



Universidad del Desarrollo
Facultad de Ingeniería

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA
METODOLOGÍA SIX SIGMA EN LA VARIABILIDAD OPERATIVA
EN LA PLANTA SELECTIVA DE MOLIBDENO DE
CHUQUICAMATA

RODRIGO JAVIER PINTO ORELLANA

PROFESOR(ES) GUÍA: GUSTAVO CANEPA, MEng
HÉCTOR VALDÉS GONZÁLEZ, PhD

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA
UNIVERSIDAD DEL DESARROLLO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER
EN INGENIERÍA INDUSTRIAL Y DE SISTEMAS

SANTIAGO – CHILE
2025



Universidad del Desarrollo
Facultad de Ingeniería

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA
METODOLOGÍA SIX SIGMA EN LA VARIABILIDAD OPERATIVA EN LA PLANTA
SELECTIVA DE MOLIBDENO DE CHUQUICAMATA

Por: RODRIGO JAVIER PINTO ORELLANA

Proyecto de Grado presentado a la Comisión integrada por los profesores:

PROFESORES GUÍA: Gustavo Canepa, MEng y Héctor Valdés González, PhD

PROFESOR INTEGRANTE 1: José Luis Salazar, PhD

PROFESOR INTEGRANTE 2: Juan Carlos Vidal, PhD

Para completar las exigencias del Grado de Magíster en Ingeniería Industrial y de
Sistemas en la Universidad del Desarrollo de Chile

2025

Santiago, Chile

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Por medio de la presente, declaro que el trabajo titulado **EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA SIX SIGMA EN LA VARIABILIDAD OPERATIVA EN LA PLANTA SELECTIVA DE MOLIBDENO DE CHUQUICAMATA**, que presento a la Universidad del Desarrollo de Chile, es de mi autoría y no ha sido publicado previamente, ni está siendo considerado para publicación bajo otra filiación. En igual sentido, declaro que el trabajo de tesis y su contenido, son originales y que todos los datos y referencias a trabajos ya publicados con anterioridad han sido debidamente identificados, referenciados o citados en el documento, y que estas citas han sido incluidas en las referencias bibliográficas. Afirmo, asimismo, que los materiales presentados no se encuentran protegidos por derechos de autor; y en caso de que así lo estuvieran, me hago responsable de cualquier litigio o reclamo relacionado con la violación de derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad a la Universidad del Desarrollo de Chile.

Finalmente, me comprometo a no someter este trabajo, a consideración en ninguna revista o congreso para publicación sin contar con la aprobación y haber pasado el debido proceso de revisión en Universidad del Desarrollo. En caso de que un artículo sea aprobado para su publicación, autorizo a la Universidad del Desarrollo a incluir dicho artículo en sus revistas, y a reproducirlo, editarlo, distribuirlo, exhibirlo y comunicarlo en el país y en el extranjero, por medios impresos, electrónicos, Internet o cualquier otro medio, para propósitos científicos y sin fines de lucro.

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke at the bottom, set against a light gray background.

RODRIGO JAVIER PINTO ORELLANA

Firma

*“Si únicamente fuéramos seres lógicos,
el mundo sería desolador.
Pero somos seres humanos,
tenemos fe y esperanza,
y eso nos permite trabajar conjuntamente”*

...

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este Magíster en Ingeniería Industrial y Sistemas (MIIS). Haber sido parte de este programa ha significado un desafío académico y personal del que me siento profundamente orgulloso, y que ha contribuido de manera significativa a mi crecimiento profesional.

Agradezco al programa de Magíster por brindarme la oportunidad de participar en esta formación y por entregarme herramientas que fortalecieron mis competencias como ingeniero. Extiendo un especial agradecimiento al Dr. Héctor Valdés (PhD) por su constante apoyo, confianza y guía durante este proceso. Su acompañamiento fue fundamental para mantenerme firme en los momentos más complejos. Aprecio profundamente su calidad humana, su generosidad y su compromiso con el desarrollo de sus estudiantes.

Quiero agradecer también a cada uno de los profesores del programa por su dedicación, por compartir sus conocimientos con claridad y exigencia, y por entregarnos nuevas herramientas que serán fundamentales en nuestro desempeño profesional futuro.

A mis amigos y compañeros del MIIS, gracias por cada conversación, por el apoyo mutuo y por acompañarme en este camino. En especial, agradezco a Diego Elgueta, por su compañerismo, disposición y profesionalismo, que hicieron más llevadero este proceso académico.

Extiendo además un profundo agradecimiento a los jefes de turno y trabajadores de la Planta de Molibdeno, quienes facilitaron el desarrollo de este proyecto con su colaboración, disposición y experiencia operativa. Su apoyo fue esencial para comprender la realidad del proceso y llevar esta investigación a buen término.

Finalmente, agradezco con todo mi corazón a mi familia, quienes han sido mi mayor fuente de fuerza y motivación. A Ángela, mi compañera de vida, y a mis hijos Martín y Amparo, gracias por su amor, paciencia y comprensión durante cada jornada de estudio y dedicación. Este logro también les pertenece.

Quiero dedicar un agradecimiento especial a mis padres, por cada enseñanza y por los valores que me entregaron desde la infancia. Gracias por su amor incondicional, su apoyo en cada decisión y por enseñarme, con su ejemplo, la importancia del esfuerzo y la perseverancia. Todo lo que he logrado se sostiene en los cimientos que ustedes construyeron.

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA SIX SIGMA EN LA VARIABILIDAD OPERATIVA EN LA PLANTA SELECTIVA DE MOLIBDENO DE CHUQUICAMATA

RODRIGO JAVIER PINTO ORELLANA

Bajo la supervisión de los profesores Gustavo Canepa, MEng y Héctor Valdés-González, PhD en la Universidad del Desarrollo de Chile

Resumen

La flotación selectiva de molibdeno constituye un proceso estratégico dentro de la industria mineral, dado el alto valor económico de este subproducto y su contribución directa a la rentabilidad global de las plantas concentradoras. En operaciones de gran escala, pequeñas variaciones en la recuperación o en la estabilidad del proceso pueden traducirse en impactos económicos relevantes. En este escenario, la gestión de la variabilidad operacional se convierte en un desafío crítico para asegurar la estabilidad de los indicadores claves de desempeño, tales como la recuperación de molibdeno, la ley del concentrado y el consumo de reactivos. El presente estudio tiene como objetivo evaluar el impacto de la metodología Six Sigma en la optimización de los procesos de recuperación de molibdeno en la planta selectiva de Chuquicamata. Para ello, se adoptó un enfoque cuantitativo sustentado en el ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), empleando datos operacionales correspondientes al año 2024, con el propósito de analizar las causas raíz que explican la inestabilidad del proceso y de estructurar una base metodológica para orientar estrategias de mejora continua. Se recopilieron datos relacionados con el porcentaje de recuperación de molibdeno, la ley de concentrado y el consumo de reactivos, específicamente ácido sulfúrico y sulfhidrato de sodio. En este contexto, el estudio utiliza herramientas estadísticas propias del enfoque Six Sigma, tales como análisis de regresión, gráficos de control estadístico y los diagramas de Pareto, con el fin de evaluar de manera estructurada la variabilidad operacional y fortalecer la comprensión del comportamiento del proceso. La implementación de la metodología Six Sigma contribuyó a la reducción de la variabilidad operativa y a la optimización de la recuperación de molibdeno, proporcionando un enfoque estructurado y basado en datos para el control de procesos críticos. Asimismo, la estabilización de los parámetros operativos entre turnos favoreció el mantenimiento de un rendimiento constante y predecible, aspecto fundamental para fortalecer la competitividad en el sector minero. En conclusión, la aplicación de Six Sigma no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también aporta un marco robusto para la gestión sostenible y la mejora continua de los procesos industriales.

PALABRAS CLAVE: Mejora continua, Six Sigma, recuperación de molibdeno, control estadístico de procesos, análisis cuantitativo, optimización operativa.

HIGHLIGHTS

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA SIX SIGMA EN LA VARIABILIDAD OPERATIVA EN LA PLANTA SELECTIVA DE MOLIBDENO DE CHUQUICAMATA

RODRIGO JAVIER PINTO ORELLANA

- Evaluar el impacto de la metodología Six Sigma en la optimización de procesos
- Se adopta un enfoque cuantitativo sustentado en el ciclo DMAIC
- Se consideraron datos de recuperación, ley de concentrado y consumo de reactivos
- La implementación contribuyó a reducción de variabilidad y aumento de recuperación
- Aporta un marco robusto de gestión sostenible y mejora continua de procesos

Tabla de contenido

1	Introducción.....	8
1.1	Impacto de la metodología Six Sigma: DMAIC.....	10
1.2	Objetivos de la investigación.....	11
2	Metodología	12
3	Resultados	15
3.1	Análisis de resultados	15
3.2	Discusión de resultados	19
3.3	Impacto de la metodología Six Sigma evaluado.....	19
4	Conclusiones	21
4.1	Trabajos Futuros.....	22
5	Referencias.....	23
6	Anexo 1: Revisión de plagio	25
7	Anexo 2: Aplicación Ciclo DMAIC	27

1 Introducción

La planta de flotación selectiva de molibdeno, constituye una etapa crítica dentro de la cadena de valor de la minería del cobre, tanto por el alto valor económico del molibdeno como subproducto estratégico, como por la complejidad inherente de los procesos metalúrgicos asociados a su separación. En la planta de flotación selectiva de molibdeno de la División Chuquicamata, la estabilidad operacional del circuito de flotación resulta determinante para asegurar niveles adecuados de recuperación, calidad del concentrado y eficiencia en el uso de reactivos. No obstante, la evidencia operacional y la literatura especializada coinciden en que estos procesos presentan una elevada sensibilidad a variaciones operacionales y geo-metalúrgicas, lo que se traduce en fluctuaciones significativas de los indicadores clave del desempeño (KPI), tales como la recuperación metalúrgica, la ley de concentrado y el consumo de reactivos (Donoso Ovalle et al., 2020; Castro, 2019; Wills & Finch, 2016).

