



Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión

Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

**Evaluación de la trazabilidad y calidad de muestras en concentrados para
exportación - 2025**

Tesis

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

Autora

Andrea Tayz Paucar Quijano

Asesora

M(o) Helen Anali Zapata Del Solar



**Huacho- Perú
2026**

**Reconocimiento - No Comercial – Sin Derivadas - Sin restricciones adicionales**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Reconocimiento: Debe otorgar el crédito correspondiente, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se realizaron cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de ninguna manera que sugiera que el licenciante lo respalda a usted o su uso. **No Comercial:** No puede utilizar el material con fines comerciales. **Sin Derivadas:** Si remezcla, transforma o construye sobre el material, no puede distribuir el material modificado. **Sin restricciones adicionales:** No puede aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros de hacer cualquier cosa que permita la licencia.



UNIVERSIDAD NACIONAL

JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN

LICENCIADA

(Resolución de Consejo Directivo N° 012-2020-SUNEDU/CD de fecha 27/01/2020)

“Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica” Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica

INFORMACIÓN

DATOS DEL AUTOR(ES):		
APELLIDOS Y NOMBRES	DNI	FECHA DE SUSTENTACIÓN
Paucar Quijano, Andrea Tayz	76580742	11-06-2026
Datos del asesor:		
APELLIDOS Y NOMBRES	DNI	CÓDIGO ORCID
M(o) Zapata Del Solar, Helen Anali	44067559	https://orcid.org/0000-0002-5347-6155
Datos de los Miembros de Jurados – Pregrado:		
APELLIDOS Y NOMBRES	DNI	CÓDIGO ORCID
Dr. Sánchez Guzman, Alberto Irhaam	15758117	https://orcid.org/0000-0003-1575-8466
Dr. Ramos Pacheco, Ronald Luis	15615274	https://orcid.org/0000-0003-2036-1068
Dr. Abarca Rodriguez Joaquin Jose	15740291	https://orcid.org/0000-0003-1004-3824

Paucar Quijano Andrea 2026 - 030233

Evaluación de la trazabilidad y calidad de muestras en concentrados para exportación - 2025

 UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA FIQyM - PREGRADO - 2026

 Unidad de Investigación de la FIQyM - 2026

 Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::1:3570773128

Fecha de entrega

15 may 2026, 9:37 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

15 may 2026, 9:41 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

Tesis-Andrea_Paucar_Quijano2.docx

Tamaño del archivo

1.5 MB

93 páginas

18.642 palabras

102.526 caracteres



Página 2 de 100 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid:::1:3570773128

12% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

11%  Fuentes de Internet

5%  Publicaciones

6%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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

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

DEDICATORIA

A Dios, mi fortaleza, quien estuvo en los momentos más oscuros y me guio hacia la luz. A mis padres, por su entrega, por ser el pilar de mi educación y darme la mejor herencia. A mis hermanos menores, cuya presencia es mi motor diario.

A mi abuelo Toti, a quien dedico con mucho cariño este logro y que sea una gran alegría y orgullo.

A mi querida abuela Tita, que en paz descansa. Sé que, de estar aquí presente, este momento habría sido de gran alegría para ella. Siempre llevare en mi corazón el amor tan grande que me brindo hasta el último día de su vida.

Y a mi fiel compañero Doggie, quien me acompaño en muchas noches de desvelo durante este camino.

Atentamente, la autora.

AGRADECIMIENTO

A mi tío Benjamín, quien siempre estuvo presente y nunca se negó en brindarme apoyo para lograr mis objetivos.

A mis tíos Jorge, Rosario, Judith y Janet quienes me brindaron su tiempo, consejos, hogar y aportes económicos en momentos claves en este camino.

A toda mi familia en general quienes de una u otra forma aportaron en este proceso.

A la empresa donde actualmente me desempeño fuera del país cuyo nombre guardo en confidencialidad, por brindarme disposición y llevar a cabo este proyecto.

A mi asesora Hellen por su guía y apoyo en cada etapa del proceso.

A mi universidad José Faustino Sánchez Carrión y mi instituto técnico CETEMIN donde me permitieron formarme como la profesional que hoy soy.

Y lo último y no menos importantes, a todos mis profesores y mentores que a lo largo de este camino me brindaron sus consejos, conocimientos y experiencia.

Atentamente, la autora.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	5
AGRADECIMIENTO	6
ÍNDICE GENERAL	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
ÍNDICE DE FIGURAS	12
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
INTRODUCCIÓN.....	15
CAPITULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.1 Descripción de la realidad problemática	17
1.2 Formulación del problema	20
1.2.1 Problema general.....	20
1.2.2 Problemas específicos	20
1.3 Objetivos de la investigación	20
1.3.1 Objetivo general.....	20
1.3.2 Objetivos específicos.....	20
1.4 Justificación de la investigación.....	21
1.5 Delimitaciones del estudio	21
CAPITULO II MARCO TEÓRICO.....	22
2.1. Antecedentes de la investigación	22
2.1.1. Investigaciones internacionales	22
2.1.2. Investigaciones nacionales	23
2.2. Bases teóricas	26
2.2.1. Calidad de concentrado de mina	26
2.2.2. Muestreo de concentrados de mina	27
2.2.3. Índices de calidad de concentrados de mina.....	30
2.2.4. Contenido de metales en concentrados	31
2.2.5. Humedad en muestra de concentrados	36
2.2.6. Representatividad, sesgo y precisión	37
2.2.7. Trazabilidad.....	39
2.3. Definición de términos básicos	41

2.4.	Hipótesis de investigación.....	42
2.4.1.	Hipótesis general.....	42
2.4.2.	Hipótesis específicas	42
2.5.	Operacionalización de las variables	44
CAPITULO III METODOLOGÍA.....		45
3.1.2.	Nivel de investigación	45
3.1.3.	Diseño de investigación.....	45
3.1.4.	Enfoque de investigación	46
3.2.	Población y muestra	46
3.2.1.	Población.....	46
3.2.2.	Muestra.....	46
3.3.	Técnicas de recolección de datos	47
3.3.1.	Técnica	47
3.3.2.	Instrumentos	47
3.4.	Técnicas para el procesamiento de la información	47
CAPITULO IV RESULTADOS.....		48
4.1.	Análisis de los resultados.....	48
4.1.1.	Recepción de mineral	48
4.1.2.	Reducción.....	51
4.1.3.	Secado	55
4.1.4.	Molienda	55
4.1.5.	Preparación de muestras para determinación de calidad.....	61
4.1.6.	Envasado y embalaje para envío	61
4.1.7.	Despacho a laboratorio.....	61
4.1.8.	Resultados respecto a la calidad de concentrado de minerales	62
4.2.	Contrastación de hipótesis.....	68
4.2.1.	Contrastación de Hipótesis general	68
4.2.2.	Contrastación de Hipótesis específica 1.....	69
4.2.3.	Contrastación de Hipótesis específica 2.....	71
4.2.4.	Contrastación de Hipótesis específica 3.....	72
CAPITULO V DISCUSIÓN		74
CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		78
6.1.	Conclusiones	78
6.2.	Recomendaciones.....	81

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
ANEXOS.....	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Datos obtenidos en la trazabilidad para el proceso de recepción de mineral en diferentes lotes	48
Tabla 2 Estadísticos descriptivos de datos de trazabilidad en proceso de recepción de mineral	48
Tabla 3 Frecuencia de cantidad de material tomado (kg) en proceso de recepción de mineral	49
Tabla 4 Datos obtenidos en la trazabilidad para el proceso de reducción de muestra en diferentes lotes	51
Tabla 5 Estadísticos descriptivos de datos de trazabilidad en proceso de reducción de muestra lote 1	51
Tabla 6 Estadísticos descriptivos de datos de trazabilidad en proceso de reducción de muestra lote 2	52
Tabla 7 Estadísticos descriptivos de datos de trazabilidad en proceso de reducción de muestra lote 3	52
Tabla 8 Datos obtenidos en la trazabilidad para el proceso de secado de muestra en diferentes lotes	55
Tabla 9 Estadísticos descriptivos de datos de trazabilidad en proceso de secado de muestra lote 1..	56
Tabla 10 Estadísticos descriptivos de datos de trazabilidad en proceso de secado de muestra lote 2	57
Tabla 11 Estadísticos descriptivos de datos de trazabilidad en proceso de secado de muestra lote 3	57
Tabla 12 Datos obtenidos en la trazabilidad para el proceso de molienda en diferentes lotes	60
Tabla 13 Datos obtenidos en la trazabilidad para el proceso de preparación de muestras para calidad en diferentes lotes	61
Tabla 14 Datos obtenidos en la trazabilidad para el proceso de envasado y envío en diferentes lotes	61
Tabla 15 Datos obtenidos en la trazabilidad para el despacho a laboratorio en diferentes lotes	61
Tabla 16 Análisis descriptivo de calidad de concentrado en diferentes lotes	62
Tabla 17 Estadísticos globales para concentrado en diferentes lotes	63
Tabla 18 Contaminantes en concentrado de diferentes lotes	63
Tabla 19 Análisis descriptivo de contaminantes en concentrado en diferentes lotes	64
Tabla 20 Valores de humedad en concentrado de diferentes lotes	65
Tabla 21 Estadísticos descriptivos de valores de humedad en concentrado en lote 1	65
Tabla 22 Estadísticos descriptivos de valores de humedad en concentrado en lote 2	65
Tabla 23 Estadísticos descriptivos de valores de humedad en concentrado en lote 3	66
Tabla 24 Coeficientes de variación en los diferentes lotes respecto a su humedad	68
Tabla 25 Estadística de regresión	68
Tabla 26 Análisis de varianza	68
Tabla 27 Estadística de regresión	69
Tabla 28 Análisis de varianza	70
Tabla 29 Estadística de regresión	71
Tabla 30 Estadística de regresión	72
Tabla 31 Análisis de varianza	72

Tabla 13 Datos obtenidos en la trazabilidad para el proceso de preparación de muestras para calidad en diferentes lotes.....	63
Tabla 14 Datos obtenidos en la trazabilidad para el proceso de envasado y envío en diferentes lotes.....	63
Tabla 15 Datos obtenidos en la trazabilidad para el despacho a laboratorio en diferentes lotes	64
Tabla 16 Análisis descriptivo de calidad de concentrado en diferentes lotes	65
Tabla 17 Estadísticos globales para concentrado en diferentes lotes	65
Tabla 18 Contaminantes en concentrado de diferentes lotes	65
Tabla 19 Análisis descriptivo de contaminantes en concentrado en diferentes lotes	66
Tabla 20 Valores de humedad en concentrado de diferentes lotes.....	67
Tabla 21 Estadísticos descriptivos de valores de humedad en concentrado en lote 1	67
Tabla 22 Estadísticos descriptivos de valores de humedad en concentrado en lote 2	67
Tabla 23 Estadísticos descriptivos de valores de humedad en concentrado en lote 3	68
Tabla 24 Coeficientes de variación en los diferentes lotes respecto a su humedad	69
Tabla 25 Estadística de regresión.....	70
Tabla 26 Análisis de varianza.....	70
Tabla 27 Estadística de regresión.....	71
Tabla 28 Análisis de varianza.....	71
Tabla 29 Estadística de regresión.....	72
Tabla 30 Análisis de varianza.....	72
Tabla 31 Estadística de regresión.....	73
Tabla 32 Análisis de varianza.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Representación de muestreo sistemático a diferentes profundidades	28
Figura 2 Representación de muestreo sistemático a diferentes profundidades	29
Figura 3 Representación de plan de muestreo duplicado intercalado.....	33
Figura 4 Esquema de Método 1 de procesamiento de muestras	34
Figura 5 Esquema de Método 2 de procesamiento de muestras	35
Figura 6 Esquema de Método 3 de procesamiento de muestras	36
Figura 7 Etapas o puntos de trazabilidad en mina caso de estudio.....	41
Figura 8 Frecuencia de cantidad de material tomado (kg) en proceso de recepción de mineral.....	49
Figura 9 Distribución de cantidad de material tomado (kg) en proceso de recepción de mineral por lote	50
Figura 10 Distribución de humedad (%) en proceso de reducción de muestra por lote	53
Figura 11 Distribución de temperatura (°C) en proceso de secado de muestra por lote	58
Figura 12 Distribución de peso inicial (kg) en proceso de secado de muestra por lote	59
Figura 13 Distribución de peso final (kg) en proceso de secado de muestra por lote.....	60
Figura 14 Calidad de concentrado en diferentes lotes	62
Figura 15 Contaminantes en concentrado de diferentes lotes	63
Figura 16 Distribución de humedad en concentrado por lote	67

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo general determinar la relación entre la trazabilidad y la calidad del concentrado de minerales y para ello, se desarrolló un estudio de tipo básico con nivel descriptivo-correlacional, diseño no experimental y enfoque cuantitativo, analizando datos históricos de 10 corridas de producción mediante técnicas observacionales y estadísticas y los resultados evidenciaron que la trazabilidad, documentada en etapas como recepción, reducción, secado y despacho, mantuvo parámetros operativos consistentes, como cantidades de muestreo uniformes y homogeneidad en la reducción; sin embargo, la calidad final del concentrado mostró variaciones significativas, con solo un lote alcanzando la ley objetivo de cobre, mientras que todos presentaron humedad elevada y contenidos variables de contaminantes; además, el análisis de regresión confirmó relaciones significativas entre la trazabilidad y la calidad general, el contenido de metales, la humedad, y la representatividad, sesgo y precisión; finalmente, se concluyó que, aunque la trazabilidad es una herramienta fundamental para el monitoreo y control del proceso, su impacto en la calidad final está también mediado por factores operativos y las características inherentes del mineral, por lo que debe complementarse con controles en etapas críticas de beneficio para asegurar estándares de exportación.

Palabras clave: Trazabilidad, calidad de concentrado, minerales para exportación, humedad, contenido de metales

ABSTRACT

The present research had objective of determining the relationship between traceability and the quality of the mineral concentrate, developing a basic study with a descriptive-correlational level, non-experimental design and quantitative approach, analyzing historical data from 10 production runs through observational and statistical techniques; the results showed that traceability, documented in stages such as reception, reduction, drying and dispatch, maintained consistent operational parameters, such as uniform sampling quantities and reduction homogeneity; however, the final concentrate quality showed significant variations, with only one batch reaching the target copper grade, while all presented elevated moisture and variable contaminant contents; moreover, regression analysis confirmed significant relationships between traceability and overall quality, metal content, moisture, and representativeness, bias and precision; in conclusion, although traceability is a fundamental tool for process monitoring and control, its impact on final quality is also mediated by operational factors and the inherent characteristics of the mineral, so it must be complemented with controls in critical beneficiation stages to ensure export standards.

Keywords: Traceability, concentrate quality, minerals for export, moisture, metal content

INTRODUCCIÓN

La exportación de concentrados minerales está sujeta a exigentes estándares internacionales de calidad, que determinan su aceptación en el mercado y su valor comercial; esta investigación estudia específicamente la relación entre la trazabilidad y la calidad final del concentrado, analizando si el seguimiento documentado y controlado a lo largo de las etapas de procesamiento, desde la recepción del mineral hasta su despacho, constituye un factor determinante para alcanzar y mantener las especificaciones técnicas requeridas.

El estudio se plantea debido a que, a pesar de su importancia crítica, la trazabilidad efectiva de la calidad enfrenta obstáculos estructurales y operativos significativos; en particular, la industria minera en contextos como el peruano se ve limitada por la dependencia de métodos tradicionales, la falta de integración de datos en tiempo real y la escasa planificación predictiva, lo que impide anticipar y controlar las variaciones en la composición del mineral y esta incapacidad para garantizar una calidad consistente genera riesgos de penalizaciones, rechazos comerciales y un aprovechamiento subóptimo del recurso, afectando la competitividad y sostenibilidad del sector y para cumplir con el objetivo el estudio se estructuró considerando los capítulos:

- CAPITULO I: Planteamiento del problema; se presenta el problema, objetivos y la justificación del estudio.
- CAPITULO II: Marco Teórico; se expone los antecedentes, las bases teóricas, conceptos e hipótesis.
- CAPITULO III: Metodología; se describe la metodología, muestra y técnicas empleadas.
- CAPITULO IV: Resultados; se muestran los hallazgos y el contraste estadístico de las hipótesis planteadas.

- CAPITULO V: Discusión, se interpreta y contextualiza los resultados obtenidos de manera comparativa con los antecedentes de investigación.
- CAPÍTULO VI: Conclusiones y recomendaciones, se concluye y formula recomendaciones derivadas del estudio.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

La calidad de los minerales destinados a la exportación representa un factor clave para asegurar su aceptación en los mercados internacionales, donde se exigen altos estándares químicos y ambientales; no obstante, uno de los principales problemas que enfrenta la industria minera es la dificultad para garantizar que dicha calidad se mantenga de forma constante y la ausencia de un sistema de trazabilidad enfocado en la calidad puede dar lugar a variaciones no controladas en la composición del mineral, lo que pone en riesgo su cumplimiento con las especificaciones requeridas por los compradores, esta situación puede traducirse en pérdidas económicas, ya sea por penalizaciones, rechazos o disminución en el valor comercial del producto; por ello, es esencial implementar mecanismos que permitan verificar y asegurar la calidad del mineral desde su origen, como parte de una estrategia que fortalezca la confianza en los procesos mineros de exportación. (Lafquih & Saad, 2021)

Así mismo, la trazabilidad de la calidad de los minerales enfrenta desafíos, a pesar de su importancia para garantizar transparencia y cumplimiento de estándares técnicos y aunque permite verificar el origen, la composición, el historial de procesamiento y otros atributos clave de los minerales, su implementación efectiva se ve obstaculizada por puntos críticos en la cadena de suministro, donde se mezclan materiales de diversas procedencias, dificultando el seguimiento de la calidad original del mineral; además, las características geológicas y la compleja composición química de los yacimientos añaden una capa adicional de dificultad para rastrear con precisión los atributos de calidad y si bien tecnologías emergentes ofrecen oportunidades para registrar información detallada sobre los minerales, su aplicación específica en aspectos de calidad aún está en desarrollo. (Schöneich et al., 2023)

A nivel global, la implementación de sistemas de trazabilidad en la cadena de suministro

de minerales enfrenta desafíos estructurales, técnicos y socioeconómicos que complican su adopción y efectividad, especialmente en lo referente a la calidad del mineral y uno de los principales problemas es la falta de estandarización y la baja interoperabilidad entre áreas, lo que impide un flujo de datos confiable y coordinado entre los distintos actores y a esto se suman los altos costos de implementación y operación de tecnologías avanzadas, que además requieren una gran cantidad de energía, lo cual limita su viabilidad, especialmente en países con infraestructura limitada; la calidad de los datos también es una preocupación crítica ya que, errores u omisiones desde el punto de origen pueden comprometer todo el sistema de trazabilidad; además, existen obstáculos específicos por tipo de mineral que complican aún más el seguimiento de atributos como la calidad y por otro lado, muchos sistemas de trazabilidad corren el riesgo de excluir a pequeños productores, quienes no pueden asumir los costos ni cumplir con requisitos técnicos, lo que amenaza con aumentar la desigualdad dentro de la cadena de suministro internacional. (OCDE, 2025)

En el contexto latinoamericano, la trazabilidad de la calidad del mineral se ve comprometida por una combinación de factores estructurales y tecnológicos que frenan el avance hacia operaciones más eficientes y transparentes; además, la disminución progresiva de las leyes del mineral, producto del envejecimiento de los yacimientos, exige sistemas de monitoreo más precisos para gestionar materiales con menor concentración de contenido útil; sin embargo, la mayoría de las operaciones aún dependen de métodos tradicionales, lo que limita la capacidad de rastrear variaciones de calidad en tiempo real y la infraestructura tecnológica obsoleta en muchas minas maduras impide la adopción de soluciones digitales como sensores o plataformas de análisis automatizado, esenciales para capturar datos de calidad de manera continua y confiable y a esto se suma la falta de articulación entre empresas mineras, proveedores locales y centros de investigación, lo cual impide desarrollar soluciones adaptadas a condiciones específicas de la región y refuerza la dependencia de tecnologías

importadas poco contextualizadas; además, la resistencia al cambio y el llamado “tecnological lock-in” agravan el problema, ya que muchas operaciones están atadas a decisiones tecnológicas del pasado que ya no permiten escalar herramientas modernas y en este escenario, Latinoamérica desaprovecha el potencial económico y operativo de las tecnologías digitales, que podrían mejorar sustancialmente la trazabilidad interna del mineral si existiera una mayor inversión en innovación aplicada, cooperación institucional y capacitación técnica local. (Calzada, 2022)

