar dicho método para controlar las desviaciones en la estimación de costos.

Los resultados mostraron que las herramientas utilizadas, como DMAIC y el índice de capacidad del proceso, permitieron generar orden y estructura en el proceso. Estas herramientas fueron esenciales para identificar la causa raíz del problema. Se eligieron variables clave como el avance mensual promedio y los tiempos operacionales de la actividad de ejecución de chimeneas Raise Boring. Se identificó que las variables del precio unitario vigente provenían de un estudio de tiempos y avances mensual desfasado, lo que generaba costos que no reflejaban la realidad operacional. Lean Six Sigma permitió corregir la subestimación de costos, al determinar y analizar las variables correctas para la estimación del precio unitario. Se observó un incremento del 6% en el precio unitario, resultado positivo tanto a la empresa contratista como a la compañía minera y se determinaron las variables correctas para la ejecución de estas labores, estableciendo avances mensuales acordes al rendimiento del equipo e identificando posibles mejoras en los tiempos de ejecución de una chimenea.

Martínez y Vasquez (2021) llevaron a cabo un estudio con el objetivo de aplicar la Metodología Six Sigma para mejorar el nivel de producción del sector 1 de la Cantera R.B, ubicada en el distrito de Mesones Muro, provincia de Ferreñafe, departamento de Lambayeque. Este estudio se enfocó en identificar la situación actual del área de producción, reconocer las causas de la baja producción o puntos muertos, realizar un análisis de los puntos críticos, plantear mejoras basadas en las deficiencias que originan la baja producción y controlar las mejoras planteadas. Se empleó una metodología cuantitativa con un diseño descriptivo aplicativo. Las variables de estudio fueron la Metodología Six Sigma y el Nivel de Producción y se realizaron análisis de tiempos y se recogió información en campo, lo cual permitió calcular las horas operativas de las maquinarias, específicamente el cargador frontal, y los ciclos de trabajo. Los resultados indicaron que el rendimiento actual de las maquinarias de la cantera es menor al especificado por el fabricante, con un rendimiento real del equipo de 115 m^3 por hora y un total de 33 ciclos. Además, se encontró que el nivel sigma está en el rango de 1 a 1.1, lo que indica una alta presencia de errores o demoras en el proceso de carguío.

La aplicación de la metodología Six Sigma permitió reconocer los contratiempos en la Cantera R.B y se propusieron varias mejoras, tales como la implementación de personal adicional en el área de carguío, mejoras en el mantenimiento de las maquinarias, capacitaciones para los trabajadores y la supervisión diaria de los mismos. Estas acciones están dirigidas a aumentar el rendimiento de las maquinarias y la producción diaria de la cantera. Además, se recomendó llevar un control y supervisión constante en las áreas de trabajo e implementar personal que gestione las boletas y controle el proceso de carguío sin interferencias de los conductores. Con estas medidas, se espera incrementar el nivel sigma de 1 a 2.1, mejorando significativamente la eficiencia del proceso productivo en la cantera.

Cornejo (2020) propuso un modelo de optimización de ruteo de acarreo heurístico para minería, con el objetivo de incorporar y optimizar las operaciones de carguío y acarreo. Este estudio se llevó a cabo en una mina ubicada en Cajamarca, donde se extrae oro y plata y para abordar el problema de asignación de camiones a rutas, se desarrolló un algoritmo heurístico multiobjetivo que maneja el tratamiento de los datos necesarios para generar soluciones. Se logró resolver el problema de creación de cronogramas de producción óptimos, maximizando beneficios en parámetros

que son excluyentes entre sí, tales como *blending*, tiempo de ejecución y balanceo de trabajo. El tiempo de cálculo fue considerado razonable, alcanzando soluciones en aproximadamente 0.98 horas, lo cual es adecuado dada la complejidad y el tamaño de las soluciones manejadas, que incluían hasta 2581 elementos por solución. Además, el modelo demostró su capacidad para optimizarse en diferentes objetivos divergentes, permitiendo a los usuarios elegir la mejor opción de producción según diferentes criterios. Esto evidencia el potencial del modelo para satisfacer las necesidades de decisión multicriterio en la planificación de la producción minera. Finalmente, la industria minera puede beneficiarse significativamente de la implementación de un modelo multiobjetivo, ya que permite la inclusión de diversos objetivos que, aunque difíciles de modelar, son importantes para la sostenibilidad de las operaciones.

En un estudio realizado por Ingar en 2023, se exploró la aplicación de la metodología Lean Six Sigma para mejorar la productividad en una empresa metalmecánica dedicada a la reparación de componentes de maquinaria pesada para la industria minera. El objetivo principal fue reducir los defectos de reparación y, específicamente, mejorar el cumplimiento de los tiempos acordados con los clientes a un mínimo del 90%, así como disminuir el nivel de producto no conforme en un 25%. La investigación se llevó a cabo mediante un proceso de simulación basado en datos originales, aplicando las etapas del sistema DMAIC para abordar el problema de productividad en la reparación de componentes. Se utilizaron herramientas como Kanban y Heijunka para mejorar la programación, clasificación de trabajos y nivelación de la producción.

Los resultados iniciales mostraron un Cp (índice de capacidad del proceso) de 0.91 y un Cpk (índice de capacidad del proceso centrado) de -0.64. Tras la implementación de las herramientas Lean Six Sigma en la simulación, estos valores mejoraron significativamente, alcanzando un Cp de 1.09 y un Cpk de 0.95. La correcta implementación de la metodología Lean Six Sigma puede hacer que las empresas metalmecánicas sean más competitivas y mejora la productividad en los procesos de reparación, aumentando la eficacia y reduciendo el índice de producto no conforme. Además, la combinación de Lean Six Sigma con herramientas como Kanban y Heijunka resultó efectiva para optimizar la programación y nivelación de la producción. Finalmente, se observó que la aplicación de esta metodología no solo

reduce el índice de producto no conforme, sino que también evita demoras en la reparación y mejora el índice de cumplimiento en las áreas de la planta.

Castrejon (2021) realizó un estudio con el objetivo de diseñar un sistema basado en la Metodología Six Sigma para mejorar la gestión de mantenimiento predictivo de los equipos estáticos en una empresa minera de Cajamarca, Perú. La investigación se llevó a cabo en el área de mantenimiento de un proyecto minero ubicado en dicha región y para recolectar datos, el autor empleó técnicas como la entrevista, la encuesta y la observación directa, utilizando como instrumentos el cuestionario y la lista de verificación. El estudio siguió la metodología DMAIC propia del Six Sigma para proponer el diseño del modelo de gestión de mantenimiento predictivo.

Los resultados del diagnóstico inicial revelaron un porcentaje de desviación negativo de -39.74% en el tiempo de ejecución de los procesos de mantenimiento predictivo. Además, se identificó un alto porcentaje (31.9%) de solicitudes de órdenes pendientes por ejecutar, así como demoras significativas en las actividades (155 minutos en promedio). Estas deficiencias se traducían en frecuentes quejas de los clientes y un elevado índice de no conformidad absoluta del 30.86%, con un nivel sigma inicial de 3.3. El diseño basado en la metodología Six Sigma permitió establecer una línea base del proceso de mantenimiento predictivo, proyectando una mejora del 30% en dicho proceso y un aumento en el número de órdenes ejecutadas a 103. Estas mejoras elevarían el nivel sigma a 4.4, lo que implica un mayor desempeño en el proceso de mantenimiento predictivo. Adicionalmente, la evaluación económica del proyecto demostró su viabilidad en un periodo de 2 años, con una tasa de interés del 10%, arrojando resultados favorables: un Valor Actual Neto (VAN) de 172,348.37, una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 144% y un Índice de Rentabilidad (IR) de S/.1.36 por cada sol invertido.

Hilario et al. (2022) realizaron un estudio con el objetivo de plantear una propuesta de mejora para el proceso de productos terminados en Minera Deisi, una manufacturera peruana de mármoles, utilizando el modelo Lean Six Sigma. El estudio empleó una metodología descriptiva, utilizando herramientas como el Diagrama de Pareto y el Diagrama de Ishikawa para identificar y analizar los puntos críticos en el área de productos terminados y se realizaron entrevistas a miembros de la empresa para recopilar información sobre los procesos y actividades

principales. El área de producción tenía el mayor impacto en los beneficios de la empresa y se identificaron varios puntos críticos que afectaban la calidad de las baldosas, incluyendo la falta de mecanismos de control, errores en el llenado de hojas de control, verificación de calidad, empaquetado y reconocimiento de baldosas debido a procesos realizados empíricamente. La investigación también reveló una necesidad de capacitación del personal.

Basándose en estos hallazgos, los autores propusieron un plan de acción utilizando la metodología Lean Six Sigma y la herramienta de las 5S. Esta propuesta incluyó mejoras en los procesos que no requerían inversiones económicas significativas, considerando el contexto de la pandemia. Se enfocaron en la selección y ordenamiento de elementos necesarios, la creación de cambios estructurales para mejorar el orden, la limpieza y el control en los procesos de empaquetado, así como la implementación de programas de capacitación para los trabajadores. Se identificaron importantes oportunidades de mejora en sus procesos, principalmente debido a su crecimiento empírico y la falta de implementación de cambios significativos en el control de calidad. Recomendaron la aplicación de la herramienta de las 5S para mantener una cultura de cero defectos, mejorar las actividades en el área de productos terminados y reducir costos. Se recomendó la implementación de un programa de capacitación enfocado tanto en aspectos técnicos como motivacionales, con el fin de facilitar la adopción de las nuevas medidas y fomentar una cultura de mejora continua en la organización.

Antecedentes a nivel local

Hilasaca (2021) llevó a cabo un estudio en la mina Cuajone, con el objetivo de optimizar los tiempos de espera de volquetes en la zona de descarga de mineral sulfurado de la chancadora primaria, buscando incrementar la productividad de estos vehículos y, por ende, la producción de la mina. Para alcanzar este objetivo, se utilizó el sistema “Dispatch” junto con reportes de producción mensual, costos de producción, y consumo de materiales como principales instrumentos de medición. La metodología implementada consistió en controlar los tonelajes nominales y las leyes diarias que cada pala envía de la mina a su destino, permitiendo un análisis detallado y ajustado del flujo de mineral. El tiempo de espera promedio por volquete para descargar el mineral se redujo de 4.45 minutos

a 1.22 minutos lo que permitió que tres volquetes que antes hacían cola fueran reasignados al circuito de acarreo de desmonte, lo cual contribuyó a un incremento de 3,154,997 toneladas movidas entre los meses de mayo a octubre en la unidad productiva de Cuajone. Se obtuvo una reducción del tiempo de espera en la zona de descarga del 72.6%, lo cual representó una disminución de costos de aproximadamente US$ 2,287,400 al año. Además, se observó que el tiempo de espera para la descarga representaba inicialmente un 11.6% del tiempo total del ciclo de los volquetes, cifra que se redujo a 4% después de las mejoras implementadas. La estandarización y la coordinación efectiva aumentaron la productividad de los volquetes en un 23.7%, de 511.17 a 632.36 toneladas en promedio por ciclo de mineral.

Davila (2022), llevó a cabo un estudio con el objetivo de evaluar el rendimiento de los neumáticos bajo parámetros de TKPH con la finalidad de reducir los costos de acarreo de mineral incrementando su tiempo de vida útil. El estudio se realizó en un yacimiento tipo pórfido de cobre y molibdeno Cu-Mo, ubicado en el distrito de Torata, provincia Mariscal Nieto, departamento de Moquegua. Se aplicó una metodología descriptiva comparativa con diseño correlacional y se logró reducir en un 33% el retiro de neumáticos debido a separación térmica, lo cual se tradujo en una disminución significativa de los costos unitarios de acarreo por tonelada de mineral, específicamente para neumáticos de medida 59/80R63. Durante el primer mes, se observó una disminución del 10.00% en los costos de neumáticos debido a este problema, seguido de una reducción del 8.86% en el segundo mes. Además, se identificó que el TKPH promedio varió significativamente según las rutas específicas dentro de la mina, lo que permitió determinar el cambio oportuno de ruta en caso de superar el TKPH nominal del neumático. El impacto del TKPH en el tiempo de vida de los neumáticos mostró que un 33% de estos no fueron retirados prematuramente debido a separación térmica, lo que incrementó su vida útil en un 20%, equivalente a 1109 horas adicionales. Esto resultó en un ahorro significativo de 60,560.00 USD, equivalente a 5.91 USD por hora adicional de vida útil de los neumáticos.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Metodología Lean Six Sigma

Lean Six Sigma es una *metodología ágil* que une dos enfoques para la mejora continua con un énfasis en la eliminación de desperdicios y la reducción de variaciones en los procesos de manufactura y servicios. El primer enfoque que reúne, Lean, busca maximizar el valor añadido para el cliente mientras mantiene los desperdicios al mínimo y realiza economías en el consumo de recursos. El segundo enfoque, Six Sigma, es un esfuerzo constante para reducir gradualmente las fluctuaciones mediante un enfoque definido hacia los procesos. Juntos, estos dos enfoques promueven una mejora constante, sirviendo como filosofía subyacente para la gestión efectiva del sistema en cualquier organización que desee desarrollarse de manera intensiva (Espinoza y Carreño, 2022).

Lean y Six Sigma son sistemas separados que presentan diferencias en sus métodos. Las empresas que adoptan Lean basan sus actividades en Kaizen, es decir, mejora continua, día tras día, paso a paso. Para organizar mejor su trabajo, utilizan métodos aprendidos de la experiencia de Toyota, como: 5S, gestión visual, Andon, Heijunka, TPM, SMED y PDCA.

No obstante, Lean y Six Sigma se complementan mutuamente. Lean impulsa a Six Sigma para obtener mejores resultados que los logrados por estos dos métodos por separados. La combinación de estos métodos proporciona a un equipo de optimización un conjunto completo de herramientas para mejorar la velocidad y eficiencia de cada proceso dentro de la organización, con el fin de obtener mayores beneficios, mejores reducciones de costos y una cooperación más estrecha. A pesar de sus diferencias, Lean y Six Sigma pueden complementarse mutuamente . Ambos métodos son similares en sus algoritmos de acción. DMAIC se utiliza para optimizar los procesos existentes de la misma forma que PDCA (Planificar, Hacer, Verificar, Actuar) de Deming utilizado en la gestión Lean

2.2.1.1. Metodología Lean

La metodología de gestión Lean es uno de los conceptos más conocidos y ampliamente aplicados en la gestión de empresas manufactura. También se conoce como Producción Lean, abreviado simplemente como Lean (Kesek, Bogacz y Migza, 2019). El término "Gestión Lean" es el más difundido, especialmente tras

numerosos casos de implementación exitosa en el sector de servicios y su origen de Lean se encuentra en la industria automotriz. A partir de la década de 1950, Toyota se esforzó por crear, implementar y sistematizar herramientas que, combinadas, formaron el Sistema de Producción Toyota cuyo objetivo principal era cambiar el enfoque de la producción masiva a la reducción de costos en áreas que no agregaban valor para el cliente. En 1988, John Krafcik, uno de los investigadores involucrados en el Programa Internacional del Vehículo Motorizado, nombró al sistema como Lean, no obstante, la noción de Manufactura Lean fue popularizada por James P. Womack, Daniel T. Jones y Daniel Roos. En 1991, coescribieron el *bestseller* "The Machine That Changed the World", que destacaba al Sistema de Producción Toyota como el primer proceso de producción Lean.

La aplicación de la Gestión Lean apunta a que todos los elementos correctos estén en el lugar y momento adecuados. A su vez se enfoca en realizar esfuerzos particulares para reducir los tres tipos principales de desperdicio:

Muda. Desechos de producción, tiempo de inactividad, movimientos innecesarios y desperdicio de tiempo, recursos y otras actividades que no aportan valor al cliente.

Muri. Sobrecarga de empleados, máquinas o procesos, lo que resulta en fatiga, fallas repetidas de maquinaria, aumento del tiempo de inactividad, etc.

Mura. Irregularidad e inconsistencia en las operaciones, gestión del flujo de recursos de tal manera que se asegure consistencia, flujo de trabajo constante y una operación constante.

2.2.1.2. Principios Lean

Existen cinco principios fundamentales de Lean que pueden aplicarse a una empresa en su totalidad, a procesos individuales o a las acciones de un empleado específico.

(1) Definir qué acciones agregan valor para el cliente.
(2) Identificar todas las acciones necesarias para crear un producto a lo largo de toda la cadena de valor para identificar aquellos pasos que representan desperdicio.
(3) Crear una nueva cadena de valor libre de desperdicios, sin tiempos de inactividad, interrupciones o reflujo, etc.

(4) Hacer lo que el cliente requiere.
(5) Apuntar a la perfección eliminando los casos de desperdicio identificados.

Lean crea una cultura de trabajo en la organización que motiva a todos sus miembros a reducir continuamente costos, mejorar la calidad y acortar los tiempos de entrega. Todo esto con el objetivo de proporcionar la máxima satisfacción al cliente y alinearse de manera flexible con el entorno. La idea busca, especialmente, eliminar todo desperdicio o actividades que no agregan valor y puede considerarse una filosofía de gestión empresarial, una nueva organización empresarial o como un sistema de conceptos y métodos de gestión. Las herramientas más importantes incluyen: PDCA, Jidoka, Just in Time, TPM (Mantenimiento Productivo Total), Gestión Visual, 5S, Kaizen, Estandarización, SMED, Kanban y Heijunka.

2.2.1.3. Desperdicios Lean en minería

En el ámbito de la minería, la aplicación de la metodología Lean implica la identificación y eliminación de desperdicios para optimizar los procesos, mejorar la productividad y reducir costos. Sin embargo, las características únicas del sector, como la variabilidad geológica, los entornos de trabajo desafiantes y la escala de las operaciones, hacen que los desperdicios Lean adopten categorías específicas que impactan significativamente en la eficiencia operativa. A continuación, se describen los principales tipos de desperdicios Lean presentes en la minería, con un análisis de sus causas y consecuencias (Cuevas, 2021).

La identificación y mitigación de estos desperdicios requieren una adopción consciente de principios L ean adaptados a la minería. Esto implica desde la implementación de sistemas "pull" basados en la demanda, hasta el rediseño de procesos logísticos y la capacitación constante del personal. En un sector donde cada mejora puede traducirse en ahorros significativos y en una operación más sostenible, la aplicación de estas estrategias no solo es deseable, sino necesaria para una minería rentable.