Desde una perspectiva operacional, la experiencia acumulada en plantas de flotación selectiva de molibdeno muestra que la variabilidad del proceso no responde a una única causa aislada, sino a la interacción dinámica de múltiples variables críticas. Entre estas destacan el potencial electroquímico (Eh), el pH, el porcentaje de sólidos, la dosificación de reactivos y las diferencias en los modos de operación entre turnos de trabajo. Esta complejidad se ve acentuada por la variabilidad geo metalúrgica del mineral alimentado, que introduce cambios en la respuesta metalúrgica del sistema aun bajo condiciones operativas aparentemente estables (Huanca, 2024; Moreno, 2018). En este contexto, la gestión de la variabilidad operacional se convierte en un desafío técnico permanente, cuyo impacto trasciende el ámbito metalúrgico y se manifiesta directamente en los costos operacionales, la continuidad del proceso y el cumplimiento de los compromisos productivos establecidos en los planes anuales de producción.

La metodología Six Sigma ha sido ampliamente reconocida como un marco estructurado para el análisis y la reducción de variabilidad en procesos industriales, sustentando en la toma de decisiones basada en datos y en el uso sistemático de herramientas estadísticas (Antony, 2006; Tinoco, 2013). Six Sigma ha sido asociada a proyectos de mejora continua y a la implementación de iniciativas orientadas a la optimización de procesos. Sin embargo, su potencial como herramienta analítica y evaluativa en procesos industriales complejos ha sido menos explorado, existiendo una brecha entre su uso práctico en planta y su evaluación sistemática como marco metodológico de análisis (Meléndez, 2024; Fontalvo et al., 2024).

En este sentido, el ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar) ofrece una estructura metodológica que permite descomponer procesos complejos, evaluar su comportamiento y analizar la relación entre variables operacionales críticas y resultados metalúrgicos. Mas allá de su aplicación como herramienta de intervención, DMAIC puede ser utilizado como un marco analítico que facilita la evaluación cuantitativa de la variabilidad y el desempeño del proceso, permitiendo generar conocimiento y el control de procesos industriales (Antony, 2006).

El estudio adopta un enfoque analítico y evaluativo, utilizando la metodología Six Sigma y el ciclo DMAIC como marco metodológico para evaluar el impacto de la variabilidad operacional sobre el desempeño del proceso de flotación. A partir de los datos operacionales reales correspondientes al período 2024, se examina el comportamiento de los principales KPI del proceso, con el objetivo de

cuantificar las variables existentes, evaluar su efecto sobre la recuperación y analizar el potencial de Six Sigma como herramienta de apoyo para la gestión y el control estadístico de los procesos metalúrgicos.

Es importante precisar que, si bien el presente estudio utiliza datos operacionales reales y reporta mejoras observadas en indicadores clave de desempeño, su aporte principal es de carácter analítico y evaluativo. La investigación no contempla la ejecución directa de una intervención operacional formal ni la implementación institucional de mejoras en la planta, sino que utiliza metodología Six Sigma y el ciclo DMAIC como marco metodológico para el análisis del desempeño del proceso. En este sentido, el valor del trabajo radica en la evaluación cuantitativa de la variabilidad operacional, el análisis de su impacto sobre la recuperación de molibdeno y la generación de evidencia que respalda el uso de Six Sigma como herramienta analítica en procesos metalúrgicos.

En este contexto, la pregunta de investigación que guía el desarrollo del estudio es: ¿cómo impacta la metodología Six Sigma, utilizada como marco analítico, en la reducción de la variabilidad operativa y en el desempeño de la recuperación de molibdeno en la planta de flotación selectiva de Chuquicamata? La respuesta a esta interrogante busca aportar no solo a la comprensión del proceso específico estudiado, sino también a la discusión más amplia sobre el uso de metodologías de excelencia operacional como herramientas analíticas para la evaluación y gestión de procesos mineros-metalúrgicos. Para abordar esta problemática se propone una discusión de la literatura según la orientación mostrada en la Figura 1.

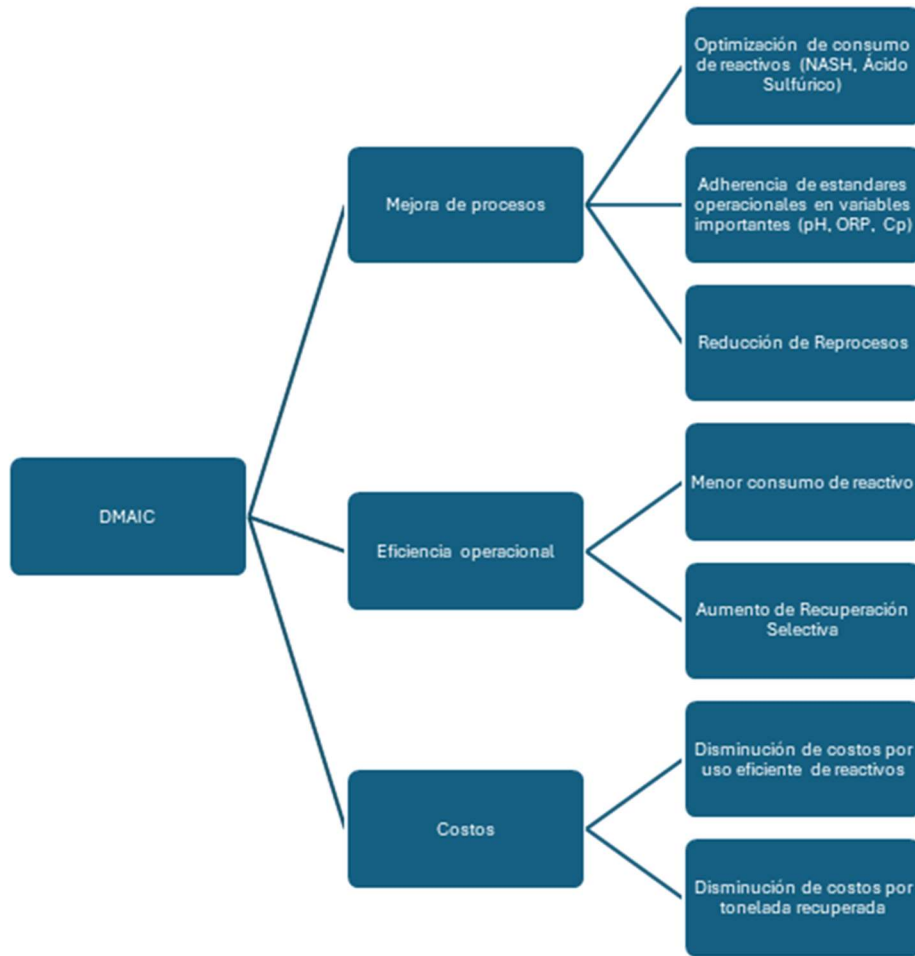


Figura 1: Mapa conceptual que orienta la discusión de la literatura (Fuente elaboración propia)

1.1 Impacto de la metodología Six Sigma: DMAIC

Dado el contexto operacional previamente descrito, se plantea la siguiente pregunta de investigación orientadora: ¿cómo impacta la metodología Six Sigma en la reducción de la variabilidad operativa y en el desempeño de la recuperación de molibdeno en la planta selectiva de Chuquicamata?

En la actualidad, la operación de la planta presenta un escenario caracterizado por una elevada variabilidad operacional, lo que dificulta el cumplimiento consistente de los compromisos productivos establecidos en el plan operativo anual. Esta condición evidencia la necesidad de evaluar la estandarización de los procesos y las formas de operación, así como de analizar el efecto de las principales variables operativas sobre los indicadores clave de desempeño, utilizando un enfoque estructurado y basado en datos.

En este contexto, la metodología Six Sigma se presenta como un marco metodológico robusto para el análisis y la gestión de la variabilidad en procesos industriales complejos. Más allá de su aplicación tradicional como herramienta de intervención, Six Sigma permite estructurar el análisis del desempeño del proceso mediante la toma de decisiones fundamentadas en evidencia estadística y el uso sistemático de herramientas de control y análisis de datos (Antony, 2006).

El ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar) fue utilizado en este estudio como una estructura metodológica para organizar el análisis del desempeño del proceso, más que como una herramienta de implementación operacional directa. Su aplicación permitió descomponer el sistema productivo en etapas analíticas, facilitando la identificación de fuentes de variabilidad, la evaluación cuantitativa de su impacto y la estructuración del análisis estadístico de los indicadores clave. Desde esta perspectiva, DMAIC se emplea como un marco de análisis que orienta la interpretación de datos operacionales y respalda la toma de decisiones basada en evidencia, sin implicar necesariamente la ejecución de cambios estructurales en la operación. Este enfoque resulta particularmente pertinente en procesos industriales complejos, donde la variabilidad inherente del sistema limita la aplicación directa de intervenciones experimentales (Antony, 2006; Clancy et al., 2022).