En Perú, la trazabilidad de la calidad de concentrados minerales se ve gravemente limitada por la falta de planificación predictiva y la escasez de datos en tiempo real, dos componentes fundamentales para caracterizar con precisión el comportamiento del mineral; además, ausencia de modelos predictivos basados en variables cuantificables impide anticipar variaciones que afectan directamente el consumo energético y la calidad del producto final; asimismo, la escasez de información mineralógica precisa representa una barrera crítica para definir condiciones óptimas de tratamiento y a esto se suma la limitada integración entre técnicas y algoritmos de aprendizaje automático, lo cual reduce la capacidad del sistema para gestionar incertidumbres asociadas a la variabilidad en la calidad, como ocurre en casos complejos como la separación de minerales con características físico-químicas similares, por ejemplo, en la minería de zinc y cobre; no obstante, aunque experiencias en diferentes plantas concentradoras han demostrado que diferentes modelos de trazabilidad pueden mejorar los procesos mediante estrategias de producción más precisas, su implementación aún es puntual y no generalizada y en este contexto, el principal reto para la minería peruana es evolucionar hacia una minería que integre métodos computacionales avanzados, estandarización de datos y colaboración entre diferentes especialistas para lograr una trazabilidad técnica robusta de la calidad del mineral. (Medina et al., 2024)

En consecuencia, los controles de calidad en cada etapa del procesamiento de minerales,

es clave para garantizar la eficiencia operativa, reducir pérdidas y asegurar la consistencia del producto final; esto se plantea en vista de la problemática identificada que radica en la falta de trazabilidad continua y confiable de la calidad del mineral, lo cual impide tomar decisiones oportunas y basadas en datos; esta limitación no solo afecta la competitividad del sector minero en Perú y en la región latinoamericana, sino que también incrementa los costos operativos y reduce el aprovechamiento del recurso mineral y abordar esta problemática es urgente, ya que la adopción de tecnologías digitales y modelos predictivos permitirían optimizar los procesos, adaptarse a la creciente complejidad mineralógica de los yacimientos y avanzar hacia una minería más sostenible, eficiente y basada en conocimiento.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cuál es la relación entre la trazabilidad y la calidad de concentrado de minerales para exportación?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es la relación entre la trazabilidad y el contenido de metales en el concentrado de minerales para exportación?
- ¿Cuál es la relación entre la trazabilidad y la humedad en el concentrado de minerales para exportación?
- ¿Cuál es la relación entre la trazabilidad y la representatividad, sesgo y precisión en la calidad del concentrado de minerales para exportación?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Determinar la relación entre la trazabilidad y la calidad del concentrado de minerales para exportación

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar la relación entre la trazabilidad y el contenido de metales en el concentrado de minerales para exportación

- Determinar la relación entre la trazabilidad y la humedad en el concentrado de minerales para exportación
- Determinar la relación entre la trazabilidad y la representatividad, sesgo y precisión en la calidad del concentrado de minerales para exportación

1.4 Justificación de la investigación

La presente investigación es conveniente porque permitirá conocer de qué manera la trazabilidad influye en la calidad del concentrado de minerales para exportación, aportando información valiosa para optimizar los procesos y garantizar que el producto cumpla con los estándares exigidos en el mercado internacional; su relevancia social y tecnológica radica en que los resultados beneficiarán tanto a las empresas exportadoras, al fortalecer su competitividad y reputación, como a los compradores internacionales, al asegurar un producto de calidad consistente y desde el punto de vista práctico, el estudio contribuirá a resolver problemas asociados a la pérdida de control en el manejo de muestras y a la variabilidad en las mediciones de calidad, mediante un seguimiento sistemático del flujo y control de las mismas; en cuanto al valor teórico, ampliará el conocimiento existente sobre la relación entre trazabilidad y calidad en el sector minero y metodológicamente, servirá como base para el diseño y validación de instrumentos de recolección y análisis de datos aplicables en la industria.

1.5 Delimitaciones del estudio

La presente investigación se sustenta en el marco conceptual de la trazabilidad y la calidad en la industria minera, entendida la trazabilidad como el conjunto de procedimientos que permiten seguir el historial, la aplicación y la ubicación de una muestra de concentrado a lo largo de todo el proceso productivo, desde su obtención hasta su análisis final.

CAPITULO II MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1 Investigaciones internacionales

König y Pöllmann (2022) en su publicación "Valor del monitoreo mineralógico para la industria minera y de minerales" publicado en la revista Minerals, analizan el papel crítico del monitoreo mineralógico rápido, especialmente mediante difracción de rayos X (XRD), para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la minería ante desafíos como yacimientos de baja ley y volatilidad del mercado; los autores destacan cómo los métodos tradicionales están siendo reemplazados por XRD combinado con enfoques e inteligencia artificial, permitiendo control de procesos en tiempo real; además, estudios de caso demuestran aplicaciones en metales verdes: lateritas de níquel (optimizando definición de ley y procesamiento), minerales de litio (cuantificación donde XRF falla), cobre (detección de minerales penalizantes), bauxita (evaluación de alúmina/sílice reactiva) y arenas minerales pesadas (análisis de composición de fases); finalmente, concluye que el monitoreo mineralógico es indispensable para modelos geometalúrgicos, agilidad operacional y extracción sostenible, contribuyendo directamente a la seguridad y viabilidad económica del sector minero.

Pernechele et al. (2021) en su artículo "Valor del monitoreo mineralógico rápido de minerales de cobre", publicado en la revista Minerals, analizaron la aplicación de técnicas rápidas de difracción de rayos X (XRD) combinadas con refinamiento Rietveld y métodos estadísticos (análisis cluster y PLSR) para optimizar el mezclado de minerales y detectar minerales penalizantes (como tetraedrita portadora de antimonio) en 265 muestras de minerales de cobre de la Faja Pirítica Ibérica (España); los autores demostraron que la monitorización mineralógica automatizada permite caracterizar en tiempo real las mezclas de alimentación, concentrados y relaves, correlacionando la mineralogía con parámetros de proceso como la recuperación de cobre y la presencia de elementos perjudiciales, finalmente, la investigación

concluyó que esta metodología mejora significativamente la eficiencia de la flotación, al permitir ajustes dinámicos en los reactivos y reducir costos operativos, destacando su potencial para la toma de decisiones automatizada en la industria minera y su aplicabilidad en otros contextos de procesamiento de minerales.

König y Verryn (2021) en su artículo "Minería de arenas minerales pesadas y procesamiento posterior: Valor del monitoreo mineralógico mediante XRD", publicado en la revista *Minerals*, demostraron la utilidad de la difracción de rayos X (XRD) combinada con métodos estadísticos (análisis cluster) y refinamiento Rietveld para optimizar el procesamiento de arenas minerales pesadas en tres estudios de caso. Los autores analizaron muestras de concentrados minerales, flujos de productos (ilmenita, circón, granate) y escorias de titanio, destacando cómo la monitorización mineralógica rápida y automatizada permite controlar la eficiencia de etapas clave como la concentración por espirales, la separación de minerales y la reducción de ilmenita; la investigación concluyó que el XRD proporciona información crítica en tiempo real sobre composiciones de fases (ej. óxidos de titanio, fases Magnéli) y contenido amorfo, facilitando ajustes operativos para mejorar la calidad del producto, optimizar mezclas y reducir costos y además, el estudio subrayó que esta técnica reemplaza métodos tradicionales (química húmeda, fluorescencia de rayos X) al ofrecer mayor precisión en la caracterización mineralógica, reforzando su papel esencial para la sostenibilidad y competitividad en la industria minera de metales estratégicos.

2.1.2 Investigaciones nacionales

Falcón (2020) en su tesis: "La Norma ISO 12743 y su aplicación en el muestreo de concentrados de exportación", presentada en la Universidad Nacional San Luis Gonzaga (Perú), evaluó la implementación de la norma ISO 12743 en el muestreo de concentrados minerales (cobre, plomo, zinc) en plantas procesadoras de Nazca (2020-2021) y mediante un diseño exploratorio no experimental, el estudio analizó 3 plantas mineras (PERUMETAL, SANTA TERESA, MINEX) y 3 laboratorios (LABPERU, MINARES, ROLAP), utilizando

técnicas de encuestas, entrevistas y validación estadística con coeficiente de correlación de Pearson; además, la investigación identificó que la norma no se aplica adecuadamente en la mayoría de los casos, generando sesgos en los resultados de humedad y contenido metálico, lo que distorsiona la calidad comercial de los concentrados y causa pérdidas económicas; los hallazgos confirmaron que solo los laboratorios acreditados alcanzaron alta confiabilidad (correlación: 0.943 para cobre, 0.845 para plomo, 1.0 para zinc) al seguir estrictamente los protocolos de muestreo, homogenización y análisis de la ISO 12743 y finalmente, el estudio concluye que la incorrecta aplicación de la norma permite un robo sistemático de riqueza mineral en Perú, y recomienda su exigencia obligatoria por entes reguladores para garantizar transparencia en la comercialización.

Choquegonza (2024), en su tesis: “Implementación de los procedimientos de trazabilidad operativa del oro para gestionar las operaciones minero-metalúrgicas en la Cooperativa Minera Señor de Ananea”, presentada en la Universidad Nacional del Altiplano (Perú), desarrolló un sistema de trazabilidad para optimizar la gestión de operaciones auríferas en la Unidad Operativa Minera (U.O.M.) Señor de Ananea; mediante una metodología descriptiva-explicativa, el autor determinó el volumen diario de grava aurífera extraída (983 m³/día, cercano al límite legal de 960 m³) y diseñó 11 formatos estandarizados de trazabilidad operativa (codificados como GP1-GP4) que rastrean el mineral desde la extracción hasta la obtención de oro doré, integrando controles en etapas como lavado, amalgamación y fundición, los resultados demostraron que este sistema no solo mejora la planificación operativa y la transparencia en la cadena de producción, sino que también garantiza la procedencia legal del oro, cumpliendo con requisitos de certificación Fairtrade para exportación (como el precio justo y prima adicional de USD 2000/kg); finalmente se concluye que, la implementación facilitó la formalización minera, evitó sanciones regulatorias y optimizó la gestión de riesgos ambientales y sociales, destacando su aplicabilidad para mineros artesanales y pequeños productores en

Perú.

Loayza (Loayza, 2024) en su tesis "Diseño de un sistema automatizado para la obtención de muestras de concentrado en el proceso de producción de lingotes de Zn y su incidencia en los costos de materia prima en la Refinería Cajamarquilla-Lima 2024", para optar al título de Ingeniero Industrial, diseñó un sistema robótico automatizado para optimizar el muestreo de concentrado de zinc y reducir costos, ello mediante una metodología aplicada con enfoque cuantitativo y diseño pre-experimental, analizó muestras trimestrales de tres años, identificando un error promedio de 0.185% en la medición de humedad debido a limitaciones del método manual, lo que generaba un sobre costo anual de 1'133,555.90 USD y la propuesta tecnológica, que incluyó un brazo robótico ABB, estructura metálica y sistemas de seguridad, demostró reducir lesiones laborales y mejorar la precisión; además, el análisis económico confirmó viabilidad con un VAN de 1.7 millones de USD, TIR del 19.3% y retorno de inversión en 6.9 años, concluyendo que la automatización disminuye significativamente los costos de materia prima y mejora la seguridad operativa.

Ricra (2022) en su tesis "Evaluación del aseguramiento y control de calidad de muestras de la mina Marcapunta de Sociedad Minera El Brocal, 2021", publicada por la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión (Perú), analizaron la efectividad del sistema de calidad en el muestreo, utilizando una muestra de 13,735 muestras (incluyendo 2,061 controles) provenientes de 210 sondajes (11,842 metros perforados); los autores aplicaron una metodología cuantitativa no experimental, evaluando dimensiones clave como precisión (mediante duplicados de campo, gruesos y finos), exactitud (con estándares certificados) y contaminación (con blancos gruesos y finos) y la investigación determinó que un ratio de inserción de controles del 15% es adecuado, identificando tasas de error aceptables en precisión para Cu (15.7%), Ag (9.0%) y Au (5.5%), y sesgos dentro de límites permisibles en exactitud, excepto en plata (Ag) donde se observó subestimación; además, el chequeo externo con

laboratorio ALS Perú confirmó buena precisión para Cu y Au, pero evidenció sesgos cuestionables en Ag; finalmente, el estudio concluyó que el sistema QA/QC implementado previene errores en la cadena de muestreo, aunque recomendó mejorar la exactitud analítica para plata y realizar auditorías regulares para optimizar la confiabilidad de los datos en la estimación de recursos mineros.

2.2. Bases teóricas

2.2.1 Calidad de concentrado de mina

De acuerdo con la teoría QA/QC (Aseguramiento y Control de Calidad) el proceso de aseguramiento de la calidad es fundamental para garantizar que los datos y resultados obtenidos en los procesos de muestreo, preparación y análisis cumplan con estándares predefinidos de precisión y exactitud; además, el aseguramiento de la calidad se centra en establecer y seguir procedimientos que minimicen errores y aseguren la confiabilidad de la información, mientras que el control de calidad verifica, a través de prácticas como el uso de duplicados, blancos, estándares y controles granulométricos, que dichos estándares se mantengan de forma consistente en el tiempo, estos principios no solo se aplican a las etapas iniciales de exploración o producción, sino que también son esenciales para evaluar con confianza parámetros clave, como la calidad de concentrado. (Ricra, 2022)

La calidad de concentrado se refiere a las características y composición de un material concentrado obtenido tras un proceso de separación de minerales, considerando tanto el contenido del elemento principal que se busca aprovechar, como la presencia de otros elementos de valor y de impurezas; esta calidad es un factor clave para estimar el valor comercial del producto, planificar su venta y proyectar la rentabilidad de un proyecto, ya que influye en los ingresos, en los costos asociados al manejo de contaminantes y en el cumplimiento de normativas ambientales; en consecuencia, la calidad de concentrado resume el equilibrio entre la cantidad del mineral útil, el aporte de subproductos y las limitaciones que imponen las impurezas. (Díaz, 2024)

2.2.2 Muestreo de concentrados de mina

El muestreo de concentrados consiste en extraer una pequeña porción de un lote o flujo de material con el fin de analizarla y, a partir de sus resultados, estimar con precisión las características de todo el conjunto. Para que este proceso sea confiable, la muestra debe ser representativa, lo que significa que cada partícula del material original debe tener la misma probabilidad de ser incluida; esto se logra delimitando bien el volumen a muestrear y utilizando dispositivos o técnicas que eviten sesgos. En la práctica, el muestreo puede hacerse recolectando incrementos, que son porciones pequeñas tomadas en una sola operación y que reflejan la composición del material, o elaborando un compuesto, que resulta de combinar múltiples muestras individuales para obtener una visión global más precisa y si la muestra no representa fielmente el material, los análisis posteriores pueden perder valor y dar lugar a decisiones equivocadas. (Ancca, 2024)

En tanto Santos (2021), especifica que, en los procesos de muestreo para concentrados, los laboratorios deben trabajar bajo un plan y un procedimiento documentado que especifique cómo, dónde y con qué criterios se realizará la toma de muestras, preferentemente siguiendo métodos estadísticos para garantizar su validez y este plan debe estar disponible en el lugar de trabajo y contemplar todos los factores que puedan afectar la representatividad y exactitud de los resultados y si por requerimientos del cliente se modifica el procedimiento, los cambios deben registrarse y comunicarse junto con los datos obtenidos; además, es crucial minimizar errores desde la recolección hasta la llegada de la muestra al laboratorio, prestando especial atención a su manipulación y tratamiento químico, ya que en la mayoría de los análisis la muestra debe convertirse en disolución, y cualquier fallo en este paso puede distorsionar los resultados y afectar la confiabilidad del ensayo.

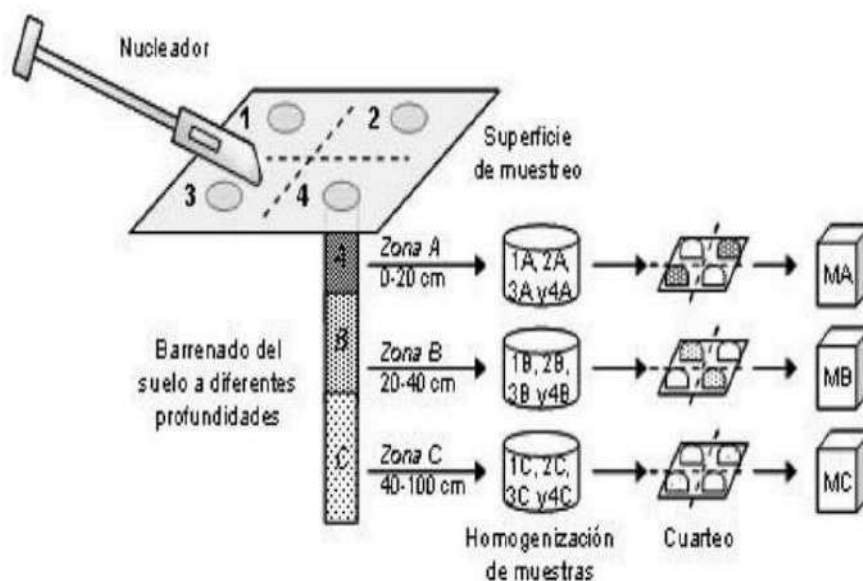
Así mismo, Flores y Hermoza (2024) resaltan que, el muestreo tiene como propósito estimar, con un grado de exactitud definido, las características del conjunto completo de la población sin tener que analizarlo por completo y la precisión depende tanto de la calidad con

que se seleccionen y manipulen las muestras como de la cantidad de ellas que se tomen, ya que un mayor número suele aumentar la exactitud, pero también eleva los costos operativos y en el ámbito de control de calidad, un muestreo deficiente puede generar errores significativos en la determinación de parámetros clave como leyes y humedad, afectando directamente la validez de los reportes y la toma de decisiones; entre los tipos de muestreo se tienen:

- **Muestreo Sistemático:** Este tipo de muestreo se basa en seguir reglas fijas y predefinidas para decidir cuándo o dónde tomar las muestras; por ejemplo, se puede establecer que en una faja transportadora de concentrados se recoja una muestra cada cierta cantidad de minutos, o que en un contenedor o pila de material se tomen muestras a distintas profundidades; este método busca mantener un patrón constante que facilite la recolección y permita cubrir de forma ordenada diferentes partes del material. (Flores & Hermoza, 2024)

Figura 1

Representación de muestreo sistemático a diferentes profundidades



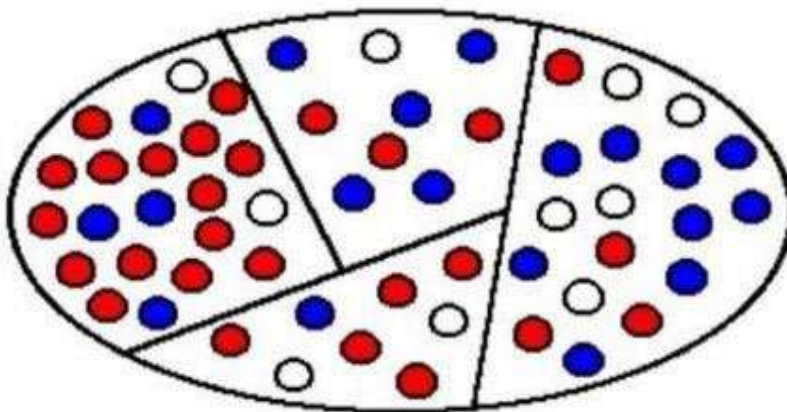
Nota. Extraído de Optimización del tiempo de análisis de humedad por secado en el despacho de concentrado de cobre en la compañía minera Antapaccay- Cusco de Flores y Hermoza (2024).

