UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACION PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

T E S I S

Estudio del incremento de la recuperación del oro con la Instalación de una celda flash flotation en la descarga del Hidrociclón de la planta procesadora "El Tambo" Empresa Qori Ñahuin S.A – 2023

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Metalurgista

Autor:

Bach. Fernando CAUCHOS MORAN

Asesor:

Dr. Eduardo Jesús MAYORCA BALDOCEDA

Cerro de Pasco – Perú – 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACION PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

T E S I S

Estudio del incremento de la recuperación del oro con la Instalación de una celda flash flotation en la descarga del Hidrociclón de la planta procesadora "El Tambo" Empresa Qori Ñahuin S.A – 2023

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Dr. Marco Antonio SURICHAQUI HIDALGO **PRESIDENTE**	**Mg. Eusebio ROQUE HUAMAN** **MIEMBRO**

Mg. Edgar Yoni AIRE MENDOZA
MIEMBRO

Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión

Facultad de Ingeniería

Unidad de Investigación

INFORME DE ORIGINALIDAD N° 039-2026-UNDAC/UIFI

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Presentado por:

Bach. Fernando, CAUCHOS MORAN

Escuela de Formación Profesional:

Ingeniería Metalúrgica

Tipo de trabajo:

Tesis

Título del trabajo:

"Estudio del incremento de la recuperación del oro con la Instalación de una celda flash flotation en la descarga del Hidrociclón de la planta procesadora "El Tambo" Empresa Qori Ñahuin S.A – 2023"

Asesor

Dr. Eduardo Jesús, MAYORCA BALDOCEDA

Índice de Similitud

5 %

Calificativo:

APROBADO

Se adjunta el informe y el reporte de evaluación del software Turnitin Similarity.

Cerro de Pasco, 15 de julio del 2026

Firma Digital UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN [AVANZADA]

Firmado digitalmente por PALOMINO ISIDRO Ruben Edgar FAU 20154605046 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 15.07.2026 20:42:48 -05:00

DEDICATORIA

Gracias a mis seres queridos,

por acompañarme en cada paso de mi carrera.

Este logro es el reflejo de su amor y dedicación,

y siempre les estaré agradecido por creer en mi

en cada paso de este camino.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente a Dios nuestro señor por guiar siempre mi camino, y presento mi total reconocimiento a la Empresa Qori Ñahuin S.A, por haberme permitido desarrollar mis capacidades como profesional dentro de sus instalaciones en el área de Operaciones Planta, y así poder lograr realizar mi trabajo de investigación titulada "Estudio del incremento de la recuperación del oro con la Instalación de una celda flash flotation en la descarga de Hidrociclón de la planta procesadora "El Tambo" Empresa Qori Ñahuin S.A – 2023", cumpliendo de este modo uno de mis más anheladas metas en mi continuo desarrollo profesional.. A mi familia por siempre estar a mi lado motivándome a seguir adelante y por la gran oportunidad que me dieron en un difícil momento de seguir estudiando y cumplir mi meta de ser un gran profesional, y sobre todo el de ser una persona de bien para la sociedad. A los Ingenieros de mi alma mater la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión por haber sido parte de mi desarrollo profesional durante los 5 años de educación universitaria, donde me inculcaron los conocimientos y capacidades que eh fortalecido actualmente como un buen Ingeniero Metalurgista.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de la implementación de una celda de flotación flash en la descarga del hidrociclón sobre la recuperación de oro en la planta procesadora “El Tambo” de la empresa Qori Ñahuin S.A. Se empleó un enfoque aplicado con diseño cuasi experimental y nivel explicativo, utilizando análisis metalúrgicos, balance de masas, evaluación granulométrica y pruebas estadísticas para comparar el desempeño del sistema convencional frente al sistema con flotación flash. Los resultados del proceso convencional evidenciaron una recuperación promedio de oro de 89.43%, con estabilidad operativa, pero con pérdidas significativas de metal en el relave. El análisis granulométrico mostró que el 96.59% del material corresponde a fracción fina, donde se concentra la mayor cantidad de oro, mientras que la fracción gruesa presenta alta variabilidad, indicando presencia de oro libre parcialmente recuperable. Con la implementación de la celda de flotación flash, la recuperación de oro se incrementó a un promedio de 93.47%, reduciendo significativamente las pérdidas en el relave y disminuyendo su ley de salida. Asimismo, se obtuvo un concentrado de mayor ley sin afectar la estabilidad del proceso. El análisis estadístico ($p < 0.05$) confirmó que las mejoras observadas son significativas. Se concluye que la flotación flash constituye una alternativa eficiente para recuperar oro en etapas tempranas del proceso, optimizando la recuperación global y reduciendo pérdidas metalúrgicas, contribuyendo a una operación más eficiente y sostenible.

Palabra clave: Flotación flash; recuperación de oro y eficiencia metalúrgica.