De esta manera, el presente estudio adopta la metodología Six Sigma y el ciclo DMAIC como un enfoque analítico para evaluar el impacto de la variabilidad operacional sobre la recuperación de molibdeno y el desempeño del proceso de flotación selectiva, contribuyendo a fortalecer la comprensión del proceso y a generar evidencia cuantitativa que respalde la gestión y el control de procesos metalúrgicos desde una perspectiva de excelencia operacional (Hardy et al., 2021).

1.2 Objetivos de la investigación

Entendido lo anteriormente discutido, el objetivo general de este trabajo es:

Evaluar el impacto de la metodología Six Sigma, sobre la variabilidad operativa y el desempeño del proceso de recuperación de molibdeno en la planta selectiva de Chuquicamata.

Los objetivos específicos son:

- Caracterizar la variabilidad operativa del circuito de flotación selectiva de molibdeno mediante el análisis de indicadores clave de desempeño.
- Evaluar las causas raíz que explican la inestabilidad observada en la recuperación de molibdeno.
- Analizar el impacto del enfoque Six Sigma, estructurado mediante el ciclo DMAIC, sobre la variabilidad operacional del proceso.

2 Metodología

Diseño del estudio:

Este estudio se basa en un enfoque cuantitativo, alineado con la metodología Six Sigma y el ciclo DMAIC, que se estructura en cinco etapas: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar. Este enfoque permite abordar el problema de variabilidad operativa de manera sistemática y estructurada, aplicando herramientas estadísticas para garantizar la precisión y consistencia en la evaluación de los resultados (Tinoco, 2013).

Datos utilizados en el estudio:

Se analizarán variables como el porcentaje de recuperación (proporción de molibdeno recuperado respecto al contenido inicial), la ley del concentrado (pureza del molibdeno obtenido en el producto final) y el consumo de reactivos (cantidad de insumos químicos utilizados en el proceso; ácido y sulfhidrato de sodio). Para estos análisis se utilizarán datos históricos de la planta de molibdeno de Chuquicamata del año 2024.

Instrumentos:

Los instrumentos utilizados en el presente estudio fueron definidos con el propósito de evaluar, caracterizar y analizar la variabilidad operacional del proceso de flotación selectiva de molibdeno, en coherencia con la evaluación de la metodología Six Sigma y con la estructura del ciclo DMAIC. Los instrumentos no se emplean como herramientas de implementación de mejoras en la operación, sino como medios para sustentar el análisis cuantitativo del desempeño del proceso y la evaluación de su estabilidad operacional (Aparicio Hernández et al., 2024).

En relación con la fase Definir, se utilizaron como instrumentos los indicadores de desempeño del proceso, entre los que se incluyen la recuperación de molibdeno, la ley de concentrado y el consumo de reactivos. Estos indicadores permiten delimitar el problema de investigación y establecer criterios objetivos para la evaluación del desempeño operacional, en concordancia con estudios que destacan la importancia de una adecuada definición de métricas críticas dentro del enfoque DMAIC (Carrillo et al., 2021).

Para la fase Medir, el principal instrumento corresponde a la base de datos operacionales del año 2024, la cual fue recopilada, depurada y validada con el fin de asegurar consistencia, trazabilidad y confiabilidad de la información. A partir de estos datos se construyeron métricas estadísticas descriptivas, tales como la media, desviación estándar y rangos de variación, orientadas a caracterizar el comportamiento inicial de los KPI y de las variables operacionales críticas. Este procedimiento se encuentra alineado con los principios de medición y análisis de variabilidad descritos sobre control estadístico de la calidad y Six Sigma (Gutierrez-Pulido & de la Vara Salazar, 2013).

En la fase analizar se aplicaron técnicas estadísticas y gráficos exploratorios para examinar relaciones entre variables operacionales y KPI, evaluando la existencia de patrones o tendencias que expliquen variaciones significativas en la recuperación de molibdeno o en el consumo de reactivos. Se emplearon análisis de dispersión y pruebas de hipótesis donde correspondió, permitiendo identificar relaciones estadísticamente significativas y potenciales causas de variabilidad en el proceso (Marín-Calderón et al., 2023).

En la fase Mejorar, y considerando el carácter investigativo del estudio, los instrumentos se orientaron a formular y evaluar propuestas de mejora continua basadas en la evidencia obtenida durante el análisis estadístico, sin ejecutar una implementación operacional formal. Este enfoque es

consistente con estudios recientes que utilizan Six Sigma y el ciclo DMAIC como herramientas para evaluar el impacto potencial de alternativas de mejora, manteniendo el énfasis en el análisis y la evaluación más que en la intervención directa del proceso (Medina & Abdul, 2023).

En la fase Controlar, se utilizó como instrumento un dashboard de seguimiento de KPI, el cual integra de manera visual los principales indicadores del proceso y permite evaluar la estabilidad operacional y sustentar el monitoreo del desempeño en el tiempo. La literatura reciente destaca que el uso de dashboards e indicadores facilita la consolidación de la mejora continua y el control estadístico de procesos complejos (Aparicio Hernández et al., 2024).

Prueba t de Student:

Con el objetivo de determinar si las variaciones observadas en los indicadores clave de desempeño del proceso corresponden a cambios sistemáticos y no a fluctuaciones aleatorias propias de la operación, se aplicó la prueba t de Student para muestras pareadas. Este contraste estadístico resulta adecuado cuando se comparan mediciones obtenidas del mismo sistema productivo en distintos períodos, permitiendo evaluar diferencias en la media bajo condiciones operacionales comparables.

En el presente estudio, la prueba t fue utilizada para analizar comparativamente los valores de recuperación de molibdeno, ley de concentrado y consumo específico de sulfhidrato de sodio (NaSH), considerando dos períodos definidos dentro del año 2024. El análisis se realizó bajo un nivel de significancia del 5 % ($\alpha = 0,05$), criterio ampliamente aceptado en estudios de ingeniería para la validación de diferencias estadísticas. Valores de p inferiores a dicho umbral fueron interpretados como evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de igualdad de medias, concluyendo que las diferencias observadas reflejan cambios reales en el comportamiento del proceso (Molina Arias, 2021).

Plan de Análisis de Datos:

El análisis de datos se desarrolló en etapas sucesivas, comenzando con un análisis estadístico descriptivo orientado a caracterizar el comportamiento central y la dispersión de los indicadores clave del proceso. Posteriormente, se aplicaron pruebas de hipótesis para evaluar diferencias significativas entre períodos operacionales, complementadas con análisis de regresión y herramientas de control estadístico para examinar la estabilidad del proceso en el tiempo.

Este enfoque permitió integrar la evaluación cuantitativa de la variabilidad con el análisis del desempeño metalúrgico, asegurando la consistencia metodológica y la validez de los resultados obtenidos. El tratamiento de los datos se realizó bajo criterios de confidencialidad y trazabilidad, garantizando la integridad de la información utilizada.

Riesgos de Sesgo Operacional

El análisis de datos operacionales en plantas mineras puede verse afectado por sesgos derivados de variaciones en la ejecución de procedimientos, diferencias entre turnos o en la experiencia de los operadores. Estos sesgos pueden impactar la consistencia de los KPI y distorsionar la interpretación de los resultados estadísticos, generando decisiones no deseadas (Moreno, 2018). Para mitigar este riesgo, se implementaron estrategias de estandarización y capacitación de operadores, así como la revisión cruzada de datos y validación mediante auditorías internas. Adicionalmente, el uso de sistemas automáticos de captura en línea (como PI Process Book) permite reducir la intervención manual y con ello minimizar errores humanos.

Incidencia de la variabilidad geo-metalúrgica

La variabilidad geo-metalúrgica, entendida como la heterogeneidad en la composición mineralógica y las propiedades físicas del mineral alimentado, representa un desafío crítico en la recuperación selectiva de molibdeno. Diferencias en la ganga, la presencia de minerales de cobre secundarios y la variabilidad en la distribución del molibdeno afectan directamente la eficiencia de flotación y la pureza del concentrado (Castro, 2019). Esta variabilidad puede conducir a desviaciones significativas en los KPI, incluso bajo condiciones operativas controladas, obligando a ajustar parámetros como pH, potencial electroquímico y dosificación de reactivos para mantener la estabilidad del proceso. Por lo tanto, la comprensión y gestión de la variabilidad geo-metalúrgica son fundamentales para el éxito de programas de mejora continua basados en Six Sigma.

3 Resultados

El análisis de los datos operativos recopilados entre enero a diciembre de 2024 evidenció un proceso con alta variabilidad en sus principales indicadores de desempeño. Se observaron fluctuaciones significativas entre turnos y una baja capacidad de control sobre los parámetros críticos.

3.1 Análisis de resultados

El análisis de los datos recopilados incluye la información operacional en el período de enero 2024 a diciembre 2024, son datos cada 2 horas.

El detalle completo de la implementación del ciclo DMAIC se presenta en el Anexo 2.

Resultados previos DMAIC

Antes de la implementación de la metodología DMAIC, el proceso presentaba una marcada variabilidad operacional. A partir de los registros operativos del año 2024, se evaluaron fluctuaciones importantes en los indicadores clave de desempeño, reflejando la ausencia de control operacional y una baja estandarización operacional entre los turnos.