- **Muestreo Estratificado:** Este tipo de muestreo consiste en dividir el lote total en partes más pequeñas llamadas estratos, donde cada estrato agrupa material con

características similares, como una misma especie mineralógica y una vez hecha esta división, se toma una muestra de cada estrato siguiendo un procedimiento previamente definido; este enfoque permite obtener resultados más precisos, ya que asegura que todas las variaciones del material estén representadas en la muestra final (Flores & Hermoza, 2024).

Figura 2

Representación de muestreo sistemático a diferentes profundidades



Nota. Extraído de Flores y Hermoza (2024).

- Muestreo aleatorio simple: El muestreo aleatorio simple consiste en seleccionar partes o unidades de un lote de manera que todas tengan la misma probabilidad de ser elegidas y esto significa que no hay preferencias ni patrones fijos en la elección, lo que ayuda a evitar sesgos y garantiza que la muestra obtenida sea representativa del conjunto total (Flores & Hermoza, 2024).

Así mismo, el muestreo en camiones, vagones o tolvas consiste en tomar varios incrementos distribuidos de manera uniforme sobre la superficie del concentrado, usando herramientas como una lanza o una pala diseñadas con dimensiones adecuadas para el tamaño de las partículas; cada incremento debe extraerse desde la profundidad total del material, retirando toda la columna vertical para asegurar que la muestra represente correctamente el lote, especialmente si este ha sufrido segregación o cambios en la humedad por almacenamiento o transporte prolongado; además, es importante no limitarse a las capas

superficiales, ya que esto podría generar un sesgo, y verificar periódicamente la ausencia de errores mediante ensayos de sesgo según normas establecidas y por otro lado, la ISO 12743 indica que, en teoría, es posible obtener una muestra representativa en caso de un apilamiento si el equipo de muestreo logra penetrar hasta su profundidad total en el punto elegido y extraer toda la columna de concentrado; sin embargo, en la práctica, este procedimiento suele ser difícil de realizar debido a las limitaciones técnicas y operativas que implica. (Neira & Acuña, 2022)

2.2.3 Índices de calidad de concentrados de mina

Los índices de calidad de los concentrados de mina, se conocen como herramientas clave que ayudan a medir el valor y la calidad de los productos o servicios que ofrece una empresa, comparando los resultados con las metas de producción, eficiencia, efectividad y satisfacción del cliente; sirven para evaluar de forma ordenada la calidad, detectar fallas en los componentes y asegurar que se cumplan las normas y procedimientos y su buen funcionamiento depende de usar criterios de medición claros y acordes a los objetivos del producto, tomando en cuenta tanto lo técnico como la opinión del cliente. (Chamorro, 2024)

Por otro lado, en caso de los yacimientos minerales, los componentes se clasifican según su valor comercial en dos partes principales; la parte valiosa, o mena, es aquella que contiene metales con utilidad económica o industrial, como el cobre, plomo, zinc, plata u oro, presentes en forma de minerales como galena, esfalerita, calcopirita o acantita y estos son los que se buscan extraer y procesar para su venta o uso industrial: por otro lado, la parte no valiosa, o ganga, está compuesta por minerales que, aunque puedan contener metales, no tienen valor comercial o su recuperación no es rentable, como la pirita, el cuarzo, la arsenopirita o diferentes óxidos de hierro, además de roca estéril y en el proceso minero, la meta es separar eficientemente la mena de la ganga para obtener un producto de mayor calidad y valor; en tanto, en el proceso de beneficio de minerales, las plantas concentradoras cumplen un papel clave al tratar minerales de baja ley, separando los sulfuros valiosos en un producto concentrado y enviando la ganga a los relaves, por lo que, el mineral que ingresa a la planta,

llamado cabeza, contiene una mezcla de parte valiosa y estéril, cuyo contenido metálico se expresa en la ley, es decir, el porcentaje del metal presente y tras el procesamiento, se obtiene el concentrado, que posee un alto contenido del metal de interés y constituye el producto comercializable, mientras que los relaves son el material descartado, con bajo contenido útil y alto volumen de desechos, que requiere manejo adecuado por sus implicancias ambientales (Ortiz, 2018).

Finalmente, la Norma ISO 12743 considera lineamientos para realizar un muestreo confiable de concentrados minerales como cobre, plomo, zinc o níquel, asegurando que las muestras obtenidas representen fielmente el lote o flujo que se analiza y su objetivo principal es evitar errores o sesgos, de manera que los resultados de análisis químico, pruebas físicas y medición de humedad sean precisos y para ello, describe diferentes métodos de muestreo, ya sea en cintas transportadoras en movimiento o detenidas, con equipos mecánicos o de forma manual, así como en camiones, tolvas o pilas de material; también establece que todos los incrementos de material deben tener la misma probabilidad de ser seleccionados, y que las muestras deben procesarse y almacenarse adecuadamente para evitar cambios en su composición, especialmente en la humedad, en términos simples, esta norma busca que, sin importar cómo o dónde se tome la muestra, el procedimiento sea justo, representativo y minimice errores que puedan afectar la evaluación de la calidad del concentrado (Falcon, 2020).

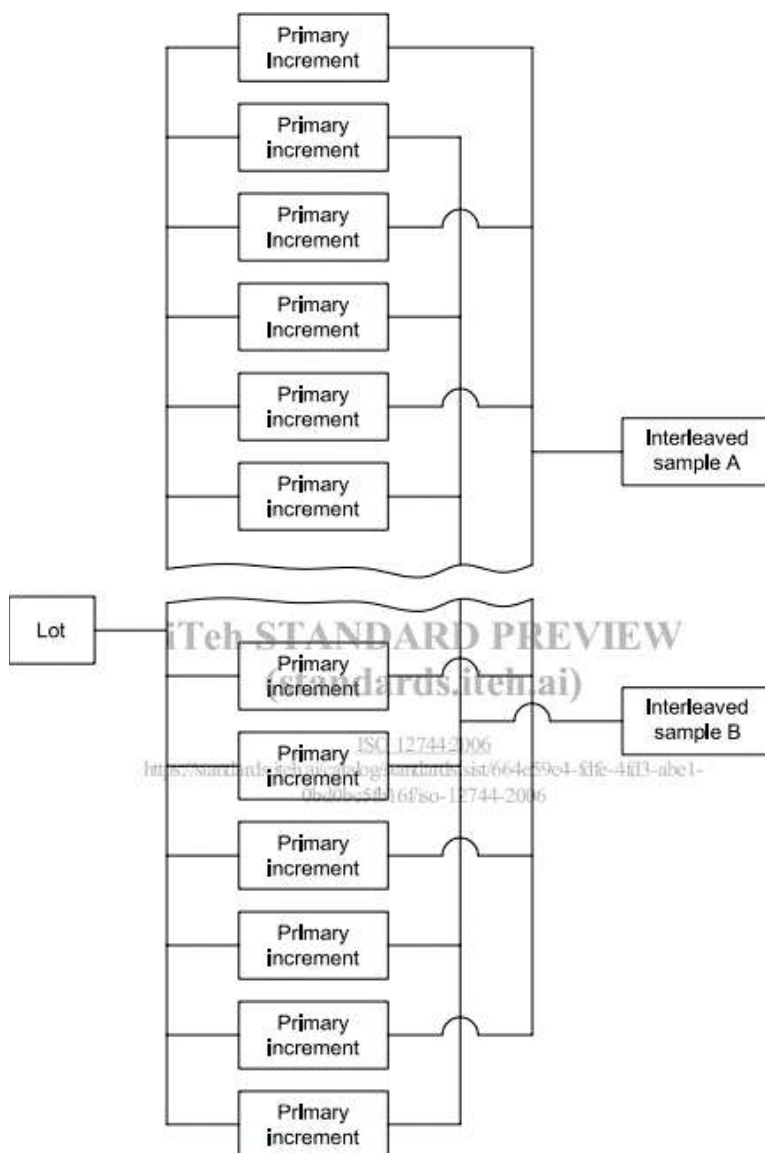
2.2.4 Contenido de metales en concentrados

El contenido de metales en concentrados mineros se refiere a la proporción o cantidad de metales valiosos, como cobre, plomo, zinc o níquel, presentes en el material concentrado resultante de los procesos de beneficio del mineral, expresada generalmente como porcentaje en masa y determinada junto con su humedad; según la norma ISO 12743, esta determinación se realiza mediante un muestreo cuidadosamente planificado que garantice que todos los incrementos del flujo de concentrado tengan igual probabilidad de ser seleccionados, evitando

sesgos y asegurando representatividad y la exactitud del resultado depende de la combinación de la varianza propia del muestreo, incluyendo el procesamiento de la muestra y la del análisis químico; además, la norma establece criterios como la masa mínima de incremento primario (0,25 kg para muestreo manual, ajustable según el tamaño máximo nominal de partícula), métodos de cálculo de varianzas y número de incrementos, así como procedimientos adaptados a diferentes puntos de muestreo (camiones, vagones, tolvas y apilamientos) para garantizar uniformidad y prevenir segregación y finalmente se incluyen métodos experimentales, respaldados por las normas ISO 12744 e ISO 13292, para verificar la precisión y ausencia de sesgo del muestreo.

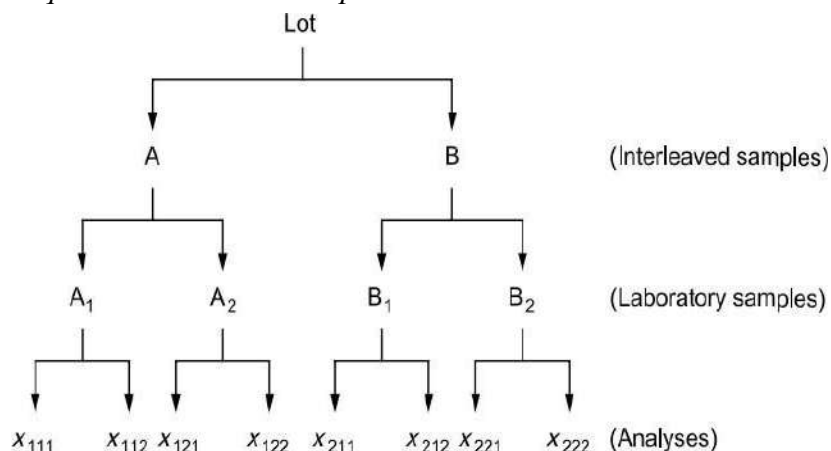
De acuerdo con la norma ISO 12743, el procedimiento de determinación de metales en concentrados considera:

- La etapa de muestreo primario en la que, se recolectan pares de muestras entrelazadas (A y B) de cada lote de concentrado, obtenidas mediante la desviación alternada de incrementos del flujo; el número mínimo de incrementos a recolectar debe ser $2n$, donde n corresponde al requerido por la norma ISO 12743, asegurando así representatividad estadística. Este esquema, ilustrado en la Figura 3 proveniente del estándar, busca que cada fracción del material tenga igual probabilidad de ser incluida en la muestra final.

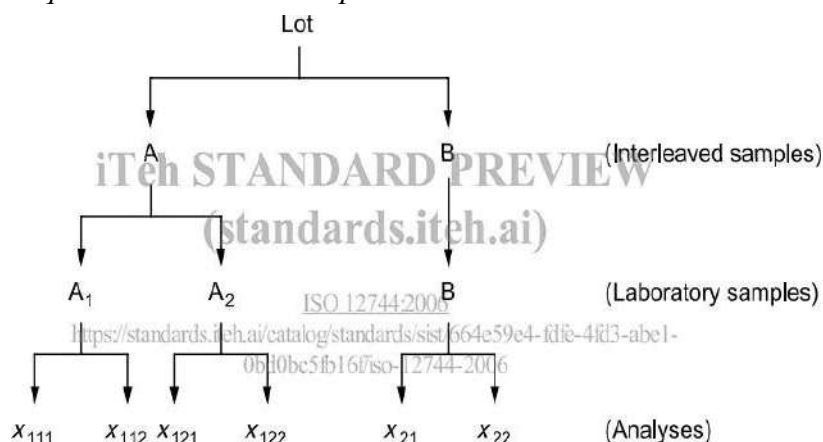
Figura 3*Representación de plan de muestreo duplicado intercalado*

Nota. Extraído de ISO 12744 (2006).

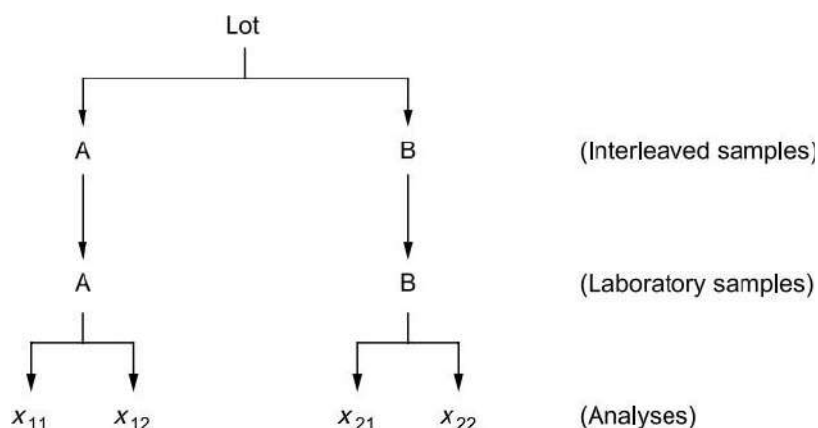
- Posterior al muestreo sigue la etapa de procesamiento de muestras y la norma plantea tres métodos alternativos para preparar el material que será analizado en laboratorio:
 - En el Método 1, cada muestra entrelazada (A y B) se divide en dos submuestras de laboratorio (A_1 , A_2 , B_1 , B_2) que se analizan por duplicado, maximizando la capacidad de estimar las variaciones en muestreo, procesamiento y análisis.

Figura 4*Esquema de Método 1 de procesamiento de muestras**Nota. Extraído de ISO 12744 (2006).*

- en el Método 2, la muestra A se subdivide en dos fracciones independientes, denominadas A₁ y A₂, las cuales pasan por todo el proceso de preparación de laboratorio y posterior análisis químico; esto permite medir no solo la variabilidad analítica, sino también la generada durante la subdivisión y preparación de la muestra y por otro lado, la muestra B se mantiene como una sola unidad de laboratorio sin fraccionar, sirviendo como referencia para contrastar la dispersión de resultados obtenida con A₁ y A₂; todas las determinaciones, tanto de A₁, A₂ como de B, se realizan por duplicado bajo las mismas condiciones (mismo analista, mismo equipo y mismo día), lo que asegura que las diferencias observadas en los resultados se deban principalmente a efectos de muestreo y procesamiento, y no a cambios en las condiciones analíticas.

Figura 5*Esquema de Método 2 de procesamiento de muestras**Nota. Extraído de ISO 12744 (2006).*

- En el Método 3, el enfoque se simplifica al máximo, ya que cada muestra entrelazada, la muestra A y la muestra B, se procesa directamente como una única muestra de laboratorio, sin realizar subdivisiones intermedias y una vez obtenidas, ambas muestras se someten a un análisis químico por duplicado bajo las mismas condiciones de trabajo (mismo analista, equipo y día), lo que permite estimar la variabilidad analítica pero no la asociada a subdivisiones dentro del laboratorio; este método es el más rápido y sencillo de los tres planteados, pues reduce la manipulación del material y, con ello, el riesgo de introducir errores durante el procesamiento; sin embargo, su simplicidad también implica que es menos detallado para separar las distintas fuentes de variabilidad, ya que concentra la evaluación en la repetibilidad del análisis químico y en la representatividad del muestreo primario, dejando en segundo plano la cuantificación de la variabilidad por procesamiento.

Figura 6*Esquema de Método 3 de procesamiento de muestras**Nota. Extraído de ISO 12744 (2006).*

- Sigue el análisis químico que se realiza bajo condiciones controladas, aplicando un orden aleatorio en las determinaciones para evitar sesgos sistemáticos. Aunque ISO 12744 no especifica técnicas instrumentales concretas, exige el uso de métodos estandarizados descritos en ISO 12743 y en otras normas internacionales pertinentes.
- Finalmente, para la evaluación de la precisión, se calculan las desviaciones estándar correspondientes al muestreo, procesamiento y análisis, empleando las varianzas obtenidas de los rangos de las mediciones duplicadas; además, algunas fórmulas específicas permiten aislar cada componente de variabilidad y pruebas estadísticas F verifican su significancia, todo el proceso requiere un registro exhaustivo de incrementos, muestras, submuestras y resultados analíticos, permitiendo la trazabilidad completa de los datos y la verificación de la calidad del procedimiento.

2.2.5 Humedad en muestra de concentrados

La humedad en los concentrados mineros se refiere a la cantidad de agua presente en el material después de los procesos de concentración, y se expresa como porcentaje en masa respecto al peso húmedo; este parámetro es crítico porque influye directamente en la calidad, el transporte y la comercialización del producto, en condiciones iniciales, los concentrados

pueden presentar humedades muy elevadas, en algunos casos superiores al 80%, lo que dificulta su manejo, incrementa los costos logísticos y genera riesgos ambientales; además, tradicionalmente, parte del agua se elimina mediante secado al sol, con movimientos manuales y maquinaria para acelerar la evaporación, alcanzando humedades cercanas al 10%; sin embargo, esta práctica es lenta y económicamente desfavorable y para cumplir con los estándares del mercado nacional e internacional y con regulaciones como el límite máximo del 9% de humedad establecido por la Organización Marítima Internacional (IMO) para transporte marítimo, se emplean equipos especializados que permiten reducir la humedad a niveles menores al 10% (aproximadamente 90% de sólidos), este control no solo garantiza la calidad y seguridad en el transporte, sino que también favorece la recuperación de agua de proceso para su reutilización en la planta, disminuyendo así el consumo de agua fresca y mejorando la eficiencia operativa. (Hinostroza, 2021)

Además, la humedad en los concentrados minerales puede entenderse como una variable dependiente de un conjunto de condiciones físico-químicas y operativas específicamente del proceso de filtración y en el caso de los concentrados de zinc, la etapa de filtración a presión se ve influenciada por parámetros como la temperatura, la concentración de sólidos en la pulpa, el pH del medio, la presión aplicada, el espesor del queque filtrado, el tiempo de filtración y el tiempo de soplado de aire; cada uno de estos factores afecta el equilibrio entre la fuerza de retención capilar del agua en la estructura porosa del sólido y las fuerzas mecánicas que favorecen su expulsión, por lo que, a nivel teórico, un incremento en el tiempo o la presión de filtración puede aumentar la compactación del queque y reducir su porosidad, lo que disminuye el contenido de humedad, mientras que condiciones subóptimas de temperatura o concentración de sólidos pueden dificultar la evacuación del agua intersticial. (Masoume, Davood, & Alireza, 2023)

2.2.6 Representatividad, sesgo y precisión

En el muestreo de concentrados minerales, la representatividad se entiende como la

capacidad de una muestra para reflejar fielmente las características mineralógicas, geoquímicas, geológicas y físicas del lote o dominio del que proviene y de acuerdo con la Teoría del Muestreo (TOS):

- Una muestra representativa presenta niveles aceptables de sesgo y precisión, lo que implica definir correctamente el dominio de muestreo, asegurar una adecuada distribución espacial de los puntos, cubrir el rango de leyes primarias y evitar que los resultados estén dominados por valores extremos; además, el control de la heterogeneidad es esencial, ya que cuanto mayor sea esta, más difícil será lograr representatividad y en este sentido, las muestras de variabilidad permiten modelar la distribución tridimensional de atributos múltiples, mientras que las muestras compuestas pueden enmascarar dicha variabilidad y generar conclusiones poco fiables.
- El sesgo corresponde a errores sistemáticos que alteran los resultados del análisis, siendo común que provengan de tamaños de muestra inadecuados, métodos de recolección poco apropiados o preparación deficiente del material y prácticas como el muestreo puntual superficial (grab sampling) tienden a sobreestimar las leyes, ya que pueden concentrar una proporción mayor de minerales valiosos que la que realmente representa el lote total, estos errores, contemplados en la Teoría del Muestreo (TOS), pueden derivar en decisiones técnicas y económicas erróneas si no se controlan adecuadamente.
- Finalmente, la precisión describe el grado de dispersión de resultados obtenidos al repetir la medición en condiciones similares y se evalúa con métricas como el coeficiente de variación ($COV < 20\%$), la precisión de duplicados ($< 5\%$) o el sesgo aceptable ($< 2.5\%$) y para garantizarla, se implementan actividades de control de calidad que incluyen el uso de materiales de referencia certificados (CRM), blancos

y duplicados; un sistema de QA/QC bien estructurado, junto con verificaciones en campo y procedimientos estandarizados, es clave para minimizar el sesgo y mantener la precisión en rangos aceptables, asegurando así que los datos analíticos sean confiables y útiles para la toma de decisiones técnicas y comerciales. (Dominy & Hylke, 2025)

2.2.7 Trazabilidad

La trazabilidad en el contexto de la minería y procesamiento de concentrados se entiende como la capacidad de seguir el recorrido y la transformación de un material desde su punto de origen hasta su destino final, garantizando transparencia y confianza en toda la cadena de suministro; de acuerdo con la norma ISO (2015b), esto implica registrar e identificar cada etapa del material, verificando la información desde el inicio y manteniéndola disponible para todos los actores involucrados y entre las herramientas más robustas se encuentra la prueba analítica de origen, que se basa en parámetros físico-químicos propios del mineral, introducidos de manera natural por el ambiente y las condiciones geológicas de formación, actuando como una “huella digital” que permite vincularlo inequívocamente con su yacimiento (Dietrich & Melcher, 2022).