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the effect of implementing a flash flotation cell at the hydrocyclone discharge on gold recovery in the “El Tambo” processing plant of Qori Ñahuin S.A. The study followed an applied approach with a quasi-experimental design and explanatory level, using metallurgical analysis, mass balance, granulometric evaluation, and statistical tests to compare the performance of the conventional system with the flash flotation system. The results of the conventional process showed an average gold recovery of 89.43%, with operational stability but significant metal losses in the tailings. Granulometric analysis revealed that 96.59% of the material corresponds to the fine fraction, where most of the gold is concentrated, while the coarse fraction exhibited high variability, indicating the presence of partially recoverable free gold. With the implementation of the flash flotation cell, gold recovery increased to an average of 93.47%, significantly reducing losses in the tailings and lowering its grade. Additionally, a higher-grade concentrate was obtained without affecting process stability. Statistical analysis ($p < 0.05$) confirmed that the observed improvements are significant. It is concluded that flash flotation is an efficient alternative for recovering gold at early stages of the process, optimizing overall recovery and reducing metallurgical losses, thereby contributing to a more efficient and sustainable operation.

Keywords: Flash flotation; gold recovery; metallurgical efficiency.

INTRODUCCIÓN

La minería aurífera constituye una de las actividades económicas más relevantes para el desarrollo del sector minero, tanto a nivel global como nacional, debido a su contribución a la generación de empleo, divisas y encadenamientos productivos. Sin embargo, uno de los principales desafíos técnicos en el procesamiento de minerales auríferos radica en maximizar la recuperación de oro, especialmente cuando este se presenta como oro libre de granulometría gruesa o asociado a minerales sulfurados, condiciones que afectan directamente la eficiencia de los circuitos convencionales de molienda, clasificación y flotación.

En muchas plantas concentradoras, una fracción significativa del oro liberado tiende a perderse en las etapas de conminución y clasificación, particularmente en el underflow del hidrociclón, donde las partículas gruesas, debido a la ductilidad del oro, no se muelen eficientemente y pueden laminarse o incrustarse en los cuerpos moledores. Esta situación genera pérdidas metalúrgicas, incremento de la sobremolienda de minerales valiosos y disminución de la eficiencia global del proceso.

Frente a esta problemática, la flotación flash se presenta como una alternativa tecnológica orientada a la recuperación temprana del oro libre y de los sulfuros portadores de oro, mediante la implementación de una celda de flotación rápida en puntos estratégicos del circuito de molienda–clasificación. Este tipo de celdas permite recuperar partículas de mayor tamaño antes de que ingresen nuevamente al molino, contribuyendo a mejorar la recuperación metalúrgica, reducir pérdidas al relave y optimizar el desempeño del proceso.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo evaluar cómo la implementación de una celda de flotación flash en la descarga del hidrociclón incrementa la recuperación de oro en la planta procesadora “El Tambo” de la Empresa Qori Ñahuin S.A., mediante la ejecución de pruebas piloto y el análisis de balances metalúrgicos. El estudio

adopta un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado, con un diseño experimental piloto, orientado a generar resultados técnicos de aplicación inmediata en el proceso productivo.

La investigación se organizó en los siguientes capítulos:

Capítulo I: Planteamiento del problema, donde se describe la problemática a nivel general, nacional y local, se formulan los objetivos, las preguntas de investigación, las hipótesis, la justificación y las limitaciones del estudio.

Capítulo II: Marco teórico, que desarrolla los fundamentos conceptuales y teóricos relacionados con la flotación de minerales auríferos, celdas de flotación, flotación flash, variables que influyen en la recuperación de oro y antecedentes de investigaciones previas.

Capítulo III: Metodología, en el cual se detalla el enfoque, tipo y diseño de la investigación, las variables, la población y muestra, los procedimientos experimentales, así como la operacionalización de las variables.

Capítulo IV: Técnicas de investigación, donde se describen las técnicas e instrumentos de recolección de datos, el procesamiento de la información, los balances metalúrgicos y el tratamiento estadístico aplicado a los resultados obtenidos.