Indicador	Media	Desviación estándar
Recuperación de molibdeno (%)	87	10,48
Ley de concentrado (%Mo)	47,57	2,5
Consumo de NaSH (kg/t)	6,73	3,26
Potencial electroquímico (Eh, mV)	-486	31.20

Tabla 1: Datos operacionales previo a la implementación DMAIC.

Los datos previos al control DMAIC muestran un proceso inestable, con pérdida de recuperación y excesivo consumo de reactivos, confirmando la necesidad de intervención para reducir la variabilidad y estandarización de la operación.

Resultados posteriores DMAIC

Tras la aplicación de la metodología DMAIC, la planta de flotación selectiva de molibdeno mostró mejoras significativas en los KPI. Se logró estabilizar los parámetros operativos críticos (pH, Eh, %sólidos, consumo de reactivos), disminuir el consumo de reactivos y aumentar la recuperación como la calidad del concentrado final.

Indicador	Media	Desviación estándar
Recuperación de molibdeno (%)	88	8,00
Ley de concentrado (%Mo)	47,42	2,1
Consumo de NaSH (kg/t)	6,55	3,13
Potencial electroquímico (Eh, mV)	-511	22,43

Tabla 2: Datos operacionales posterior a la implementación DMAIC.

Estadística Descriptiva

Se analizan los siguiente KPI:

- Porcentaje de Recuperación de Molibdeno: 88%
- Ley de Concentrado: 47%
- Consumo de Reactivos:
 - Sulfhidrato de Sodio: 7 gr/ton

Prueba de Hipótesis

Se realizaron pruebas t de Student para cada KPI:

- %Recuperación: La prueba muestra una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,001$) entre los valores antes y después de la intervención.

- Ley de Concentrado: No se observan diferencias significativas ($p = 0,927$), por lo que no podemos concluir que la media del período previo sea menor que la media obtenida posterior a la implementación.

- Consumo de Reactivos (NASH): Los resultados evidencian que no existe evidencia para concluir que la media del período previo sea mayor que la obtenida después de la implementación ($p = 0,345$).

Modelo Predictivo

En el marco del análisis de impacto de la metodología Six Sigma, se desarrolló un modelo esquemático del comportamiento del proceso, cuyo objetivo fue representar de manera conceptual las relaciones entre las variables operativas críticas que influyen en la recuperación de molibdeno. Este modelo permitió visualizar la interacción entre pH, potencial electroquímico (Eh), porcentaje de sólidos, recuperación y consumo de reactivos, facilitando la identificación preliminar de las variables con mayor influencia en la estabilidad del proceso.

Indicador	p-valor	Resultado estadístico
Recuperación de molibdeno (%)	0,001	Diferencia significativa (↑)
Ley de concentrado (%Mo)	0,927	No existe diferencia significativa
Consumo de NaSH (kg/t)	0,345	No existe diferencia significativa

Tabla 3: Resultados aplicación Prueba t Student.

Si bien este modelo esquemático cumplió un rol orientador dentro de la fase Analizar del ciclo DMAIC, su alcance fue descriptivo y no alcanzó a constituir un modelo predictivo cuantitativo plenamente funcional. La imposibilidad de avanzar hacia un modelo predictivo se debió a limitaciones operacionales de los datos, tales como diferencias en la frecuencia de muestreo, ausencia de series de tiempo homogéneas y variabilidad no controlada entre turnos. Estas condiciones impidieron construir un modelo matemático capaz de anticipar el comportamiento del proceso con un nivel adecuado de precisión.

A pesar de estas restricciones, el modelo esquemático permitió estructurar de forma más rigurosa la interpretación de los resultados estadísticos y orientar la priorización de variables para futuras evaluaciones del proceso. Como siguiente paso, se considera necesario desarrollar un modelo predictivo completo, basado en técnicas multivariantes o herramientas de machine learning, que permita anticipar desviaciones en los KPI críticos y entregar soporte operativo en tiempo real. La construcción de dicho modelo requerirá datos de mayor resolución, integración de sensores en línea y una plataforma analítica capaz de consolidar las condiciones operacionales del proceso rougher y de las etapas de limpieza.

Control Estadístico del Proceso

El control estadístico del proceso se implementa para monitorear en línea la estabilidad de los KPI críticos del circuito de flotación selectiva de molibdeno como son la %Recuperación Mo, la Ley de concentrado %Mo, el potencial electroquímico, el pH y el consumo específico de NASH. De esta manera podemos detectar de forma temprana desviaciones atribuibles a causas especiales.

Se utilizaron gráficos de control (I-MR) para el seguimiento de cada KPI, como por ejemplo el de la Figura 2.

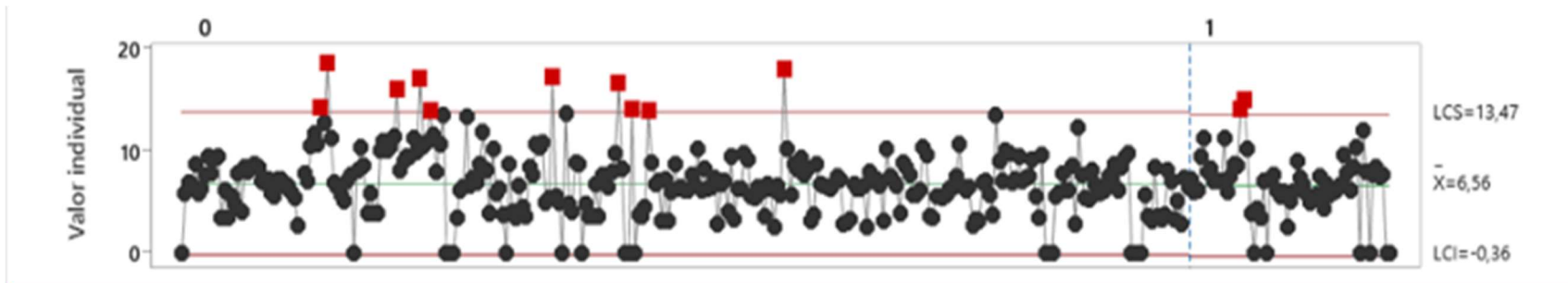


Figura 2: Grafica de Control, consumo de NASH

3.2 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en este estudio confirman que el proceso de flotación selectiva de molibdeno presenta una elevada sensibilidad a la variabilidad operacional, coherente con lo reportado en la literatura especializada para procesos metalúrgicos complejos (Castro, 2019). La reducción observada en la dispersión de los indicadores clave de desempeño, particularmente en la recuperación de molibdeno y en el potencial electroquímico, evidencia que la variabilidad operacional constituye un factor determinante en la estabilidad del proceso. El aumento promedio de la recuperación de molibdeno desde 87% a 88%, si bien puede parecer marginal desde una perspectiva puramente numérica, adquiere relevancia significativa al considerar la escala industrial del proceso y el alto valor económico del molibdeno como subproducto estratégico. Estudios recientes señalan que incrementos aparentemente pequeños en recuperación pueden traducirse en impactos económicos relevantes en plantas de gran capacidad, especialmente cuando van acompañados de una reducción sostenida de la variabilidad (Huanca, 2024). De manera similar, la reducción del consumo específico de sulfhidrato de sodio (NaSH) observada en el período posterior al análisis bajo el enfoque DMAIC no solo representa una disminución directa de costos operacionales, sino que también refleja una mayor estabilidad del proceso. La literatura indica que una dosificación más estable de reactivos contribuye a reducir desviaciones metalúrgicas, minimizar reprocesos y mejorar la predictibilidad del desempeño del circuito de flotación (Castro, 2019). Desde una perspectiva metodológica, los resultados refuerzan lo planteado por Antony et al. (2017), que destaca que la principal fortaleza de Six Sigma radica en su capacidad para reducir la variabilidad mediante decisiones basadas en datos. En este estudio, el uso del ciclo DMAIC como marco analítico permitió estructurar el análisis del proceso, evaluar cuantitativamente la variabilidad y fortalecer el control estadístico, sin necesidad de ejecutar una intervención operacional formal. Este enfoque resulta particularmente pertinente en contextos mineros, donde las restricciones operacionales y la variabilidad inherente del mineral dificultan la implementación directa de cambios estructurales. En conjunto, los hallazgos del presente trabajo aportan evidencia empírica que respalda el uso de Six Sigma como herramienta analítica para la evaluación de procesos metalúrgicos complejos, contribuyendo a la comprensión del impacto de la variabilidad operacional sobre el desempeño del proceso de flotación selectiva de molibdeno.

3.3 Impacto de la metodología Six Sigma evaluado

La implementación del ciclo DMAIC bajo el enfoque Six Sigma permitió reducir la variabilidad operativa y mejorar la estabilidad de los principales indicadores metalúrgicos del circuito de flotación selectiva de molibdeno. Los resultados obtenidos posterior a la intervención permiten establecer que la metodología no solo entregó un marco estructurado para el análisis de causa raíz, sino que también propició mejoras cuantificables en la recuperación y el control del proceso, en concordancia con lo planteado por autores como Antony (2006) y Meléndez (2024), quienes destacan que la principal fortaleza de Six Sigma radica en su capacidad para reducir la variabilidad mediante decisiones basadas en datos. A partir de esto es que se produjo mejoras significativas en los indicadores claves del proceso de flotación selectiva de molibdeno (Figura 3). Con el fin de evaluar y monitorear el comportamiento de las variables operativas, se diseñó un dashboard de seguimiento, presentado en la Figura 3, que permite analizar de manera integrada los principales KPI de la planta de flotación

selectiva de molibdeno y respaldar la toma de decisiones frente a desviaciones observadas en las variables críticas del proceso.