La Figura 7 muestra las etapas de trazabilidad en el manejo de muestras dentro de una operación minera. El proceso inicia con la recepción del material y avanza a través de puntos de control que aseguran la representatividad, homogeneidad, limpieza y humedad adecuada de la muestra. Posteriormente, se realizan actividades de reducción, secado y pulverizado, con controles específicos sobre temperatura, tiempo, peso constante y granulometría, garantizando así la confiabilidad de los resultados. Cada uno de estos pasos busca minimizar errores, contaminaciones o pérdidas de material, asegurando que la muestra refleje de manera fidedigna las características del mineral en estudio.

Más adelante, el flujo continúa con la preparación para calidad, donde intervienen controles como el etiquetado, duplicados y verificación de peso. Después, se procede al

envasado y embalaje bajo condiciones de insumos limpios y rótulos adecuados, para finalmente despachar la muestra al laboratorio. El proceso concluye con la comprobación de la lista frente al material físico y el registro de entrega, cerrando la trazabilidad. En síntesis, este esquema asegura que cada etapa del manejo de la muestra quede registrada y validada, fortaleciendo la confiabilidad, repetibilidad y calidad de los resultados analíticos en la minería.

Además, trazabilidad en minería se define como aquel seguimiento completo de un mineral desde que se extrae en la mina hasta que llega al comprador final y esto incluye anotar y controlar cada paso: Cómo se transporta, dónde se almacena, cómo se procesa, cómo se distribuye y cómo se vende, el objetivo es asegurar que el producto mantiene su calidad, reducir errores y demostrar que fue producido de forma legal y responsable; por ejemplo, en la minería, un sistema de trazabilidad permite confirmar que el metal proviene de un lugar específico y que no se mezcla con oro de origen desconocido y para esto se llevan registros detallados de la producción, del procesamiento en planta y del uso de insumos , incluyendo su recuperación; además, este control ayuda a obtener certificaciones que facilitan vender el mineral a mercados que pagan más por productos trazables y producidos con respeto al medio ambiente y a las leyes (Mamani, 2020).

Figura 7*Etapas o puntos de trazabilidad en mina caso de estudio**Nota. Elaboración propia*

2.3. Definición de términos básicos

- ✓ **Calidad de concentrado de mineral de exportación:** Características físico-químicas que determinan el valor comercial y la aptitud del mineral procesado para su uso industrial; según el Informe de Productos Minerales 2020 del USGS, esto incluye parámetros como pureza, composición de metales valiosos (ej. oro, cobre) y ausencia de contaminantes, que son críticos para cumplir con estándares

internacionales y demandas de mercados.

- ✓ **Trazabilidad:** Definida por la ISO 9001:2008 como la propiedad que permite rastrear la historia, ubicación y trayectoria de un producto a lo largo de la cadena de suministro mediante registros estandarizados.
- ✓ **Humedad:** Medida del vapor de agua presente en el aire o materiales; la humedad relativa (HR) expresa el porcentaje de vapor en relación con la capacidad máxima de saturación del aire a una temperatura dada, mientras que la humedad absoluta cuantifica la masa de agua por unidad de volumen (g/m^3) (Calam, 2020).
- ✓ **Contenido de metales:** Se refiere a la cantidad de elementos metálicos valiosos presentes en un concentrado mineral, expresado comúnmente en porcentaje (%) o partes por millón (ppm); este parámetro determina la calidad comercial del mineral y su procesamiento posterior (ISO 12744, 2006).
- ✓ **Sesgo:** Error sistemático que afecta la representatividad de datos en procesos mineros, como muestreo, análisis químicos o estimación de reservas (Dominy & Hylke, 2025).
- ✓ **Precisión:** Grado de repetibilidad de mediciones en controles de calidad mineros, como determinación de humedad, granulometría o contenido metálico (Dominy & Hylke, 2025).

2.4. Hipótesis de investigación

2.4.1 Hipótesis general

Existe relación significativa entre la trazabilidad y la calidad de concentrado de minerales para exportación.

2.4.2 Hipótesis específicas

- Existe relación significativa entre la trazabilidad y el contenido de metales en el

concentrado de minerales para exportación.

- Existe relación significativa entre la trazabilidad y la humedad en el concentrado de minerales para exportación.
- Existe relación significativa entre la trazabilidad y la representatividad, sesgo y precisión en la calidad del concentrado de minerales para exportación.

2.5. Operacionalización de las variables

Se propone dos variables, siendo “X” = Trazabilidad, y “Y” = Calidad de concentrado de minerales, para el estudio se empleó los informes de laboratorio metalúrgico de la empresa.

Variable X	Concepción operacional	Dimensiones	Indicadores	Técnicas / Instrumentos
Trazabilidad	Capacidad de rastrear cada etapa del proceso de producción del concentrado mineral, desde la materia prima hasta el producto final.	Recepción de mineral	Cantidad de material tomado Muestra representativa del lote	Cuantitativa / informes de trazabilidad
		Reducción de muestra	Humedad del ambiente Homogeneidad de material tras reducción	
		Secado de muestra	Temperatura de secado Tiempo de secado Peso inicial Peso final	
		Molienda	Porcentaje de material pasando malla	
		Preparación de muestras para calidad	Cantidad de duplicados Comparación peso constante antes de embalaje	
		Envasado y embalaje para envío	Registro de trazabilidad	
		Despacho a laboratorio	Verificación en lista de muestras	
Variable Y	Concepción operacional	Dimensiones	Indicadores	Técnicas / Instrumentos
Calidad de concentrado de minerales	Grado en que el concentrado cumple con las especificaciones técnicas y comerciales requeridas.	Contenido de metales	1. Ley del metal principal (%) y elementos contaminantes (ppm).	Cuantitativa / informes metalúrgicos
		Humedad	2. Porcentaje de humedad en el concentrado (%).	
		Representatividad, Sesgo y Precisión	3. Error de muestreo (%) y variabilidad en resultados de análisis.	

CAPITULO III METODOLOGÍA

3.1. Diseño metodológico

3.1.1. Tipo de investigación

Este estudio analizó cómo la trazabilidad en las etapas de producción minera influye en la calidad del concentrado mineral, evaluando indicadores clave como pureza del metal, humedad y precisión analítica mediante datos históricos de informes metalúrgicos; además con un enfoque práctico y metodología cuantitativa, se buscó identificar relaciones entre ambos factores para que a futuro se propongan mejoras en la eficiencia operativa, optimizando procesos sin realizar experimentos nuevos sino analizando información documentada de la trazabilidad y los resultados apuntaron a fortalecer la estandarización y control en la producción de concentrados; en consecuencia la presente investigación siguió una metodología básica, ya que de acuerdo con Hernández, et al. (2014) este tipo de estudio se centra en la búsqueda de conocimiento y la comprensión de fenómenos sin un objetivo inmediato de aplicación práctica.

3.1.2. Nivel de investigación

De acuerdo con el objetivo establecido en la presente investigación, se siguió un nivel descriptivo correlacional, ya que, de acuerdo con Hernández, et al. (2014) este nivel de investigación permite examinar la relación natural entre dos variables en su contexto real y en este caso, se analizará cómo la trazabilidad del proceso minero se vincula con indicadores de calidad del concentrado (ley de metales, humedad y precisión analítica), utilizando registros operativos; además, este enfoque busca identificar patrones y conexiones entre ambas variables para comprender su interacción en las condiciones actuales de producción, sin alterar el entorno existente.

3.1.3. Diseño de investigación

Para este estudio se adoptó un diseño no experimental, ya que, como señala Hernández et al. (2014), en este tipo de investigaciones no se manipulan las variables analizadas y en el presente caso, tanto la trazabilidad del proceso como los indicadores de calidad del concentrado

se evaluarán a partir de los datos históricos generados por el laboratorio metalúrgico de la empresa, manteniendo intactas las condiciones reales de producción; además, este enfoque permite analizar la relación entre ambas variables tal como ocurren naturalmente en las operaciones mineras, sin intervenir en el proceso productivo existente.

3.1.4. Enfoque de investigación

El estudio aplicó el método cuantitativo que de acuerdo con Hernández et al. (2014) se emplea para analizar numéricamente la relación entre las variables de estudio, en este caso entre la trazabilidad y los indicadores de calidad del concentrado, que se determinarán usando datos históricos del laboratorio; esto permitirá identificar correlaciones que apoyen la toma de decisiones técnicas.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

La población de estudio estuvo conformada por todas las muestras de concentrado destinadas a exportación, abarcando desde el momento de su recepción hasta la entrega en el laboratorio; esta población incluyó los distintos procesos y actores involucrados en la cadena de trazabilidad y control de calidad, tales como las observaciones en campo, registros de análisis de humedad, fichas de control de tiempos e identificación de muestras y también se considerarán las actividades realizadas en diferentes turnos y con distintas empresas contratistas, con el fin de garantizar la representatividad de los datos en todo el flujo operativo

3.2.2. Muestra

La muestra de estudio estuvo compuesta por un mínimo de 10 corridas de producción, cada una evaluada mediante 10 medidas de trazabilidad y 10 controles de calidad, cada uno con sus respectivos indicadores; la selección de estas corridas permitirá analizar de forma detallada las etapas del proceso, identificar posibles errores o faltas de control, y evaluar la consistencia de los resultados a través de diferentes condiciones operativas y empresas participantes.

3.3. Técnicas de recolección de datos

El estudio se enmarcó dentro del enfoque cuantitativo, ya que busca medir y analizar de manera numérica los indicadores de trazabilidad y calidad de las muestras de concentrado para exportación; este enfoque permitió obtener datos objetivos, comparables y reproducibles, facilitando la identificación de patrones y tendencias dentro del proceso evaluado.

3.3.1. Técnica

Se utilizó la técnica observacional, que consiste en registrar de manera directa y sistemática las características, eventos y condiciones presentes durante el manejo de las muestras; esta técnica permitirá documentar el flujo de la muestra desde la recepción hasta el laboratorio, así como las condiciones operativas, los controles aplicados y cualquier eventualidad que pueda afectar la trazabilidad o la calidad.

3.3.2. Instrumentos

El instrumento principal fue una guía de recolección de datos, diseñada para consignar de forma ordenada y estandarizada las observaciones realizadas y las mediciones obtenidas. Esta guía incluyó apartados específicos para registrar datos cuantitativos de las corridas, medidas de trazabilidad, controles de calidad, tiempos y observaciones relevantes, garantizando consistencia y precisión en la información recopilada.

3.4. Técnicas para el procesamiento de la información

El procesamiento de la información se llevó a cabo mediante técnicas estadísticas, las cuales permitieron organizar, tabular y analizar los datos obtenidos; este tratamiento estadístico facilitó la interpretación de los resultados, el cálculo de indicadores clave y la comparación entre diferentes condiciones y escenarios, aportando una base objetiva para la formulación de conclusiones y recomendaciones.

CAPITULO IV RESULTADOS

4.1. Análisis de los resultados

4.1.1. Recepción de mineral

Se inicia el análisis de la trazabilidad en el proceso de recepción de mineral y para ello se tomó en cuenta la cantidad de material muestreado y su representatividad los cuales corresponden a informes de trazabilidad de diferentes lotes registrados durante la recepción, los cuales fueron:

Tabla 1

Datos obtenidos en la trazabilidad para el proceso de recepción de mineral en diferentes lotes

Recepción de mineral Lote 1		Recepción de mineral Lote 2		Recepción de mineral Lote 3	
Cantidad material tomado (kg)	Muestra representativa (SI/NO)	Cantidad material tomado (kg)	Muestra representativa (SI/NO)	Cantidad material tomado (kg)	Muestra representativa (SI/NO)
23	SI	22	SI	22	SI
22,6	SI	23	SI	23	SI
24	SI	21	SI	23,5	SI
23	SI	22,5	SI	21,5	SI
22	SI	23	SI	22,6	SI
21	SI	24	SI	23	SI
22,5	SI	21	SI	21	SI

Con los datos obtenidos se realizó el análisis descriptivo con la finalidad de determinar el rango en el que oscilan las cantidades de material muestreado y también para observar si existe algún tipo de variabilidad atípica o si se sigue un procedimiento de muestreo consistente.

Tabla 2

Estadísticos descriptivos de datos de trazabilidad en proceso de recepción de mineral

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv.	
						Desviación	Varianza
Cantidad de mineral tomado (kg)	21	3,00	21,00	24,00	22,4381	,94047	,884

De acuerdo con los resultados de la tabla 2, se observa que la cantidad de mineral tomada durante el proceso de recepción se mantiene dentro de un rango entre 21 y 24 kg, con una diferencia total de 3 kg; además, el promedio de material muestreado es de aproximadamente 22,4 kg, lo que indica que, en general, se siguió un criterio uniforme al momento de realizar el muestreo; asimismo, la baja desviación estándar y la varianza pequeña

muestran que las cantidades registradas presentan poca dispersión entre sí, lo cual sugiere que no existen valores atípicos relevantes y que el procedimiento de muestreo fue consistente y controlado a lo largo de las 21 observaciones realizadas.

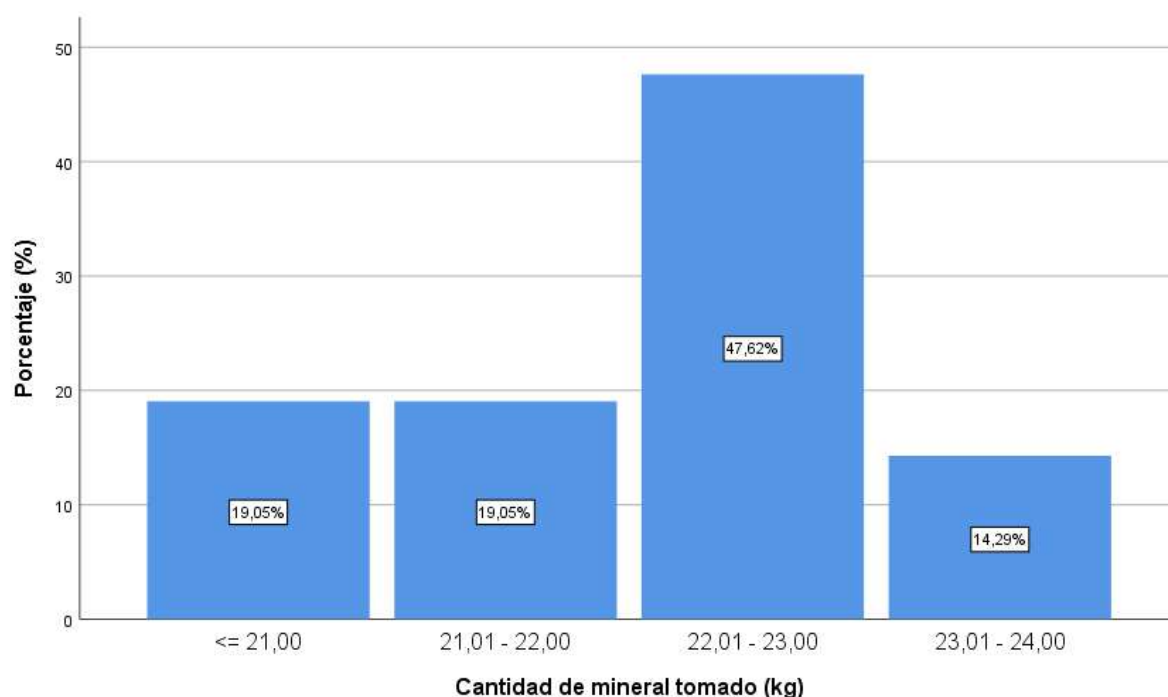
Tabla 3

Frecuencia de cantidad de material tomado (kg) en proceso de recepción de mineral

		Frecuencia	Porcentaje
Cantidad de material (kg)	<= 21,00	4	19,0
	21,01 - 22,00	4	19,0
	22,01 - 23,00	10	47,6
	23,01 - 24,00	3	14,3
	Total	21	100,0

Figura 8

Frecuencia de cantidad de material tomado (kg) en proceso de recepción de mineral

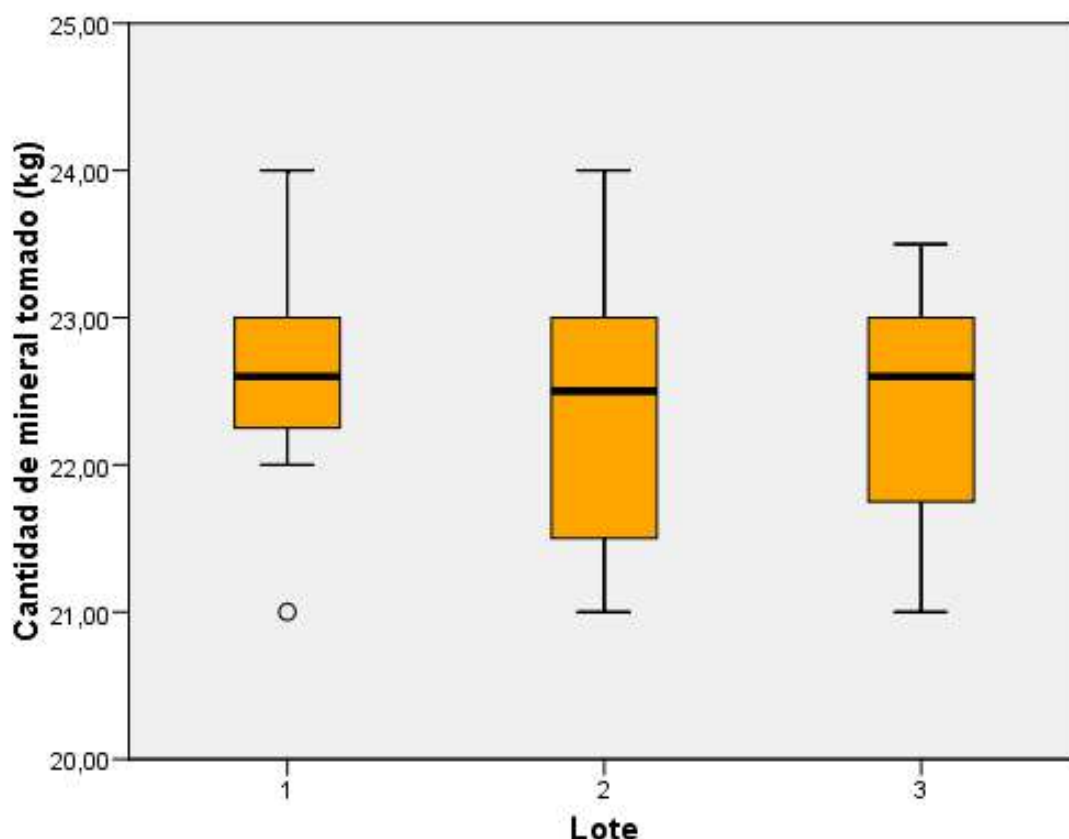


De acuerdo con la tabla 2 y la figura 8, se observa que la mayor parte de las muestras de mineral tomadas durante el proceso de recepción se concentra entre 22,01 y 23,00 kg., lo que confirma que esta cantidad fue la más utilizada en el muestreo; asimismo, los rangos menores, iguales o inferiores a 21 kg y entre 21,01 y 22,00 kg, presentan la misma frecuencia (19 % cada uno), mientras que el intervalo más alto, entre 23,01 y 24,00 kg, es el menos frecuente (14,3 %); por lo que la toma de material se realizó de manera relativamente

homogénea, con una clara tendencia a concentrarse alrededor de un valor central, lo que respalda la consistencia del procedimiento de muestreo.