Sobreproducción

La sobreproducción surge cuando la capacidad de extracción excede la capacidad de procesamiento. Este fenómeno puede deberse al uso de sistemas de producción "push", donde el flujo de trabajo no está regulado por la demanda real de

procesamiento en las plantas. Esto provoca acumulaciones de material, desperdicio de recursos y, en ocasiones, un impacto ambiental negativo por el manejo excesivo de mineral y uso de equipos.

Tiempos improductivos

Los tiempos improductivos se manifiesta en diversas formas, como la falta de disponibilidad de equipos o refacciones, tiempos de inactividad por fallas inesperadas o mantenimiento no programado, y condiciones laborales inadecuadas, como la ausencia de ventilación para remover gases y polvo. Estas pausas afectan no solo la productividad, sino también la seguridad y bienestar de los trabajadores, generando costos adicionales y retrasos en la cadena productiva.

Transporte innecesario

El transporte innecesario es otro desperdicio crítico, derivado de diseños ineficientes en las rutas de transporte y manejo de materiales. En minería, las largas distancias y movimientos innecesarios del mineral desde el punto de extracción hasta las plantas de procesamiento incrementan los costos operativos y el desgaste de maquinaria, además de aumentar las emisiones contaminantes.

Procesamiento incorrecto

El procesamiento incorrecto o sobreprocesamiento ocurre cuando se ejecutan tareas redundantes o mal planificadas, como la utilización de métodos menos eficientes o la búsqueda de calidades de mineral que exceden las especificaciones requeridas por los clientes. Estas prácticas no solo consumen más recursos, sino que también retrasan el cumplimiento de metas productivas.

Inventario Excesivo

El inventario excesivo, ya sea de materiales, equipos o refacciones, refleja una administración deficiente. En minería, mantener altos inventarios puede parecer una estrategia preventiva frente a la incertidumbre operativa, pero también inmoviliza capital y genera espacio ocupado de manera ineficiente.

Excesivo movimiento

El movimiento innecesario incluye los desplazamientos superfluos de trabajadores, herramientas o materiales dentro del sitio de trabajo. Este problema, común en

operaciones mal organizadas, disminuye la productividad y genera un desgaste innecesario tanto en los recursos humanos como en los equipos.

Defectos

Los defectos abarcan problemas como el retrabajo, las reparaciones frecuentes y los fallos en la calidad del material extraído. Estas situaciones, además de generar pérdidas económicas, también afectan la reputación de las operaciones mineras y prolongan los ciclos de producción.

Desperdicios de personal

El desperdicio relacionado con el personal es quizás uno de los más complejos, ya que incluye la falta de capacitación, asignaciones inadecuadas de tareas, ausentismo y problemas de comunicación. En minería, donde las operaciones dependen de una coordinación precisa, estos problemas impactan directamente en la seguridad y la eficiencia.

2.2.1.4. Beneficios y desventajas de la metodología Lean

Los beneficios más comúnmente mencionados de la implementación de Lean incluyen:

(1) Reducción de costos.
(2) Reducción de tiempos de entrega.
(3) Reducción de desperdicios.
(4) Mejora de la productividad.
(5) Reducción del inventario de trabajo en proceso (WIP).
(6) Reducción de defectos/mejora de la calidad.

Como la mayoría de los sistemas de gestión, Lean no está exento de desventajas (Davies, 2016).

(1) Problemas de tensión en la cadena de suministro.
(2) Altos costos de implementación.
(3) Falta de aceptación por parte de los empleados.
(4) Problemas de insatisfacción del cliente.
(5) Falta de enfoque estratégico.
(6) Falta de sistemas de TI adecuados.

(7) Lean toma tiempo y puede ser muy disruptivo.

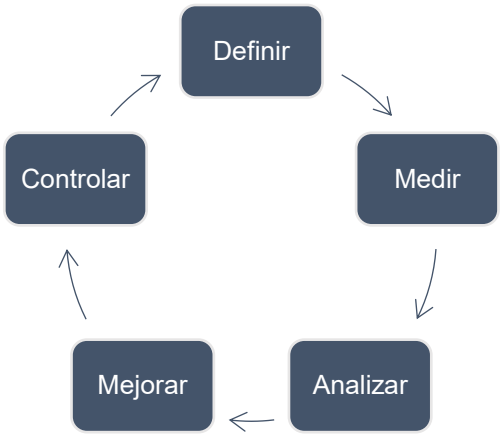
2.2.1.5. Metodología Six Sigma

Six Sigma es una metodología de gestión que ayuda a mejorar la productividad y reducir los costos empresariales. Su objetivo principal es proporcionar a los clientes un producto adecuado a sus expectativas mediante la eliminación de fluctuaciones en los procesos. Se utilizan principalmente herramientas analíticas y estadísticas sólidas como SPC, MSA y DOE. En lugar de centrarse en el producto, el método Six Sigma busca asegurar la calidad o minimizar las fluctuaciones en los procesos para eliminar errores incluso antes de que aparezcan, y da prioridad a los procesos sobre los productos, aplicando métodos de ejecución de procesos que excluyen la posibilidad de defectos.

La herramienta más importante que impulsa Six Sigma es el algoritmo de excelencia DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar, Controlar) de la Figura 1.

Figura 1

Método DMAIC de Lean Six Sigma



Nota. Elaboración propia en base a Lööw, J. (2018).

Six Sigma se ha convertido en un método importante en muchas grandes corporaciones debido a su impacto en la cultura de gestión. Esta metodología innovadora está ganando terreno cada vez más en organizaciones de diversos sectores industriales. El punto fuerte de Six Sigma radica en una clara división de responsabilidades y funciones entre los empleados, requisitos precisamente definidos para los solicitantes que buscan una posición en la empresa, así como un extenso sistema de formación.

2.2.1.6. Origen de Six Sigma

Six Sigma recibe su nombre de la desviación estándar sigma, un parámetro utilizado en estadística. En la década de 1970, los productos japoneses baratos empezaron a ser cada vez más competitivos en los mercados globales, obligando a las empresas estadounidenses a buscar maneras de mejorar la calidad de sus productos al mismo tiempo que mantenían bajos los costos. En un esfuerzo conjunto, General Motors, Ford y Chrysler implementaron ampliamente el Control Estadístico de Procesos (SPC), lo cual les permitió monitorear de manera constante el proceso de fabricación en puntos críticos de calidad y costos. Del mismo modo, Motorola, enfrentando la presión de productos japoneses más baratos y superiores, reunió a expertos en estadística matemática, diseño y aseguramiento de calidad, quienes colaboraron para desarrollar un sistema consistente de mejora continua de calidad conocido como "Iniciativa Six Sigma". Este sistema también facilitó reducciones progresivas en los costos primarios a través del Costo de la Mala Calidad (COPQ), permitiendo a Motorola reducir los costos por mala calidad del 40% a alrededor del 1% del valor vendido en pocos años (Antony et al., 2019).

Es un proceso económico que permite a las empresas mejorar su salud financiera mediante la planificación y el control del flujo de trabajo para minimizar el consumo de materias primas y la producción de residuos, al mismo tiempo que proporciona mayor satisfacción al cliente. No obstante, es difícil ofrecer una definición clara, completa y universal de Six Sigma, ya que interactúa fuertemente con la cultura de la empresa y adopta una forma individual en cada lugar. De hecho, como receta para el éxito, se recomienda crear su propia forma de Six Sigma. Esto se debe a que los proyectos, la formación y la infraestructura disponible deben ajustarse a las necesidades y capacidades específicas de cada organización.

Beneficios y Desventajas de Six Sigma

El principal beneficio de Six Sigma proviene de la eliminación de costos por mala calidad. Tiene un impacto financiero positivo debido al ahorro de costos, la reducción del riesgo en la variación del proceso, un conjunto común de herramientas, un enfoque de resolución de problemas y proyectos vinculados con objetivos empresariales (Fursule, Bansod y Fursule, 2012).

Las principales desventajas de Six Sigma giran en torno a no ofrecer nada nuevo en comparación con las prácticas tradicionales de gestión de calidad. Se argumenta que los grandes retornos de esta metodología en algunas empresas se debieron a que el nivel de calidad inicial de estas empresas era tan bajo que cualquier cosa habría mejorado drásticamente su calidad. Debido a que Six Sigma se aplica a todos los aspectos del proceso de producción y planificación, puede crear rigidez y burocracia que pueden sofocar la creatividad y la flexibilidad. Además, su enfoque en el cliente puede llevarse a extremos, donde las medidas internas de control de calidad que tienen sentido para una empresa no se llevan a cabo debido al objetivo predominante de alcanzar el nivel de satisfacción del consumidor estipulado por esta metodología.

2.2.1.7. Lean Six Sigma en minería

Lean y Six Sigma juntos ofrecen un conjunto de herramientas que pueden ser utilizadas en la minería para mejorar la eficiencia. Sin embargo, más importante aún, estos métodos pueden aplicarse para transformar el negocio, fomentando una cultura de excelencia en la alta dirección, que posee un buen entendimiento de lo que constituye un buen valor y cómo estimarlo. Lean es una forma de pensar, una filosofía centrada en el ser humano, que busca principalmente mejorar a las personas, quienes a su vez realizarán un trabajo eficiente mejorando los procesos. Esto es debido a que Six Sigma ofrece métodos científicos de gestión y estabiliza los procesos.

El objetivo no es el método en sí mismo, sino los resultados que intentamos alcanzar. Además, una implementación efectiva de estos métodos de excelencia depende en gran medida de mediadores cualificados que conozcan la industria minera y puedan adaptarse rápidamente a este entorno riguroso. Nada puede reemplazar a especialistas experimentados que entiendan la importancia de la mejora constante del negocio y la formación de empleados. Estos son necesarios para obtener una visión panorámica del sistema y hacer un uso adecuado de los datos para la toma de decisiones.

Casos de implementación de Lean Six Sigma en Empresas Mineras (Kesek, Bogacz y Migza, 2019)

La empresa minera alemana RAG AG es un buen ejemplo de implementación del pensamiento Lean con operaciones principalmente centradas en Alemania. Sus actividades se han enfocado históricamente en la extracción de carbón, especialmente en la región del Ruhr y el Sarre. A lo largo de los años, RAG AG ha jugado un papel importante en la economía energética de Alemania, proporcionando carbón para la generación de electricidad y la producción de acero (RAG, 2024).

Las actividades dirigidas a eliminar pérdidas y crear procesos estandarizados comenzaron allí en 2000 bajo el lema "Cero Accidentes y 100% de Valor Agregado" con los siguientes principios:

(1) Crear valor desde el punto de vista del cliente.

(2) Observar todo el flujo de valor.

(3) Principio de tirón para los procesos.

(4) Flujo sincronizado.

(5) Búsqueda de la perfección.

RAG adaptó muchas herramientas existentes al contexto minero e inventó herramientas especiales para los procesos mineros. Dos ejemplos de esta adaptación son las herramientas SMED y el ciclo PDCA/DMAIC. RAG las llama Boxenstopp y ciclo APUC, que significa análisis, planificación, implementación y control (Analyse, Planung, Umsetzung, Controlling). En 2000, RAG comenzó con la implementación de Lean como piloto en los procesos comerciales de una mina. Posteriormente, RAG incluyó los procesos de apoyo como el desarrollo, el mantenimiento de máquinas, la logística, así como los procesos de gestión y administración.

KGHM International

KGHM es una de las empresas mineras más grandes de Polonia y una de las principales productoras de cobre y plata a nivel mundial. Sus operaciones mineras están principalmente ubicadas en Polonia, donde posee varias minas importantes, incluyendo las minas de Lubin, Polkowice-Sieroszowice y Rudna, situadas en la región de la Baja Silesia. Estas minas se centran en la extracción de cobre y plata, que son procesados y refinados en sus propias instalaciones. Además de sus

operaciones en Polonia, KGHM ha expandido su presencia internacionalmente, con minas en países como Estados Unidos, Canadá y Chile. En los Estados Unidos, KGHM posee la mina Robinson en Nevada y la mina Carlota en Arizona. En Canadá, opera la mina Victoria en la provincia de Ontario y tiene participación en otros proyectos mineros. En Chile, posee una participación significativa en la mina Sierra Gorda, que es una de las mayores minas de cobre a cielo abierto del país (KGHM, 2024).

Después de los primeros pasos exitosos, el lanzamiento de Lean y sus herramientas continuó en la producción de las otras minas como KGHM. El enfoque de Lean Management en KGHM comenzó en 2011 con el programa "Adaptación e implementación de la metodología Lean en las minas de cobre", que abarca: Lean Mining, Kaizen para las ideas de los empleados, Mantenimiento Productivo Total, Enfoque por procesos y, Modelado y simulaciones.

Alcoa

Alcoa opera minas de bauxita en varias partes del mundo, incluyendo Australia, Brasil, Guinea y Arabia Saudita, es un líder global en la industria de la bauxita, alúmina y productos de aluminio, con una visión centrada en la industria del aluminio. Fue pionera en la implementación del sistema de producción de Toyota, desarrolló su propio sistema derivado conocido como Alcoa Business System. Este enfoque adaptado de Lean Six Sigma se centró en la mejora continua y la reducción de desperdicios en todas las operaciones de Alcoa, resultando en mejoras significativas en la eficiencia operativa y prácticas empresariales sostenibles (Alcoa, 2024).

Grupo Rio Tinto

Grupo Rio Tinto, una de las compañías mineras más grandes del mundo, opera minas en varios países como Australia, Canadá, Estados Unidos, Sudáfrica entre otros y sus principales actividades incluyen la extracción de minerales como hierro, cobre, oro, litio, bauxita y uranio. Rio Tinto comenzó a implementar Lean en la minería de mineral de aluminio en 2004, complementando su programa de mejora Six Sigma. Este enfoque se extendió posteriormente a sectores como el cobre, el carbón y la minería de mineral de hierro en Australia. Bajo el nombre "Juntos, mejorando el rendimiento", Rio Tinto aplicó metodologías Lean Six Sigma en todas

sus unidades de negocio, destacándose por la eliminación constante de desperdicios y la optimización de procesos para lograr eficiencias operativas superiores (Rio Tinto, 2010).

BHP Billiton

BHP Billiton es una compañía con unidades mineras a nivel mundial, tiene operaciones en varios países donde extrae diversos recursos naturales como Australia, posee minas en regiones como Pilbara, Queensland y Nueva Gales del Sur, donde extrae principalmente mineral de hierro, carbón y cobre. En Chile, opera la mina Escondida, una de las mayores minas de cobre del mundo, y tiene participaciones en otros proyectos mineros en el país. En los Estados Unidos, BHP Billiton explota recursos de petróleo y gas, especialmente en la región del Golfo de México y en el estado de Texas. Además, en Canadá, se centra en la extracción de potasa y uranio, especialmente en la región de Saskatchewan. La empresa también tiene operaciones en otros países como Perú, donde extrae cobre en la mina Antamina con 33.75% del accionariado de acuerdo a Antamina (2024), y en Brasil, con minas de mineral de hierro.

BHP Billiton implementó el programa de excelencia empresarial conocido como Business Excellence, utilizando Six Sigma para reducir defectos y desperdicios en sus operaciones de arenas petrolíferas en Canadá. Este enfoque ha permitido a BHP Billiton mantener altos estándares de calidad y sostenibilidad en la extracción de recursos, optimizando procesos críticos para la producción de materiales bituminosos.

Diavik

La mina de diamantes Diavik se encuentra en los Territorios del Noroeste de Canadá, específicamente en una isla dentro del lago de Gras. Esta implementó el programa de excelencia operativa Lean Six Sigma para mejorar la eficiencia operativa mediante la eliminación de actividades redundantes o innecesarias y la automatización de procesos. Este enfoque integral permitió a Diavik generar ahorros significativos mediante ideas de reducción de costos originadas tanto por empleados como por subcontratistas, destacándose por su compromiso con prácticas sostenibles y eficiencia continua en todas las áreas de la organización (Rio Tinto, 2024).

2.2.2. Tiempos de carguío, transporte y acarreo.

El control de tiempos en la minería permite optimizar la eficiencia operativa y alcanzar las metas de producción. En este sentido, las métricas de desempeño, conocidas como Indicadores Clave de Rendimiento (KPIs), se utilizan generalmente para evaluar y supervisar la eficacia de camiones y maquinaria, enfocándose en aspectos como disponibilidad, uso y productividad. Dichas métricas facilitan la identificación de oportunidades de mejora operacional mediante la medición precisa de las actividades mineras y la gestión efectiva del proceso.

Una herramienta implementada con éxito en este ámbito es el Modelo de Uso de Tiempo (Time Usage Model en inglés) de la Figura 2, que ha sido utilizado ampliamente en la industria minera durante más de cuarenta años.

Figura 2

Modelo de Uso de Tiempo para el Control de Tiempos Productivos e Improductivos.

<table>
<tr><td rowspan="4">Grupos de Elementos</td><td colspan="10">Tiempo Calendario (T000) = Tiempo Controlable (T100)</td></tr>
<tr><td colspan="5">Tiempo Disponible (T200)</td><td colspan="3">Tiempo No Disponible (D000)</td><td colspan="2" rowspan="2">Tiempo No Controlable (N000)</td></tr>
<tr><td colspan="3">Tiempo Operativo (T300)</td><td colspan="2">Tiempo Perdido (L000)</td><td colspan="2">Tiempo No Programado</td><td>Tiempo Programado</td></tr>
<tr><td colspan="3">Tiempo Utilizado</td><td colspan="2">Tiempo No Utilizado</td><td>Otro Tiempo</td><td colspan="2">Tiempo de Mantenimiento</td></tr>
<tr><td>Elementos de Tiempo Primarios</td><td>Producción Primaria (P200)</td><td>Producción Secundaria (P100)</td><td>Pérdida de Producción (L300)</td><td>Pérdida Interna (L200)</td><td>Pérdida Externa (L100)</td><td>Mantenimiento Operacional (D300)</td><td>Mantenimiento No Programado (D100)</td><td>Mantenimiento Programado (D200)</td><td>Eventos No Controlables (N200)</td><td>No Programado para Producir (N100)</td></tr>
</table>

Nota. Elaboración propia.