ÍNDICE

Página

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema 1

1.2. Delimitación de la investigación 3

1.2.1. Delimitación espacial 3

1.2.2. Delimitación temporal 3

1.2.3. Delimitación conceptual 3

1.3. Formulación del problema 3

1.3.1. Problema general 3

1.3.2. Problemas específicos 3

1.4. Formulación de objetivos 4

1.4.1. Objetivo general 4

1.4.2. Objetivos específicos 4

1.5. Justificación de la investigación 4

1.5.1. Teórica 4

1.5.2. Práctica 5

1.5.3. Metodológica 5

1.6. Limitaciones de la investigación 6

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio 8

2.1.1. Antecedentes internacionales 8

2.1.2. Antecedentes nacionales 9

2.1.3. Antecedentes locales 12

2.2. Bases teóricas – científicas 13

2.2.1. Proceso de flotación 13

2.2.2. Flotación flash 16

2.2.3. Flotación del oro 17

2.2.4. Recuperación de oro 18

2.3. Definición de términos básicos 19

2.4. Formulación de hipótesis 20

2.4.1. Hipótesis general 20

2.4.2. Hipótesis específicas 20

2.5. Identificación de variables 21

2.5.1. Variable independiente 21

2.5.2. Variable dependiente 21

2.6. Definición operacional de las variables 22

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación 23

3.2. Nivel de investigación 23

3.3. Método de investigación 24

3.4. Diseño de investigación 24

3.5. Población y muestra 24

3.5.1. Población 24

3.5.2. Muestra 24

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos 25

3.6.1. Técnicas 25

3.6.2. Instrumentos 25

3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos 25

3.8. Tratamiento estadístico 25

3.9. Orientación ética filosófica y epistémica 26

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo 28

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados 30

4.2.1. Análisis del nivel de recuperación de oro y plata con el proceso actual 30

4.2.2. Determinación del balance granulométrico del mineral en el proceso de molienda y conminución a partir del cual se analizó el proceso de flotación a instalar 33

4.2.3. Descripción del proceso metalúrgico actual y aspectos técnicos – operativos de la celda de flotación flash 38

4.2.4. Evaluación de reducción de las pérdidas de oro en el relave y la nueva ley de salida que se logra con la implementación de la celda flotación 43

4.3. Prueba de hipótesis 51

4.4. Discusión de resultados 55

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Página

Tabla 1. Operacionalización de variables 22

Tabla 2. Balances metalúrgicos en sistema actual sin flotación flash.....31

Tabla 3 Estadísticos descriptivos de la recuperación de Au del proceso actual.....32

Tabla 4. Resumen del análisis granulométrico para el flujo de cabeza.....34

Tabla 5. Resumen del análisis granulométrico para el flujo de concentrado.....35

Tabla 6 Resumen del análisis granulométrico para el flujo de relave.....36

Tabla 7. Resumen del análisis de leyes finos y gruesos.....37

Tabla 8. Descriptivos del análisis de leyes de finos y gruesos.....37

Tabla 9. Resultado de los balances metalúrgicos con el proceso de flotación flash 44

Tabla 10. Estadísticos descriptivos del balance metalúrgico con la flotación flash 45

Tabla 11. Reducción de las pérdidas de Au según contenido metálico.....50

Tabla 12. Prueba de normalidad para las pérdidas de Au 52

Tabla 13. Prueba t student para las pérdidas de Au.....53

Tabla 14. Prueba de normalidad para la recuperación de Au.....54

Tabla 15. Prueba t student para la recuperación de Au 54

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1. Diagrama general del proceso de trabajo de campo 29

Figura 2. Esquema básico del balance de masa del sistema 30

Figura 3. Diagrama del chancado 39

Figura 4. Diagrama del circuito molienda – clasificación 40

Figura 5. Diagrama de cianuración – carbón activado – obtención de doré 41

Figura 6. Diagrama de ubicación de la celda de flotación flash en zona de molienda 42

Figura 7. Diagrama de la celda de flotación 42

Figura 8. Diagrama de caja de la recuperación de oro 46

Figura 9. Diagrama de caja de la ley de oro 47

Figura 10. Diagrama de caja del contenido de oro 48

Figura 11. Pérdidas en relave según %Recuperación Au 49

Figura 12. Pérdidas en relave según contenido metal Au 50

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

La recuperación metalúrgica de oro en procesos de concentración continúa siendo un desafío técnico en la industria minera global debido a la complejidad mineralógica de los yacimientos y las limitaciones inherentes a los equipos convencionales. En circuitos de molienda y flotación integrados, minerales con oro finamente liberado tienden a recircular en el sistema y sufrir sobremolienda, lo que reduce la recuperación de oro en la etapa de flotación convencional y aumenta las pérdidas en los relaves. Estudios recientes han demostrado que la incorporación de celdas de *flotación flash* instaladas en la descarga del hidrociclón puede incrementar significativamente la recuperación de oro al capturar minerales valiosos antes de que ingresen nuevamente al molino, reduciendo así la sobremolienda y las pérdidas de partículas flotables. Por ejemplo, un trabajo en *Minerals Engineering* evidenció que la adición de una celda de flotación flash en un circuito de molienda mejoró la recuperación de oro en la celda individual en un 27 % y elevó la recuperación global de oro de 78.9 % a 90.6 %, mostrando que este tipo de pretratamiento puede ser una

alternativa viable para mejorar la eficiencia de recuperación metalúrgica en concentradoras modernas (Arellano et al., 2023).