Reducción de la variabilidad operacional

Previo a la intervención, los datos operativos mostraban un proceso inestable, con desviaciones estándar elevadas en recuperación, potencial electroquímico y consumo de reactivos. Tras la evaluación del desempeño operacional bajo el enfoque DMAIC, los KPI mostraron una reducción de la dispersión, destacándose lo siguiente:

Recuperación de molibdeno: aumento de un promedio de 87% a un 88%, con una disminución en la dispersión de 10,48% a 8,00%, evidenciando un mayor control sobre la flotación rougher.

Potencial electroquímico (Eh): la desviación estándar disminuyó de 31,2 mV a 22,43 mV, indicando un manejo más consistente del ambiente electroquímico de flotación.

Consumo de NASH: se redujo en un 3% el consumo de NASH, optimizando así los costos operativos.

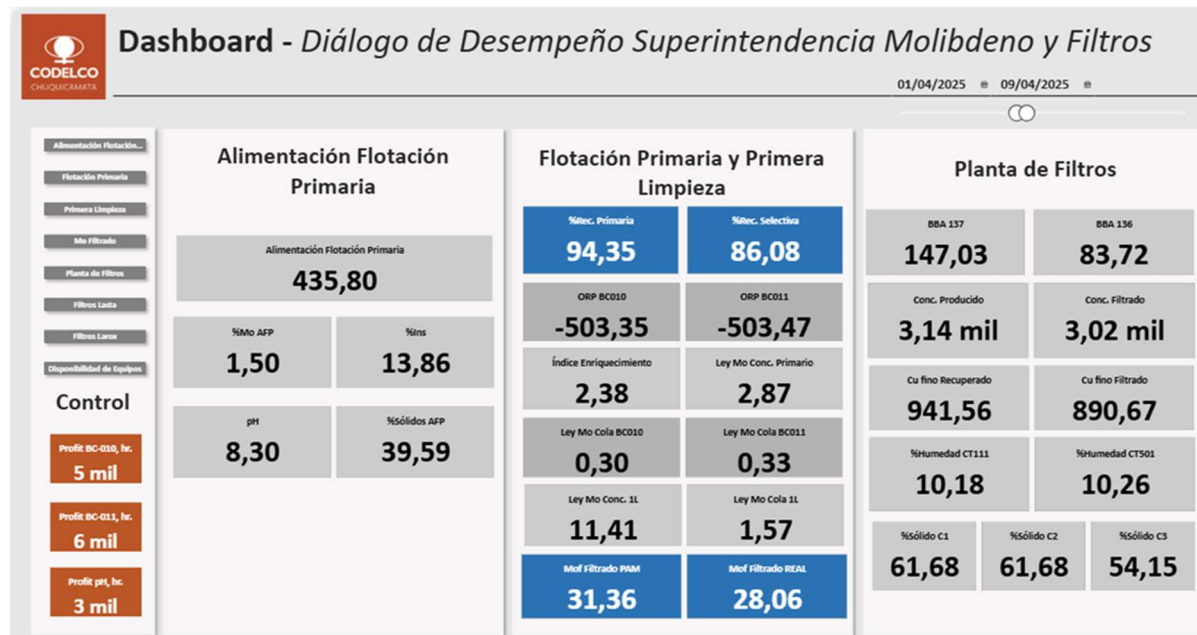


Figura 3: Dashboard de seguimiento y control de KPI.

4 Conclusiones

La aplicación de la metodología Six Sigma mediante el ciclo DMAIC permitió demostrar, que es posible reducir la variabilidad del circuito de flotación selectiva de molibdeno y mejorar la estabilidad de sus indicadores críticos en la División Chuquicamata. Desde la perspectiva de un proceso altamente sensible a cambios mineralógicos y operacionales, los resultados confirman que la integración de herramientas estadísticas, estandarización operacional y análisis sistemático de causas raíz contribuyen a una operación más consistente y controlada.

Con estos resultados es posible responder directamente la pregunta de investigación: la metodología Six Sigma impacta de manera efectiva en la reducción de la variabilidad operativa y en la mejora de la recuperación de molibdeno, al entregar un marco estructurado que permite estabilizar parámetros críticos, disminuir la dispersión de los KPI y fortalecer el control estadístico del proceso. Esto se reflejó en un aumento de la recuperación de 87% a 88% con una reducción significativa de la desviación estándar ($p < 0,001$), junto con una mejora en la estabilidad del potencial electroquímico (Eh) y del consumo específico de NaSH, factores que inciden directamente en la eficiencia del circuito rougher y en las etapas sucesivas de limpieza.

Se caracterizó la variabilidad operativa del circuito de flotación, mediante el análisis detallado de los KPI registrados durante el año 2024. La evaluación estadística permitió evidenciar una marcada dispersión en parámetros críticos tales como recuperación, pH, Eh y consumo de NASH, lo que confirmó la presencia de un proceso altamente inestable y sensible a las condiciones operativas y mineralógicas. Así permitieron establecer una línea base cuantitativa que fundamentó la necesidad de intervención mediante el ciclo DMAIC.

La identificación y causa raíz se llevó a cabo utilizando herramientas propias del ciclo DMAIC, tales como análisis de Ishikawa, Pareto y revisión de condiciones operativas. Este análisis permitió determinar que la inestabilidad del proceso estaba fuertemente asociada a variaciones no controladas en el potencial electroquímico, diferencias operacionales entre equipos de trabajo, desviaciones en el pH, así como la influencia de la variabilidad geo metalúrgica. Estos hallazgos no solo confirmaron la hipótesis inicial, sino que entregan evidencia para priorizar las variables críticas y definir intervenciones enfocadas en la estandarización de la operación.

La aplicación del ciclo DMAIC permitió reducir la variabilidad operacional y mejorar la estabilidad de los parámetros más influyentes en la recuperación de molibdeno. Las acciones de estandarización, control estadístico del proceso y ajustes operacionales implementados durante las etapas de Mejorar y Controlar generaron una disminución significativa de la dispersión de los KPI, evidenciada en la reducción de la desviación estándar.

Si bien no se observaron cambios estadísticamente significativos en la ley de concentrado ni en el consumo medio de reactivos, la disminución de su variabilidad constituye un avance relevante, pues permite una operación más predecible y menos susceptible a desviaciones que comprometan la calidad del producto o incrementen los costos operativos. En procesos de flotación selectiva, donde pequeñas fluctuaciones de pH, Eh o %sólidos pueden afectar el rendimiento metalúrgico en un corto plazo, esta estabilidad representa un aporte concreto a la continuidad operacional.

La principal contribución de este estudio radica, con evidencia real, que la metodología Six Sigma aplicada de manera estructurada mediante el ciclo DMAIC, es una herramienta efectiva para reducir la variabilidad de un proceso metalúrgico altamente sensible como es la flotación selectiva de molibdeno

4.1 Trabajos Futuros

Como parte de los trabajos que exceden el alcance de este proyecto de grado y que requieren de una investigación adicional tendiente a nuevos proyectos, se plantean lo siguiente:

No fue posible implementar completamente el modelo predictivo propuesto, debido a la disponibilidad y estructura de los datos operacionales. Por ello, como siguiente paso natural de esta línea de investigación, es necesario desarrollar un modelo predictivo robusto que permita anticipar desviaciones en los KPI críticos y optimizar en línea la toma de decisiones operativas. La integración futura de técnicas de machine learning, modelos basados en series de tiempo y mayor capacidad sensorial en línea permitirá avanzar hacia un control avanzado del proceso, complementando el control estadístico tradicional aplicado en esta investigación.

5 Referencias

- Antony, J. (2006). Six Sigma for service process. *Business Process Management Journal*, 12(2), 234–248. <https://doi.org/10.1108/14637150610657558>.
- Antony, J., Snee, R., & Hoerl, R. (2017). Lean Six Sigma: Yesterday, today and tomorrow. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 34(7), 1073–1093. <https://doi.org/10.1108/IJORM-03-2016-0035>.
- Aparicio Hernández, J. A., Mora Castañeda, E., & López Cruz, G. (2024). Herramientas estadísticas para reducir la variabilidad en los procesos con Six Sigma. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(6), 1764–1781. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6.14940.
- Carrillo, M. S., Severiche, C., Peralta, J. T., Ortega, V. P., & Vargas, L. E. (2021). Reducción de ruido industrial en un proceso productivo metalmecánico: Aplicación de la metodología DMAIC de Lean Seis Sigma. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 15(30), 41–48. <https://doi.org/10.31908/19098367.1819>.
- Castro, S. (2019). Challenges in flotation of Cu-Mo sulfide ores in sea water. *Water in mineral processing*, 29-40.
- Clancy, R., Bruton, K., O’Sullivan, D. T. J., & Cloonan, A. J. (2022). The HyDAPI framework: A versatile tool integrating Lean Six Sigma and digitalisation for improved quality management in Industry 4.0. *International Journal of Lean Six Sigma*. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-12-2021-0214>.
- Codelco. (2022). Memoria anual y estrategia de negocios 2022: División Chuquicamata.
- Donoso Ovalle, R., Valenzuela Klagges, B., Soto Bubert, A., Muñoz Pavlov, V., & Valenzuela Klagges, I. (2020). Producción chilena de molibdeno: influencia en el mercado mundial y su comportamiento exportador. *Revista de Economía del Rosario*, 23(1), 149–172.
- Fontalvo, T., Banquez, A., & Fontalvo, A. (2024). A multivariate Six Sigma-based capacity indicator for process performance evaluation. *Quality Engineering*, 36(1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/08982112.2023.2234567>.
- Gutiérrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2021). Control estadístico de la calidad y Seis Sigma (3.ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Hardy, D. L., Kundu, S., & Latif, M. (2021). Productivity and process performance in a manual trimming cell exploiting Lean Six Sigma (LSS) DMAIC – a case study in laminated panel