Este modelo clasifica las actividades operativas en diversas categorías y se utiliza para estructurar y gestionar tanto actividades productivas como no productivas, eventos y estados que ocurren durante las operaciones mineras. Esta herramienta es de uso difundido en minería debido a que brinda un marco detallado para la clasificación de tiempo y control de indicadores de equipos mineros. Las principales características de esta herramienta son:

(1) Clasificación exhaustiva: Todas las actividades operativas son clasificadas en categorías de tiempo específicas.
(2) Productividad del tiempo: Las categorías de tiempo distinguen entre tiempo utilizado de manera productiva y no productiva.
(3) Contabilidad completa: El modelo permite la contabilidad integral del tiempo mediante categorías como Tiempo Calendario, Tiempo Programado, Tiempo Operativo y Tiempo Productivo.
(4) Optimización de recursos: Mediante la identificación y eliminación de tiempos no productivos, las operaciones pueden mejorar significativamente el aprovechamiento de sus recursos.
(5) Base para KPI's operacionales: El TUM sirve como fundamento para calcular KPI's comunes como disponibilidad, utilización y efectividad.
(6) Detalle en la documentación: Permite un nivel de detalle más profundo en la captura de retrasos y tiempos productivos, dependiendo de la capacidad de recopilación de datos.

La mina ha adoptado esta metodología para mejorar sus procesos, facilitando un enfoque más estructurado y metódico en la gestión de tiempos y la optimización de sus operaciones mineras.

2.2.3. Costos y Metodología Lean Six Sigma

La metodología Lean aplicada a la gestión de costos en proyectos mineros es una herramienta efectiva para optimizar recursos, reducir desperdicios y garantizar la sostenibilidad económica de las operaciones. En el ámbito minero, donde los riesgos son intrínsecamente elevados debido a la incertidumbre geológica, la implementación de estrategias Lean pueden ser bastante significativas, especialmente en la minería a escala, donde el control de costos es determinante. La estimación adecuada de los recursos, ya sean medidos, indicados o inferidos, es permite minimizar la incertidumbre geológica, tomando en consideración aspectos como la geología estructural, las vetas y los sistemas que las controlan. Este enfoque reduce riesgos y establece una base sólida para una toma de decisiones más informada(Bazo y Loayza, 2021).

En este sentido, los costos de los proyectos se dividen principalmente en dos categorías: CAPEX (Capital Expenditure) y OPEX (Operational Expenditure), ambos se utilizan para evaluar la viabilidad y sostenibilidad del proyecto.

2.2.3.1. CAPEX

El CAPEX, o gasto de capital, representa la inversión inicial necesaria para poner en marcha un proyecto. Incluye costos asociados a labores de preparación, instalación de campamentos y contratación de personal capacitado. La correcta estimación de este rubro es esencial, ya que constituye una inversión sin retorno inmediato. Una planificación imprecisa puede derivar en sobrecostos y retrasos, impactando negativamente en la percepción del proyecto por parte de los inversores. La metodología Lean contribuye a ajustar al máximo estos costos, identificando y eliminando actividades que no aportan valor, lo que optimiza la asignación de recursos y mejora la eficiencia en la etapa de desarrollo.

2.2.3.2. OPEX

OPEX, o gasto operativo, abarca los costos necesarios para garantizar la producción continua y alcanzar los objetivos establecidos. Estos costos, estimados de forma mensual, incluyen tanto gastos fijos como variables, además de costos directos e indirectos. Entre los rubros destacados se encuentran la mano de obra, servicios tercerizados, materias primas, mantenimiento, y reparaciones. Lean se centra en la mejora continua de los procesos operativos, buscando minimizar desperdicios, optimizar el uso de recursos y garantizar un control efectivo sobre los costos. Esto incluye la identificación de cuellos de botella en la operación, la reducción de tiempos muertos y la mejora de la calidad en cada etapa del proceso.

2.2.3.3. Costos a considerar en una operación minera

Los costos en minería superficial es un aspecto íntegramente relacionado a la operación de cualquier unidad minera, ya que de ellos depende no solo la viabilidad económica del proyecto, sino también su capacidad de generar valor para los accionistas e inversores. Un adecuado análisis y optimización de los costos permite mejorar la rentabilidad, reduciendo los desperdicios de recursos y aumentando las utilidades, lo que resulta ser una prioridad estratégica para las empresas del sector (Davila, 2022).

Los costos en minería se entienden como la inversión de recursos necesarios para alcanzar un objetivo específico, que puede incluir no solo la generación de utilidades sino también la adquisición de materiales, equipos e insumos para continuar operando. Por ejemplo, los materiales necesarios para extraer una tonelada de mineral o los costos asociados a su transporte.

Los costos operativos a considerar en un proyecto minero abarcan desde materias primas y servicios hasta tareas de mantenimiento, reparaciones y análisis de laboratorio. Por ejemplo, se deben calcular los costos de insumos como combustibles, electricidad, y reactivos, así como los gastos asociados al tratamiento de efluentes y la supervisión directa de las operaciones. Además, aspectos como las patentes, royalties y el uso de tecnologías de terceros también forman parte del análisis financiero, y requieren una gestión rigurosa para evitar pérdidas innecesarias. Estos costos suelen medirse en términos monetarios y se clasifican en dos grandes categorías: costos directos y costos indirectos, cada uno con sus particularidades y su importancia en la estructura operativa.

2.2.3.4. Costos directos en minería

En cuanto a los costos directos, estos se refieren a aquellos gastos que están intrínsecamente vinculados a la ejecución de las operaciones mineras. En minería superficial, estas actividades incluyen perforación, voladura, carguío y acarreo, entre otras. Cada una de estas operaciones unitarias conlleva costos específicos asociados, como el consumo de diésel, mantenimiento de equipos, mano de obra, y materiales como brocas, explosivos o emulsiones. Por ejemplo, en la operación de perforación, los costos directos podrían incluir el diésel utilizado por las perforadoras, el desgaste de brocas y la energía consumida. En el caso del carguío y acarreo, se consideran gastos como el mantenimiento de palas y volquetes, neumáticos y nuevamente, el consumo de diésel. Estos costos son necesarios y se relacionan de manera directa con la producción, pues sin ellos sería imposible extraer y trasladar el mineral (Espinoza y Carreño, 2022).

Los costos unitarios son una derivación importante dentro de los costos directos, ya que implican desglosar el costo general hasta la unidad mínima, permitiendo medir con precisión el gasto necesario para realizar una acción concreta, como transportar una tonelada de mineral. Los costos unitarios son necesarios para una mejor toma

de decisiones, ya que permite identificar áreas de oportunidad para la reducción de costos y la mejora de procesos.

2.2.3.5. Costos indirectos en minería

Por otro lado, los costos indirectos son aquellos que, aunque no están directamente relacionados con las operaciones productivas, sí forman parte del funcionamiento general de la unidad minera. Entre estos se encuentran los gastos administrativos, financieros y de ventas. Por ejemplo, los costos administrativos, como los salarios de personal no operativo, alquileres de oficinas o gastos de gestión, no afectan directamente el costo operativo de producción, pero son necesarios para mantener la estructura de soporte de la operación minera. Aunque estos costos no son indispensables para la extracción del mineral, su adecuada gestión contribuye al equilibrio financiero global de la empresa.

2.3. Definición de términos

Acarreo

Proceso de transporte del material extraído desde el frente de extracción hasta su destino final, como una planta de beneficio (chancado) o una desmontera. Generalmente involucra el uso de camiones, cintas transportadoras u otros medios para mover grandes volúmenes de material, asegurando que la operación de extracción sea eficiente y segura (Cornejo, 2020, p.25).

Análisis de causa raíz

Método utilizado para identificar la fuente fundamental de un problema o defecto, con el fin de determinar las acciones correctivas necesarias para prevenir su recurrencia (Espinoza y Carreño, 2022, p.54).

Ciclo de carga y descarga

Periodo que abarca desde el inicio de la carga de materiales como mineral, desmonte, material de relleno, etc. hasta el término de su descarga hacia planta de beneficio, botaderos o desmonteras (Davila, 2022, p. 50).

Ciclo DMAIC

Metodología utilizada en la gestión de calidad y mejora continua dentro del enfoque Six Sigma. Sus siglas corresponden a las fases del proceso definir, medir, analizar, mejorar y controlar, en inglés (Cruz, 2019, pp. 40-41).

Costos de acarreo

Gastos asociados con el proceso de transporte de mineral, desmonte, material de relleno, etc. dentro de una operación minera, incluyendo costos de combustible, mantenimiento de vehículos, mano de obra, y otros gastos operativos y administrativos (Cornejo, 2020, p. 25).

Desperdicios (Lean)

Cualquier actividad que consuma recursos, pero no agregue valor desde la perspectiva del cliente, incluyendo sobreproducción, tiempos de espera, transporte innecesario, procesos ineficientes, entre otros (Quiroz, 2016, p.12).

Diagrama de Ishikawa

También conocido como diagrama de espina de pescado, es una herramienta de calidad que ayuda a visualizar las causas principales de un problema específico, agrupándolas en categorías para facilitar su análisis y solución (Cuevas, 2021, p.56).

KPI (Key Performance Indicator)

Indicador de desempeño clave que mide el nivel de rendimiento de un proceso, permitiendo evaluar su eficacia y eficiencia respecto a objetivos definidos (Davila, 2022, p.9).

Lean

Filosofía de gestión enfocada en la creación de valor para el cliente con el mínimo desperdicio posible. Se caracteriza por su enfoque en la mejora continua y la eliminación de actividades que no añaden valor (Cruz, 2019, p. 48).

Lean Six Sigma

Metodología que combina los principios de Lean para reducir desperdicios y Six Sigma para reducir variabilidad en los procesos, mejorando así la calidad y eficiencia en la producción y los servicios (Martínez y Vasquez, 2021, p.8).

Metodología ágil

Enfoque de gestión de proyectos que promueve la adaptación rápida y flexible ante cambios, con ciclos de desarrollo cortos e iterativos que permiten una continua evaluación y ajuste del proyecto(Alcarraz y Legoas, 2023, p. 21).

Modelo de uso de tiempo

Herramienta analítica que permite identificar cómo se distribuye el tiempo de trabajo en diferentes actividades, ayudando a detectar ineficiencias y oportunidades de mejora en la utilización del tiempo (Quiroz, 2016. p. 25).

Six Sigma

Metodología de mejora de la calidad que utiliza técnicas estadísticas para identificar y eliminar las causas de defectos y variabilidad en los procesos, con el objetivo de alcanzar grandes estándares de calidad en la ejecución (Cruz, 2019, p.48).

Tiempos de acarreo

Duración total que toma el proceso de acarreo, desde la carga hasta la descarga del mineral, desmonte, material de relleno, etc. incluyendo cualquier demora o tiempo de espera inherente al proceso (Agüero y Martínez, 2024, pp. 94-95).

Tiempos improductivos de acarreo

Periodos durante el proceso de acarreo producidos por retrasos, malfuncionamientos, esperas o cualquier otra interrupción que impide la continuidad eficiente del flujo de trabajo(Hilasaca, 202, pp. 18).

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y nivel de investigación

La presente investigación es aplicada en tanto se busca identificar a través de Lean Six Sigma aquellos factores que tienen un mayor efecto en los procesos que generan tiempos improductivos, y aplicar soluciones para evaluar su efectividad en la minería. La investigación aplicada tiene como objetivo principal abordar y resolver problemas inmediatos que enfrentan las sociedades o las organizaciones industriales y comerciales (Bernal, 2010). Este tipo de estudio se distingue por su enfoque práctico y directo, orientado a generar conocimientos que tengan una aplicación concreta en los problemas reales del sector productivo o social. A diferencia de la investigación básica, que se centra en explorar teorías y principios fundamentales, la investigación aplicada se basa en los avances tecnológicos y científicos previos para conectar la teoría con el producto final.

La investigación responde a una necesidad inmediata y concreta dentro de la operación minera, que es optimizar la eficiencia y reducir costos. Esto es coherente con el propósito principal de la investigación, esto es, identificar y reducir los tiempos improductivos y los costos asociados en las operaciones de acarreo del Área 4000 de la unidad minera utilizando Lean Six Sigma. Esta orientación hacia la solución de un problema específico en un contexto real y aplicado es una característica distintiva de la investigación aplicada. Se utilizan herramientas cuantitativas y metodologías como Lean Six Sigma, que son ampliamente reconocidas por su eficacia en la mejora de procesos industriales. La aplicación directa de estas metodologías para mejorar la eficiencia operativa en un contexto de minería. Los resultados de esta investigación no solo se centran en identificar problemas, sino también en implementar soluciones y evaluar su efectividad en la práctica. Este enfoque en la aplicación directa de soluciones para mejorar la operación minera refuerza su carácter aplicado, ya que los conocimientos generados se traducen en acciones concretas que impactan directamente la operatividad de la unidad minera.

En la presente investigación se utilizó el enfoque cuantitativo para analizar los resultados y evaluar la efectividad de la mejora de procesos identificados. El enfoque cuantitativo se caracteriza por la recolección y análisis de datos numéricos

para establecer patrones y validar hipótesis preexistentes. Utiliza herramientas estadísticas para deducir propiedades y relaciones entre variables y es muy estructurado y busca la objetividad y la precisión en los resultados (Pandey y Mishra, 2015).

La presente investigación es experimental en tanto se manipulan los procesos identificados con mayor incidencia en la generación de tiempos improductivos y costos de operación, para reducir los mismos. En un diseño experimental, el investigador manipula una o más variables independientes para observar su efecto en una o más variables dependientes. Los experimentos se realizan en condiciones controladas para asegurar que cualquier cambio en la variable dependiente sea el resultado directo de la manipulación de la variable independiente.

Los estudios experimentales tienen como característica el control y la manipulación de variables, en el presente c aso se manipula la variable independiente (en este caso, la implementación de Lean Six Sigma) para observar efectos en variables dependientes (tiempos improductivos y costos de acarreo). El enfoque central de la investigación es la manipulación activa de los procesos identificados que inciden en la generación de tiempos improductivos y costos operativos. Esto implica ajustar deliberadamente la metodología Lean Six Sigma dentro de las operaciones unitarias de acarreo para evaluar su impacto.

Este estudio también será exploratorio dado que, si bien los procesos a manipular y mejorar no están definidos, la aplicación de Lean Six Sigma como metodología de gestión, nos ayuda a identificarlos, medirlos y mejorarlos de acuerdo a la naturaleza y análisis de cada uno. La investigación exploratoria se lleva a cabo cuando el problema no está bien definido o entendido y se necesita más información para comprenderlo mejor. Es útil para identificar problemas, establecer prioridades, desarrollar hipótesis operativas y expandir horizontes.

Una investigación no correlacional no busca determinar la relación o correlación entre variables; en cambio, puede enfocarse en describir características, distribuciones o tendencias de un fenómeno sin evaluar cómo una variable afecta a otra (Kothari, 2004). En el contexto de un diseño experimental, el término "no correlacional" puede referirse a estudios donde el interés principal no es medir la correlación entre variables, sino más bien determinar efectos causales específicos.

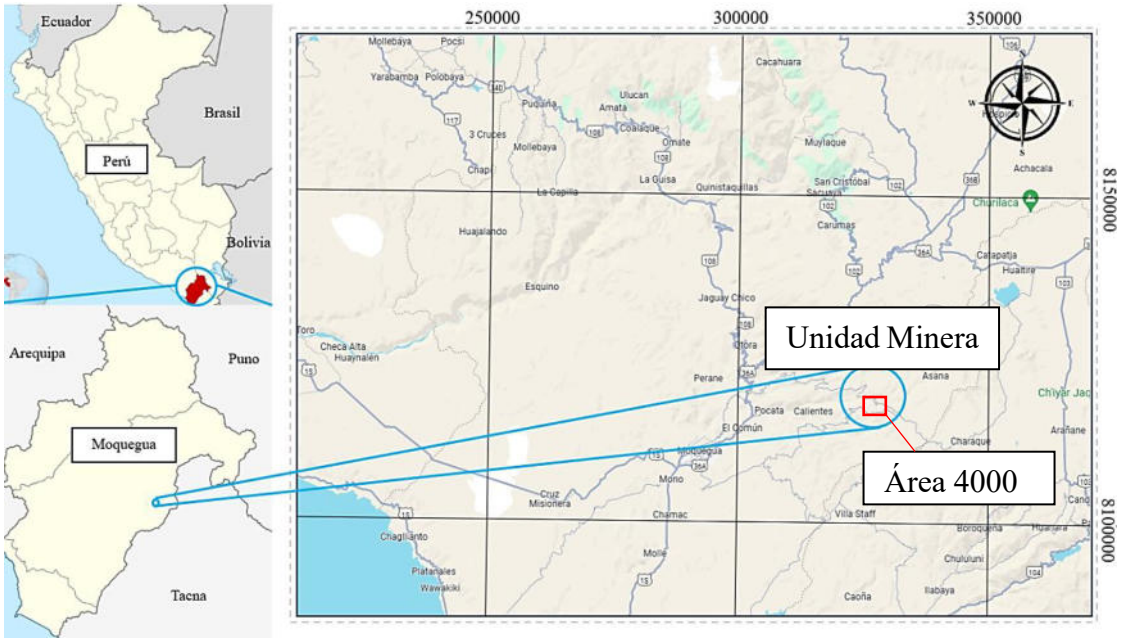
En este caso no se busca establecer el sentido o magnitud de la relación entre las variables estudiadas sino analizar la efectividad de la identificación de las principales causas y factores de la baja productividad y aplicar mejora de procesos para disminuir los tiempos improductivos y los costos.

3.2. Ámbito temporal y espacial

La unidad minera en estudio es uno de los yacimientos de cobre más significativos a nivel global, situado en la región de Moquegua, al sur de Perú (Figura 3). Este proyecto representa la mayor inversión minera en Perú y marca un hito al ser la primera mina 100% digital del país. Esta mina cuenta con procesos autónomos y un Centro Integrado de Operaciones que permiten la producción de datos en tiempo real para optimizar la eficiencia y el uso de recursos.

Figura 3

Ubicación de la unidad minera.



Nota: Elaboración propia en base a Google Maps, consultado el 30 de julio de 2024. Sistema de coordenadas UTM.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

La población está conformada por todas las operaciones unitarias de acarreo del Área 4000 de la unidad minera.

3.3.2. Muestra

La muestra está conformada por las operaciones unitarias de acarreo del Área 4000 de la unidad minera Quellaveco durante un periodo de seis meses del año 2024 (Abril-Noviembre). Estas operaciones incluyen el proceso de extracción de material de relleno(desmonte) para el recrecimiento de la presa de relaves, incluyendo actividades de conformación del área 4000 de acuerdo a diseño y las actividades de gestión de flota.

3.4. Instrumentos

Los instrumentos empleados ayudaron a realizar la evaluación de variables y comprender las causas del deficiente rendimiento del proceso de estimación de costos. Los instrumentos de recolección de datos son las herramientas específicas utilizadas para obtener y registrar información en una investigación y permiten sistematizar la recopilación de datos y asegurar que sean precisos, confiables y relevantes para los objetivos de estudio (Pandey y Mishra, 2015).