Figura 9

Distribución de cantidad de material tomado (kg) en proceso de recepción de mineral por lote



De acuerdo con la figura 9, las medianas de las cantidades de mineral tomado en los tres lotes se ubican alrededor de valores similares, cercanos a 22,5 kg, lo que indica que el criterio de muestreo fue uniforme entre lotes; asimismo, la dispersión de los datos es moderada y comparable entre los tres grupos, aunque el segundo lote presenta una ligera mayor variabilidad, evidenciada por una caja más amplia; asimismo, se identifica un valor atípico en el primer lote, lo que sugiere una toma de muestra ligeramente inferior al resto.

Por otro lado, respecto a la representatividad de las muestras, todas fueron calificadas como muestra representativa, lo que indica que el procedimiento de muestreo cumplió de manera

consistente con los criterios técnicos establecidos para garantizar la representatividad del material tomado y esto evidencia que las cantidades de mineral muestreadas se mantienen dentro de un rango controlado, con baja variabilidad y sin desviaciones significativas entre lotes, lo que asegura que cada muestra refleja adecuadamente las características del lote correspondiente.

4.1.2. Reducción

Una vez confirmada la representatividad de las muestras obtenidas en la etapa de recepción de mineral, se procede a la etapa de reducción de muestra, la cual tiene como objetivo disminuir la cantidad de material sin alterar sus características físicas y químicas originales; esta etapa es fundamental para garantizar que el material final a analizar sea manejable y, al mismo tiempo, conserve la composición del lote del cual proviene.

Tabla 4

Datos obtenidos en la trazabilidad para el proceso de reducción de muestra en diferentes lotes

Reducción de muestra Lote 1		Reducción de muestra Lote 2		Reducción de muestra Lote 3	
Humedad de la muestra (%)	Homogeneidad de material tras reducción (SI/NO)	Humedad de la muestra (%)	Homogeneidad de material tras reducción (SI/NO)	Humedad de la muestra (%)	Homogeneidad de material tras reducción (SI/NO)
8,47	SI	8,53	SI	10,31	SI
7,77	SI	8,87	SI	11,38	SI
8,21	SI	8,81	SI	10,93	SI
7,77	SI	8,96	SI	10,45	SI
8,28	SI	8,45	SI	10,70	SI
8,38	SI	8,92	SI	10,96	SI
7,62	SI	8,68	SI	10,86	SI

Tabla 5

Estadísticos descriptivos de datos de trazabilidad en proceso de reducción de muestra lote 1

Lote	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza
1 Humedad de la muestra (%)	7	,85	7,62	8,47	8,0714	,34212	,117

De acuerdo con la tabla 5, los estadísticos descriptivos del proceso de reducción de muestra en el lote 1 evidencian que la humedad del ambiente se mantiene dentro de un rango estrecho, con valores que oscilan entre 7,62 % y 8,47 %, lo que representa una variación total

de 0,85 %; además, la humedad promedio es de aproximadamente 8,07 %, lo que indica un nivel estable durante el proceso de reducción, asimismo, la baja desviación estándar y la varianza reducida evidencian una dispersión mínima entre las mediciones, lo que sugiere que el procedimiento de reducción de muestra se realizó de manera controlada y consistente, sin variaciones significativas que puedan afectar la calidad o representatividad de la muestra final.

Tabla 6

Estadísticos descriptivos de datos de trazabilidad en proceso de reducción de muestra lote 2

Lote		N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza
2	Humedad de la muestra (%)	7	,51	8,45	8,96	8,7457	,19756	,039

Para el lote 2, los resultados del análisis descriptivo indican que la humedad de la muestra durante el proceso de reducción se mantiene altamente estable, con valores comprendidos entre 8,45 % y 8,96 %, lo que corresponde a un rango reducido de 0,51 %; además, la humedad media alcanza aproximadamente 8,75 %, reflejando condiciones homogéneas a lo largo del proceso.

Tabla 7

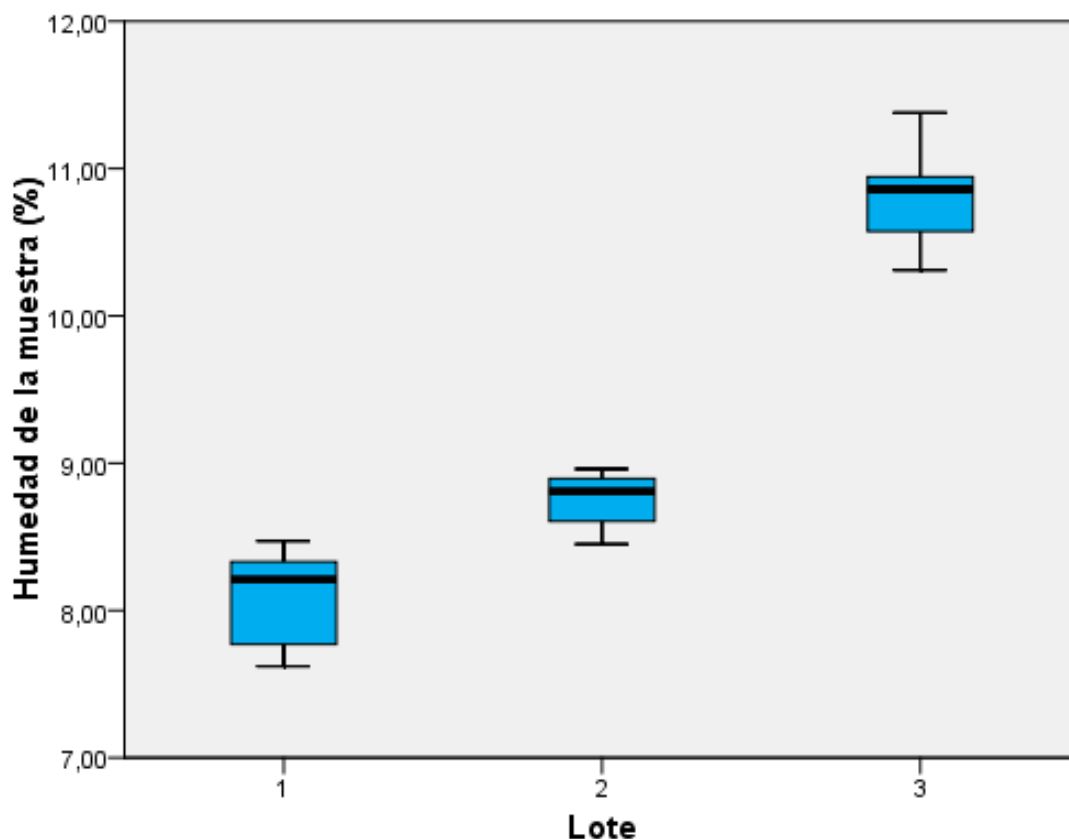
Estadísticos descriptivos de datos de trazabilidad en proceso de reducción de muestra lote 3

Lote		N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza
3	Humedad de la muestra (%)	7	1,07	10,31	11,38	10,7986	,35475	,126

Para el lote 3, el análisis descriptivo de la humedad durante el proceso de reducción de muestra evidencia valores que oscilan entre 10,31 % y 11,38 %, con un rango de 1,07 %, lo que indica una variabilidad ligeramente mayor en comparación con los lotes anteriores, aunque aún dentro de límites controlados, asimismo, la humedad promedio es de aproximadamente 10,80 %, reflejando un nivel característico y consistente para este lote, en tanto, la desviación estándar y la varianza, aunque superiores a las de los otros lotes, siguen siendo relativamente bajas.

Figura 10

Distribución de humedad (%) en proceso de reducción de muestra por lote



La figura 10, evidencia la distribución de la humedad de la muestra durante el proceso de reducción para los tres lotes analizados y se observa una clara diferenciación entre lotes, con valores de humedad crecientes del lote 1 al lote 3, lo que indica que cada lote presenta condiciones iniciales propias; además, dentro de cada lote, la dispersión de los datos es reducida, evidenciando un control adecuado del proceso de reducción de muestra y una variabilidad interna limitada, en el lote 2 se presenta la menor variabilidad, mientras que el lote 3 muestra una dispersión ligeramente mayor, aunque sin valores atípicos; por lo que el proceso de reducción de muestra fue consistente y estable en cada lote, y mantiene la homogeneidad necesaria para asegurar su confiabilidad.

Respecto a la homogeneidad, nuevamente se observa que en los 3 lotes se cumple con dicha condición, por lo que se evidencia que el procedimiento fue eficaz para lograr una mezcla

uniforme del mineral reducido y esto refuerza lo hallado anteriormente respecto a la baja variabilidad en la humedad, lo que demuestra que efectivamente el material mantiene características consistentes en toda la muestra.

4.1.3. Secado

Tabla 8

Datos obtenidos en la trazabilidad para el proceso de secado de muestra en diferentes lotes

Secado de muestra Lote 1				Secado de muestra Lote 2				Secado de muestra Lote 3			
Temperatura de secado (°C)	Tiempo de secado (min)	Peso inicial (kg)	Peso final (kg)	Temperatura de secado (°C)	Tiempo de secado (min)	Peso inicial (kg)	Peso final (kg)	Temperatura de secado (°C)	Tiempo de secado (min)	Peso inicial (kg)	Peso final (kg)
105	900	1,366	1,250	105	900	1,405	1,285	105	900	1,561	1,400
104	900	1,432	1,320	104	900	1,416	1,290	104	900	1,573	1,394
106	900	1,470	1,349	106	900	1,394	1,271	106	900	1,518	1,352
105	900	1,405	1,289	105	900	1,389	1,265	105	900	1,579	1,415
105	900	1,453	1,340	104	900	1,365	1,250	104	900	1,441	1,287
104	900	1,431	1,289	106	900	1,448	1,319	106	900	1,491	1,328
106	900	1,434	1,313	105	900	1,398	1,277	103	900	1,481	1,320

Tabla 9*Estadísticos descriptivos de datos de trazabilidad en proceso de secado de muestra lote 1*

		Desv.						
Lote		N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desviación	Varianza
1	Temperatura de secado (°C)	7	2,00	104,00	106,00	105,0000	,81650	,667
	Tiempo de secado (min)	7	,00	900,00	900,00	900,0000	,00000	,000
	Peso inicial	7	,104	1,366	1,470	1,42729	,033713	,001
	Peso final	7	,099	1,250	1,349	1,30714	,031499	,001
	N válido (por lista)	7						

De acuerdo con la tabla 9, se observa que la temperatura en el lote 1, se mantuvo dentro de un rango estrecho, entre 104 °C y 106 °C, con un valor promedio de 105 °C; además, la baja desviación estándar indica que la temperatura fue controlada de manera adecuada durante todo el proceso, sin fluctuaciones importantes; por lo que el secado se realizó bajo condiciones térmicas uniformes, evitando diferencias en el grado de secado de las muestras.

Por otro lado, el tiempo de secado fue exactamente el mismo para todas las muestras, con un valor constante de 900 minutos y la ausencia total de variación refleja que el procedimiento se aplicó de forma estrictamente estandarizada, lo que elimina este factor como fuente de variabilidad y garantiza condiciones homogéneas para todas las muestras del lote.

Asimismo, el peso inicial de las muestras presenta una variación mínima, con valores entre 1,366 y 1,470 y un promedio aproximado de 1,43 y la baja dispersión observada indica que las porciones de muestra antes del secado fueron tomadas de manera uniforme, lo que contribuye a la consistencia del proceso y facilita la comparación de los resultados posteriores. Finalmente el peso final que fue medido después del secado, también muestra una variabilidad reducida, con valores comprendidos entre 1,250 y 1,349 y un promedio cercano a 1,31; esta consistencia sugiere que el proceso de secado fue efectivo y uniforme, logrando una pérdida de humedad similar en todas las muestras.

Tabla 10*Estadísticos descriptivos de datos de trazabilidad en proceso de secado de muestra lote 2*

Lote		N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv.	
							Desviación	Varianza
2	Temperatura de secado (°C)	7	2,00	104,00	106,00	105,0000	,81650	,667
	Tiempo de secado (min)	7	,00	900,00	900,00	900,0000	,00000	,000
	Peso inicial	7	,083	1,365	1,448	1,40214	,025622	,001
	Peso final	7	,069	1,250	1,319	1,27957	,015805	,001
	N válido (por lista)	7						

Par a el lote 2, la temperatura registrada varía únicamente entre 104 y 106 °C, con una media exacta de 105 °C y una desviación estándar de 0,82 °C y esta dispersión reducida (varianza 0,667) indica que las fluctuaciones térmicas fueron mínimas.

Respecto al tiempo de secado, este también fue constante con un valor 900 minutos; además el peso inicial de las muestras oscila entre 1,365 y 1,448, con un rango de 0,083 y una media de 1,402 y la desviación estándar de 0,0256 evidencia una baja dispersión relativa, lo que evidencia una adecuada precisión en la toma de las submuestras antes del secado y reduce el error asociado a la masa inicial y finalmente, el peso final varía entre 1,250 y 1,319, con un rango aún menor de 0,069 y una media de 1,279 y la desviación estándar de 0,0158 confirma que, tras el secado, las muestras convergen hacia valores muy similares, lo que analíticamente indica una pérdida de humedad homogénea para el lote 2.

Tabla 11*Estadísticos descriptivos de datos de trazabilidad en proceso de secado de muestra lote 3*

Lote		N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv.	
							Desviación	Varianza
3	Temperatura de secado (°C)	7	3,00	103,00	106,00	104,7143	1,11270	1,238
	Tiempo de secado (min)	7	,00	900,00	900,00	900,0000	,00000	,000
	Peso inicial	7	,138	1,441	1,579	1,52057	,052561	,003
	Peso final	7	,128	1,287	1,415	1,35667	,037136	,001

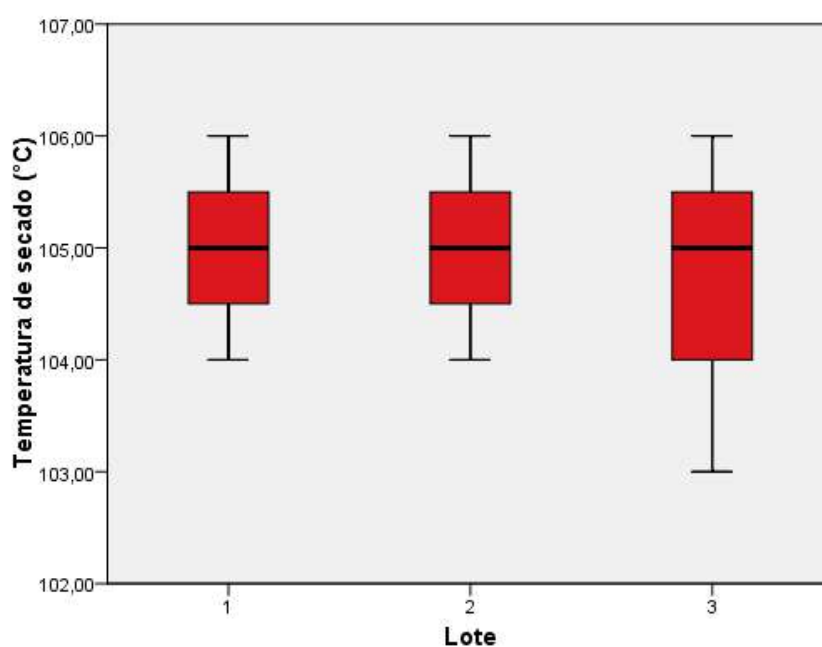
N válido (por
lista) 7

Respecto al lote 3, la temperatura de secado registrada varía entre 103 y 106 °C, con una media de 104,71 °C y una desviación estándar de 1,11 °C; esta mayor dispersión, reflejada en una varianza de 1,238, indica fluctuaciones térmicas ligeramente más amplias en comparación con los lotes anteriores, aunque sin comprometer la estabilidad general del proceso.

Asimismo, el tiempo de secado se mantuvo constante en 900 minutos para todas las muestras y en cuanto al peso inicial, los valores oscilan entre 1,441 y 1,579, con un rango de 0,138 y una media de 1,521; la desviación estándar de 0,0526 muestra una variabilidad moderada, asociada a diferencias naturales en las submuestras antes del secado y finalmente, el peso final varía entre 1,287 y 1,415, con un rango de 0,128 y una media de 1,356 y la desviación estándar de 0,0371 indica que, pese a la mayor variabilidad inicial, el proceso de secado condujo a valores finales relativamente próximos, lo que analíticamente sugiere una eliminación de humedad consistente en el lote 3.

Figura 11

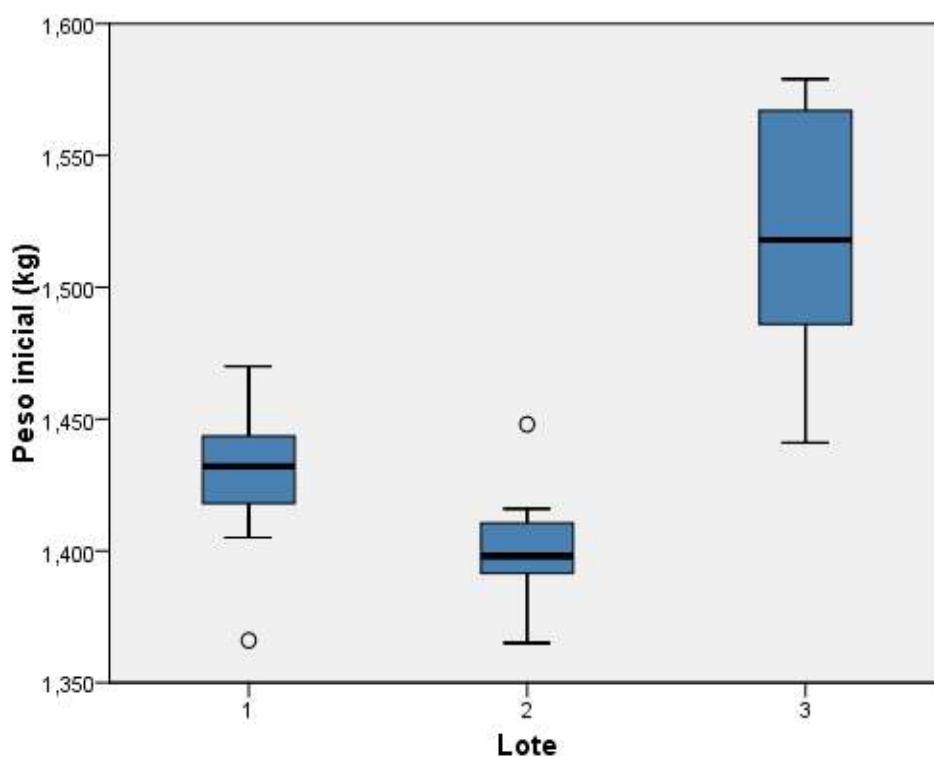
Distribución de temperatura (°C) en proceso de secado de muestra por lote



De acuerdo con la figura 11, se observa que la distribución de la temperatura de secado para los tres lotes analizados, evidencia que las medianas se sitúan en torno a 105 °C, lo que indica que el proceso operó bajo un mismo punto de referencia térmico; además, los lotes 1 y 2 presentan una dispersión reducida y rangos similares, lo que sugiere un control térmico más estable durante el secado; en contraste, el lote 3 exhibe un rango más amplio, con valores que se extienden hacia temperaturas ligeramente menores, reflejando una mayor variabilidad operativa.