A nivel nacional, u estudio realizado en una compañía aurífera del norte del país, validó experimentalmente la aplicación de un circuito de *flotación flash* como tratamiento previo al sistema convencional de flotación. La investigación determinó parámetros significativos (como porcentaje de sólidos, colector y espumante) y concluyó que la implementación de la celda *flash* permitió mejorar las recuperaciones de oro en diferentes leyes de mineral de cabeza, destacando la importancia de este equipo en la optimización del proceso en relación con la clasificación del mineral y la reducción de pérdidas por sobremolienda (Huamán, 2023).

La planta *El Tambo* de la empresa Qori Ñahuin S.A., ubicada en el distrito de Ulcumayo (Junín), procesa minerales auríferos provenientes de las minas Concepción y María Julia, que se encuentran caracterizados por asociaciones minerales complejas (chalcopirita, arsenopirita, pirita, arcillas) que dificultan la liberación óptima de las partículas de oro durante las operaciones de molienda y clasificación. Estas propiedades físico-químicas provocan que granos libres de oro con alta ductilidad no se reduzcan adecuadamente en tamaño y tienden a laminarse y recircular en el circuito del molino e hidrociclón, lo que limita su recuperación eficiente en la flotación convencional y aumenta las pérdidas de oro en el relave.

Este problema plantea la necesidad de evaluar si la implementación de una celda de flotación flash en la descarga del hidrociclón, como pretratamiento antes de la flotación convencional, puede aumentar la recuperación de oro, optimizar el balance mineralógico del circuito y reducir las pérdidas en el relave, cumpliendo los requisitos técnicos y operativos de la planta.

1.2. Delimitación de la investigación

1.2.1. Delimitación espacial

La investigación se llevó a cabo en la Empresa Procesadora “El Tambo” ubicada en el distrito de Ulcumayo, provincia de Junín.

1.2.2. Delimitación temporal

La investigación se realizó durante el período 2023 – 2024. El desarrollo del informe fue realizado en el 2025.

1.2.3. Delimitación conceptual

Desde un enfoque conceptual, la investigación se delimitó al análisis del proceso de conminución y molienda, con el propósito de evaluar cómo la distribución granulométrica del mineral influye en la recuperación de oro. A partir de este análisis, se plantea la implementación de una celda de flotación flash que permita recuperar de manera eficiente el oro libre presente en las fracciones gruesas provenientes de la conminución, evitando su recirculación y sobremolienda. De este modo, el estudio se orienta a optimizar el proceso de recuperación aurífera mediante la intervención en una etapa crítica del circuito metalúrgico, como es la molienda–clasificación.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿En qué medida la implementación de una celda de flotación flash en la salida de la descarga del hidrociclón incrementa la recuperación de oro en la planta procesadora “El Tambo” – Empresa Qori Ñahuin S.A., 2023?

1.3.2. Problemas específicos

a. ¿Cuál es el nivel de recuperación de oro con el proceso actual en la planta procesadora “El Tambo” – Empresa Qori Ñahuin S.A?

b. ¿Cuál es el balance granulométrico del mineral en el proceso de molienda y conminución a partir del cual se analiza el proceso de flotación a instalar en la planta procesadora “El Tambo” – Empresa Qori Ñahuin S.A?

c. ¿En qué medida la implementación de la celda flotación flash reduce las pérdidas de oro en el relave y que ley de salida se logra en comparación con el proceso anterior en la planta procesadora “El Tambo” – Empresa Qori Ñahuin S.A?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar cómo la implementación de una celda de flotación flash en la salida de la descarga del hidrociclón incrementa la recuperación de oro en la planta procesadora “El Tambo” – Empresa Qori Ñahuin S.A., 2023.

1.4.2. Objetivos específicos

a. Analizar nivel de recuperación de oro con el proceso actual y describir este.

b. Determinar el análisis granulométrico del mineral en el proceso de molienda y conminución a partir del cual se analiza el proceso de flotación a instalar.

c. Evaluar la reducción de las pérdidas de oro en el relave y la nueva ley de salida que se logra con la implementación de la celda flotación.

1.5. Justificación de la investigación

1.5.1. Teórica

Desde el punto de vista teórico, la investigación contribuye al cuerpo de conocimiento en el área de la metalurgia del oro, particularmente en la comprensión de la relación entre la granulometría del mineral, el proceso de molienda–clasificación y la recuperación aurífera mediante flotación flash. Los resultados permitirán generar

evidencia técnica sobre el comportamiento del oro libre presente en las fracciones gruesas del underflow del hidrociclón, aportando información útil para futuras investigaciones orientadas a la optimización de circuitos de molienda y flotación en minerales auríferos con asociaciones complejas.