Cada uno de los instrumentos presentados (Lluvia de Ideas, Diagrama de Ishikawa, Diagrama de Pareto y FODA de Estrategias) tiene validez teórica y empírica y son ampliamente usados dentro de la metodología Lean Six Sigma y en general en la optimización de procesos operacionales. Estos instrumentos se complementan y ayudaron a crear un marco sólido para explorar, identificar, analizar y mejorar las causas que contribuyen a los tiempos improductivos y costos en las operaciones de acarreo en el Área 4000 de la mina.

3.4.1.1. Lluvia de ideas (Brainstorming)

Es una herramienta colaborativa que busca generar ideas, soluciones o hipótesis sobre un problema en un corto período de tiempo. Su objetivo es fomentar la creatividad y la participación activa de un grupo de trabajo, con el fin de obtener múltiples perspectivas que pueden ayudar a identificar problemas y proponer mejoras. Se realizó para tener una revisión inicial de la información de la unidad minera e identificar de manera general problemas, oportunidades de mejora y posibles planes de acción. Con esta herramienta se busca crear un mapa preliminar de posibles causas y soluciones, que luego pueden ser contrastadas con instrumentos más analíticos, como el Diagrama de Ishikawa o Pareto.

Se analizó el proceso de acarreo de material de relleno para identificar la causa raíz de problemas como el sobrecosto y tiempos perdidos con la ayuda de la Lluvia de Ideas (*brainstorming*). Para esto se elaboró una línea base sobre cómo se encuentra la gestión en términos de Lean Six Sigma en la unidad minera, y a través de reuniones se aplicó *brainstorming* o lluvia de ideas. Como resultado se obtuvo la las causas preliminares de tiempos improductivos de los equipos del Área 4000 de la Tabla 5.

Tabla 5

Identificación de causas preliminares de tiempos improductivos del Área 4000

Nº	Problema	Causa	Áreas
1	Paradas no planificadas (fallas de equipos)	Problemas mecánicos o eléctricos en camiones, excavadoras y cargadores debido a mantenimiento preventivo inadecuado.	-Mantto -Operaciones
2	Congestión o atascos en las rutas	Mala planificación logística y falta de coordinación, causando demoras significativas.	-Operaciones -Supervisión
3	Malas condiciones de las vías	Carreteras internas deterioradas o sin mantenimiento, ralentizando el transporte.	-Operaciones - Infraestructura
4	Asignación ineficiente de recursos	Descoordinación entre operaciones de carga y acarreo, resultando en tiempos de espera prolongados para camiones y cargadores.	-Supervisión.
5	Espera en zonas de carga	Ineficiencias en los procesos de carga o tiempos prolongados de espera en puntos de carga.	-Supervisión.
6	Falta de operadores capacitados	Personal insuficiente o no calificado que afecta la operación eficiente de los equipos.	- RRHH - Operaciones
7	Ausencia de monitoreo en tiempo real	Falta de sistemas adecuados para identificar problemas operativos de forma oportuna.	- Operaciones
8	Gestión ineficiente de la demanda	Desajuste entre la demanda de material y la capacidad de acarreo disponible, generando ineficiencias.	- Supervisión - Operaciones
9	Procesos ineficientes de carga y descarga	Retrasos por prácticas inadecuadas en estas áreas, incrementando el tiempo de ciclo de los camiones.	- Supervisión

Nota. Elaboración propia con información obtenida en entrevista y reuniones de operaciones.

Durante la sesión de *brainstorming* para este proyecto, los participantes (ingenieros, operadores de acarreo, supervisores) contribuyeron con ideas que luego serán evaluadas otros instrumentos analíticos más específicos, como el Diagrama de Pareto y el Diagrama de Ishikawa. Permite identificar los cuellos de botella y las áreas de mayor desperdicio en los tiempos de acarreo, enfocando el análisis en aquellos elementos que generan los mayores impactos en el costo y la eficiencia.

3.4.1.2. Diagrama de Ishikawa

El Diagrama de Ishikawa (Figura 4), también conocido como diagrama de causa y efecto o diagrama de espina de pescado, es un instrumento comúnmente utilizado dentro de la metodología Lean Six Sigma para identificar y organizar las posibles causas de un problema o efecto específico. De acuerdo a la presente investigación que buscar reducir los tiempos improductivos y costos en las operaciones de acarreo del Área 4000 de la unidad minera, este instrumento ayudó a identificar, analizar y visualizar las diversas fuentes de ineficiencia que generan desperdicio y retrasos en las operaciones de acarreo de material de relleno.

Figura 4

Diagrama de Ishikawa de causa raíz de los tiempos improductivos en el Área 4000



Nota. Elaboración propia a partir de las entrevistas, reuniones de operación y sesión de lluvia de ideas.

Gracias a las entrevistas, reuniones con el personal y observación en campo de los procesos de acarreo del área 4000 se realizó la identificación de causas raíces de los tiempos improductivos con el diagrama de Ishikawa o diagrama de espina pescado. Las causas raíces se clasificaron en 5 categorías de acuerdo a causas de Equipo, Medición, Empleados, Método y Ambiente mostrado de la Figura 4.

El Diagrama de Ishikawa ayuda a desglosar un problema complejo en causas más específicas y manejables, agrupando estas causas en categorías para facilitar su análisis. Con el uso de este instrumento se busca identificar las principales fuentes de desperdicio y tiempos improductivos, permitiendo enfocar los planes de acción y mejora en aquellas causas raíz que tienen mayor impacto en el acarreo del Área 4000 de la unidad minera. Esto, a su vez, permite proponer mejoras específicas para optimizar el uso de los recursos y reducir costos, alineado con el objetivo general de aumentar la eficiencia.

A continuación, se explica las categorías principales que componen este instrumento.

Problema principal. En la presente investigación, el problema central es la acumulación de tiempos improductivos y los costos en las operaciones de acarreo del Área 4000. Este problema estaría a la "cabeza" del diagrama de espina de pescado.

Causas principales. Luego, se identifican las causas potenciales del problema, que generalmente se agrupan en grandes categorías clásicas (Métodos, Maquinaria, Mano de Obra, Materiales, Entorno, Medición). En el presente caso, estas categorías estuvieron alineadas con los aspectos claves de la operación de acarreo en la unidad minera. Las causas principales, a su vez, se categorizaron de la siguiente manera:

- Métodos. Procedimientos ineficientes durante el acarreo, falta de estandarización en los procesos de carga y descarga.
- Maquinaria. Averías frecuentes en los equipos de acarreo, mantenimiento inadecuado, falta de actualización tecnológica.
- Empleados. Capacitación insuficiente de los operadores, errores humanos, turnos ineficientes.
- Ambiente. Condiciones del terreno, clima, infraestructura inadecuada.

- Medición. Falta de un sistema adecuado de monitoreo y medición de los tiempos en cada etapa del acarreo, errores en la recolección de datos.

Subcausas. Dentro de cada una de las categorías mencionadas, se profundiza más para identificar las subcausas específicas que contribuyen al problema. Por ejemplo, dentro de la categoría de "Maquinaria", una subcausa podría ser "mantenimiento correctivo en lugar de preventivo", lo que incrementaría los tiempos de paradas.

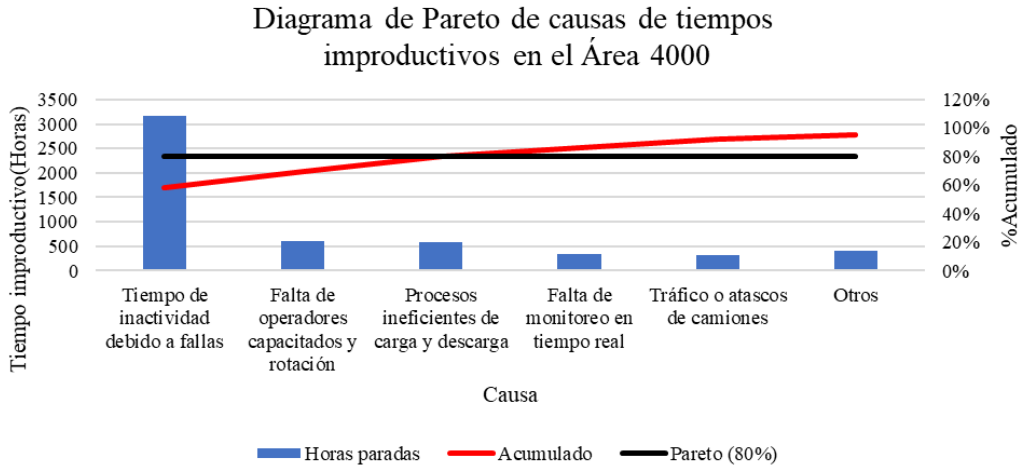
3.4.1.3. Diagrama de Pareto

Se utilizó el Diagrama de Pareto de la Figura 5, en tanto es un instrumento útil para definir aquellos factores de la operación que son más relevantes para cumplir con los objetivos, es decir la mejora de procesos de acarreo y reducción de costos. El objetivo principal de este análisis es identificar y priorizar las causas más significativas que contribuyen a las horas de inactividad, aplicando el principio 80/20.

Permite enfocar los esfuerzos y maximizar los recursos a asignar a su mejora y control posterior. En esta investigación, este instrumento ayudó a identificar las principales causas que generan tiempos improductivos y los factores que contribuyen al desperdicio en las operaciones de acarreo. Esto permitió ordenar las causas por su impacto o frecuencia, siguiendo el principio 80/20: el 80% de los problemas son causados por el 20% de los factores.

Figura 5

Diagrama de Pareto de causas de tiempos improductivos de los equipos del Área 4000



Nota. Elaboración propia en base a los datos de mantenimiento, cálculo de ralentí e indicadores de uso de equipos.

Las fallas técnicas representaron el 58% de las horas improductivas y son la causa más significativa en el gráfico de Pareto. Este hallazgo indica que las intervenciones enfocadas en el mantenimiento predictivo y correctivo pueden tener un impacto sustancial en la reducción de la ineficiencia general. En segundo lugar, tenemos la falta de operadores capacitados y la alta rotación aportan un 11% adicional, lo que lleva el total acumulado al 69%. Las causas como la falta de monitoreo en tiempo real, tráfico, falta de coordinación y problemas similares representan un 20% acumulado. Aunque estas causas tienen menor impacto individual, pueden abordarse para optimizar aún más el sistema una vez se resuelvan las causas principales.

Por tanto, las causas principales de acuerdo al análisis del 80/20 son:

(1) Fallas mecánicas.
(2) Falta de operadores capacitados y alta rotación.
(3) Procesos ineficientes de carga y descarga.

El Diagrama de Pareto permitió identificar qué factores contribuyen en mayor medida a los tiempos improductivos y sobrecostos. Al enfocar los esfuerzos en estas causas más críticas, se asegura una mejora eficiente del proceso y la generación de propuestas adecuadas.

3.4.1.4. FODA de Estrategias

El instrumento FODA de estrategias en la aplicación de Lean Six Sigma en el Área 4000 de fue utilizado para identificar las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas que afectan la implementación de la metodología, a partir de las cuales se generaron acciones y estrategias. En esta investigación, el análisis FODA dentro de la metodología Lean Six Sigma permitió estructurar las estrategias que mejoren la eficiencia de las operaciones de acarreo, reduciendo tiempos improductivos y costos asociados. Se desarrollaron diversas alternativas de solución en base a los instrumentos anteriores y al FODA de estrategias de la Figura 6, esta combina las debilidades, fortalezas, amenazas y oportunidades para proponer acciones concretas que permitan enfrentar los desafíos del área 4000 mientras se aprovechan las ventajas existentes.

Figura 6

Matriz de análisis FODA para la identificación de estrategias de mejora de procesos.

		AMENAZAS	OPORTUNIDADES
	1	Malas condiciones de las vías	1 Optimización de asignación de recursos
	2	Congestión o atascos en las rutas	2 Automatización y monitoreo en tiempo real
	3	Incremento en los costos de mantenimiento	3 Capacitación de operadores
	4	Competencia en el sector	4 Mejoras en el mantenimiento preventivo
DEBILIDADES		**Estrategias de supervivencia**	**Estrategias de reorientación**
1	Falta de delimitación de responsabilidades	DA1- Implementar planes de mantenimiento preventivo priorizado. DA2- Delimitar responsabilidades entre áreas. DA3- Realizar evaluaciones regulares de las vías. DA4- Contratar personal temporal o capacitar al personal actual.	OD1- Implementar un sistema de gestión de recursos. OD2- Rediseñar los procesos de carga y descarga. OD3- Estandarizar los procesos de carga y descarga.
2	Falta de repuestos para mantenimiento		
3	Procesos ineficientes de carga y descarga		
4	Falta de operadores capacitados		
FORTALEZAS		**Estrategias defensivas**	**Estrategias Ofensivas**
1	Recursos de	FA1- Asignar recursos adicionales desde la dirección. FA2- Reducir el ralentí de los equipos. FA3- Priorizar el acondicionamiento de las rutas más criticas.	FO1- Capacitación intensiva del personal actual. FO2- Optimizar la relación con clientes leales para financiar proyectos de mejora.
2	Partes interesadas claramente identificadas		
3	Gran cantidad de maquinaria y equipos		
4	Apoyo de la dirección para brindar recursos		
5	Clientes solventes y leales		

Nota. Elaboración propia en base a la priorización de problemas y mapeo de procesos, en base a Bazo y Loayza (2021, p. 82).

Las estrategias de supervivencia, que combinan debilidades con amenazas, están diseñadas para mitigar los riesgos más críticos. Por ejemplo, implementar planes de mantenimiento preventivo priorizado busca enfrentar las malas condiciones de las vías y el aumento en los costos de mantenimiento, maximizando el uso de los recursos disponibles. Además, delimitar responsabilidades entre áreas reducirá conflictos internos que podrían exacerbar problemas como la congestión en las rutas y la maga gestión de la demanda. Realizar evaluaciones regulares de las vías y contratar personal temporal o capacitar al personal actual permitirán abordar problemas estructurales y operativos, minimizando el impacto de factores externos como la competencia o la falta de repuestos.

Las estrategias de reorientación, que combinan debilidades con oportunidades, se centran en transformar los puntos débiles en áreas de mejora. Por ejemplo, implementar un sistema de gestión de recursos ayudará a optimizar la asignación

de equipos y operadores, mitigando la ineficiencia en los procesos de carga y descarga. Asimismo, rediseñar y estandarizar los procesos de carga y descarga permitirá capitalizar la oportunidad de automatización y monitoreo en tiempo real, mejorando la eficiencia y reduciendo los tiempos muertos.

El análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades, Amenazas) es un instrumento clásico y difundido para la planificación estratégica, validado en diversos campos, incluyendo la mejora de procesos dentro de metodologías como Lean Six Sigma. Permite evaluar tanto factores internos (Fortalezas y Debilidades) como externos (Oportunidades y Amenazas) para desarrollar estrategias que mejoren la eficiencia de los procesos.

Con base en este análisis, se pueden desarrollar estrategias específicas para aplicar Lean Six Sigma de manera efectiva en el Área 4000:

Maximizar Fortalezas para aprovechar Oportunidades (FO). Se puede potenciar la tecnología y la experiencia del personal para aplicar Lean Six Sigma, lo que permite identificar y eliminar desperdicios de manera más efectiva y, así, mejorar la eficiencia del acarreo y reducir costos.

Minimizar Debilidades aprovechando Oportunidades (DO). Se plantean estrategia como la capacitación y comunicación para que el personal se familiarice con la metodología Lean Six Sigma, y asegurarse de las tecnologías se integren sin problemas en las operaciones diarias.

Usar Fortalezas para mitigar Amenazas (FA). Se pueden plantear estrategias como aprovechar el sistema de control de acarreo y la experiencia en la gestión de la unidad minera para minimizar el impacto de factores externos como el clima o interrupciones no controlables en las operaciones de acarreo.

Reducir Debilidades y evitar Amenazas (DA). Se enfoca en abordar tanto los puntos débiles internos de la organización como las amenazas externas, con el objetivo de minimizar los impactos negativos en el proyecto o en las operaciones.

En el estudio del proceso de acarreo del área 4000, el análisis FODA estructurado dentro del marco de Lean Six Sigma ayudó a diseñar estrategias que aprovechen las fortalezas (como la tecnología, experiencia del personal) y oportunidades, a la vez que mitiguen debilidades (capacitación insuficiente) y amenazas (geología local,

clima, etc.). Este instrumento sirvió para la toma de decisiones estratégicas informadas, ya que proporciona una visión integral de los factores que pueden influir en la implementación exitosa de las mejoras propuestas en el acarreo de materiales. Al combinarse con los otros instrumentos, el FODA orienta las decisiones sobre qué estrategias implementar primero y cómo abordar tanto los factores controlables como los no controlables.

3.5. Procedimientos

Se emplearon técnicas de recolección de datos para obtener información relevante para los objetivos de estudio. Cada técnica tiene sus propias ventajas y limitaciones, y la elección depende de los objetivos de la investigación, la naturaleza del problema de estudio, y los recursos disponibles.

3.5.1.1. Observación directa

Para llevar a cabo la observación directa sobre la aplicación de Lean Six Sigma en la reducción de tiempos improductivos y costos en el Área 4000 de la unidad minera, se realizó de la siguiente manera.

Registro de Datos. Se registraron datos directamente de los procesos de acarreo en el Área 4000 para identificar tiempos improductivos y desperdicios según los principios de Lean Six Sigma.

Observación Estructurada. Se utilizaron técnicas de observación estructurada para registrar y medir los tiempos de ciclo de carga y descarga, así como identificar los desperdicios en el proceso de acarreo. Se utilizaron registros del sistema interno de control de acarreo, así como estándares y procedimientos para obtener datos precisos y comparables.

Tiempo. Se realizaron observaciones a lo largo de un periodo representativo de seis meses del año 2024, para cubrir diferentes turnos y condiciones operativas para obtener una visión integral de los factores que afectan los tiempos improductivos y los desperdicios.

Si bien la principal técnica de recolección de datos es la observación directa se utilizó complementariamente la revisión documental, principalmente a través de los registros y formatos internos de control de acarreo.