- production. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 38(9), 1861–1879. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-07-2020-0242>.
- Huanca, C. J. (2024). Implementación de la metodología Six Sigma en el circuito de flotación de una planta concentradora de cobre.
- Kaizen Institute. (2025). *Lean Six Sigma: Mejora continua*. Kaizen Institute. <https://kaizen.com/es/insights-es/lean-six-sigma-mejora-continua/>
- Llauce Santamaria, R. Y., Saldaña Miranda, M. Y., & Olivera Aldana, M. F. (2024). Monografía pruebas de hipótesis t student. Universidad Nacional de Jaén. <https://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/791>.
- Medina, C. A., & Abdul, I. (2023). Lean Six Sigma y mejora de la productividad en el servicio de reparación de equipos de minería en una empresa metalmeccánica. *Industrial Data*, 26(2), 239–265. <https://doi.org/10.15381/idata.v26i2.25462>.
- Meléndez, C. M. H. (2024). Implementación de metodología DMAIC para la mejora de procesos en la industria.
- Molina Arias, M. (2021). Paso a paso. Prueba de la t de Student para muestras independientes. *Revista Electrónica Anestesiología*, 14(8). <https://doi.org/10.30445/rear.v14i8.1060>.
- Moreno, D. G. (2018). Control estadístico y sesgo operacional en minería. *Revista Chilena de Ingeniería*, 26(4), 652–662.
- Tinoco, F. (2013). Six Sigma en logística: aplicación en el almacén de una unidad minera. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*, 16(1), 67–74.
- Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016). *Wills' mineral processing technology* (8th ed.). Butterworth-Heinemann. <https://www.sciencedirect.com/book/9780080970530/wills-mineral-processing-technology>.

6 Anexo 1: Revisión de plagio



Página 1 de 41 - Portada

Identificador de la entrega trnoid::3117541805863

03 PG2 Rodrigo PInto MIIS 2025.docx

Universidad del Desarrollo

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trnoid::3117541805863

Fecha de entrega
18 dic 2025, 4:55 a.m. GMT-3

Fecha de descarga
18 dic 2025, 5:07 a.m. GMT-3

Nombre del archivo
03+PG2+Rodrigo+PInto+MIIS+2025.docx

Tamaño del archivo
3.9 MB

34 páginas

5490 palabras

38.321 caracteres



Página 1 de 41 - Portada

Identificador de la entrega trnoid::3117541805863




22% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

► Bibliografía

Fuentes principales

14%		Fuentes de Internet
5%		Publicaciones
19%		Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitan distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo. Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

7 Anexo 2: Aplicación Ciclo DMAIC

Etapa 1-Definir

Herramienta 0: DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA & SITUACIÓN

CODELCO - División Chuquibambilla - Planta de Flotación Selectiva Molibdeno

La planta selectiva de molibdeno, tiene como objetivo principal recuperar el molibdeno a partir del concentrado de cobre mediante el proceso de flotación selectiva. Este proceso consiste en la flotación del molibdeno en células convencionales y agregando depresores de cobre para lograr la separación. Obteniendo como producto final un concentrado de molibdeno con un 48% Mo y una cola que correspondería a un concentrado de cobre con un 30%Cu.

Actualmente, se observa una variabilidad en la recuperación de molibdeno, la cual a estado afectada por las variaciones de pH, %Sólidos, potencial redox. Esto genera una reducción en la producción teniendo como consecuencia el no cumplimiento del compromiso productivo y pérdidas económicas.

Herramienta 1: SEIS PREGUNTAS BÁSICAS ó 5W+2H

<p>1 ¿Qué?</p> <p>Problemas de Variabilidad en la recuperación selectiva de molibdeno</p>	<p>2 ¿Quién?</p> <p>Afecta a los operadores, jefes de turno, supervisores y área de metalurgia de la planta</p>	<p>3 ¿Cómo?</p> <p>a través de descontrol y variaciones de las variables críticas del proceso: pH, %Sólidos, potencial electroquímico, cinética del proceso</p>
<p>6 ¿Por qué?</p> <p>Falta de estandarización del proceso, mal funcionamiento de los equipos, deficiencia en el control y mal funcionamiento de sensores utilizados en el proceso</p>	<p>5 ¿Dónde y cuando?</p> <p>Ocurre en el área 400 que corresponde a la flotación primaria (rougher). Principalmente en los cambios de turno o en las variaciones de flujo desde planta concentradora</p>	<p>4 ¿Cuánto?</p> <p>Se observa una reducción en 3% de recuperación selectiva</p>

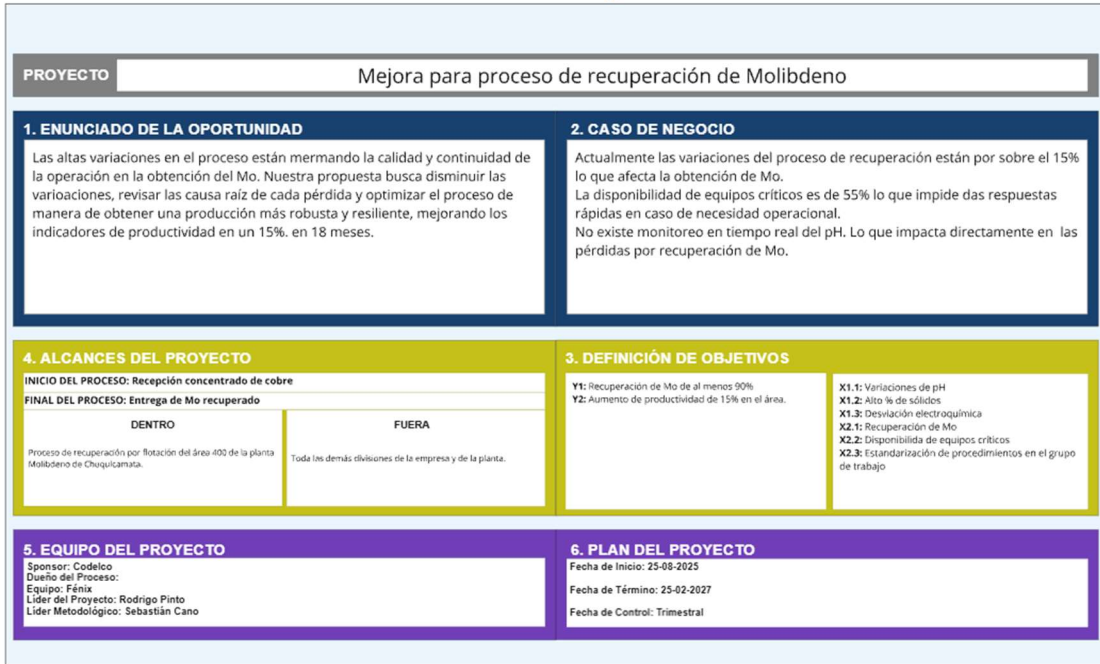
Herramienta 2: ECOSISTEMA DEL PROBLEMA



Herramienta 3: LA VOZ DEL CLIENTE (VoC)

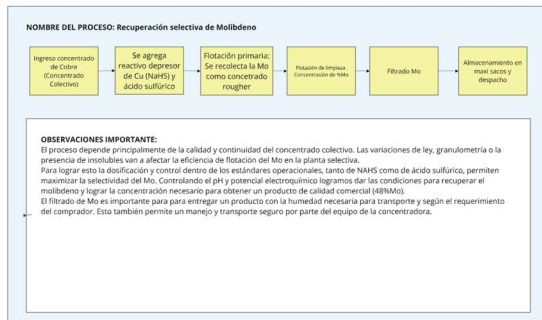
CLIENTE	LA VOZ	NECESIDADES	REQUERIMIENTOS CRÍTICOS
Gerencia Planta	Se necesita cumplir el compromiso de recuperación selectiva	Reducir variabilidad de la recuperación	Rec Mo selectiva en 90% con 1% de desviación estándar
Metalurgista	Minimizar las pérdidas de molibdeno en la celda	Minimizar pérdidas metalúrgicas	Rec Mo en relave menos a 0,15%Mo
Operador	Se opera con pH fuera del estándar y no se sabe cuando sucede	Información en línea y sin errores (equipo calibrado)	Sistema de monitoreo de variables críticas 100% del tiempo en línea.
Mantenimiento	Las bombas de concentrado primario fallan muy seguido	equipos críticos en buen estado y con su plan de mantenimiento al día	Disponibilidad de equipos críticos mayor al 95%