1.5.2. Práctica

La justificación práctica de este estudio redunda en evaluar la viabilidad técnica de la implementación de una celda flash flotation en el circuito actual de la planta procesadora *El Tambo*, con el fin de aumentar la recuperación de oro reduciendo las pérdidas de metal libre en el relave. La implementación de esta tecnología contribuirá a optimizar el desempeño del proceso metalúrgico, mejorar la eficiencia operativa de la planta y aprovechar de manera más efectiva el oro liberado que actualmente no es recuperado por el sistema convencional. Así mismo, los resultados sentarán una base técnica que permita tomar decisiones operativas en pro de la optimización del proceso metalúrgico.

1.5.3. Metodológica

En el plano metodológico, la investigación aporta un enfoque aplicado y experimental, sustentado en el análisis granulométrico, balances metalúrgicos y pruebas de flotación con el producto del underflow del hidrociclón. La metodología propuesta permite evaluar de manera sistemática el impacto de la flotación flash sobre la recuperación de oro, generando resultados cuantificables, reproducibles y comparables. Este enfoque metodológico puede ser replicado o adaptado en estudios similares, constituyéndose en una guía práctica para investigaciones futuras orientadas a la mejora de procesos metalúrgicos en plantas concentradoras auríferas.

1.6. Limitaciones de la investigación

La presente investigación estuvo sujeta a diversas limitaciones de carácter técnico, operativo y experimental que deben ser consideradas en la interpretación de los resultados obtenidos. En primer lugar, la recuperación de oro se encuentra influenciada por la forma, tamaño y grado de liberación de las partículas auríferas, las cuales pueden presentarse como granos, lentejuelas, filamentos o asociadas a minerales sulfurados. Estas características mineralógicas, propias del mineral tratado, condicionan el comportamiento del oro durante las etapas de molienda, clasificación y flotación, limitando la posibilidad de extrapolar los resultados a otros yacimientos con mineralogía distinta.

Asimismo, el estudio se desarrolló a partir de pruebas experimentales a nivel piloto, replicando el funcionamiento de una celda de flotación flash instalada en la descarga del hidrociclón, lo cual representa una aproximación al comportamiento real del proceso industrial, pero no reproduce en su totalidad las condiciones dinámicas de una operación a escala planta. Adicionalmente, por restricciones de tiempo, disponibilidad de equipos y recursos operativos, solo fue posible realizar tres repeticiones experimentales por condición evaluada, lo que limita el alcance del análisis estadístico y la generalización de los resultados.

Finalmente, la investigación se centró exclusivamente en la evaluación del impacto de la flotación flash sobre la recuperación de oro en el producto del underflow del hidrociclón, sin considerar variaciones en otros parámetros operativos del circuito, como cambios en la dosificación de reactivos, variaciones en el porcentaje de sólidos o modificaciones en la configuración del sistema de molienda. No obstante, a pesar de estas limitaciones, los resultados obtenidos proporcionan información técnica relevante

para la mejora del proceso de recuperación aurífera y sirven como base para estudios posteriores a mayor escala.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

2.1.1. Antecedentes internacionales

Barbouchi et al. (2026) realizaron la investigación titulada “Improving flotation recovery of gold in a refractory gold ore: An integrated approach between response surface methodology and automated quantitative mineralogy” en la cual se desarrolló un enfoque integrado que combina el diseño experimental y la mineralogía cuantitativa automatizada (AQM) con el fin de optimizar la recuperación de oro por flotación a partir de un mineral aurífero refractario. La caracterización integral del mineral mediante AQM y microscopía electrónica de barrido (SEM) reveló que el oro se presenta como inclusiones a escala nanométrica (288,8–489,5 nm) dentro de pirita y arsenopirita. Las condiciones óptimas de flotación se determinaron mediante un diseño experimental tipo Doehlert, considerando como variables el pH y la distribución del tamaño de partícula (D80). Bajo las condiciones optimizadas (pH = 9,56 y D80 = 88 µm), se alcanzó una recuperación de oro del 86,76 % y una ley de oro en el concentrado de 18,80 ppm, en comparación con 2,61 ppm en la alimentación.

Arellano et al. (2023) desarrollaron el estudio “Gold recovery improvements in grinding and flash flotation circuit” en el que, se propusieron y validron un método interesante para resolver el problema de la baja recuperación de oro, realizando cambios relevantes y bien pensados en un circuito de molienda y flotación instantánea. Esto se realizó mediante caracterización óptica de minerales (microscopio Leica DM2700 P usando lentes 20X y 40X), modelado matemático y simulación de procesos en estado estacionario (evaluando el circuito original (simulación I) y dos circuitos propuestos (simulación II y III)). La caracterización mineralógica indica que, oro liberado (Au), electrum (Au-Ag) y acantita (Ag_2S) partículas de menos de 100 μm eran las partículas deseadas en el concentrado de flash. Además, se identificó que la flotación verdadera era era el mecanismo predominante en la recuperación de oro y plata, pero el modelo matemático sugiere que una pequeña fracción de partículas finas con oro podría recuperarse por arrastre. Ambos análisis condujeron a la propuesta de instalar un molino de remolienda con recirculación a una celda flash (simulación III). Tras su puesta en marcha, la recuperación de oro en la celda flash aumentó un 27.0%, alcanzando un máximo del 48,3%. Esto representa una clara mejora en la recuperación del oro en una sola etapa. También se observó un aumento significativo en la recuperación global del oro (del 78.9% al 90.6%).