3.5.1.2. Entrevista

Se utilizó la entrevista para establecer una línea base sobre cómo se encuentra la gestión en términos de Lean Six Sigma en la unidad minera, se evaluaron los siguientes aspectos:

Identificación de actores. Identifica a los *stakeholders* clave dentro de la gestión de acarreo en la unidad minera que deberían ser entrevistados. Esto podría incluir supervisores del titular minero, supervisores de campo, ingenieros, operarios, entre otros.

Exploración del Estado de la Gestión. Preguntas específicas orientadas a entender cómo se gestionan actualmente los procesos de acarreo, qué metodologías de mejora continua se utilizan (si las hay), y cuál es la percepción sobre la eficiencia y calidad de estos procesos.

Exploración de Problemas. Identificar preliminarmente problemas recurrentes en el acarreo, los sistemas de medición de desempeño utilizados, la capacidad de respuesta ante variaciones en los requisitos de desempeño, y la existencia de proyectos de mejora continua en curso.

Metodología Lean Six Sigma. Se exploró el conocimiento y la aplicación actual de principios y herramientas Lean Six Sigma dentro del área de acarreo, capacitación recibida, la participación en proyectos Lean Six Sigma anteriores, y la disponibilidad de recursos para implementar mejoras.

3.6. Análisis de datos

3.6.1.1. Comprobación de hipótesis y método estadístico

La validación de la hipótesis principal, que postula que la aplicación de la metodología Lean Six Sigma permitió identificar causas, cuellos de botella y sobrecostos con el fin de reducir los tiempos improductivos y costos en las operaciones de acarreo del Área 4000 de la unidad minera, se realizó mediante un enfoque cuantitativo, acorde al diseño experimental de la investigación. A continuación, se describe el método de comprobación de hipótesis, junto con las herramientas estadísticas que se emplearon.

La hipótesis principal sugiere que la aplicación de Lean Six Sigma reduce los tiempos improductivos y los costos de las operaciones de acarreo. La comprobación de esta hipótesis se hizo mediante métodos estadísticos que comparen los datos antes y después de la intervención.

Hipótesis nula (H_0): La aplicación de Lean Six Sigma no reducirá significativamente los tiempos improductivos ni los costos de acarreo.

Hipótesis alternativa (H_1): La aplicación de Lean Six Sigma reducirá significativamente los tiempos improductivos y los costos de acarreo.

3.6.1.2. Análisis estadístico de los datos

Estadística Descriptiva para Reducción de tiempos improductivos

Antes de proceder con las pruebas estadísticas, se debe realizar un análisis descriptivo de los datos recolectados los cuales se muestran en la Tabla 6. Esto implica calcular estadísticas como la media, mediana, moda y desviación estándar para los tiempos improductivos y los costos antes de la implementación de Lean Six Sigma.

Tabla 6

Estadística descriptiva y prueba de normalidad de Shapiro Wilk para horas improductivas

Descriptivas	Pre-Implementación	Post-Implementación
N	4	4
Media	5871	4005
Mediana	5841	3935
Desviación estándar	806	252
Mínimo	4919	3788
Máximo	6881	4360
W de Shapiro-Wilk	0.979	0.897
Valor p de Shapiro-Wilk	0.897	0.417

Nota. Elaboración propia.

La media para la muestra es de 5871 horas mensuales pre implementación y 3935 horas improductivas mensuales post implementación, con un máximo de 6881 horas y un mínimo de 3788 horas.

Prueba de Normalidad

Se verificaron si los datos siguen una distribución normal para elegir las pruebas estadísticas adecuadas. Para esto se utilizó la Prueba de Shapiro-Wilk. Esta prueba es adecuada para muestras pequeñas y se verifico si los tiempos improductivos y los costos siguen una distribución normal. El valor p de S-W resultó 0.897 y 0.417 (<0.05) por lo que se demuestra que las muestras siguen una distribución normal. Esto demuestra que las muestras tienen normalidad y por tanto se le puede aplicar estadística inferencial a través del estadístico t.

Prueba T para muestras relacionadas para Reducción de Tiempos Improductivos y Lean Six Sigma (antes y después)

Para comprobar si la reducción de costos es significativa tras la aplicación de Lean Six Sigma, se aplicará una prueba T para muestras relacionadas. Este método comparará los promedios de los tiempos improductivos y costos antes y después de la intervención en el mismo grupo de operaciones, permitiendo verificar si las diferencias observadas no son producto del azar.

Dado que se realizaron mediciones antes y después de la implementación, la prueba T es el método más adecuado para comparar los promedios en situaciones donde las observaciones están relacionadas. Los datos antes de la intervención se contrastarán con los datos post intervención para determinar la significancia estadística de la reducción en los tiempos y costos. En la Tabla 7 se presentan los resultados de la aplicación del estadístico t para muestras pareadas con un 95% de confianza.

Tabla 7

Prueba T para muestras pareadas para reducción de horas improductivas

	Prueba T		Estadístico	gl	p
Horas 1	Horas 2	T de Student	5.01	3.00	0.015

Nota. $H_a\ \mu_{\text{Medida 1 - Medida 2}} \neq 0$

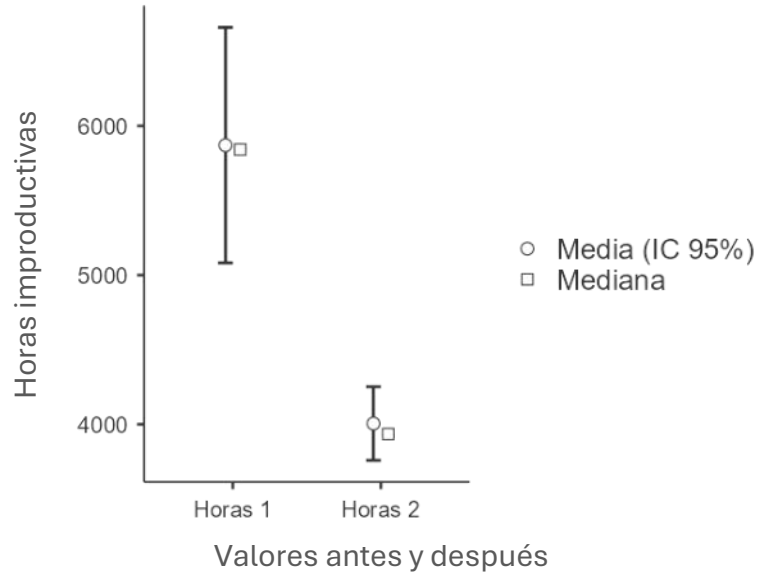
Un p-valor de 0.015 es menor que el nivel común de significancia (α=0.05. Esto significa que hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula en favor de la hipótesis alternativa. La diferencia entre las medias no parece ser atribuible al azar,

y se puede concluir que las dos medidas son significativamente diferentes. En otras palabras, hay una diferencia significativa entre las medias de antes y después de la implementación de estrategias FODA de acuerdo a la metodología Lean Six Sigma.

La Figura 7 muestra la comparación de medias y rangos entre las horas improductivas previamente a la aplicación de la metodología Lean Six Sigma. La aplicación de las estrategias Lean Six sigma tuvo un efecto significativo en la reducción de las horas improductivas en las operaciones de acarreo del Área 4000.

Figura 7

Comparación de medias de reducción de tiempos improductivos



Nota. Elaboración propia. Horas 1 son las horas improductivas mensuales antes de la implementación de Lean Six Sigma. Horas 2 corresponde a las horas improductivas mensuales después de la aplicación.

Análisis Estadístico para Reducción de Costos y Lean Six Sigma

Antes de proceder con las pruebas estadísticas, se debe realizar un análisis descriptivo de los datos recolectados los cuales se muestran en la Tabla 8. Esto implica calcular estadísticas como la media, mediana, moda y desviación estándar para los tiempos improductivos y los costos antes de la implementación de Lean Six Sigma.

Tabla 8

Estadística descriptiva y prueba de normalidad de Shapiro Wilk para costos por metro cúbico de material removido

Descriptivas	Pre-implementación	Post-Implementación
N	4	4
Media	4.65	3.73
Mediana	4.66	3.69
Desviación estándar	0.180	0.181
Mínimo	4.43	3.56
Máximo	4.87	3.98
W de Shapiro-Wilk	0.978	0.921
Valor p de Shapiro-Wilk	0.888	0.545

Nota. Elaboración propia.

En la etapa de pre-implementación el costo promedio era de 4.65 USD/m³, lo que refleja las ineficiencias en los procesos previos, como el alto ralentí, las fallas mecánicas y el uso ineficiente de recursos identificados. Post-implementación el costo promedio disminuyó a 3.73 USD/m³, una reducción significativa de 19.8%. Esto demuestra que las estrategias, como la optimización de rutas, la contratación y capacitación de operadores y el mantenimiento preventivo, lograron mejorar la eficiencia operativa.

Prueba de normalidad

Para la comprobación de hipótesis se realizará la prueba de normalidad de Shapiro Wilk debido que la muestra tiene menos de 50 datos. De acuerdo a la Tabla 8 el valor p de Shapiro-Wilk fue de 0.888 y 0.545, por lo que los datos de las muestras del antes y del después son normales dado que son mayores a 0.05.

Prueba T para muestras relacionadas para Reducción de Costos y Lean Six Sigma (antes y después)

Se aplicó estadística inferencial a través del estadístico t de acuerdo a la Tabla 9, con el fin de realizar la comprobación de la hipótesis específica 2.

Tabla 9

Prueba T para muestras pareadas para reducción de costos

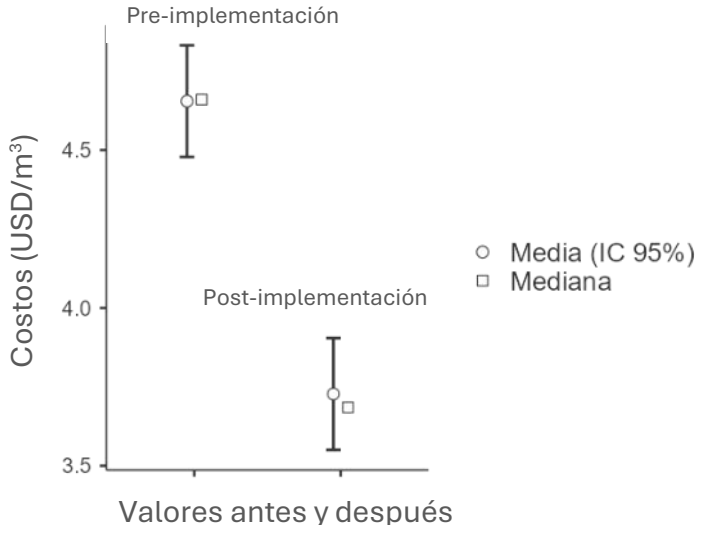
Prueba T para Muestras Apareadas			Estadístico	gl	p
Pre-implementación	Post-Implementación	T de Student	26.0	3.00	< .001

Nota. $H_a\ \mu_{\text{Medida 1 - Medida 2}} \neq 0$

La Figura 8 muestra la comparación de medias y rangos entre costos por metro cúbico de material rellenado pre y post aplicación de la metodología Lean Six Sigma. La aplicación de las estrategias Lean Six sigma tuvo un efecto significativo en la reducción de costos en las operaciones de acarreo del Área 4000.

Figura 8

Comparación de medias de reducción de tiempos improductivos



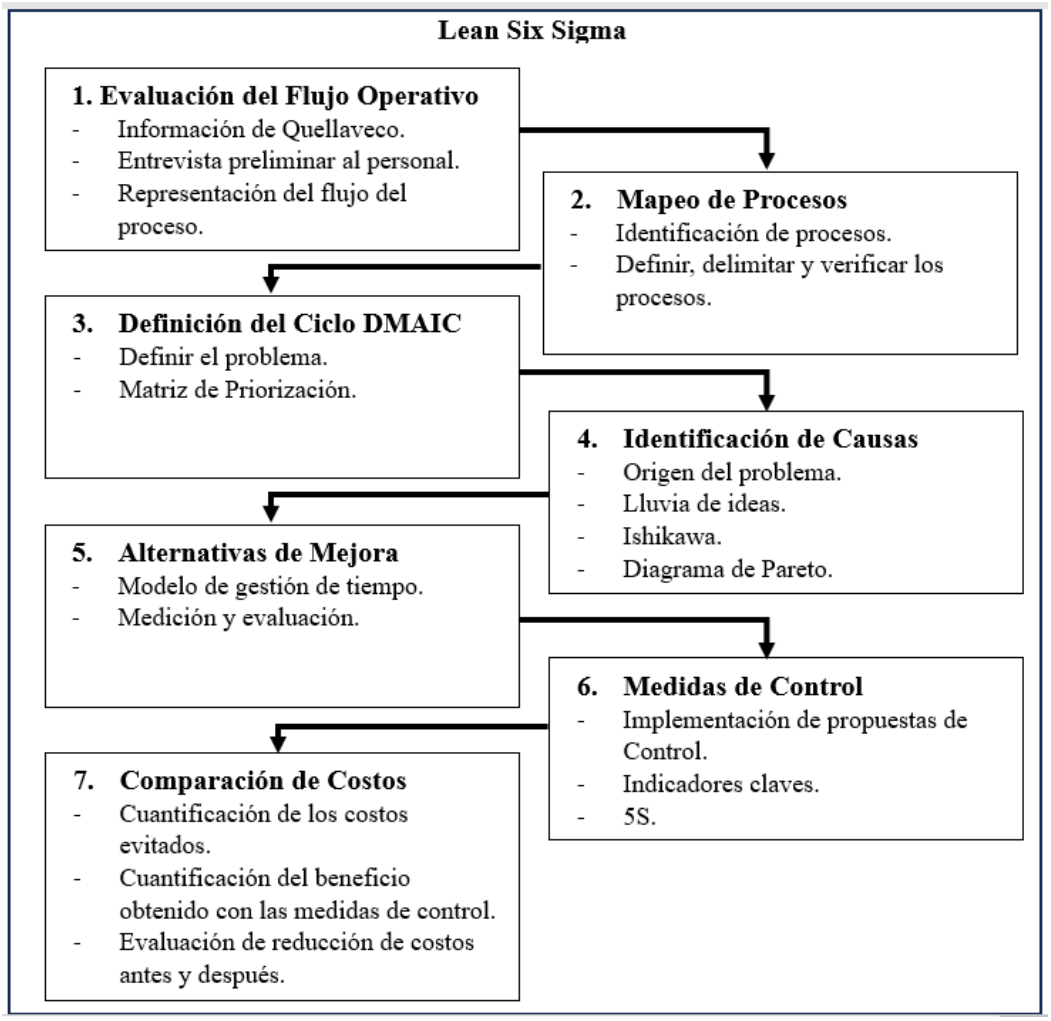
Nota. Elaboración propia, unidades en USD/m^3

3.6.1.3. Diagrama de flujo de la investigación

Para cumplir con los objetivos de la investigación, respecto a la mejora de tiempos improductivos y la reducción de costos a través de la metodología Lean Six Sigma, se ha diseño el diagrama de flujo de la Figura 9. Este demarca los pasos a seguir para identificar aquellos procesos que generan la mayor cantidad de desperdicios y por tanto que tendrán mayor influencia en el proceso en general al momento de aplicar medidas de control específicas.

Figura 9

Diagrama de flujo para la implementación de Lean Six Sigma en la investigación



Nota. Elaboración propia en base a la metodología Lean Six Sigma.

3.6.1.4. Evaluación del flujo operativo del acarreo del Área 4000

Se realizó una revisión de la información existente sobre la unidad minera y se realizaron visitas presenciales al Área 4000. Estas visitas, llevadas a cabo siguiendo estrictos estándares de seguridad, permiten observar de manera integral el ciclo de minado, enfocándose en detalle en las etapas iniciales y finales de las operaciones de acarreo de material de relleno. Además, se conversó con el personal involucrado en estas etapas para obtener una comprensión más profunda de sus funciones y el contexto operativo. A partir de estas observaciones y con la orientación del personal responsable, se podrá evaluar y elaborar una representación gráfica del flujo operativo de estas etapas, facilitando una comprensión clara del proceso y la interrelación de las actividades.

3.6.1.5. Mapeo de procesos de las operaciones

El mapeo de procesos implica identificar los procesos productivos dentro de las operaciones de la organización, desglosándolos en actividades y tareas secuenciadas lógicamente. Para elaborar un mapeo de procesos, se siguieron estos pasos:

- Definir el nivel del mapeo.
- Formar el grupo de trabajo.
- Establecer reglas de operación.
- Nombrar el proceso.
- Definir los límites del proceso a mapear.
- Mapear el proceso.
- Verificar la operación in situ.

3.6.1.6. Definición del ciclo DMAIC

Para definir el ciclo DMAIC en el proceso de acarreo del Área 4000, se buscó definir el contexto del problema mediante la identificación de variables dependientes e independientes de acuerdo a la metodología Lean Six Sigma. Esto permitió trazar un camino hacia la solución, estableciendo los parámetros iniciales de las operaciones a través de observaciones y entrevistas al personal involucrado. Aquí se incluye el análisis del ciclo de acarreo y transporte, asegurando que se comprendan los elementos críticos que influyen en el proceso.

Para establecer los parámetros y Matriz de Priorización se seleccionaron las actividades más críticas del proceso en términos de costos, tiempo o utilización de equipos, se elaboró una matriz de priorización siguiendo estos pasos:

- Definir el objetivo de la matriz.
- Identificar las opciones a considerar.
- Jerarquizar los parámetros relevantes.
- Asignar puntuaciones según la jerarquización de parámetros.
- Elaborar una tabla de calificaciones.
- Calificar cada opción respecto a los parámetros.
- Realizar la suma producto de la puntuación por parámetros contra calificaciones.
- Seleccionar las opciones con mayor puntuación.

3.6.1.7. Identificación de causas de tiempos improductivos y sobrecostos

Se identificó el origen del problema y las oportunidades de mejora mediante la interpretación de la información estadística obtenida. Los tiempos se clasificaron en productivos e improductivos, evaluando su eficiencia. En esta fase, se utilizaron herramientas como la lluvia de ideas con el personal directamente involucrado en las actividades críticas y otras metodologías analíticas para determinar las causas raíz de los tiempos improductivos.

3.6.1.8. Aplicación de alternativas de mejora

Se implementaron soluciones para mejorar el rendimiento del proceso, utilizando simulación y técnicas de toma de decisiones.

Se implementó un nuevo modelo de gestión del tiempo, con el objetivo de identificar, clasificar y controlar los tiempos de operación de acarreo. El proceso se desarrolla en las siguientes etapas:

Cálculo de la Ventana Horaria Actual. Se comienza calculando la ventana horaria actual de las operaciones en la unidad minera, considerando la disponibilidad de tiempo, las especificaciones técnicas de los equipos y las condiciones del material acarreado.