Figura 12

Distribución de peso inicial (kg) en proceso de secado de muestra por lote

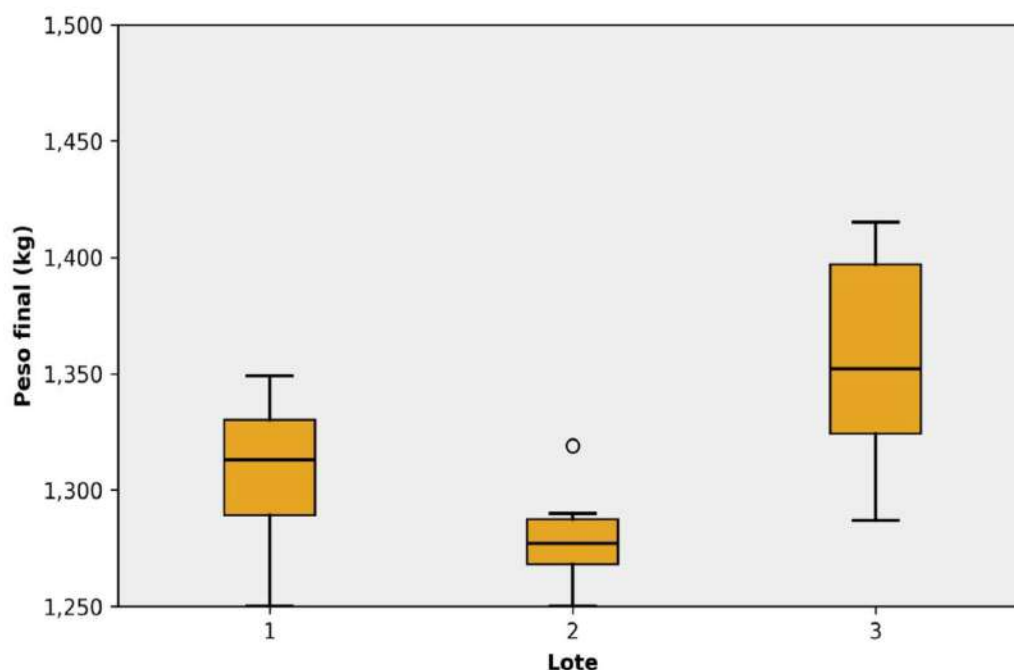


De acuerdo con la figura 12, el lote 2 presenta los valores más bajos y con menor dispersión, lo que indica una preparación más uniforme de las submuestras en esta etapa y el lote 1 muestra una dispersión moderada y la presencia de un valor atípico hacia pesos menores, lo que sugiere una submuestra ligeramente inferior al resto y por su parte, el lote 3 exhibe los valores más altos de peso inicial y una mayor variabilidad, reflejando diferencias más marcadas en la masa de las muestras antes del secado; por lo que, estas diferencias entre lotes pueden

deberse a características propias del material y al tamaño de las muestras, y no a fallas del proceso, ya que dentro de cada lote la variabilidad se mantiene controlada.

Figura 13

Distribución de peso final (kg) en proceso de secado de muestra por lote



De acuerdo con la figura 13, el lote 2 presenta los valores de peso final más bajos y una dispersión reducida, lo que indica que las muestras alcanzaron un estado de secado bastante uniforme; asimismo, el lote 1 muestra valores intermedios, con una variabilidad moderada y la presencia de un valor atípico hacia pesos menores, lo que sugiere una mayor pérdida de humedad en una de las submuestras; en contraste, el lote 3 presenta los pesos finales más elevados y la mayor dispersión, reflejando diferencias más marcadas en la masa residual después del secado.

4.1.4. Molienda

Tabla 12

Datos obtenidos en la trazabilidad para el proceso de molienda en diferentes lotes

Porcentaje de material pasando malla (%)	
Lote 1	100
Lote 2	100
Lote 3	100

En la etapa de molienda, el 100 % del material pasa la malla en los tres lotes y esto indica que el mineral fue reducido de tamaño de manera completa y uniforme, asegurando una granulometría adecuada para las etapas posteriores y evitando sesgos asociados a partículas gruesas.

4.1.5. Preparación de muestras para determinación de calidad

Tabla 13

Datos obtenidos en la trazabilidad para el proceso de preparación de muestras para calidad en diferentes lotes

Cantidad de duplicados	
Lote 1	8
Lote 2	8
Lote 3	8

Durante la preparación de muestras para control de calidad, se observa una la obtención de ocho duplicados por lote lo que refleja un adecuado nivel de replicación, lo que fortalece la confiabilidad y reproducibilidad de los resultados analíticos.

4.1.6. Envasado y embalaje para envío

Tabla 14

Datos obtenidos en la trazabilidad para el proceso de envasado y envío en diferentes lotes

Registro de trazabilidad	
Lote 1	Si
Lote 2	Si
Lote 3	Si

En la etapa de envasado y embalaje para envío, la comparación de peso constante antes del embalaje confirma que las muestras se encontraban completamente secas y estables, sin pérdidas adicionales de humedad o material, lo cual es clave para preservar la integridad de la muestra durante el transporte.

4.1.7. Despacho a laboratorio

Tabla 15

Datos obtenidos en la trazabilidad para el despacho a laboratorio en diferentes lotes

Verificación en la lista de muestras	
Lote 1	Si
Lote 2	Si
Lote 3	Si

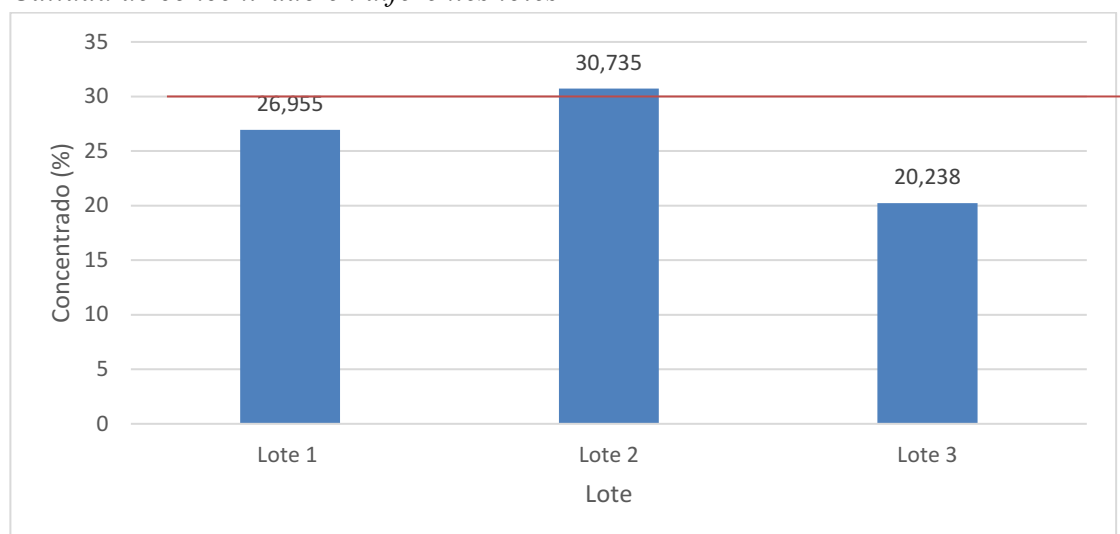
Finalmente, en el despacho al laboratorio, el cumplimiento total del registro de

trazabilidad y la verificación en la lista de muestras evidencia que el control documental fue correcto y consistente, garantizando la identificación adecuada de las muestras y la continuidad del control de calidad a lo largo de todo el proceso.

4.1.8. Resultados respecto a la calidad de concentrado de minerales

Figura 14

Calidad de concentrado en diferentes lotes



De acuerdo con la Figura 14, se observa que el Lote 2 presenta la mayor ley (30,735%), superando claramente el valor exigido, lo que indica un concentrado de alta calidad y adecuado para su comercialización; asimismo, el Lote 1 alcanza una ley de 26,955 %, que se sitúa ligeramente por debajo de la línea de referencia, evidenciando un cumplimiento marginal de la exigencia y una calidad aceptable pero ajustada y en contraste, el Lote 3 registra la menor ley (20,238 %), ubicándose claramente por debajo del valor requerido, lo que sugiere un concentrado de menor calidad que no cumple con la especificación establecida y que podría requerir reprocesamiento o mezcla con material de mayor ley para alcanzar el estándar exigido.

Tabla 16

Análisis descriptivo de calidad de concentrado en diferentes lotes

Lote	Ley objetivo (%)	Ley medida (%)	Desviación (%)	Evaluación
1	30,00	26,955	-10,15	Aceptable
2	30,00	30,735	+2,45	Excelente
3	30,00	20,236	-32,55	Crítico

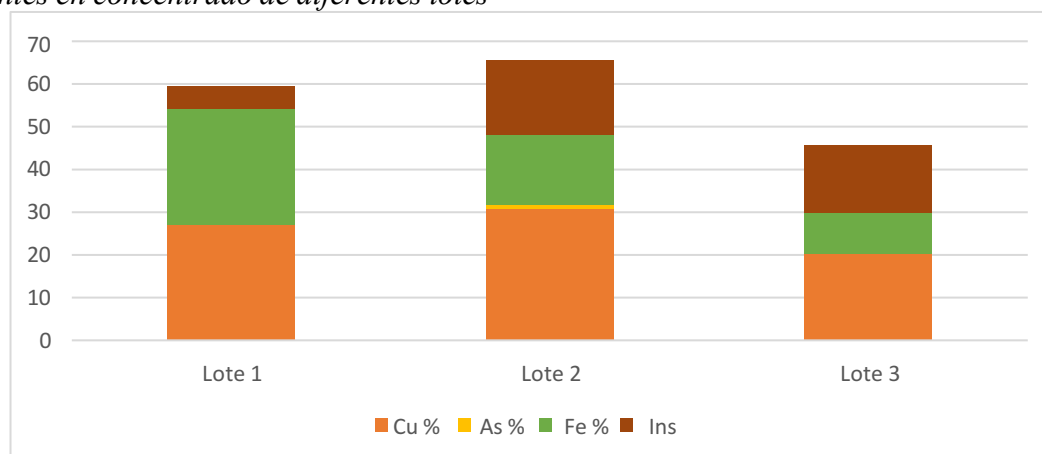
Tabla 17*Estadísticos globales para concentrado en diferentes lotes*

Indicador	Valor
Media (%)	25,975
Desviación estándar (%)	4,35
Rango (%)	10,499
Cumplimiento global (%)	66,7

De acuerdo con la tabla 16 y la tabla 17, aunque uno de los tres lotes alcanza y supera la ley establecida, los otros dos registran desviaciones negativas, siendo especialmente significativa en el Lote 3, clasificado como crítico; asimismo, esta dispersión se refleja en la media del proceso (25,975 %), que se ubica por debajo de la ley objetivo, así como en una desviación estándar de 4,35 %, indicativa de variabilidad operativa; en tanto, el rango de 10,499% confirma la amplitud entre el mejor y el peor desempeño, mientras que el cumplimiento global del 66,7 % evidencia que solo una parte de los lotes logra satisfacer los criterios de calidad establecidos.

Tabla 18*Contaminantes en concentrado de diferentes lotes*

	Cu %	As %	Fe %	Ins (%)
Lote 1	26.955	0.000484	27.39	5.25
Lote 2	30.735	1.04	16.41	17.41
Lote 3	20.238	0.00016	9.66	15.77

Figura 15*Contaminantes en concentrado de diferentes lotes*

De acuerdo con la tabla 18 y la figura 15, el lote 1 presenta un contenido moderado de hierro y un bajo nivel de insolubles, acompañado de una presencia muy reducida de arsénico, lo que indica un concentrado relativamente limpio desde el punto de vista de impurezas penalizables; en contraste, el lote 2, aunque registra la mayor ley de cobre, muestra un contenido elevado de arsénico (1,04 %) y un alto porcentaje de insolubles, factores que pueden generar penalidades comerciales y reflejan una menor selectividad en el proceso de concentración y finalmente el lote 3 exhibe los menores valores de hierro y arsénico, pero mantiene un porcentaje significativo de insolubles, lo que sugiere arrastre de ganga y una eficiencia de limpieza limitada.

Tabla 19

Análisis descriptivo de contaminantes en concentrado en diferentes lotes

Contaminante	Media (%)	Rango (%)	Desv. estándar (%)
As	~0,347	10,398	~0,6
Fe	17,82	17,73	~8,9
Insolubles	12,81	12,16	~6,4

De acuerdo con la tabla 19, el arsénico (As) presenta una media relativamente baja, pero con un rango amplio y una desviación estándar elevada en relación con su valor medio, lo que indica una alta variabilidad asociada principalmente al Lote 2, que concentra el mayor contenido de este contaminante; además, el hierro (Fe) exhibe una variabilidad moderada, reflejada en un rango amplio y una desviación estándar significativa, lo que sugiere fluctuaciones en la eficiencia de separación entre mineral útil y ganga; por su parte, los insolubles mantienen una media elevada y una dispersión considerable, evidenciando problemas recurrentes de arrastre de material no deseado, especialmente en los lotes 2 y 3.

Tabla 20*Valores de humedad en concentrado de diferentes lotes*

Lote 1 (%)	Lote 2 (%)	Lote 3 (%)
11.35	11.41	12.12
12.04	11.32	12.43
11.69	11.31	11.98
11.73	11.34	12.08
12.59	11.44	12.1
12.94	11.35	11.9
11.4	11.39	12.11
11.42	11.43	9.61
11.25	11.26	10.67
11.4	11.1	10.57

Tabla 21*Estadísticos descriptivos de valores de humedad en concentrado en lote 1*

Lote	Variable	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. estándar	Varianza
1	Humedad (%)	10	1,69	11,25	12,94	117,810	0,57388	0,32934

Los resultados del Lote 1 muestran que el contenido de humedad del concentrado presenta una variación moderada, con valores que oscilan entre 11,25 % y 12,94 %, y un rango de 1,69 %; además, la desviación estándar de 0,57 % indica que las mediciones se distribuyen de manera relativamente cercana a la media, lo que sugiere un control aceptable del proceso de secado; asimismo, el lote 1 se clasifica dentro de la categoría de muy alta humedad (%H > 10%), ya que todas las mediciones se encuentran por encima de este umbral y esta condición indica que el concentrado presenta un contenido de agua elevado, lo que puede afectar negativamente su manejo, transporte y comercialización.

Tabla 22*Estadísticos descriptivos de valores de humedad en concentrado en lote 2*

Lote	Variable	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. estándar	Varianza
2	Humedad (%)	10	0,34	11,10	11,44	11,350	0,10036	0,01007

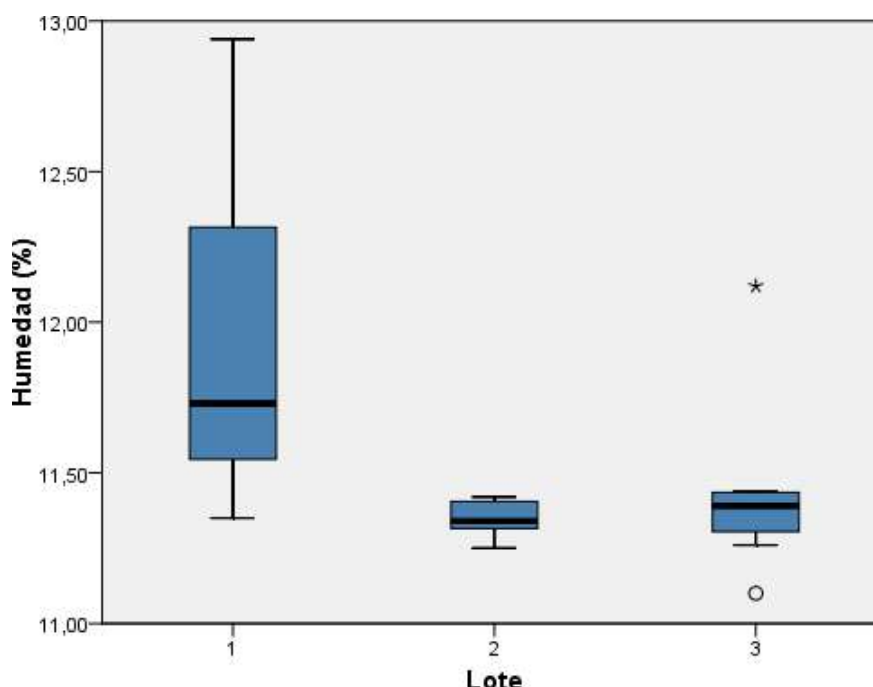
En el Lote 2 se observa un comportamiento mucho más estable y uniforme del contenido de humedad, esto debido a que, el rango es reducido (0,34 %) y los valores mínimos y máximos se mantienen muy próximos entre sí, lo que se refleja en una desviación estándar baja (0,10 %) y una varianza mínima; por otro lado, también se ubica en la categoría de muy alta humedad ($\%H > 10 \%$), dado que este valor se mantiene ligeramente por encima del límite establecido en todas las muestras.

Tabla 23

Estadísticos descriptivos de valores de humedad en concentrado en lote 3

Lote	Variable	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. estándar	Varianza
3	Humedad (%)	10	2,82	9,61	12,43	115,570	0,93105	0,86685

El Lote 3 se presenta la mayor variabilidad en el contenido de humedad entre los tres lotes analizados y los valores fluctúan ampliamente, desde 9,61 % hasta 12,43 %, con un rango de 2,82 %, acompañado de una desviación estándar elevada (0,93 %) y una varianza considerable; por lo que, existe una falta de uniformidad en el proceso de secado o en el manejo del concentrado, lo que podría generar problemas de calidad y la necesidad de ajustes operativos para lograr una humedad más controlada y consistente; asimismo este lote se clasifica igualmente como de muy alta humedad ($\%H > 10 \%$), considerando que la mayoría de los valores superan el umbral definido, a pesar de que algunas mediciones se aproximan al límite inferior.

Figura 16*Distribución de humedad en concentrado por lote*

De acuerdo con la figura 16, el lote 1 presenta la mayor dispersión de datos, evidenciada por una caja más amplia y valores que alcanzan los niveles más altos de humedad, lo que confirma una variabilidad significativa y un control menos consistente del proceso de secado; en contraste, el lote 2 exhibe una distribución estrecha y homogénea, con valores muy concentrados alrededor de la mediana, lo que indica un proceso estable y bien controlado, aunque con humedad aún elevada y el lote 3 muestra una variabilidad intermedia, con la presencia de valores atípicos; por lo que, si bien todos los lotes presentan humedades superiores al umbral establecido, el lote 2 es el más consistente, mientras que el lote 1 requiere mayor control para reducir la dispersión y estabilizar la calidad del concentrado.