2.1.2. Antecedentes nacionales

Huacca (2021) efectuó la investigación con el propósito de optimizar el proceso de flotación de minerales de oro mediante el sistema de flotación flash para incrementar la recuperación del metal valioso en la empresa minera Cori Puno. Para alcanzar dicho objetivo, primero se realizó la caracterización del mineral, luego se evaluaron los parámetros operativos para determinar las condiciones óptimas y, la posterior aplicación de la celda de flotación flash en la planta concentradora. El estudio se

desarrolló bajo una metodología experimental con enfoque cuantitativo, que incluyó la revisión de literatura especializada, el diseño experimental, la preparación mecánica de las muestras, la ejecución de pruebas de flotación, el análisis de resultados y la aplicación de los parámetros obtenidos a nivel de planta. Como resultado, se implementó una celda de flotación flash en condición de pilotaje, determinándose que la recuperación global de oro sin el uso de este equipo alcanzó un promedio de 76.42 %, mientras que con la incorporación de la celda flash se logró incrementar la recuperación hasta un 77.54 %.

Gonzales y Arroyo (2022) estudiaron los parámetros operativos de proceso del circuito de flotación de la Minera Raura asociados con la materia prima, operación y recuperación del metal. El estudio se desarrolló mediante pruebas experimentales a nivel de planta concentradora, utilizando como material de estudio el alimento del hidrociclón. La celda Flash SK-240 fue instalada en la descarga de los molinos de bolas de 7’×8’ y 8’×10’, captando la pulpa mediante una bomba HM-150 y alimentándola directamente a la celda. Las espumas generadas se condujeron por gravedad al concentrado final, mientras que el relave se integró a la descarga del molino de barras de 9’×12’ y fue bombeado hacia los hidrociclones. En el circuito, los finos del overflow alimentaron la flotación bulk, y los gruesos del underflow retornaron como carga a los molinos de bolas. La implementación de la celda de flotación flash permitió obtener concentrados de plomo y plata con leyes de 56,53 % y 745,9 g/t, respectivamente, alcanzando recuperaciones de 81,9 % para plomo y 71,9 % para plata. Asimismo, el uso de la celda Flash SK-240 optimizó el proceso metalúrgico al reducir la sobremolienda de los minerales valiosos, permitir la recuperación de concentrados de alta ley en una sola etapa y disminuir el desplazamiento de plomo hacia el concentrado de cobre.

Huaman (2024) llevó a cabo la “Implementación de una celda unitaria en el circuito de molienda secundaria para mejorar la flotación de plomo grueso en la Compañía Minera Kolpa S.A.C” con el fin de mejorar la calidad del concentrado y la recuperación metalúrgica respecto al proceso convencional. La investigación se inició con la recopilación y análisis de datos operativos del proceso de concentración normal, considerando variables como granulometría, densidad de pulpa, ley de cabeza y calidad del concentrado. Posteriormente, se instalaron las celdas de flotación flash SK-80 y SK-240, evaluándose nuevamente los mismos parámetros para comparar el desempeño del sistema modificado frente al proceso convencional. Asimismo, se realizó un análisis estadístico para verificar el control del proceso antes y después de la implementación de las celdas flash. En el proceso convencional se obtuvo, en promedio, un tamaño de partícula de 53,78 % bajo malla −200, una densidad de pulpa de 1565,67 g/L, una ley de cabeza de 2,26 % Pb y una calidad de concentrado de 56,77 % Pb, con una recuperación global de 88,00 % de plomo. Tras la implementación de las celdas SK-80 y SK-240, se registraron valores promedio de 52,57 % −200 malla, una densidad de pulpa de 1563,45 g/L, una ley de cabeza de 2,63 % Pb y una calidad de concentrado de 62,38 % Pb, alcanzándose una recuperación global de 89,89 % de plomo. De manera específica, la celda SK-80 permitió obtener un concentrado grueso con una calidad de 66,03 % Pb y una recuperación de 21,03 % Pb, mientras que la SK-240 alcanzó una calidad de 60,30 % Pb; el concentrado bulk presentó 59,77 % Pb y el concentrado final 58,48 % Pb. En conjunto, la implementación de las celdas flash generó un incremento promedio de 4,08 % en la calidad del concentrado y de 1,89 % en la recuperación de plomo. El análisis estadístico evidenció que, a diferencia del proceso convencional —donde los datos se encontraban dispersos y fuera de los parámetros de control—, tras la implementación de las celdas flash los valores se

mantuvieron dentro de los límites aceptables, con valores de *p* superiores a 0,05, salvo en la variable granulométrica (% −200 malla).