Elaboración del Formato de Gestión. Se crea un formato para la ventana horaria del modelo de gestión. Los parámetros a considerar son: Turno, Categoría, Actividad y Hora de Inicio

Análisis de Brechas. Se realiza un análisis de brechas con respecto a los objetivos para establecer metas de rendimiento operativo, seguido por la implementación de propuestas de mejora durante un período determinado.

Medición y Evaluación. Finalmente, se lleva a cabo una nueva medición de tiempos para evaluar y comparar la efectividad de las propuestas de mejora.

3.6.1.9. Implementación de medidas de control

Tras aplicar las alternativas de mejora y observar los resultados, se plantearon propuestas de control para mantener o incrementar las mejoras alcanzadas. Estas incluyen:

- Implementación de un formato actualizado para clasificar y medir los tiempos de operación.
- Se utilizan indicadores clave como la eficiencia y el nivel sigma para el acarreo y transporte del material de relleno. Estos indicadores, desarrollados en etapas anteriores, se adaptan en gráficos de tendencia para monitoreo y observación regular.
- Implementación de las 5S: Seiri (Seleccionar), Seiton (Organizar), Seiso (Limpiar), Seiketsu (Estandarizar) y Shitsuke (Autodisciplina).

Con las causas, medidas y controles establecidos, se realizó un nuevo modelamiento de rendimientos de los equipos del proceso de acarreo del Área 4000.Asimismo se espera tener un nuevo análisis de precio unitario, proyectando una nueva valorización y obteniendo la estimación de costos con la nueva metodología.

3.6.1.10. Comparación de costos

La comparación de costos consiste en evaluar el impacto económico de las mejoras implementadas mediante la metodología Lean Six Sigma en el proceso de acarreo del Área 4000. Para cuantificar el beneficio de las mejoras, se llevó a cabo un análisis comparativo que permita identificar los costos antes y después de la implementación de las soluciones. Este análisis se centró en la reducción de costos operativos.

Para determinar los costos iniciales, antes de las mejoras, se realizó un análisis detallado de los costos operativos previos a su aplicación. Los datos serán obtenidos de registros históricos, entrevistas con el personal operativo y revisiones de la información disponible. Los costos a evaluar incluyeron:

- Costos de mano de obra como tiempo productivo vs. improductivo.
- Costos de equipos: costos de mantenimiento, uso de combustible, desgaste y disponibilidad.
- Costos de materiales: insumos utilizados en el acarreo.
- Costos asociados a tiempos improductivos: como esperas, ineficiencias operativas y ralentí o tiempos muertos.

Para la determinación de los costos posteriores, una vez implementadas las mejoras, se procederá a evaluar los costos operativos bajo las nuevas condiciones de gestión

y control. Se utilizó el mismo formato de desagregación de costos para asegurar una comparación coherente. Este análisis incluye los costos actualizados según:

- Reducción de tiempos improductivos tras la implementación de soluciones de control y la optimización del proceso de acarreo, se identificó una disminución significativa en los tiempos improductivos, lo que a su vez redujo los costos de operación.
- Mejor uso de equipos debido a los cambios en la gestión del tiempo y el control de operación deberán reflejarse en una mayor disponibilidad y menor desgaste de los equipos, traduciéndose en menores costos de mantenimiento y operativos.
- Con la implementación del DMAIC y el uso de las 5S, el personal podrá desempeñar sus funciones de manera más eficiente, reduciendo así los costos relacionados con la mano de obra.

El análisis de la comparación de costos se basó en la diferencia entre los costos iniciales y los costos posteriores a la mejora. Para facilitar esta comparación, se elaboró una tabla resumen que muestra el desglose de costos en ambas fases y que permita visualizar claramente el ahorro generado en cada área (mano de obra, equipos, materiales, etc.).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.1. Tiempos improductivos y metodología Lean Six Sigma

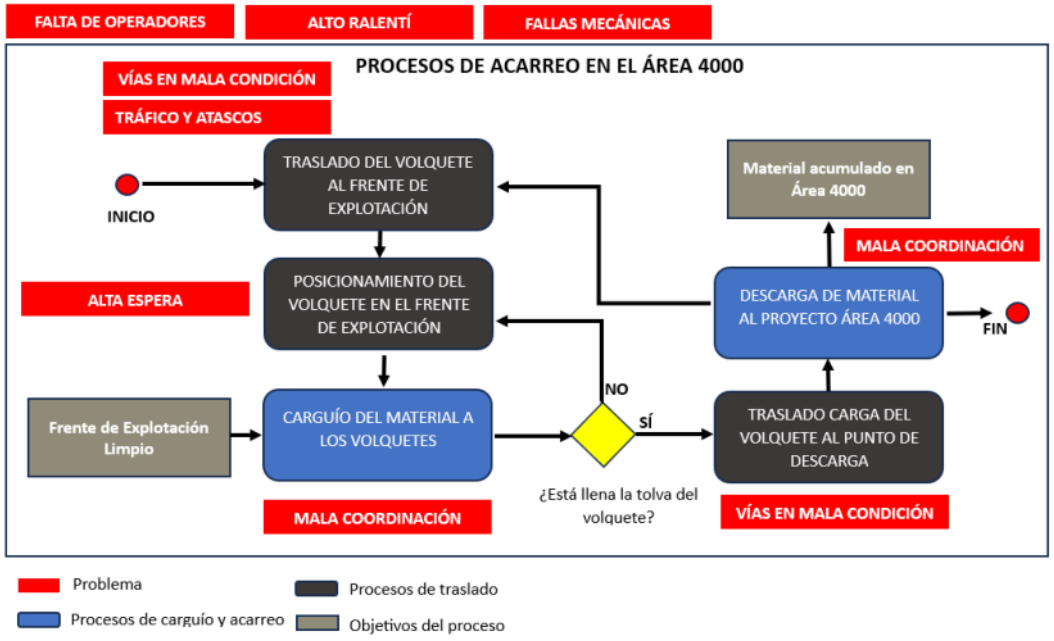
4.1.1.1. Mapa de procesos del Área 4000 e incidencia de problemas

El mapa de procesos de la Figura 10 muestra las operaciones de carguío y acarreo en el área 4000, destinadas principalmente al transporte de material que se utiliza para el relleno en el recrecimiento de la presa de relaves. El flujo del proceso comienza con el traslado del volquete hacia el frente de explotación que se ve afectada por el tráfico, los atascos y las malas condiciones de las vías.

Una vez que el volquete llega al frente de explotación, se posiciona en dicho lugar. Esta fase enfrenta problemas relacionados con largas esperas, que pueden incrementar los tiempos del proceso. A continuación, se procede al carguío del material en los volquetes, una tarea que puede verse obstaculizada por una mala coordinación operativa.

Figura 10

Mapa de procesos e incidencia de problemas identificados en las operaciones de carguío del Área 4000



Nota. Elaboración propia.

Después de cargar el material, el flujo evalúa si la tolva del volquete está llena. Si no está llena, el ciclo regresa al proceso de carguío. Una vez llenado el volquete de

17 toneladas de carga, el material se traslada al proyecto del área 4000. Este paso también está sujeto a problemas de deficiente coordinación, que pueden causar acumulación de material en el área, tiempos largos de espera para carga o que los volquetes tengan que ir a otro punto de carga. Posteriormente, se realiza el traslado del material que también enfrenta retos derivados de las malas condiciones de las vías. Finalmente, el material descargado se incorpora al proyecto de recrecimiento de la presa, cerrando el ciclo.

El mapa resalta las problemáticas en cada etapa del proceso utilizando cuadros en color rojo, que describen los principales problemas operativos que deben abordarse para optimizar el flujo y minimizar los tiempos improductivos. Cabe resaltar que la falta de operadores, el alto ralentí y las fallas mecánicas son problemas globales que afectan al proceso en conjunto, por tanto, se les deben dar mayor importancia.

4.1.1.2. Priorización de problemas que causan los tiempos improductivos

Con base en la matriz de priorización de problemas, se puede identificar y jerarquizar las áreas críticas que afectan el proceso de carguío y acarreo en el área 4000, considerando criterios de complejidad, beneficio y costo de acuerdo a la Tabla 10.

Tabla 10

Matriz de priorización de problemas de acuerdo a complejidad, beneficio y costos de la implementación de soluciones al problema

N°	Problema	Criterios de priorización						Total
		Complejidad	Valor	Beneficio	Valor	Costo	Valor	
1	Paradas no planificadas (fallas de equipos)	Media	3	Muy Alto	5	Alto	2	10
2	Congestión o atascos en las rutas	Media	3	Bajo	2	Bajo	4	9
3	Malas condiciones de las vías	Media	3	Muy Bajo	1	Medio	3	7
4	Asignación ineficiente de recursos	Baja	4	Medio	3	Bajo	4	11
5	Espera en zonas de carga	Media	3	Muy Bajo	1	Bajo	4	8
6	Falta de operadores capacitados	Media	3	Muy Alto	5	Alto	2	10
7	Ausencia de monitoreo en tiempo real	Muy Alta	1	Medio	3	Alto	2	6
8	Gestión ineficiente de la demanda	Media	3	Bajo	2	Medio	3	8
9	Procesos ineficientes de carga y descarga	Media	3	Muy Alto	5	Medio	3	11

Nota. Ponderación de valores, de acuerdo a mayor complejidad menor puntaje(1-5), a mayor beneficio mayor puntaje(1-5), a mayor costo menor puntaje(1-5).

El problema de asignación ineficiente de recursos y los procesos ineficientes de carga y descarga tienen la puntuación más alta (11 puntos), lo que indica que deben ser prioritarios. Estos problemas son relativamente fáciles de abordar debido a su

baja o media complejidad, ofrecen beneficios significativos al optimizar el uso de recursos y reducir tiempos muertos, y presentan costos moderados.

Paradas no planificadas por fallas de equipos y la falta de operadores capacitados también destacan con puntuaciones altas (10 puntos cada uno). Aunque tienen una complejidad media, su solución puede generar beneficios muy altos, como mayor disponibilidad de equipos y mejor eficiencia operativa, pero su costo es relativamente alto, lo que exige una planificación cuidadosa.

Por otro lado, congestión o atascos en las rutas y espera en zonas de carga son problemas con puntuaciones intermedias (8-9 puntos). Aunque su solución tiene un impacto menor en el beneficio global, son más fáciles y económicos de abordar, por lo que podrían resolverse en paralelo con las prioridades mayores.

Las malas condiciones de las vías (7 puntos) y la ausencia de monitoreo en tiempo real (6 puntos) son problemas de baja prioridad. Aunque afectan la operación, el beneficio esperado de su solución es bajo en comparación con los costos y la alta complejidad asociada en algunos casos, como la implementación de monitoreo en tiempo real.

4.1.1.3. FODA de estrategias para reducir los tiempos improductivos en el acarreo de materiales

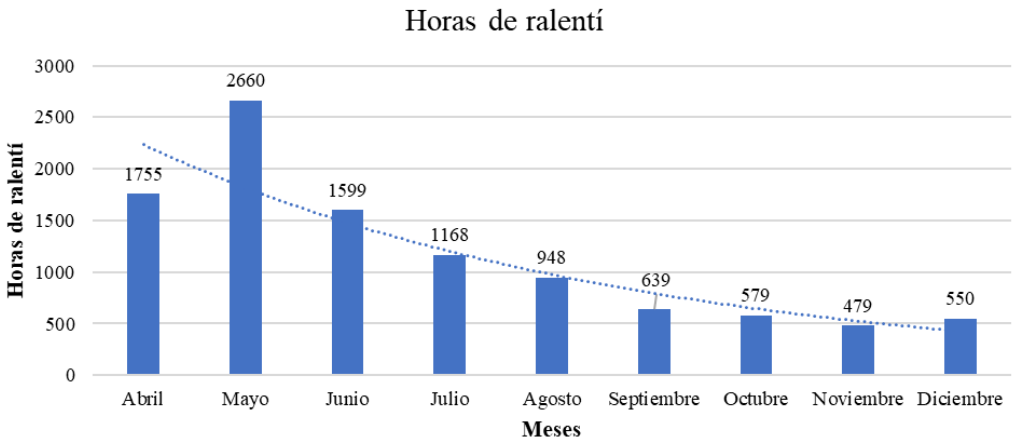
4.1.2. Resultados de reducción de tiempos improductivos

El análisis de la Figura 11 de horas acumuladas de ralentí muestra una tendencia general de reducción significativa en las horas improductivas a lo largo de los meses, lo que refleja un impacto positivo de las estrategias FODA implementadas. La gráfica muestra que las estrategias implementadas han sido efectivas para reducir las horas improductivas de forma sostenida, logrando un descenso de 79% desde el máximo registrado en mayo hasta noviembre.

A partir de junio (1599 horas), las horas de ralentí comienzan a disminuir considerablemente, con un descenso sostenido en julio (1168 horas), agosto (948 horas) y septiembre (639 horas). Este periodo refleja la consolidación de las estrategias, como la mejora en la asignación de recursos, la optimización de los procesos de carga y descarga, y la capacitación de operadores. También indica una mejor gestión del mantenimiento preventivo y de la supervisión operativa, que reducen los tiempos muertos y las paradas no planificadas.

Figura 11

Reducción de horas de tiempos improductivos por ralentí de equipos

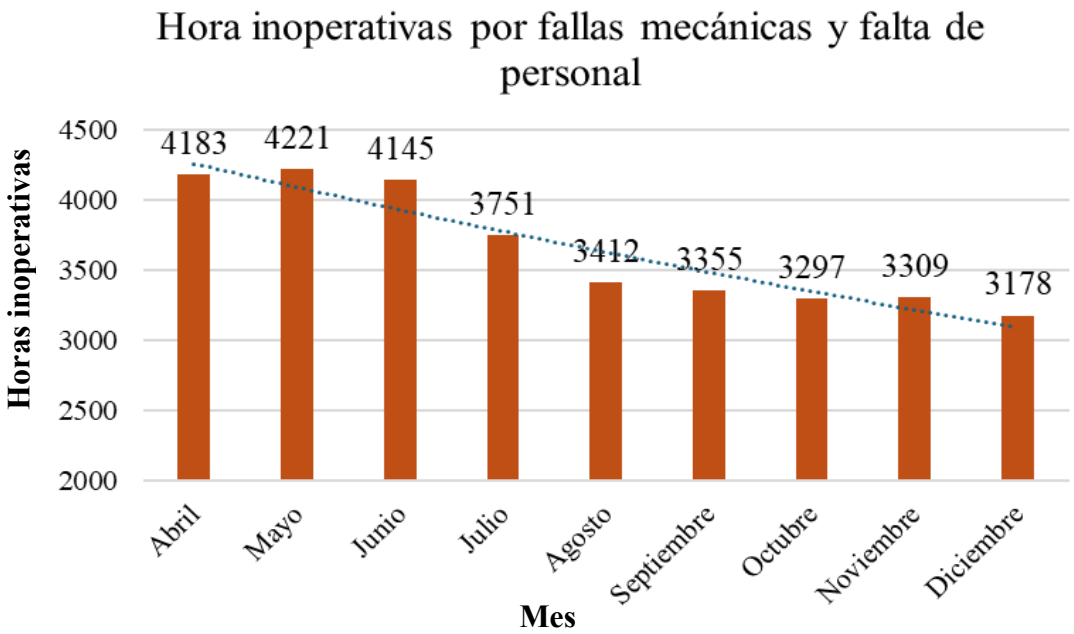


Nota. Elaboración propia en base a las horas de ralentí registradas.

La Figura 12 que muestra las horas inoperativas por fallas mecánicas refleja un comportamiento menos consistente en comparación con las horas de ralentí, indicando que, aunque hay mejoras en algunos meses, las fallas mecánicas siguen siendo un desafío.

Figura 12

Reducción de horas de tiempos improductivos por fallas mecánicas de equipos



Nota. Elaboración propia en base a los registros del área de mantenimiento.

Este gráfico también toma en cuenta que hubo equipos como volquetes, excavadoras que estuvieron inoperativos por stand-by por falta de operadores alrededor de 600 horas al mes, lo cual se eliminó con la contratación de personal adicional y la capacitación de operadores para que pudieran operar dos tipos de equipos y puedan cubrir roles críticos de acuerdo a la necesidad de la operación. Esta disminución es más pronunciada en julio y agosto, meses en los que se contrató operadores nuevos y se capacitó al personal para afrontar la falta de personal capacitado debido a alta rotación.

4.1.2.1. Comparación de resultados

Para hallar el efecto de la reducción de tiempos improductivos se compararon los meses de abril a julio con los meses de la implementación de agosto a noviembre de la Tabla 11. En total se redujo el tiempo improductivo causado por ralentí y por fallas mecánicas en 7464 horas a través de la metodología Lean Six Sigma de mejora de procesos.

Tabla 11

Total de horas reducidas de tiempo improductivos

Línea base(horas)		**Implementación (horas)**		**Diferencia**
Abril	5938	Agosto	4360	(1578)
Mayo	6881	Septiembre	3994	(2887)
Junio	5744	Octubre	3876	(1868)
Julio	4919	Noviembre	3788	(1131)
Subtotal 1	**23482**	**Subtotal 2**	**16018**	**(7464)**

Nota. En base a la suma de las horas de ralentí y de inoperatividad por fallas mecánicas.

4.1.3. Reducción de costos y Lean Six Sigma

Para este proyecto el objetivo meta de carguío, traslado y relleno de material es de 5,400 m^3 diarios para lo cual se requiere el uso de equipos de acuerdo a la Tabla 12.

Tabla 12

Total de horas de uso requerido por equipo en el Área 4000

Equipo	Proceso			Total (Horas)
	Relleno (Horas)	Carga (Horas)	Transporte (Horas)	
Excavadora	13	28		41
Motoniveladora	6			6
Retroexcavadora	6			6
Rodillo	14			14
Tractor	11	20		31
Volquete			360	360

Nota. Elaboración propia tomando en cuenta todos los equipos del proyecto.

Así también de acuerdo a los contratos se tiene una tarifa variable con horómetro, pero con un mínimo de uso de 200 horas mensuales para los equipos. La Tabla 13 muestra los costos por hora por equipo.

Tabla 13

Costos de equipo por hora para el cálculo de reducción de costos

Equipo	Costo (USD/hr)
Excavadora	52.69
Motoniveladora	54.64
Retroexcavadora	52.67
Rodillo	31.05
Tractor	83.34
Volquete	33.25

Nota. Costo por contrato.