Herramienta 4: PROJECT CHARTER

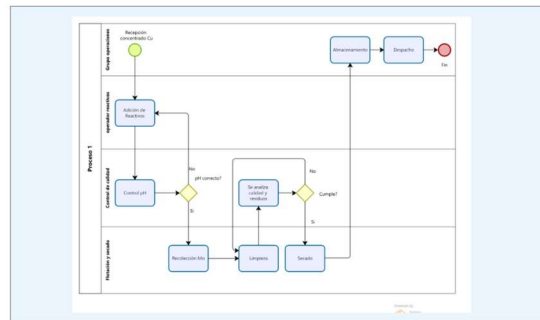


Etapa 2 – Medir

Herramienta 0: DIAGRAMA DE PROCESO



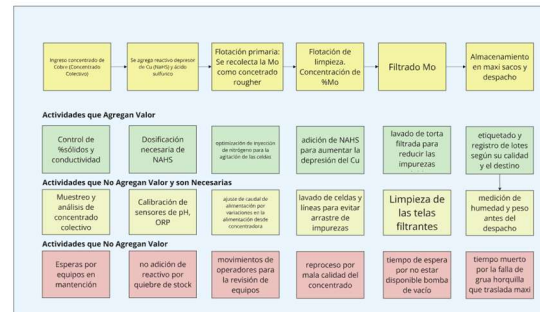
Herramienta 1: DIAGRAMA DE FLUJO (BPMN)



Herramienta 2: SIPOC

SUPPLIERS	INPUTS	PROCESS	OUTPUTS	CUSTOMERS
Planta de flotación colectiva (Cu-Mo) Proveedores de reactivos Sistema de agua industrial Mantenimiento e instrumentación	Concentrado colectivo Cu-Mo NAHS Ácido sulfúrico CaI (CaCl) Expunentes Agua de proceso Energía eléctrica Aire comprimido	1. Recepción del concentrado colectivo 2. Acondicionamiento químico (destrucción del Cu) 3. Flotación rougher de Mo 4. Limpieza de Mo (remoción de Cu y Fe) 5. Filtrado y sacado del concentrado final 6. Análisis de laboratorio y control de calidad 7. Almacenamiento y despacho del producto final	Concentrado final de Mo (48%) Reflaves de flotación (con Cu) Reportes de calidad (leyes y humedad) Subproductos de limpieza Información para optimización	cliente exportador (empresa compradora de Mo) Área de comercialización de la minera. Control de gestión / reportabilidad. Planta de procesamiento de refines a planta de Cu, filtros de concentrado de CuI

Herramienta 3: DESPERDICIOS



ETAPA PLANIFICACIÓN

LUGAR: Planta de Flotación Selectiva Molibdeno – División Chuquicamata	FECHA / HORA: 31 de Julio de 2025 a las 11:00
OBJETIVO: Observar en terreno las condiciones operacionales, identificar desviaciones, validar estándares de trabajo y levantar oportunidades de mejora en la etapa de flotación	ZONAS DE TRABAJO: Flotación rougher, Sala de control, dosificación de reactivos
PARTICIPANTES: Operador de terreno, Jefe de control de proceso, Metalurgista	
ANTECEDENTES PREVIOS: La planta a presentado variabilidad en los resultados de recuperación selectiva de molibdeno durante los últimos meses. Se han detectado desviaciones como el pH, el potencial redox y el % de sólidos, lo que afecta la eficiencia del proceso	

DOCUMENTO DE TRABAJO | GENBA WALKS | 2023

ETAPA EJECUCIÓN

OBSERVACIONES: <ul style="list-style-type: none">El Jefe de control de proceso reporta que existe una desviación en la medición de lectura de pH y la muestra obtenida manualmente.Se obtiene que existe variación de los % de sólidos de alimentación a planta que afecta en el resultado de recuperación.Mayor adición de NASH en terreno que lo indicado en sala de control	MEDICIONES: <ul style="list-style-type: none">Lectura de pH en línea 9,1 vs la lectura de pH en muestra manual de 8.6Potencial redox promedio en -500 mV%sólidos en alimentación planta de 38%Caudal de NASH oscilando entre los 10 lts/min a 19 lts/min
VOZ DEL USUARIO (VOU): <ul style="list-style-type: none">Los instrumentos de medición no siempre están calibrados, lo que genera desconfianza.Hay mucho cambio de condiciones en poco tiempo, lo que nos obliga a operar de forma reactiva.La dosificación de NASH a veces se corta y el sistema no lo detecta.Tenemos sobre dosificación de NASH y no se controla de manera efectiva	

DOCUMENTO DE TRABAJO | GENBA WALKS | 2024

ETAPA EJECUCIÓN

REGISTRO FOTOGRAFICO:



DOCUMENTO DE TRABAJO | GENBA WALKS | 2024

ETAPA ANALISIS Y ACCION

HALLAZGOS IMPORTANTES

- Desfase entre medición en línea y manual de los parámetros críticos (pH).
- Variabilidad en la dosificación de reactivos sin causa operacional clara.
- Falta de estandarización en la calibración de los instrumentos de medición.

OPORTUNIDADES DE MEJORAS

- Implementar rutina diaria de validación de instrumentos con medición manual.
- Establecer alarmas por variabilidad en la dosificación de reactivos.
- Capacitar a los operadores sobre la interpretación de tendencias y acciones proactivas a realizar.

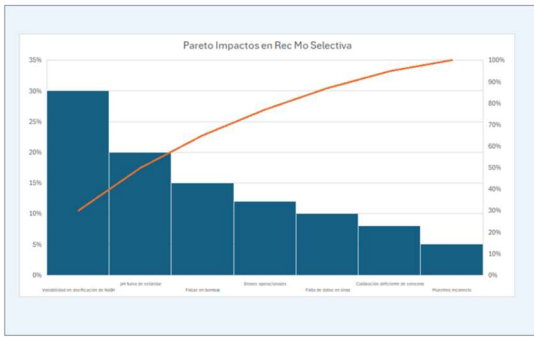
PROXIMOS PASOS

- Reunión con el área de instrumentación para revisar pautas y programa de calibración de equipos de medición.
- Implementar control y registro de las mediciones de los equipos críticos.
- Levantar proyecto de automatización en el control de dosificación de NASH.
- En 15 días realizar caminata de verificación de procesos para evaluar los avances de las iniciativas.

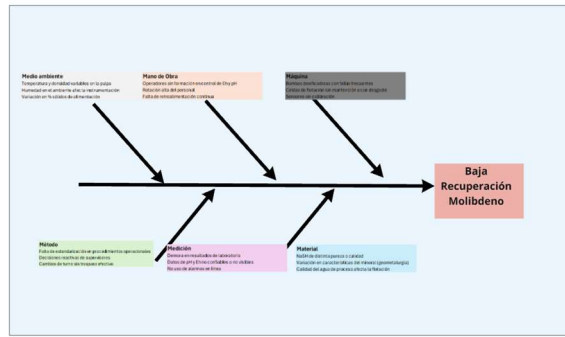
DOCUMENTO DE TRABAJO | GENBA WALKS | 2024

Etapa 3 – Analizar

Herramienta 1: ANALISIS DE PARETO



Herramienta 2: ANALISIS CAUSA RAIZ (Causas Basales)



Herramienta 3: 5 ¿POR QUÉ?

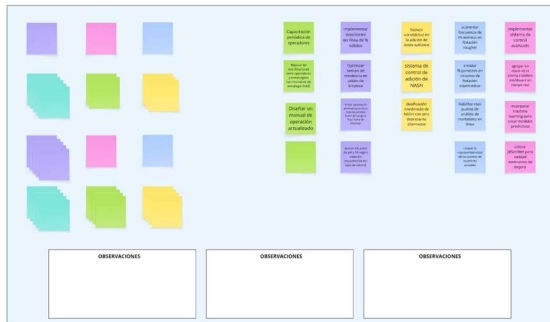
5 M's	Causas Basales	1° ¿Por qué?	2° ¿Por qué?	3° ¿Por qué?	4° ¿Por qué?	5° ¿Por qué?
4. Métodos	Falta de procedimientos operativos estandarizados	¿Por qué no hay procedimientos estandarizados?	¿Por qué no se estandarizaron los procedimientos?	¿Existió un estándar?	¿Por qué no se estandarizó?	¿Por qué no se estandarizó?
	Respuesta operativa reactiva	¿Por qué se responde de manera reactiva?	¿Por qué no se responde de manera proactiva?	¿Por qué no se responde de manera proactiva?	¿Por qué no se responde de manera proactiva?	¿Por qué no se responde de manera proactiva?
2. Materiales	Variabilidad en la pureza y dosificación de sales	¿Por qué hay variabilidad en la pureza y dosificación de sales?	¿Por qué no se controla la pureza y dosificación de sales?	¿Por qué no se controla la pureza y dosificación de sales?	¿Por qué no se controla la pureza y dosificación de sales?	¿Por qué no se controla la pureza y dosificación de sales?
	Falta de análisis geoquímico	¿Por qué no se hacen análisis geoquímicos?	¿Por qué no se hacen análisis geoquímicos?	¿Por qué no se hacen análisis geoquímicos?	¿Por qué no se hacen análisis geoquímicos?	¿Por qué no se hacen análisis geoquímicos?
3. Medio Ambiente	Variabilidad del % sólidos en la alimentación	¿Por qué hay variabilidad en el % sólidos en la alimentación?	¿Por qué no se controla el % sólidos en la alimentación?	¿Por qué no se controla el % sólidos en la alimentación?	¿Por qué no se controla el % sólidos en la alimentación?	¿Por qué no se controla el % sólidos en la alimentación?
	Temperatura ambiental afecta el desempeño del proceso	¿Por qué la temperatura ambiental afecta el desempeño del proceso?	¿Por qué no se controla la temperatura ambiental?	¿Por qué no se controla la temperatura ambiental?	¿Por qué no se controla la temperatura ambiental?	¿Por qué no se controla la temperatura ambiental?
1. Mano de Obra	Formación técnica insuficiente	¿Por qué la formación técnica es insuficiente?	¿Por qué no se capacita al personal?	¿Por qué no se capacita al personal?	¿Por qué no se capacita al personal?	¿Por qué no se capacita al personal?
	Alta rotación y reemplazos sin instrucción adecuada	¿Por qué hay alta rotación y reemplazos sin instrucción adecuada?	¿Por qué no se instruye al personal nuevo?	¿Por qué no se instruye al personal nuevo?	¿Por qué no se instruye al personal nuevo?	¿Por qué no se instruye al personal nuevo?
5. Máquinas	Bombas dosificadoras sin mantenimiento preventivo	¿Por qué no se hacen mantenimientos preventivos a las bombas dosificadoras?	¿Por qué no se hacen mantenimientos preventivos a las bombas dosificadoras?	¿Por qué no se hacen mantenimientos preventivos a las bombas dosificadoras?	¿Por qué no se hacen mantenimientos preventivos a las bombas dosificadoras?	¿Por qué no se hacen mantenimientos preventivos a las bombas dosificadoras?
	Sensares de pH/Eh sin calibración frecuente	¿Por qué no se calibran los sensores de pH/Eh frecuentemente?	¿Por qué no se calibran los sensores de pH/Eh frecuentemente?	¿Por qué no se calibran los sensores de pH/Eh frecuentemente?	¿Por qué no se calibran los sensores de pH/Eh frecuentemente?	¿Por qué no se calibran los sensores de pH/Eh frecuentemente?