Suca y Palomino (2022) desarrollaron su investigación con el objetivo de optimizar la recuperación de un preconcentrado aurífero proveniente de minerales sulfurados mediante el proceso de flotación, estableciendo los parámetros óptimos de concentración de sólidos (%), dosis de reactivos y tiempo de flotación. En el estudio se desarrolló un conjunto de pruebas experimentales basadas en un diseño factorial 2^3, considerando tres variables a dos niveles, con un total de 11 corridas experimentales que incluyeron tres puntos centrales. Las pruebas se realizaron sobre un mineral sulfurado compuesto principalmente por pirita, calcopirita, esfalerita y galena, con una ley promedio de cabeza de 10 g Au/TM. El mineral fue molido hasta alcanzar una granulometría de 65 % -200 mallas, determinándose un tiempo óptimo de molienda de 21,65 minutos. Los resultados evidenciaron que es posible optimizar el proceso de flotación, alcanzando una recuperación de oro de 76,96 %, superior a la recuperación promedio en planta (70,08 %). La mejor condición experimental permitió obtener una ley de 58,45 g Au/TM en el concentrado y 2,59 g Au/TM en el relave, operando con 35 % de sólidos, una dosificación de colector Aerofloat-238 de 50 g/TM y un tiempo de flotación de 10 minutos. Se concluyó que el porcentaje de sólidos y la dosificación del colector son las variables más influyentes en la recuperación del oro.

2.1.3. Antecedentes locales

Huamán (2023) implementó una celda flash flotation para la optimización de la recuperación de oro en el proceso metalúrgico de una compañía minera en el norte de Perú y también, aprovechar la proporción de metal valioso presente en el flujo de ingreso del sistema de flotación convencional. Inicialmente, se evaluó la factibilidad metalúrgica del proceso a escala de laboratorio, lo que permitió estimar la recuperación

de oro alcanzable. Posteriormente, se aplicó un diseño experimental con el objetivo de identificar y optimizar los parámetros más influyentes en la flotación flash. Para ello, se analizaron cinco factores operativos: porcentaje de sólidos (%S), colector (Z-6), espumante (MT-346) y los activadores $CuSO_4$ y AR-404. Los resultados indicaron que el colector y el espumante fueron las variables independientes con mayor significancia estadística, por lo que se consideraron en una etapa posterior de optimización del proceso. Con los parámetros optimizados, se procedió a la selección e implementación de la celda de flotación flash SK-240. La aplicación de estas condiciones permitió evidenciar mejoras en la recuperación de oro al procesar minerales con distintas leyes de cabeza. Específicamente, para rangos de ley de <10, [10;12>, [12;14>, [14;16> y >16 g Au/TMS, la recuperación de oro en la etapa de flotación se incrementó en 1,65 %, 1,40 %, 1,13 %, 0,85 % y 0,37 %, respectivamente.

2.2. Bases teóricas – científicas

2.2.1. Proceso de flotación

El fenómeno fisicoquímico que permite la concentración de minerales de acuerdo con la diferencia de afinidades superficiales entre sus partículas y las de agua, se conoce como flotación. Su principio fundamental consiste en la adhesión selectiva de partículas hidrofóbicas a burbujas de aire, las cuales ascienden a la superficie de la pulpa formando una espuma rica en mineral valioso, mientras que las partículas hidrofílicas permanecen en la fase acuosa y son descartadas como relave (Wills y Finch, 2015).

Este proceso se desarrolla en un medio acuoso denominado pulpa, constituido por mineral finamente molido, agua y reactivos químicos específicos. La eficiencia de la flotación depende de la adecuada liberación del mineral, del control de las

condiciones físico-químicas del sistema y de la correcta selección y dosificación de reactivos (Wills y Finch, 2015).

Desde el punto de vista fisicoquímico, la flotación se sustenta en fenómenos de tensión superficial, adsorción y potencial electrocinético. La adsorción de los reactivos colectores sobre la superficie del mineral modifica su carácter hidrofílico natural, volviéndolo hidrofóbico y favoreciendo su unión con las burbujas de aire. Esta interacción partícula–burbuja es esencial para la recuperación del mineral valioso La potencial zeta de las partículas minerales también influye significativamente en la flotación, ya que determina la estabilidad de la dispersión y la probabilidad de colisión efectiva entre partículas y burbujas. Un control adecuado del pH permite optimizar estas interacciones y mejorar la selectividad del proceso (Fuerstenau et al., 2007).