La Tabla 14 de costos en USD/m³ desglosa los costos asociados a las actividades de carga, transporte y relleno en el proyecto, considerando diferentes tipos de maquinaria utilizada entre los meses de abril a noviembre del 2024.

Tabla 14

Costos de carguío, traslado y relleno de material periodo Abril-Noviembre

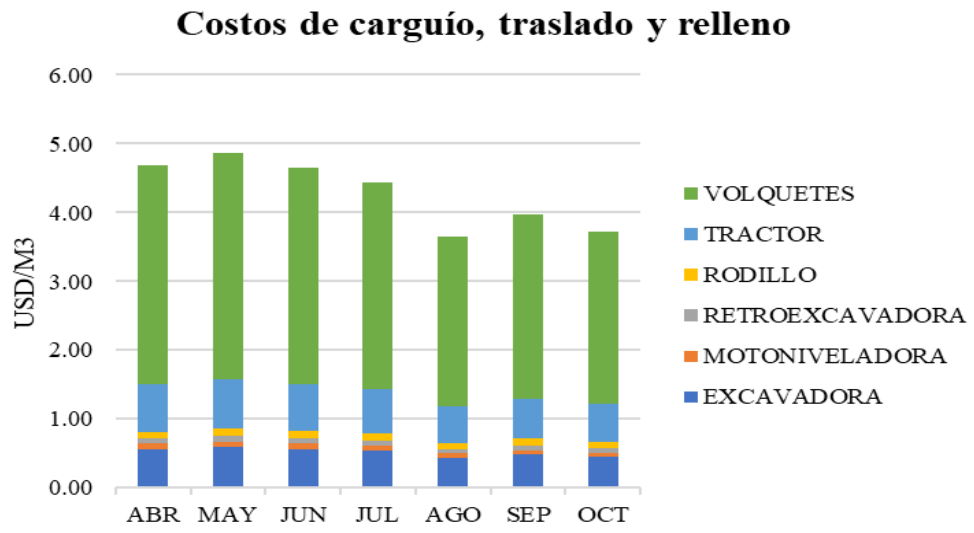
Equipo	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov
Excavadora	0.57	0.59	0.56	0.53	0.44	0.48	0.45	0.43
Motoniveladora	0.08	0.08	0.08	0.08	0.06	0.07	0.06	0.06
Retroexcavadora	0.08	0.08	0.08	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06
Rodillo	0.09	0.11	0.10	0.11	0.09	0.10	0.09	0.09
Tractor	0.69	0.71	0.68	0.65	0.53	0.58	0.54	0.52
Volquete	3.18	3.29	3.14	2.99	2.46	2.68	2.51	2.40
Total (USD/m^3)	**4.68**	**4.87**	**4.64**	**4.43**	**3.65**	**3.98**	**3.72**	**3.56**

Nota. Precios en USD/m^3

Con los datos anteriores se elaboró la Figura 13 que muestra el histograma de los costos por metro cúbico de material cargado, acarreado y rellenado en el proyecto de recrecimiento de la presa de relaves del área 4000.

Figura 13

Histograma de costos de carguío, acarreo y relleno de material del área 4000

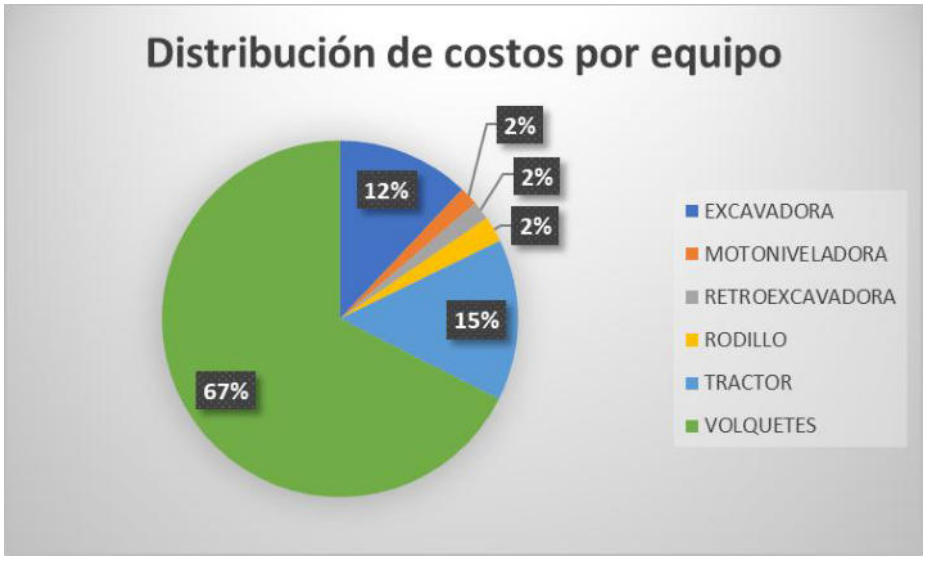


Nota. Unidades en USD/m^3

La Figura 14 muestra un gráfico pie chart o torta con la distribución de costos de acuerdo al equipo involucrado. El acarreo con volquetes constituye el 67% de los costos del proyecto.

Figura 14

Distribución de costos por equipo y metro cúbico de material rellenado



Nota. Se ha considerado el carguío, el acarreo y los trabajos de relleno con equipos de movimiento de tierras.

4.2. Discusión de resultados

La implementación de la metodología Lean Six Sigma ha demostrado ser una estrategia efectiva para la optimización de los procesos operativos y la reducción de costos. Como se muestra en los resultados obtenidos, la aplicación de esta metodología permitió reducir en un 31.8% las horas improductivas, lo que se traduce en una mejora considerable en la eficiencia de las operaciones. El análisis inicial, que incluyó la identificación y priorización de los problemas mediante diversas herramientas, como la matriz FODA, permitió detectar áreas clave para su intervención. Además, el costo promedio del transporte se redujo en un 19.8%, pasando de 4.65 USD/m³ a 3.73 USD/m³, lo que demuestra la efectividad de la metodología para eliminar desperdicios y optimizar los recursos en la operación minera.

Estos hallazgos se alinean con los estudios previos, como los de Kęsek et al. (2019), quienes encontraron que la implementación de Lean Six Sigma en empresas

mineras internacionales resultó en una reducción de costos. En este sentido, la identificación precisa de los problemas y la posterior intervención estratégica permitió una significativa reducción en el tiempo de inactividad, con una disminución del promedio mensual de horas improductivas de 5871 a 4005, lo que resultó en un ahorro de 7464 horas mensuales.

Asimismo, los resultados coinciden con otros estudios a nivel internacional, como los de Rajini et al. (2018), quienes reportaron mejoras en la consecución de metas operativas utilizando un enfoque integrado de Lean, Six Sigma y Theory of Constraints (TOC). En el contexto local y regional, la experiencia de otros proyectos también refleja resultados similares. Por ejemplo, en la unidad minera Cuajone, Hilasaca (2021) logró reducir el tiempo de espera en la zona de descarga de volquetes, lo que generó un ahorro significativo en costos operativos. Además, estudios como los de Agüero y Ramírez (2022), Pineda (2023) y Cruz (2019) evidencian cómo la mejora de la eficiencia operativa y el incremento en la utilización de equipos incrementó la productividad y redujo los costos en diversas operaciones mineras del país.

En particular, el caso de la unidad minera Cuajone demuestra cómo pequeñas mejoras en los tiempos de espera pueden generar ahorros sustanciales. Davila (2022) también evidenció una mejora en la vida útil de los neumáticos, lo que impactó directamente en la reducción de costos. Esto muestra cómo la optimización de procesos a través de una correcta gestión y mantenimiento de los equipos, como se recomienda en el estudio de Soto (2022) para Codelco, permite alcanzar estándares de eficiencia y rentabilidad en las operaciones mineras.

En este sentido, la implementación de Lean Six Sigma no solo ha permitido la reducción de costos operativos, sino que también ha mejorado la gestión de recursos humanos, como se demuestra en los resultados obtenidos con la contratación y capacitación de operadores. Este enfoque integral no solo mejora los procesos de acarreo, sino que también impacta en la calidad general de las operaciones mineras. Los logros alcanzados en la reducción de tiempos improductivos y la optimización de costos refuerzan la efectividad de Lean Six Sigma como una herramienta clave para la mejora continua en la industria minera, alineándose con las experiencias positivas documentadas a nivel internacional y local.

V. CONCLUSIONES

La implementación de la metodología Lean Six Sigma en las operaciones de acarreo del Área 4000 de la unidad minera ha demostrado ser altamente efectiva para reducir tiempos improductivos y reducir costos del proyecto. A través de un análisis de identificación y priorización de problemas, así como la ejecución de estrategias FODA, se logró una mejora significativa en la eficiencia operativa, reflejada en una reducción del 31.8% en horas improductivas y una disminución del 19.8% en el costo promedio por metro cúbico transportado de 4.65 USD/m³ a 3.73 USD/m³.

El análisis de las principales causas de los tiempos improductivos, utilizando herramientas como el diagrama de Ishikawa y el principio de Pareto, permitió identificar que los principales factores de estos tiempos eran fallas mecánicas, falta de operadores capacitados y procesos ineficientes de carga y descarga, los cuales representaban el 69% del total de tiempos perdidos. Antes de las mejoras, el promedio mensual de horas inoperativas era de 5871 horas y gracias a la propuesta de mejora este promedio se redujo significativamente a 4005 horas, lo que representó una disminución del 31.8% del total de horas inoperativas mensuales, equivalente a un ahorro total de 7464 horas o USD 248 mil debido al costo de los equipos por tarifa horaria. La propuesta de mejora consistió en priorizar el mantenimiento preventivo y correctivo, se realizó una correcta delimitación de responsabilidades de las áreas, se mapearon los procesos críticos y los problemas de gestión de cada uno, se capacitó y contrató operadores y se redujo el ralentí de los equipos.

Gracias a la aplicación de Lean Six Sigma se identificaron los principales desperdicios del carguío y acarreo comprendidos por el alto ralentí de los equipos, ineficiente asignación de equipos, tráfico en rutas, falta de personal capacitado y excesivas fallas mecánicas. En consecuencia se aplicaron mejoras en la asignación de los equipos, contratación y capacitación de operadores en dos tipos de maquinarias, se priorizó el mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos más importantes, lo que permitió reducir el costo promedio del transporte de 4.65 USD/m³ a 3.73 USD/m³. Este logro representa una disminución del 19.8% en costos operativos y demuestra la efectividad de la metodología Lean Six Sigma para identificar y eliminar desperdicios en las operaciones mineras.

VI. RECOMENDACIONES

A la gestión de operaciones del proyecto de recrecimiento de presa “Área 4000”, se recomienda mantener y expandir la implementación de la metodología Lean Six Sigma dado los resultados positivos en la reducción de costos operativos y tiempos improductivos. Debido a que las fallas mecánicas son es una de las principales causas de tiempos improductivos se establecer un sistema efectivo de mantenimiento preventivo y predictivo, debe incluir la programación regular de mantenimientos y el monitoreo continuo del estado de los equipos.

Se debe continuar y fortalecer los programas de capacitación y retención de operadores, considerando que la falta de personal calificado y la alta rotación contribuyen significativamente a los tiempos improductivos. Es recomendable establecer un programa de entrenamiento que permita a los operadores manejar múltiples tipos de equipos, aumentando así la flexibilidad operativa y reduciendo el impacto de la rotación de personal. La estandarización de los procesos de carga y descarga debe ser una prioridad, implementando procedimientos claros y medibles con responsabilidades que permitan monitorear los puntos críticos de la operación.

Se debe contar con una sistematización de gestión de recursos que permita una mejor coordinación entre las diferentes áreas operativas. Este sistema debe incluir herramientas de monitoreo con una frecuencia de actualización mínima de 4 horas a fin de poder realizar acciones correctivas ante desviaciones los objetivos de producción. Se deben inspeccionar las rutas de acarreo y mejorar continuamente las condiciones de las vías como parte integral de la planificación operativa, estableciendo un programa regular de mantenimiento de vías e identificar rutas alternativas o planes de contingencia. Finalmente, se recomienda establecer un sistema de evaluación y seguimiento continuo de las mejoras implementadas, utilizando indicadores clave de desempeño que permitan medir el impacto de las intervenciones y ajustar las estrategias según sea necesario.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agüero, F. y Ramírez, G. (2022). *Aplicación de la metodología Lean Six Sigma para reducir el tiempo improductivo en las etapas de acarreo y transporte en mina Canta.* [Tesis de pregrado - UPC]. Repositorio de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. http://hdl.handle.net/10757/661955

Alcarraz, P. y Legoas, F. (2023). *Aplicación del método Lean Six Sigma para la estimación de costos y ofertas económicas en el desarrollo de chimeneas Raise Boring en una empresa contratista minera del Perú*. [Informe de Suficiencia Profesional - UPC]. Repositorio de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. http://hdl.handle.net/10757/670727

Alcoa (11 de julio de 2024). *Our History: A Legacy of Innovation*. Consultado el 26 de julio de 2024 en https://www.alcoa.com/global/en/who-we-are/history

Antamina (10 de julio de 2024). *Quienes Somos.* Antamina. Consultado el 25 de julio de 2024 en https://www.antamina.com/quienes-somos/

Antony, J., Sony, M., Dempsey, M., Brennan, A., Farrington, T., y Cudney, E. (2019). An evaluation into the limitations and emerging trends of Six Sigma: an empirical study. *The TQM Journal*. doi:10.1108/tqm-12-2018-0191

Both, C. y Dimitrakopoulos R. (2020). Joint stochastic short-term production scheduling and fleet management optimization for mining complexes. *Optimization and Engineering*. 21, 1717-1743. https://doi.org/10.1007/s11081-020-09495-x

Bernal, C. (2010). *Metodología de la Investigación Administración, Economía, Humanidades y Ciencias Sociales*. Prentice Hall (3era Edición). ISBN 978-958-699-128-5

Castrejon, R. (2021). *Diseño de un Sistema Basado en la Metodología Six Sigma para Mejorar la Gestión de Mantenimiento Predictivo de los Equipos Estáticos de una Empresa Minera, Cajamarca, 2020*. [Tesis de pregrado - UPN]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. https://hdl.handle.net/11537/28803

Cornejo S. (2020). *Optimización de Carguío y Acarreo en Tajo Abierto utilizando algoritmos bio-inspirados*. [Tesis de Pregrado, PUCP]. Repositorio de la Pontificia Universidad Católica del Perú. http://hdl.handle.net/20.500.12404/18203

Cruz. J. (2019). *Optimización del Proceso de Perforación Primaria con el Método Lean Six Sigma en la Unidad Minera Antapaccay*. [Tesis de pregrado- Universidad Nacional del Altiplano] Repositorio de la Universidad Nacional del Altiplano. http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/12395

Cuevas, J. (2021). *Metodología Lean Six Sigma aplicada a un caso real de barrenación y voladura en la minería subterránea*. [Tesis de pregrado - UNAM]. Repositorio de la Universidad Nacional Autónoma de México. http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/RepoFi/17669

Davies, J. (2016). *Disadvantages of Lean Manufacturing (and How to Make Lean Work in Your Firm).* Winman. Consultado el 01 de julio de 2024 en https://www.winman.com/blog/disadvantages-of-lean-manufacturing-and-how-to-make-lean-work-in-your-firm

Davila, 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 Pregado, UNAM]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Moquegua. https://repositorio.unam.edu.pe/handle/UNAM/471

Espinoza, F. y Carreño J. (2022). *Control operativo de los metros de avance por disparo mediante la metodología Lean Six Sigma*. [Tesis de Pregrado, PUCP]. Repositorio de la Pontificia Universidad Católica del Perú. http://hdl.handle.net/20.500.12404/24514

Fursule, N., Bansod, S. y Fursule S. (2012). Understanding the Benefits and Limitations of Six Sigma Methodology. *Understanding the Benefits and Limitations of Six Sigma Methodology, 2(1), pp. 1-9. ISSN 2250-3153*

Hilario, L., Huambo, G. y Rodrigez, A. (2022). *Propuesta de mejora del proceso de productos terminados de una manufacturera peruana basado en el modelo Lean Six Sigma: Caso Minera Deisi.* [Tesis de pregrado - PUCP].