Herramienta 4: IDENTIFICACIÓN DE POTENCIALES MEJORAS INICIALES

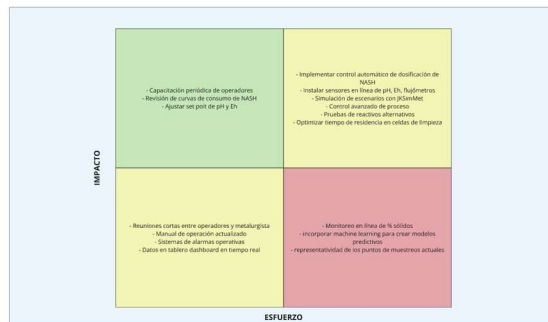
Iniciativa	Justificación basada en los 5 porqués
Estandarizar los Procedimientos Operativos en Flocación selectiva	Para reducir la variabilidad entre turnos y decisiones operativas subjetivas
Automatizar dosificación de NaSH y medición de pH/Eh	Para eliminar la dependencia del juicio del operador y asegurar parámetros constantes
Capacitación técnica continua al personal operativo	Para elevar el nivel de comprensión del proceso y respuesta ante desviaciones
Implementar dashboard de monitoreo en tiempo real (PI System)	Para visualizar en línea los parámetros críticos y actuar proactivamente
Crear un comité técnico de mejora continua	Para institucionalizar el análisis de causa raíz y las acciones correctivas
invertir en sensores robustos con mantenimiento programado	Para asegurar la calidad y confiabilidad de los datos que sustentan decisiones

Etapa 4 – Mejorar

Herramienta 1: BRAINSTORMING



Herramienta 2: MATRIZ DE PRIORIZACIÓN



Herramienta 3: MEJORAS SELECCIONADAS

	CAUSA RAIZ	INICIATIVA/MEJORA	IMPACTO ESPERADO
1	Variabilidad en parámetros pH, Eh, NSólidos	Implementar checklist diario + capacitación operadores	Mayor control operativo, reducción de variabilidad
2	Sobrecosto de NaSH por dosificación manual	Control automático de dosificación como control de Eh	Reducción de consumo de reactivo, ahorro en costos y menos variabilidad
3	Fluctuaciones en flujo de alimentación a planta y aireación de celdas de flocación	Automatización de flujo de alimentación y control de aire	Estabilidad del proceso, mejor recuperación y mayor calidad de
4	Selectividad de Mo vs Cu con reactivos actuales	Pruebas piloto con reactivo alternativo	reducción de costo y mejor selectividad de Mo

Herramienta 5: PLAN DE MEJORAS - CARTA GANTT

Actividad / Mejora	Responsable	Sem 1-2	Sem 3-4	Sem 5-6	Sem 7-8	Sem 9-10	Sem 11-12	Sem 13-14	Sem 15-16
Capacitación a + checklists	plta de Turno	█	█						
Sistema de operación	Metalurgia								
Control automático de dosificación de NaSH	Metalurgia + Instrumentación		█	█	█				
Automatización parcial de válvulas y sensores de pH	Mantenimiento + Automatización				█	█			
Pruebas piloto con reactivo alternativo (NaSH + complementario)	Metalurgia Senior + Laboratorio						█	█	█

Herramienta 3: FICHAS DE INICIATIVAS DE MEJORAS

1 INICIATIVA DE MEJORA: Capacitación + Checklist diario de operaciones

ACCIONES OPERATIVAS:

- Listado de parámetros críticos
- Capacitar a los operadores
- Implementar check list operacional. Físico o digital
- Confirmación de procesos
- visualizar resultados de checklist en tablero

RESPONSABLE: Metalurgista

RESULTADOS ESPERADOS:

- Mejorar disciplina operativa
- operadores alineados con a estrategia operacional
- reducción de errores operativos

FECHA INICIO: **FECHA TERMINO:** **FECHA RESULTADOS:**

2 INICIATIVA DE MEJORA: Control automático de adición de NASH

ACCIONES OPERATIVAS:

- Levantamiento dosificación vs tonelaje procesado
- Instalar medidores de flujo y valvulas de control
- configurar control automático
- Realizar pruebas piloto
- Ajustar la lógica de control

RESPONSABLE: Electrónicos Planta

RESULTADOS ESPERADOS:

- Dosificación precisa al tratamiento
- Reducción del consumo de NASH
- Estabilidad de Eh

FECHA INICIO: **FECHA TERMINO:** **FECHA RESULTADOS:**

3 INICIATIVA DE MEJORA: Automatización de válvulas y sensores de nivel

ACCIONES OPERATIVAS:

- Identificar válvulas críticas y puntos de control
- Seleccionar e instalar los sensores de nivel y electroválvulas
- Integrar al sistema de control
- Entrenar a operadores y equipo de mantenimiento en el nuevo sistema
- Validar desempeño

RESPONSABLE: Electrónico Planta y Metalurgista

RESULTADOS ESPERADOS:

- Menor variabilidad
- Reducción de pérdidas por operación manual
- Estabilidad en la aireación y nivel del colchón de espuma

FECHA INICIO: **FECHA TERMINO:** **FECHA RESULTADOS:**

4 INICIATIVA DE MEJORA: Pruebas piloto con reactivo alternativo

ACCIONES OPERATIVAS:

- Selección de reactivo alternativo
- Definir diseño experimental (plan de pruebas)
- Ejecutar pruebas piloto
- Analizar resultados en laboratorio
- Informe técnico económico para decidir su uso industrial

RESPONSABLE: Metalurgista

RESULTADOS ESPERADOS:

- Incremento del potencial de recuperación de Mo
- Reducción de consumo de NASH
- Reducción de costo

FECHA INICIO: **FECHA TERMINO:** **FECHA RESULTADOS:**

Etapa 5 – Controlar

Herramienta 1: ACTIVIDADES DE SEGUIMIENTO

ACTIVIDAD	OBJETIVO DE LA ACTIVIDAD	FRECUENCIA	RESULTADO ESPERADO
Verificación del checklist diario de operaciones	Asegurar disciplina operativa y cumplimiento de KPI	diario	100% cumplimiento de checklist
Auditoría de consumo de NASH	segimiento a consumo de NASH y control de dosificación	semanal	reducción de 5% en consumo
Revisión de variabilidad de pH, Eh y Nivelado	confirmar estabilidad de estos parámetros	diario	Alimentación de desolvente estable en 10%
Seguimiento de pruebas piloto con reactivo alternativo	evaluar mejoras en recuperación y reducción de NASH	quincenal	Incremento 2% recuperación Mo y reducción consumo de NASH 5%

Herramienta 2: PROPUESTA DE KPI'S

NOMBRE DEL INDICADOR	OBJETIVO DEL INDICADOR	VARIABLES INVOLUCRADAS	FRECUENCIA DE MEDICIÓN	FORMULA DE CALCULO	BENCHMARK	CLIENTES INTERNS	RESPONSABLE
Recuperación Mo, %	mejor eficiencia metalurgica del proceso	Ley Mo en alimentaciones y concentrado Mo	diario	$(\text{Mo} \text{ Concent} \text{ recuperado} / \text{Mo} \text{ aliment} \text{ total}) \times 100$	85%	Planta selectiva	Metalurgista
Consumo NASH, kg/ton	control de uso de reactivo	kg NASH consumida, toneladas procesadas	diario	$\text{kg NASH} / \text{ton procesada}$	4 kg/ton	Finanzas/Metalurgia	Jefe de Turno / Metalurgista
Variabilidad de pH y Eh	asegurar estabilidad operacional	pH, Eh	diario	pH, Eh	reducir desviación en un 10%	Operaciones Planta	Jefe de unidad
Mo concentrado	control el %Cu en el concentrado de Mo	Ley Eh Cu, Ley de Mo en concentrado	quincenal	$\text{Ley Mo} / \text{Ley Cu}$	Mayor en un 10%	Metalurgia Planta	Metalurgista