Por otro lado, se realizó el análisis de variabilidad para cada lote respecto a la humedad de concentrado y para ello se usó la expresión:

$$CV (\%) = \left(\frac{\text{Desviación estandar}}{\text{Media}} \right) * 100$$

Los resultados del coeficiente de variación (CV) se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 24*Coefficientes de variación en los diferentes lotes respecto a su humedad*

Lote	Desviación estándar (%)	Media de humedad (%)	Coefficiente de variación (%)
1	0,57388	11,781	4,87
2	0,10036	11,335	0,89
3	0,93105	11,557	8,06

De acuerdo con la tabla 24, el Lote 2 exhibe una variabilidad mínima ($CV = 0,89\%$), lo que demuestra un control excepcionalmente consistente y estricto durante el secado; en contraste, el lote 1 muestra una variabilidad moderada ($CV = 4,87\%$), indicando un control aceptable y el Lote 3, con el CV más alto ($8,06\%$), evidencia una dispersión considerable en sus mediciones de humedad, lo que sugiere inconsistencias operativas que afectan la uniformidad del producto final y requieren intervención para su corrección.

4.2. Contrastación de hipótesis

4.2.1. Contrastación de Hipótesis general

Existe relación significativa entre la trazabilidad y la calidad de concentrado de minerales para exportación.

Tabla 25*Estadística de regresión*

Parámetro	Valor
Coefficiente de correlación múltiple	0,820377
Coefficiente de determinación R^2	0,67301842
R^2 ajustado	0,66211903
Error típico	0,74533756
Observaciones	32

Tabla 26*Análisis de varianza*

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	34,3029076	34,3029076	61,74828	9,062E-09
Residuos	30	16,6658424	0,55552808		
Total	31	50,96875			

De acuerdo con las tablas 25 y 26, los resultados de la estadística de regresión muestran que la trazabilidad, mantiene una relación lineal fuerte y positiva con la calidad del

concentrado, como lo indica el coeficiente de correlación múltiple de 0.820; además, el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.673$) evidencia que el 67.3 % de la variabilidad en la calidad del concentrado es explicada por la trazabilidad y el R^2 ajustado (0.662) confirma que este nivel de explicación se mantiene estable reforzando la consistencia del modelo; por otro lado, el error típico de 0.745 sugiere una variabilidad moderada de los valores reales respecto a los estimados y finalmente, el análisis de varianza confirma que el modelo es estadísticamente significativo, ya que el valor de F calculado (61.75) presenta un nivel de significancia extremadamente bajo (9.06×10^{-9}), permitiendo rechazar la hipótesis nula y concluir que la trazabilidad influye de manera significativa en la calidad del concentrado. Este resultado constituye evidencia estadística contundente para rechazar la hipótesis nula. Esta relación positiva entre trazabilidad y calidad del concentrado es coherente con los hallazgos de Choquegonza (2024), quien demostró que la implementación de procedimientos de trazabilidad operativa en la Cooperativa Minera Señor de Ananea mejoró el control sobre las operaciones minero-metalúrgicas; asimismo, el Informe de la OCDE (2025) sobre el papel de la trazabilidad en cadenas de suministro de minerales críticos refuerza que los sistemas de seguimiento efectivos son un factor determinante para garantizar la calidad y aceptación comercial de los concentrados minerales en los mercados internacionales.

4.2.2. Contratación de Hipótesis específica 1

Existe relación significativa entre la trazabilidad y el contenido de metales en el concentrado de minerales para exportación.

Tabla 27
Estadística de regresión

Parámetro	Valor
Coeficiente de correlación múltiple	0.938839344
Coeficiente de determinación R^2	0.881419314
R^2 ajustado	0.877466624
Error típico	0.470479132
Observaciones	32

Tabla 28
Análisis de varianza

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	49.35948158	49.35948158	222.992	1.97502E-15
Residuos	30	6.640518417	0.221350614		
Total	31	56			

En este caso, los resultados de la estadística de regresión evidencian una relación muy fuerte entre la trazabilidad y el contenido de metales en el concentrado, sustentada por un coeficiente de correlación múltiple de 0.939; además, el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.881$) indica que el 88.1 % de la variabilidad en el contenido de metales del concentrado es explicada por la trazabilidad, lo que demuestra un alto poder explicativo del modelo y por otro lado, el error típico de 0.470 refleja una baja dispersión de los valores observados respecto a los estimados, lo que sugiere una buena precisión predictiva; asimismo, el análisis de varianza confirma que el modelo es altamente significativo desde el punto de vista estadístico, dado que el valor de F calculado (222.99) es elevado y está asociado a un nivel de significancia muy bajo (1.98×10^{-15}), permitiendo concluir que la trazabilidad tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la presencia de metales en el concentrado.

Desde el punto de vista metalúrgico, el contenido de cobre presentó una variación crítica entre lotes: el Lote 2 superó el objetivo con 30.74%, el Lote 1 lo aproximó de forma marginal con 26.95% (−10.15% de desviación) y el Lote 3 quedó significativamente por debajo con 20.24% (−32.55% de desviación), siendo clasificado como crítico. Adicionalmente, el contenido de arsénico en el Lote 2 (As = 1.04%) supera ampliamente el umbral de penalización del 0.5% típicamente establecido en contratos internacionales de venta de concentrados de cobre, lo que representa un riesgo comercial significativo a pesar de la alta ley metálica de ese lote. Estos resultados respaldan lo reportado por Ricra (2022) en la Sociedad Minera El Brocal, donde se identificaron sesgos y variabilidades en el contenido de metales a pesar de contar con protocolos de muestreo establecidos, confirmando que la trazabilidad del proceso de muestreo

es una condición necesaria pero no suficiente para garantizar la uniformidad del contenido metálico, el cual depende además de la variabilidad mineralógica del material alimentado al proceso de concentración.

4.2.3. Contratación de Hipótesis específica 2

Existe relación significativa entre la trazabilidad y la humedad en el concentrado de minerales para exportación.

Tabla 29

Estadística de regresión

Parámetro	Valor
Coefficiente de correlación múltiple	0,91073602
Coefficiente de determinación R^2	0,829440098
R^2 ajustado	0,823754768
Error típico	0,519495439
Observaciones	32

Tabla 30

Análisis de varianza

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	39.37248465	39.37248465	145.891	4.73993E-13
Residuos	30	8.096265348	0.269875512		
Total	31	47.46875			

En tanto, respecto a la hipótesis específica 2 se evidencia que el coeficiente de correlación múltiple de 0,911 indica una relación lineal fuerte entre ambas variables, mientras que el coeficiente de determinación ($R^2 = 0,829$) muestra que el 82,9 % de la variabilidad de la humedad del concentrado es explicada por la trazabilidad, confirmando su alta capacidad explicativa y este resultado se mantiene consistente al considerar el tamaño muestral, como lo refleja el R^2 ajustado de 0,824, lo que demuestra la solidez del modelo y el error típico de 0,519 sugiere una dispersión relativamente baja de los valores observados respecto a los estimados; asimismo, el análisis de varianza confirma que el modelo es altamente significativo desde el punto de vista estadístico, dado que el valor de F calculado (145,89) y su nivel de significancia bajo ($4,74 \times 10^{-13}$) lo que permite rechazar la hipótesis nula, validando que la trazabilidad influye de manera significativa en la humedad del concentrado.

Desde una perspectiva operativa y de seguridad, los niveles de humedad registrados en los tres lotes (medias de 11,78%, 11,34% y 11,56% para los Lotes 1, 2 y 3, respectivamente) superan sistemáticamente el umbral del 9% considerado crítico bajo el Código IMSBC (International Maritime Solid Bulk Cargoes) para el transporte seguro de concentrados de minerales, implicando un riesgo de licuefacción del concentrado durante el transporte marítimo. Esta situación es consistente con lo reportado por Flores y Hermoza (2024) en la Compañía Minera Antapaccay, quienes señalan que la optimización del proceso de análisis de humedad no resuelve por sí sola el problema de la alta humedad en concentrados de cobre, ya que esta depende de las condiciones del proceso de filtración previo; por su parte, Masoume et al. (2023) demostraron mediante redes neuronales artificiales que la humedad en el queque de filtración de concentrados de zinc está determinada principalmente por la presión y el tiempo de filtración, factores externos al proceso de preparación de muestras que deben integrarse en un sistema de trazabilidad más amplio.

4.2.4. Contrastación de Hipótesis específica 3

Existe relación significativa entre la trazabilidad y la representatividad, sesgo y precisión en la calidad del concentrado de minerales para exportación.

Tabla 30

Estadística de regresión

Parámetro	Valor
Coefficiente de correlación múltiple	0,960953227
Coefficiente de determinación R^2	0,923431105
R^2 ajustado	0,920878809
Error típico	0,391328238
Observaciones	32

Tabla 31

Análisis de varianza

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	55,4058663	55,4058663	361,804008	2,73354E-18
Residuos	30	4,594133697	0,15313779		
Total	31	60			

Finalmente, la validación de la hipótesis específica 3 demuestra que existe una relación

altamente significativa entre la trazabilidad y la representatividad, el sesgo y la precisión en la calidad del concentrado de minerales para exportación, de acuerdo con los resultados del análisis de regresión, esto debido al coeficiente de correlación múltiple de 0,961 que evidencia una relación lineal extremadamente fuerte entre las variables analizadas; asimismo, el coeficiente de determinación ($R^2 = 0,923$) indica que el 92,3 % de la variabilidad asociada a la representatividad, el sesgo y la precisión de la calidad del concentrado es explicada por la trazabilidad y el análisis de varianza confirma la significancia estadística del modelo, dado que el valor de F calculado (361,80) y su nivel de significancia extremadamente bajo ($2,73 \times 10^{-18}$) permiten rechazar ampliamente la hipótesis nula, validando que la trazabilidad ejerce una influencia determinante sobre la representatividad, el sesgo y la precisión en la calidad del concentrado.

Los coeficientes de variación calculados evidencian niveles diferenciados de precisión entre lotes: el Lote 2 exhibió una precisión sobresaliente ($CV = 0,89\%$), el Lote 1 mostró un nivel aceptable ($CV = 4,87\%$), mientras que el Lote 3 alcanzó el valor más alto ($CV = 8,06\%$), acercándose al límite del 10% recomendado por la ISO 12743 para la variabilidad en procesos de preparación de muestras de concentrado. La generación de 8 duplicados por lote, consistente con los requerimientos del Método 1 de la ISO 12744, permitió cuantificar las varianzas de muestreo, procesamiento y análisis de manera diferenciada, lo que constituye una práctica de trazabilidad sólida. Estos resultados son complementarios a los obtenidos por Neira y Acuña (2022), quienes evaluaron el sesgo en contenido de metales y humedad aplicando la ISO 13292 con brazo robótico para concentrado de cobre, encontrando que la automatización reduce el sesgo del operador; este antecedente sugiere que la incorporación de tecnología automatizada de muestreo podría reducir aún más el sesgo identificado en el Lote 3, que presentó la mayor variabilidad de los tres lotes analizados.

CAPITULO V DISCUSIÓN

5.1. Discusión de resultados

Los resultados de este estudio muestran que contar con un sistema de trazabilidad bien organizado, desde la recepción del material hasta su despacho, ayuda a seguir y controlar las variables del proceso, favoreciendo un funcionamiento más ordenado y consistente; no obstante, la calidad final del concentrado, medida a través de la ley de concentrado, presentó diferencias importantes entre los lotes, ya que solo uno de los tres cumplió con la especificación establecida y esto indica que, aunque la trazabilidad es clave para estandarizar las operaciones, por sí sola no garantiza una calidad final adecuada; asimismo, estudios previos, como los de König y Pöllmann (2022) y Pernechele et al. (2021), respaldan esta idea al señalar que la trazabilidad debe complementarse con técnicas de monitoreo mineralógico en tiempo real, como la difracción de rayos X, para relacionar directamente la composición del mineral con el proceso y la calidad del producto; de este modo, la trazabilidad documental y física, como la aplicada en esta investigación, constituye una base importante, pero alcanza mayor efectividad cuando se integra con herramientas analíticas que permitan ajustar el proceso y controlar activamente la calidad del concentrado.

Por otro lado, el estudio mostró que, aunque la trazabilidad fue constante en las etapas de muestreo y preparación, el contenido de cobre en el concentrado final presentó una variación amplia, con una media de 25,975% y una desviación estándar de 4,35% t esto evidencia que los controles de trazabilidad, por sí solos, no fueron suficientes para lograr un contenido metálico uniforme, ya que este depende en mayor medida de la eficiencia de las etapas de concentración; asimismo, investigaciones previas, como las de Pernechele et al. (2021) y König y Verryn (2021), indican que una forma de mejorar este aspecto es ampliar la trazabilidad hacia una caracterización mineralógica rápida tanto de la alimentación como de los productos intermedios, asimismo, estos estudios demostraron que relacionar la mineralogía, identificando

minerales de cobre o fases que afectan negativamente el proceso, con los datos operativos mediante modelos estadísticos como PLSR, permite predecir y optimizar la recuperación de metal; por lo que, para que la trazabilidad se vincule de manera directa y positiva con el contenido de metales, es necesario integrar información mineralógica que permita orientar y ajustar el proceso de beneficio.

Asimismo, los resultados evidenciaron que todos los lotes presentaron valores de humedad superiores al nivel deseable ($>10\%$), aun cuando la etapa de secado se realizó de manera controlada y con trazabilidad adecuada, manteniendo constantes la temperatura y el tiempo y esto pone en evidencia que la trazabilidad aplicada al secado de las muestras no asegura, por sí sola, el control de la humedad en el concentrado a granel, la cual puede verse influenciada por etapas posteriores como el almacenamiento o la manipulación del material. Y al respecto, el estudio de Falcón (2020) resulta relevante, ya que señala que una aplicación inadecuada de los protocolos de muestreo establecidos en la norma ISO 12743 puede generar sesgos sistemáticos en la medición de la humedad, afectando la calidad comercial del producto y en este sentido, se resalta que la trazabilidad debe garantizar no solo el seguimiento de los parámetros operativos, sino también el cumplimiento estricto de las normas de muestreo y análisis, a fin de obtener datos de humedad representativos y confiables; de lo contrario, su utilidad para gestionar y mejorar este indicador clave de calidad se ve limitada.

Respecto al último objetivo específico, la investigación confirmó que el muestreo inicial fue altamente representativo y que la aplicación de duplicados fue adecuada, lo cual proporciona una base sólida para la precisión de los resultados; sin embargo, se identificaron posibles sesgos reflejados en la desviación respecto a la ley objetivo y en la variabilidad de contaminantes como el arsénico y los insolubles y este comportamiento coincide con lo señalado por Ricra (2022), quien destaca que un sistema sólido de Aseguramiento y Control de la Calidad (QA/QC), que incorpore estándares certificados, duplicados y blancos, es

esencial para medir y controlar el sesgo y la precisión en todas las etapas del proceso; asimismo, antecedentes refuerzan esta idea al demostrar que el uso de técnicas como el análisis cluster y el refinamiento Rietveld aplicado a datos de XRD permite mejorar la precisión en la caracterización mineralógica; por lo que, la trazabilidad operativa resulta necesaria.

En consecuencia, los resultados obtenidos son coherentes entre sí y muestran que trazabilidad, aunque necesaria y correctamente aplicada en varias etapas del proceso, no fue suficiente por sí sola para asegurar una calidad uniforme y conforme a las especificaciones del concentrado; además, la variabilidad observada en la ley de concentrado, la humedad y los contaminantes indica que estos indicadores están fuertemente influenciados por factores técnicos adicionales, como la eficiencia real de las operaciones de concentración, las condiciones posteriores al secado y la correcta aplicación de los protocolos de muestreo y control de calidad; en este sentido, los hallazgos son coincidentes con los antecedentes revisados, ya que confirman que la trazabilidad funciona como una base de orden y control, pero requiere ser complementada con un sistema riguroso de QA/QC y con información mineralógica confiable para tener un impacto directo en la calidad final.

Los resultados del presente estudio encuentran correspondencia directa con la investigación de Falcón (2020), quien evaluó la aplicación de la Norma ISO 12743 en el muestreo de concentrados de exportación en empresas peruanas, concluyendo que la adherencia a protocolos estandarizados se correlaciona positivamente con la confiabilidad de los resultados analíticos; el presente estudio amplió esa evidencia al cuantificar estadísticamente la magnitud de dicha relación (R^2 entre 0.673 y 0.923), demostrando que la trazabilidad ejercida en todas las etapas del proceso —desde la recepción hasta el despacho— no solo mejora la confiabilidad del muestreo, sino que se relaciona significativamente con todos los indicadores de calidad evaluados.

Un hallazgo de relevancia teórica es la gradación observada en los coeficientes de determinación entre hipótesis: la relación entre trazabilidad y representatividad/sesgo/precisión fue la más alta ($R^2 = 0.923$), seguida por humedad ($R^2 = 0.829$), contenido de metales ($R^2 = 0.881$) y calidad general ($R^2 = 0.673$); este patrón sugiere que la trazabilidad ejerce su mayor influencia sobre aquellas variables directamente controladas por el procedimiento de preparación de muestras, mientras que su impacto sobre variables dependientes también de la mineralogía y del proceso productivo previo —como el contenido metálico y la humedad final del concentrado— es relativamente menor, aunque igualmente significativo desde el punto de vista estadístico; esta distinción es clave para diseñar sistemas de trazabilidad que prioricen los puntos de control de mayor impacto.

Desde una perspectiva práctica, los resultados confirman la necesidad de extender el alcance de la trazabilidad más allá de las etapas de preparación de muestras para incorporar variables críticas del proceso de concentración (flotación, filtración), tal como proponen Medina, Barreto y Mendoza (2024) al integrar la planificación geometalurúrgica con tecnologías de la Minería 4.0; esta integración permitiría que la trazabilidad, en lugar de ser un registro posterior de los resultados, se convierta en una herramienta predictiva capaz de anticipar desviaciones en la calidad del concentrado y reducir la incidencia de lotes fuera de especificación, como el Lote 3 (ley Cu = 20.24%) identificado en el presente estudio.

CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Primera: Se determinó que existe una relación significativa entre la trazabilidad y la calidad del concentrado de minerales para exportación, esto debido a que la trazabilidad, al permitir un seguimiento detallado y controlado en cada etapa del proceso (desde la recepción hasta el despacho), contribuye a mantener condiciones operativas consistentes, lo que influye directamente en la calidad final; sin embargo, los resultados muestran que, a pesar de contar con una trazabilidad bien documentada y procedimientos uniformes, la calidad del concentrado aún puede variar significativamente entre lotes debido a factores como la composición inicial del mineral o la eficiencia de las etapas de procesamiento, por lo tanto, la trazabilidad es una herramienta fundamental para monitorear y controlar el proceso, pero su impacto en la calidad final está también mediado por otros factores operativos y las características inherentes del material. Estadísticamente, esta relación fue respaldada por un coeficiente de correlación $R = 0.820$, coeficiente de determinación $R^2 = 0.673$ y estadístico $F = 61.748$ con valor $p = 9.062 \times 10^{-9}$ ($< \alpha = 0.05$), confirmando la solidez estadística del modelo de regresión lineal empleado; estos valores permiten generalizar la relación encontrada al universo de lotes de concentrado producidos bajo condiciones similares de proceso.

Segunda: En relación al contenido de metales, los resultados evidencian que la trazabilidad tiene una influencia moderada ya que si bien el seguimiento riguroso en etapas como la recepción, reducción y secado aseguró condiciones estables y muestras representativas, la ley de cobre en el concentrado final presentó variaciones notables entre lotes, con solo uno de ellos cumpliendo con el estándar requerido y esto indica que, aunque la trazabilidad ayuda a controlar el proceso y a identificar desviaciones,

no garantiza por sí sola un alto contenido de metales, ya que este depende también de factores como la selectividad durante la concentración y la composición química inicial del mineral; por ende, la trazabilidad es necesaria para monitorear el contenido de metales, pero no es suficiente para asegurar su maximización sin un control eficaz de las etapas críticas de beneficio. Cuantitativamente, el análisis de regresión evidenció $R^2 = 0.881$ con $F = 222.992$ y $p = 1.975 \times 10^{-15}$, siendo el segundo modelo más potente de los evaluados; el hecho de que solo uno de tres lotes cumpliera con la ley objetivo de 30% Cu, y que el Lote 2, a pesar de tener la mejor ley (30.74%), presentara un contenido de arsénico de 1.04% —valor que excede el umbral de penalización comercial internacional de 0.5% As—, evidencia que la trazabilidad del muestreo debe complementarse con controles sobre la composición mineralógica del material alimentado al proceso de concentración.