Repositorio de la Pontificia Universidad Católica del Perú. http://hdl.handle.net/20.500.12404/24953

Hilasaca, H. (2021). *Optimización de tiempos de espera de volquetes en la zona de descarga de mineral, para el incremento de la productividad en la unidad operativa Cuajone.* [Tesis de Pregrado, UNAM]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Moquegua. https://repositorio.unam.edu.pe/handle/UNAM/267

Ingar, C. (2023). Lean Six Sigma y mejora de la productividad en el servicio de reparación de equipos de minería en una empresa metalmecánica. *Industrial Data*, 26(2), 239-265. https://dx.doi.org/10.15381/idata.v26i2.25462

Kesek, M., Bogacz P. y Migza M. (2019). The application of Lean Management and Six Sigma tools in global mining enterprises. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 214 012090. Doi: 10.1088/1755-1315/214/1/012090

KGHM (10 de julio de 2024). *KGHM en el mundo*. Consultado el 25 de julio de 2024 en https://kghm.com/es/sobre-nosotros/kghm-en-el-mundo

Kothari,C. (2004). *Research Methodology Methods and Techniques*. New Age International Publishers (2da Edición). ISBN : 978-81-224-2488-1

Lööw, J. (2018). An investigation into lean production practice in mining. *International Journal of Lean Six Sigma*. doi:10.1108/ijlss-07-2017-0085

Martínez, J. y Vasquez Y. (2021). *Metodología Six Sigma para mejorar el nivel de producción del sector I de la Cantera R.B, Ferreñafe*. [Tesis de pregrado - UCV]. Repositorio de la Universidad César Vallejo. https://hdl.handle.net/20.500.12692/65715

Mendoza, J. y Liberato G. (2023). *Evaluación de la etapa de perforación de taladros largos en vetas angostas mediante el enfoque Lean Six Sigma para incrementar la productividad operacional de una mina subterránea al sur del Perú*. [Informe de Suficiencia Profesional-UPC]. Repositorio de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. http://hdl.handle.net/10757/670717

Pandey, P. y Mishra M. (2015). *Research Methodology: Tools and Techniques. Bridge Center*. Romania. ISBN 978-606-93502-7-0

Pineda, R. (2023). *Implementación de la metodología Lean Six Sigma para el cumplimiento de las metas de producción en minería.* [Informe de Suficiencia Profesional - UNI]. Repositorio de la Universidad Nacional de Ingeniería. http://hdl.handle.net/20.500.14076/27015

RAG (10 de julio de 2024). *Unsere Geschichte*. Consultado el 25 de julio de 2024 en https://www.rag.de/unternehmen/unsere-geschichte

Rajini, J., Nagaraju, D., y Narayanan, S. (2018). Integration of lean, Six Sigma and theory of constraints for productivity improvement of mining industry. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 24(3), 424-440. doi:10.1504/ijpqm.2018.092986

Rio Tinto (2010). *2010 Annual Report*. [Archivo pdf]. https://www.annualreports .com/HostedData/AnnualReportArchive/r/LSE_RIOA_2010.pdf

Rio Tinto (10 de julio de 2024). *Diavik*. Consultado el 26 de julio de 2024 en https://www.riotinto.com/en/operations/canada/diavik

Soto, P. (2022). *Propuesta de un Modelo de Mejora Continua Basado en Herramientas Lean con Enfoque Seis Sigma en Planta Concentradora de Empresa Minera.* [Tesis de pregado – Universidad de Concepción]. Repositorio de la Universidad de Concepción, Chile. http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/11155

SPC Group (15 de junio de 2015). *Gráfica de Pareto*. Consultado el 25 de julio de 2024 en https://spcgroup.com.mx/grafica-de-pareto/

Quiroz, R. (2016). *Implementación de Metodología Lean en Minería Subterránea – Estudio de Caso Esmeralda*. [Tesis de maestría - UC]. Repositorio de la Universidad de Chile. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/140554

VIII. ANEXOS

1.Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Método
General ¿Cómo la aplicación de Lean Six Sigma reduce los tiempos improductivos y los costos asociados a las operaciones de acarreo del Área 4000 de la unidad minera en el año 2024?	General Generar una propuesta de mejora para reducir los tiempos improductivos y costos través de la metodología Lean Six Sigma en las operaciones de acarreo en el área 4000 de la unidad minera.	Principal La aplicación de la metodología Lean Six Sigma permitirá identificar causas, cuellos de botella y sobrecostos con el fin de implementar una mejora de los procesos que reduzca los tiempos improductivos y reduzca los costos en las operaciones de acarreo del Área 4000 de la unidad minera.	**Variables dependientes:** Tiempos improductivos y costos de acarreo Indicadores: - Tiempo total de demoras (*Delays, stand-by, Relenting)*(Horas) - Costos totales asociados con el acarreo ($).	a. Tipo de investigación Aplicada con enfoque cuantitativo. b. Diseño de la investigación Experimental, de nivel exploratorio, no correlacional. c. Ámbito de estudio Una unidad minera de extracción de cobre en el sur del Perú. d. Población Todas las operaciones unitarias de acarreo de la unida minera a cielo abierto. e. Muestra Operaciones de acarreo del Área 4000 de la unidad minera durante en un periodo de seis meses durante el año 2024. f. Técnicas de recolección de datos - Observación directa. - Entrevista. g. Instrumentos - Guía de entrevista. - Sistema interno de control de acarreo.
Específicos (1) ¿Cómo reducir la acumulación de tiempos improductivos a través de la metodología Lean Six Sigma en la etapa de acarreo del Área 4000 de la unidad minera? (2) ¿Cuáles son los principales procesos que contribuyen a la generación de sobrecostos de acuerdo a la metodología Lean Six Sigma en la etapa de acarreo del Área 4000 de la unidad minera?	Específicos (1) Definir las principales causas y factores que generan tiempos improductivos a través de la metodología Lean Six Sigma, con el fin de establecer mejoras que reduzcan estos tiempos improductivos en las operaciones de acarreo del Área 4000 de la unidad minera. (2) Mejorar los procesos que contribuyen a la generación de sobrecostos (desperdicios) a través de la metodología Lean Six Sigma con el fin de reducir costos en el acarreo del Área 4000 de la unidad minera.	Específicas (1) La metodología Lean Six Sigma permitirá definir, medir, analizar, mejorar y controlar aquellos procesos que están generando tiempos improductivos en la etapa de acarreo y permitirá implementar medidas efectivas que reduzcan los tiempos improductivos del Área 4000 de la unidad minera. (2) El enfoque Lean permitirá identificar aquellos procesos que generan menor valor o que generan costos innecesarios, permitiendo establecer mejoras y reducir el costo total de las operaciones de acarreo en el Área 4000 de la unida minera.	**Variables independientes:** Metodología Lean Six Sigma Indicadores - Tiempos de ciclo de carga y descarga. (Minutos y segundos). - Análisis de Causa Raíz (Diagrama de Pareto, Diagrama de Ishikawa)	

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	: Edgar Julio Almanza Cruz
DNI/Carnet de Extranjería/Pasaporte N°	: 75101828
Correo electrónico	: julioalmanzacruz999@gmail.com
Teléfono/Celular	: 991824100

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

Bachiller	Título 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) Articulo 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: "APLICACIÓN DE LEAN SIX SIGMA PARA REDUCIR EL TIEMPO IMPRODUCTIVO Y COSTOS DE LAS OPERACIONES DE ACARREO DE UNA UNIDAD MINERA A CIELO ABIERTO EN MOQUEGUA"
b) Campo del conocimiento OCDE (Indicar el código de clasificación OCDE de la obra: https://catalogos.concytec.gob.pe/vocabulario/ocde_ford.html):
c) Fecha de publicación:

6. DATOS DEL ASESOR:

a) Nombres y Apellidos : CHRIST JESUS BARRIGA PARIA
b) DNI/Pasaporte/Cédula : 44331713
c) ORCID : 0000-0002-7130-9297

FIRMA : .....

DOCUMENTO DE IDENTIDAD : 75101828
NOMBRES Y APELLIDOS : EDGAR JULIO ALMANZA CRUZ

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 : 75101828
NOMBRES Y APELLIDOS : EDGAR JULIO ALMANZA CRUZ
FECHA : 2025

ANEXO VIII

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

Yo, Edgar Julio Almanza Cruz,

bachiller de la Escuela Profesional de:
Ingeniería de Minas,

de la Universidad Nacional de Moquegua, identificado(a) con DNI Nº. 75101828, autor(a) del Trabajo de Investigación / Tesis / Trabajo de suficiencia profesional denominado:
"APLICACIÓN DE LEAN SIX SIGMA PARA REDUCIR EL TIEMPO IMPRODUCTIVO Y COSTOS DE LAS OPERACIONES DE ACARREO DE UNA UNIDAD MINERA A CIELO ABIERTO EN MOQUEGUA"

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, 09 de Abril 2025



Nombres y Apellidos: Edgar Julio Almanza Cruz
DNI: 75101828

Huella digital

EDGAR ALMANZA

TESIS

TESIS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA
Universidad Nacional de Moquegua

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::1:3196490142

Fecha de entrega
27 mar 2025, 12:22 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
27 mar 2025, 3:52 p.m. GMT-5

Nombre de archivo
INFORME_DE_TESIS_Edgar_Almanza_levantado.pdf

Tamaño de archivo
1.1 MB

94 Páginas

28.194 Palabras

159.715 Caracteres

9% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report

- Bibliography
- Quoted Text
- Cited Text
- Small Matches (less than 8 words)
- Internet sources

Top Sources

0% Internet sources
4% Publications
7% Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

1 Integrity Flag for Review

Hidden Text
36 suspect characters on 1 page
Text is altered to blend into the white background of the document.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Top Sources

0% Internet sources
4% Publications
7% Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Student papers	
uni		<1%
2	Student papers	
unjbg		<1%
3	Publication	
Christian Abdul Ingar Medina. "Lean Six Sigma and Productivity Improvement in ...		<1%
4	Student papers	
Pontificia Universidad Catolica del Peru		<1%
5	Student papers	
Universidad Continental		<1%
6	Student papers	
consultoriadeserviciosformativos		<1%
7	Student papers	
Universidad Tecnologica del Peru		<1%
8	Student papers	
Universidad Cesar Vallejo		<1%
9	Student papers	
Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga		<1%
10	Student papers	
Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC		<1%
11	Student papers	
Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC		<1%

12 Student papers
Universidad TecMilenio <1%

13 Publication
Perales Llanos, Milka Marina. "Analisis, Diagnostico y Propuesta de Mejora en los ... <1%

14 Student papers
Universidad San Marcos <1%

15 Publication
Segura, Alberto Limo. "Análisis de la Participación Ciudadana en la Conservación ... <1%

16 Student papers
niversidad Católica San Pablo <1%

17 Student papers
Universidad Católica de Santa María <1%

18 Student papers
ULACIT Universidad Latinoamericana de Ciencia y Tecnología <1%

19 Student papers
unasam <1%

20 Publication
(Carlinda Leite and Miguel Zabalza). "Ensino superior: inovação e qualidade na do... <1%

21 Student papers
niversidad Anahuac México Sur <1%

22 Student papers
Universidad Internacional SEK <1%

23 Student papers
Universidad Europea de Madrid <1%

24 Student papers
Universidad San Ignacio de Loyola <1%

25 Student papers
Universidad Tecnológica Indoamerica <1%

26 Student papers
Universidad de Deusto <1%

27 Student papers
uncedu <1%

28 Publication
J & E CONSULTORES GENERALES S.R.L.. "EIA-SD del Proyecto Instalación de la Líne... <1%

29 Publication
Carmen Elena Bermúdez Cantillo. "Abordagem teórico-prática da inclusãode estu... <1%

30 Publication
olorzano Perez, Evelyn Veronica. "Caracteristicas del frenillo lingual y de la prod... <1%

31 Student papers
Universidad EAN <1%

32 Student papers
Universidad Fernando Pessoa Canarias <1%

33 Student papers
Universidad Nacional de Moquegua <1%

34 Publication
"Programación de itinerarios de líneas aéreas bajo incertidumbre en los tiempos ... <1%

35 Student papers
Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo <1%

36 Student papers
Corporación Universitaria Minuto de Dios,UNIMINUTO <1%

37 Student papers
Escuela de Posgrado Newman <1%

38 Publication
Pfeiffer Leon, Ann Kathrin. "Habitos de Comunicacion y Organizacion de la Infor... <1%

39 Publication
Reis, Manuel Tomé | de Sá, José Carlos Vieira. "Melhoria da Eficiência de uma Linh... <1%

40 Student papers
Universidad Internacional Isabel I de Castilla <1%

41 Student papers
monterrico <1%

42 Student papers
umb <1%

43 Publication
Gonzales Lopez, Abigaid Jholaine. "Análisis Jurídico de los Factores Limitantes del ... <1%

44 Student papers
UTEC Universidad de Ingeniería & Tecnología (NO TOCAR) <1%

45 Student papers
Universitat Politècnica de València <1%

46 Publication
FCA CONSULTORES AMBIENTALES S.A.C.. "PAMA del Fundo Blueberries Perú-IGA0... <1%

47 Publication
Pinto, Mariana Araújo. "Aplicação de conceitos lean para melhoria de desempenh... <1%

48 Publication
Durão, Lourenço Cruz Simões. "Deteção de Avarias Em Baterias de Seguidores Fot... <1%

49 Publication
Guilherme dos Santos Zimmermann, Elena Bohomol. "Lean Six Sigma methodolo... <1%

50 Publication
Ilse Urquia, Anne Zouggar Amrani, Bruno Vallespir. "A method to support joint in... <1%

51 Student papers
UTEC Universidad de Ingeniería & Tecnología <1%

52 Student papers
Universidad Gerardo Barrios de El Salvador <1%

53 Student papers
ipn <1%

54 Publication

Alza, Bertha Aracelly Bocanegra | Risco, Claudia Elizabeth Aliaga | Graus, Enrique... <1%

55 Publication

Fernandes, Carla Marisa Costa. "A Transição Entre a Educação Pré-Escolar e o Pri... <1%

56 Publication

Franco Trigo, Lucia. "Participatory Research for the Development of Community P... <1%

57 Publication

Genett Isabel Jiménez-Delgado, Hugo Hernandez-Palma, Nadia León Castro, Ande... <1%

58 Publication

arrison de la Rosa Ramírez. "Desarrollo de formulaciones de ácido poliláctico (P... <1%

59 Publication

LEONARDO ANDRES SIERRA VARELA. "EVALUACIÓN MULTICRITERIO DE LA SOSTE... <1%

60 Publication

Osandon Urzua, Felipe Andres. "Optimizacion de un Sistema de Gestion en un La... <1%

61 Publication

Sheyla Katherin, Alcantara Cueva | Miguel Alfredo, Seminario Briones. "Modelo P... <1%

62 Student papers

Submitted on 1690750732675 <1%

63 Student papers

niversidad Politecnica Salesiana del Ecuador <1%

64 Publication

"Análisis de las condiciones para implementar una estrategia de postponement e... <1%

65 Publication

"Organisasjonsformer : arbeidsvilkår og effektivitet", Gyldendal Norsk Forlag AS <1%

66 Publication

"Report of the Twelfth Session of the Sub-Committee on Aquaculture, Hermosillo,... <1%

67 Publication

Cecilia Díaz-Méndez, Jean Adams. "The combined used of quantitative and qualita... <1%

68 Publication
Cynthia Sophia Arellano Benitez, Irving D. Hernandez. "DEVELOPMENT OF A LOW-... <1%

69 Publication
Diana Yasbhet Rade L, Alvaro Cañadas, Carlos Zambrano, Carlos Molina, Alexandr... <1%

70 Publication
Galarza Hermitano, Ronald Victor | Gamarra Villegas, Yosip | Huallpa Cordova, C... <1%

71 Publication
Gonzalez Orta, Marta Maria. "Diccionario Sintactico del lexico Verbal del Ingles A... <1%

72 Publication
ernández Cruz, Liza M.. "Integración de los modelos cognitivo conductual y estr... <1%

73 Publication
Hugo Alexer Pérez Vicente, Mariana Ruiz Morales, Erick Guillermo Torres Bermúd... <1%

74 Publication
Irene Monsonís Payá. "Actors' Engagement in Monitoring and Evaluation Mechan... <1%

75 Publication
Jordi Martínez Ventura. "Enseñanza de la Arquitectura y Educación para el desarr... <1%

76 Publication
KNIGHT PIESOLD CONSULTORES S.A.. "EIA del Proyecto Constancia-IGA0006961", ... <1%

77 Publication
ma, Joana Filipa Miranda. "Conceção e Implementação de um Programa de Mel... <1%

78 Publication
Molina Castro, Juan David. "Mecanismos para la inversion y remuneracion de la tr... <1%

79 Publication
Torres, Yamileth Alvelinda Román. "Análisis y Propuesta de Mejora del Proceso Pr... <1%

80 Student papers
Universidad Internacional de la Rioja <1%

81 Publication
Valeria N. Droz Cruz, María M. García Sandoval. "MEJORA DE LA EFICIENCIA OPER... <1%

82 Publication

Veliz Rojas, Maria Isabel. "Calidad percibida por los usuarios externos e internos f... <1%

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO

N° 388-2025-CU-UNAM

Moquegua, 04 de junio de 2025

VISTOS:

El Proveído N° 2022-2025 de fecha 28 de mayo de 2025 emitido por el Rectorado, el Informe N° 212-2025-UNAM-R/SG de fecha 28 de mayo de 2025, el Informe Técnico N° 062-2025-UNAM/SEGE/GYT de fecha 28 de mayo de 2025 emitidos por el Secretario General de la UNAM, el Acuerdo del Pleno del Consejo Universitario de Sesión Extraordinaria N° 017-2025-SE-CU-UNAM, de fecha 28 de mayo de 2025, y;

CONSIDERANDO:

Que, conforme al 4to 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 14° del Estatuto de la UNAM, aprobado bajo Resolución N° 578-2021-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 9, del artículo 16 del Estatuto de la UNAM;

Que, el Sr. Rector es el personero y representante legal de la Universidad Nacional de Moquegua, conforme a lo dispuesto por la Ley Nº 30220-Ley Universitaria, tiene a su cargo la Dirección, Conducción y Gestión del Gobierno Universitario en todos sus ámbitos, concordante con el artículo 18 y numeral 2 del artículo 20° del Estatuto de la UNAM;

Que, mediante Informe Técnico N° 062-2025-UNAM/SEGE/GYT e Informe N° 212-2025-UNAM-R/SG de fecha 28 de mayo de 2025, el Secretario General de la UNAM, remite al Rectorado el expediente para el trámite de título profesional de Ingeniero de Minas del bachiller: ALMANZA CRUZ EDGAR JULIO de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, quien se encuentra apto 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, conforme lo señala la Dirección de Actividades y Servicios Académicos y la Dirección de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas; razón por la cual, el señor Secretario General incluye dicho expediente como punto de agenda para ser tratado en Sesión Extraordinaria de Consejo Universitario de fecha 28 de mayo de 2025;

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;

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° 017-2025-SE-CU-UNAM, de fecha 28 de mayo de 2025, emitió, el siguiente, Acuerdo; POR UNANIMIDAD: CONFERIR, a nombre de la Nación el título profesional de Ingeniero de Minas por la modalidad de sustentación de tesis al bachiller: ALMANZA CRUZ, EDGAR JULIO 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 Art. 18, de la Constitución Política del Perú, la Ley N° 30220-Ley Universitaria, el Estatuto de la UNAM, y a lo acordado por el pleno del Consejo Universitario;

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

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO
N° 388-2025-CU-UNAM

Moquegua, 04 de junio de 2025

SE RESUELVE:

ARTÍCULO 1°: CONFERIR, A NOMBRE DE LA NACIÓN al bachiller

- **EDGAR JULIO ALMANZA CRUZ**

  TESIS : **"APLICACIÓN DE LEAN SIX SIGMA PARA REDUCIR EL TIEMPO IMPRODUCTIVO Y COSTOS DE LAS OPERACIONES DE ACARREO DE UNA UNIDAD MINERA A CIELO ABIERTO EN MOQUEGUA"** cuyo Asesor fue el Dr. Christ Jesus Barriga Paria

El **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS**

Por la modalidad de SUSTENTACIÓN 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 a través de quien corresponda, 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 UNAM SECRETARÍA GENERAL

ABOG. EDGAR PINTO HUANCAVILCA
SECRETARIO GENERAL

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA UNAM CONSEJO UNIVERSITARIO

DR. HUGO RUBEN MARCA MAQUERA
RECTOR
PRESIDENTE DEL CONSEJO UNIVERSITARIO

DISTRIBUCION:
VRA
VRI
OAJ
FACIA
FACCAD
FACISA
OPP
DIGA
OTI
c.c. Arca.

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