Tercera: Respecto a la humedad, se concluye que la trazabilidad establece una relación clara, pero limitada ya que el monitoreo de parámetros como la temperatura y el tiempo de secado, registrados de manera consistente, permitió identificar que la humedad del concentrado se mantuvo en niveles elevados ($>10\%$) en todos los lotes, con variabilidad significativa en algunos casos y esto demuestra que, a pesar de contar con datos de trazabilidad que confirman condiciones operativas uniformes, la humedad final no siempre se controla de manera óptima, posiblemente debido a factores como la humedad inicial del mineral o la eficiencia del equipo de secado. Así, la trazabilidad sirve para detectar y documentar estas discrepancias, pero no asegura por sí misma el cumplimiento de los límites deseados de humedad. En términos cuantitativos, el modelo estadístico para esta hipótesis arrojó $R^2 = 0.829$ y $F = 145.891$ con $p = 4.740 \times 10^{-13}$ ($< \alpha = 0.05$); adicionalmente, las medias de humedad de los tres lotes (11.78%, 11.34% y 11.56%) superaron el umbral del 9%

establecido por el Código IMSBC para el transporte seguro de concentrados, identificando un riesgo operativo concreto que la trazabilidad implementada permitió detectar y documentar, aunque su corrección requiere intervenciones en el proceso de filtración previo a la preparación de muestras.

Cuarta: Finalmente, en cuanto a la representatividad, sesgo y precisión, los resultados confirman que la trazabilidad tiene una relación positiva y directa, ya que, el registro detallado en etapas como la recepción (donde todas las muestras fueron representativas) y la reducción (con homogeneidad confirmada) aseguró que el muestreo fuera preciso y sin sesgos significativos durante la preparación; sin embargo, en la calidad final del concentrado se observaron sesgos importantes, como la baja ley en un lote, lo que sugiere que, si bien la trazabilidad garantiza la representatividad y precisión en las etapas iniciales, no previene completamente la introducción de errores o variaciones en fases posteriores del proceso, como la concentración propiamente dicha y por lo tanto, la trazabilidad es esencial para validar la confiabilidad del muestreo y preparación, pero debe complementarse con controles en las etapas donde se definen las características finales del producto. Estadísticamente, este fue el modelo más robusto de todos los evaluados, con $R^2 = 0.923$, $F = 361.804$ y $p = 2.734 \times 10^{-18}$, indicando que la trazabilidad explica el 92.3% de la variabilidad en representatividad, sesgo y precisión; los coeficientes de variación diferenciados entre lotes ($CV = 0.89\%$, 4.87% y 8.06% para los Lotes 2, 1 y 3, respectivamente) demuestran que el nivel de trazabilidad aplicado en cada lote se traduce directamente en la precisión del proceso de muestreo, siendo el Lote 3 el de mayor riesgo de sesgo analítico y donde se recomienda reforzar los controles de temperatura, homogeneidad y humedad ambiental durante la preparación de la muestra.

6.2. Recomendaciones

Primera: Dado que la trazabilidad por sí sola no garantiza la calidad final del concentrado, se recomienda integrar sistemáticamente los datos de trazabilidad con indicadores de desempeño de las etapas críticas del proceso (como la flotación o concentración); además, implementar un dashboard de control que correlacione en tiempo real los parámetros trazados con los resultados de calidad permitirá identificar y corregir desviaciones específicas que afectan al producto final, transformando la trazabilidad de un registro pasivo en una herramienta activa de gestión de la calidad.

Segunda: Para fortalecer la relación entre trazabilidad y contenido de metales, se recomienda establecer puntos de control de trazabilidad específicos dentro de la planta de concentración; estos deben monitorear variables clave como la dosificación de reactivos, el pH de la pulpa y la densidad de alimentación, vinculándolas directamente con el muestreo y análisis de leyes en etapas intermedias y esta práctica permitirá detectar y ajustar las causas operativas de la baja ley antes de obtener el concentrado final, asegurando que la información trazable se use para optimizar la recuperación del metal.

Tercera: Para mejorar el control de la humedad mediante la trazabilidad, se recomienda ampliar los parámetros registrados en la etapa de secado; además de temperatura y tiempo, se debe incluir y correlacionar el flujo de aire, la humedad inicial de cada lote y la velocidad de alimentación; asimismo, establecer límites de control estadístico para estos parámetros y vincularlos automáticamente con los resultados de humedad final permitirá realizar ajustes predictivos en el proceso, asegurando que el secado sea eficiente y consistente, reduciendo así la variabilidad y el incumplimiento de especificaciones.

Cuarta: Finalmente, para que la trazabilidad asegure la representatividad y precisión hasta el resultado final, se recomienda extender el protocolo de control más allá del muestreo físico; además, implementar un programa de auditorías internas cruzadas que compare los resultados de los duplicados de cada lote con los datos de trazabilidad de las etapas previas, permitirá identificar en qué punto específico del proceso se introduce sesgo o se pierde precisión; complementariamente, se debe utilizar el registro de trazabilidad para validar y calibrar periódicamente los equipos de análisis, cerrando el ciclo entre la toma de muestra y el resultado reportado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ancca, E. (2024). *Reestructuración de un sistema de muestreo automático para optimizar el proceso de recuperación en relaves en la Compañía Minera Ares, unidad operativa Inmaculada, distrito de Oyolo, provincia Páucar del Sara Sara, Ayacucho*. Arequipa: Universidad Continental.
- Calam, C. (2020). *ThermoFisher Scientific*. Obtenido de <https://www.thermofisher.com/blog/cienciaacelerada/mineria/el-servicio-geologico-de-los-estados-unidos-usgs-lanza-el-informe-de-productos-minerales-2020/>
- Calzada, B. (2022). Innovation in mining: What are the challenges and opportunities along the value chain for Latin American suppliers? *Mineral Economics*(35), 35-51. doi:<https://doi.org/10.1007/s13563-021-00251-w>
- Chamorro, I. (2024). *Optimización de la mezcla de concentrados minerales para su comercialización Logistic Industry & Mining Sociedad Anónima-Logisminsa S.A. Huancayo: Universidad Continental*. Obtenido de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/16604/1/IV_FIN_110_TE_Chamorro_Poma_2024.pdf
- Choquegonza, E. (2024). *Implementación de los procedimientos de trazabilidad operativa del oro para gestionar las operaciones minero-metalúrgicas en la Cooperativa Minera Señor de Ananea*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano. Obtenido de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/23581>
- Díaz, J. (2024). *Estudio de la calidad de concentrado utilizando una mini planta piloto de flotación (MPP)*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.

Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/203516/Estudio-de-calidad-de-concentrado-utilizando-una-mini-planta-piloto-de-flotacion-MPP.pdf?sequence=1>

Dietrich, V., & Melcher, F. (2022). Mineral Raw Material Supply Chain Transparency and Traceability: Does Provenance Matter in the Supply Chain? *BHM*, 167(12), 594-597. doi:<https://doi.org/10.1007/s00501-022-01274-8>

Dominy, S., & Hylke, G. (2025). Geometallurgical sampling and testwork for gold mineralisation: General considerations and a case study. *Minerals*(15). doi:<https://doi.org/10.3390/min15040370>

Falcon, I. (2020). *La Norma ISO 12743 y su aplicación en el muestreo de concentrados de exportación*. Nasca: Universidad Nacional "San Luis Gonzaga".

Flores, R., & Hermoza, H. (2024). *Optimización del tiempo de análisis de humedad por secado en el despacho de concentrado de cobre en la compañía minera Antapaccay-Cusco*. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Obtenido de

https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/10404/253T20241984_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Hinostroza, R. (2021). *Implementación de filtro prensa para concentrados de minerales en la Minera Perú Sol- Planta de Beneficio San Martín - Huari-Oroya, 2019*. Cerro de Pasco: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Obtenido de http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/2391/1/T026_70750024_T.pdf

König, U., & Pöllmann, H. (2022). Valor del monitoreo mineralógico para la industria minera y de minerales. *Minerals*(12). doi:<https://doi.org/10.3390/min12070902>

König, U., & Verin, S. (2021). Minería de arenas minerales pesadas y procesamiento posterior: Valor del monitoreo mineralógico mediante XRD. *Minerals*, 11(11).

doi:<https://doi.org/10.3390/min11111253>

Lafquih, H., & Saad, L. (2021). Modeling and analysis of a quality traceability framework for phosphate extraction process: Evidence from Morocco. *International Journal Quality and Reliability Management*. doi:<https://doi.org/10.1108/IJQRM-05-2021-0132>

Loayza, E. (2024). *Diseño de un sistema automatizado para la obtención de muestras de concentrado en el proceso de producción de lingotes de Zn y su incidencia en los costos de materia prima en la refinería Cajamarquilla, Lima, 2024*. Lima: Universidad Privada del Norte. Obtenido de <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/41373>

Mamani, Y. (2020). *Ventajas y beneficios del sistema de trazabilidad para la comercialización y exportación de oro en el Proyecto Minero Francisco Uno*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

Masoume, K., Davood, M., & Alireza, A. (2023). Application of Artificial Neural Networks for investigations of Pressure Filtration Performance, a Zinc Leaching Filter Cake Moisture Modeling. *Journal of Cornell University*. doi:<https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.06138>

Medina, D., Barreto, W., & Mendoza, A. (2024). Optimizing Mineral Extraction in Perú: Integrating Geometallurgical Planning with Mining 4.0 Technologies. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 19(4), 1457-1468. doi:<https://doi.org/10.18280/ij dne.190438>

Neira, V., & Acuña, A. (2022). *Determinación del sesgo en contenido de metales y humedad entre el muestreo con el brazo robotico para concentrado de cobre en los depositos de minerales aplicando la ISO 13292*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú.

OCDE. (2025). *The Role of Traceability in critical mineral supply chains*. ORGANISATION

FOR ECONOMIC CO OPERATION AND DEVELOPMENT.

- Ortiz, E. (2018). *Cinética de secado, caracterización y determinación del tiempo optimo de pulverizado para un concentrado de plomo, cobre, zinc a nivel de laboratorio*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú. Obtenido de https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5395/T010_43017402_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Perneleche, M., López, Á., Davoise, D., Maestre, M., König, U., & Norberg, N. (2021). Value of Rapid Mineralogical Monitoring of Copper Ores. *Minerals*, 11. doi:<https://doi.org/10.3390/min11101142>
- Ricra, J. (2022). *Evaluación del aseguramiento y control de calidad de muestras de la mina Marcapunta de Sociedad Minera El Brocal, 2021*. Cerro de Pasco: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Obtenido de <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2870>
- Ricra, J. (2022). *Evolución del aseguramiento y control de calidad de muestras de la mina Marcapunta de Sociedad Minera El Brocal, 2021*. Cerro de Pasco: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Obtenido de http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/2870/1/T026_70776163_T.pdf
- Santos, J. (2021). *Procesamiento y análisis en el laboratorio química de muestras de geología y planta metalurgica en proyecto minero Cerro Lindo*. 2021: Universidad Nacional José Faustio Sánchez Carrión. Obtenido de <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14067/5229/SANTOS%20CARPIO%20JOS%C3%89%20CARLOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Schöneich, S., Saulich, C., & Müller, M. (2023). Traceability and foreign corporate accountability in mineral supply chains. *Regulation & Governance*(17), 954-969. doi:[doi:10.1111/rego.12527](https://doi.org/10.1111/rego.12527)

ANEXOS

Anexo 1. Instrumento: FICHA DE INFORME TRAZABILIDAD

Lote	Cantidad material (kg)	Rep.	Humedad del ambiente (%)	Homog.	Temp (°C)	Tiempo (min)	Peso inicial (kg)	Peso final (kg)	% malla	Duplicados	Peso constante	Trazabilidad	Verificación
1	23	SI	8,47	SI	105	900	1,366	1,250	100	8	Conforme	SI	SI
	22,6	SI	7,77	SI	104	900	1,432	1,320	100	8	Conforme	SI	SI
	24	SI	8,21	SI	106	900	1,470	1,349	100	8	Conforme	SI	SI
	23	SI	7,77	SI	105	900	1,405	1,289	100	8	Conforme	SI	SI
	22	SI	8,28	SI	105	900	1,453	1,340	100	8	Conforme	SI	SI
	21	SI	8,38	SI	104	900	1,431	1,289	100	8	Conforme	SI	SI
	22,5	SI	7,62	SI	106	900	1,434	1,313	100	8	Conforme	SI	SI
	22	SI	8,53	SI	105	900	1,405	1,285	100	8	Conforme	SI	SI
	23	SI	8,87	SI	104	900	1,416	1,290	100	8	Conforme	SI	SI
	21	SI	8,81	SI	106	900	1,394	1,271	100	8	Conforme	SI	SI
2	22,5	SI	8,96	SI	105	900	1,389	1,265	100	8	Conforme	SI	SI
	23	SI	8,45	SI	104	900	1,365	1,250	100	8	Conforme	SI	SI
	24	SI	8,92	SI	106	900	1,448	1,319	100	8	Conforme	SI	SI
	21	SI	8,68	SI	105	900	1,398	1,277	100	8	Conforme	SI	SI
	22	SI	10,31	SI	105	900	1,561	1,400	100	8	Conforme	SI	SI
	23	SI	11,38	SI	104	900	1,573	1,394	100	8	Conforme	SI	SI
	23,5	SI	10,93	SI	106	900	1,518	1,352	100	8	Conforme	SI	SI
	21,5	SI	10,45	SI	105	900	1,579	1,415	100	8	Conforme	SI	SI
	22,6	SI	10,70	SI	104	900	1,441	1,287	100	8	Conforme	SI	SI
	23	SI	10,96	SI	106	900	1,491	1,328	100	8	Conforme	SI	SI
3	21	SI	10,86	SI	103	900	1,481	1,320	100	8	Conforme	SI	SI

Anexo 2. Instrumento: FICHA DE INFORME METALURGICO

Lote	Ley Cu (%)	Ag (%)	Au (ppm)	As (ppm)	Fe (ppm)	Ins (ppm)	Humedad (%)	CV (%)
1	26,955	0,678	4,310	4.84	273.9	52.5	11,78	4,87
2	30,735	1,268	0,740	10.4	164.1	174.1	11,34	0,89
3	20,238	2,435	0,020	1.6	96.6	157.7	11,56	8,06

Anexo 3. DATA DE CODIFICACIÓN DE VALORES

Recepció n	Reducció n	Secad o	Moliend a	Prep. Calida d	Envasad o	Despach o	Metale s	Humeda d	Representativa d
5	5	5	5	5	5	5	1	1	5
5	5	4	5	5	5	5	1	2	5
5	4	5	5	5	5	5	1	2	5
5	5	5	4	5	5	5	2	2	5
5	4	4	5	5	5	5	2	2	4
4	5	5	5	5	5	4	2	2	4
4	4	5	5	5	5	4	2	3	4
4	5	4	5	5	4	5	2	3	4
4	4	4	5	5	5	4	3	3	4
4	4	5	4	5	4	5	3	3	4
4	4	4	4	5	5	4	3	3	4
4	3	4	5	4	5	4	3	3	3
4	4	3	4	4	5	4	3	3	3
4	3	4	4	4	4	5	3	4	3
3	4	4	4	4	4	4	3	4	3
3	3	4	4	4	4	4	4	4	3
3	4	3	4	4	4	3	4	4	3
3	3	3	4	4	4	4	4	4	2
3	3	4	3	4	3	4	4	4	2
3	3	3	3	4	4	4	4	5	2
3	3	3	4	3	4	3	4	5	2
3	2	3	3	4	3	4	4	5	2
3	3	2	3	3	3	4	5	5	2
2	3	3	3	3	3	3	5	5	2
2	2	3	3	3	3	3	5	5	1
2	3	2	3	3	2	3	5	5	1
2	2	2	3	3	3	2	5	5	1
2	2	3	2	3	2	3	5	5	1
2	2	2	2	3	3	2	5	5	1
2	2	2	3	2	2	2	5	5	1
1	2	2	2	2	2	2	5	5	1
1	1	2	2	2	2	2	5	5	1

Anexo 4. DATA EN IBM SPSS STATISTIC

Lote	CM	CM_A	HM	TempS	TiempoS	PesoI	PesoF	HC
1	23,00	22,01 - 23,00	8,47	105,00	900,00	1,366	1,274	11,35
1	22,60	22,01 - 23,00	7,77	104,00	900,00	1,432	1,346	12,04
1	24,00	23,01 - 24,00	8,21	106,00	900,00	1,470	1,376	11,69
1	23,00	22,01 - 23,00	7,77	105,00	900,00	1,405	1,321	11,73
1	22,00	21,01 - 22,00	8,28	105,00	900,00	1,453	1,360	12,59
1	21,00	<= 21,00	8,38	104,00	900,00	1,431	1,334	12,94
1	22,50	22,01 - 23,00	7,62	106,00	900,00	1,434	1,350	11,40
2	22,00	21,01 - 22,00	8,53	105,00	900,00	1,405	1,309	11,42
2	23,00	22,01 - 23,00	8,87	104,00	900,00	1,416	1,323	11,25
2	21,00	<= 21,00	8,81	106,00	900,00	1,394	1,300	11,40
2	22,50	22,01 - 23,00	8,96	105,00	900,00	1,389	1,297	11,41
2	23,00	22,01 - 23,00	8,45	104,00	900,00	1,365	1,275	11,32
2	24,00	23,01 - 24,00	8,92	106,00	900,00	1,448	1,348	11,31
2	21,00	<= 21,00	8,68	105,00	900,00	1,398	1,301	11,34
3	22,00	21,01 - 22,00	10,31	105,00	900,00	1,561	1,434	11,44
3	23,00	22,01 - 23,00	11,38	104,00	900,00	1,573	1,437	11,35
3	23,50	23,01 - 24,00	10,93	106,00	900,00	1,518	1,393	11,39
3	21,50	21,01 - 22,00	10,45	105,00	900,00	1,579	1,453	11,43
3	22,60	22,01 - 23,00	10,70	104,00	900,00	1,441	1,322	11,26
3	23,00	22,01 - 23,00	10,96	106,00	900,00	1,491	1,368	11,10
3	21,00	<= 21,00	10,86	103,00	900,00	1,481	1,355	12,12

Anexo 5. FOTOGRAFÍAS DE CAMPO



Foto1: Toma de muestra en recepción - ruma de concentrado



Foto 3: Disgregado de la muestra representativa- 20 kg min

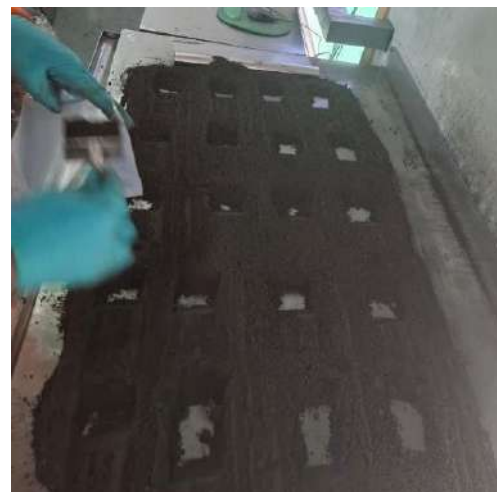


Foto 4: Toma de incrementos por bandeja.



Foto 5: Muestras para el proceso de secado



Foto 6: Tamizado de material



Foto 9: Equipo divisor de 8 vasos, sin rechazo.



Foto 10: Sobre de 200 gramos sellado para envío a la laboratorio.