Celdas de flotación

Los equipos fundamentales involucrados en el tratamiento de minerales para la separación de partículas de valor de la ganga, a través de la fuerza de adhesión selectiva de minerales que repelan el agua en las burbujas de aire que ascendiente hasta la superficie creando espuma se les conoce como la celda de flotación. La eficiencia de la operación depende de las características del equipo, la hidrodinámica interna y la interacción burbuja-partícula, así como de la correcta dosificación de reactivos y condiciones de operación (Fuerstenau et al., 2007).

La selección del tipo de celda influye significativamente en la eficiencia de la flotación, la calidad del concentrado y la recuperación del mineral valioso. Por ejemplo, celdas columnares son favorecidas cuando se requiere alta selectividad y concentrados de alta ley en etapas de limpieza o *recleaning*, mientras que equipos de alta intensidad son útiles para recuperar partículas finas que no responden bien a celdas convencionales (Errol, 2003).

Las celdas de flotación mecánicas o convencionales, generan burbujas al romper aire en la pulpa mediante un impulsor rotativo, facilitando el contacto aire-partícula. Este diseño es el más común en plantas de concentración y se emplea en etapas de *rougher*, *scavenger* y *cleaner*. La eficiencia está influenciada por variables como el flujo de aire, la velocidad del impulsor, granulometría y % de sólidos (Vashisth et al., 2011).

Las celdas columnares se caracterizan por la ausencia de agitación mecánica, introduciendo aire en la parte inferior y la pulpa en sentido contracorriente. Este diseño permite tiempos de residencia más largos y una *zona de espuma* estable que mejora la separación y la selectividad, particularmente útil en etapas de limpieza para concentrados de alta ley (Vashisth et al., 2011).

Dentro de los tipos emergentes están las unidades de flotación fluidizadas y neumáticas, que ofrecen mejores capacidades de separación para rangos más amplios de tamaño de partícula y reducen algunas limitaciones de las células tradicionales. Por ejemplo, estudios recientes destacan las *fluidized flotation units* como nuevos diseños capaces de manejar partículas tanto finas como gruesas con mayor eficiencia separativa (Han et al., 2023).

Variables de flotación

El tamaño de partícula es una de las variables más críticas en la flotación. Un tamaño adecuado favorece un contacto eficaz entre las partículas minerales y las burbujas de aire, lo que mejora tanto la adhesión como la estabilidad del agregado partícula–burbuja. Si las partículas son demasiado gruesas, su peso dificulta su adhesión a las burbujas; si son demasiado finas, la alta superficie específica y la película de agua alrededor de las partículas impide una buena adhesión, reduciendo la recuperación (Ran et al., 2019).

El pH de la pulpa controla la química de superficie de los minerales y la reacción de los reactivos de flotación, influyendo directamente en la hidrofobicidad de las partículas valiosas. Un pH inadecuado puede afectar negativamente la adsorción de colectores y modificar la flotabilidad relativa de los minerales de ganga y los minerales valiosos, alterando la selectividad del proceso. Muchos diseños experimentales de flotación de oro toman el pH como variable clave para optimizar condiciones de operación (Barbouchi et al., 2026).

La densidad de la pulpa (o contenido de sólidos) tiene un papel clave en la dinámica de la flotación, ya que condiciona la frecuencia de contacto entre partículas y burbujas, el consumo de reactivos y la estabilidad de la espuma. Una pulpa excesivamente concentrada puede incrementar el arrastre de finos y reducir la selectividad debido a efectos de mayor viscosidad, mientras que una pulpa demasiado diluida disminuye las probabilidades de interacción partícula-burbuja. Por ello, el control adecuado de este parámetro es fundamental para lograr un equilibrio entre la recuperación y la calidad del concentrado (Acasiete, 2025).

2.2.2. Flotación flash

La flotación flash es una variante especializada de la flotación que se integra en el circuito de molienda y clasificación con el propósito de recuperar material valioso que ha sido liberado previamente, evitando su recirculación innecesaria y reducción de tamaño excesiva (sobre-molienda). Esta etapa se realiza antes del circuito de flotación convencional, utilizando una celda de flotación diseñada para captar las partículas de mineral con alta superficie expuesta y que responden rápidamente al proceso de flotación (Arellano et al., 2023).

En general, la celda de flotación flash se alimenta con la descarga del ciclón (underflow), que contiene una fracción significativa de partículas liberadas o

parcialmente liberadas con tamaño y características físico-químicas favorables para la flotación. Esta ubicación permite que el procesamiento ocupe este material antes de que regrese al molino, reduciendo así el riesgo de *sobre-molienda* y las pérdidas asociadas de valiosos por generación de partículas ultrafinas difíciles de recuperar (Arellano et al., 2023).

El objetivo principal de la flotación flash es maximizar la recuperación de partículas de mineral con alta flotabilidad y grado, en una etapa rápida y de bajo tiempo de residencia, produciendo un concentrado preliminar que puede ser tratado posteriormente por el circuito convencional o por etapas de limpieza adicionales (Kanowna Belle concentrator study). Esta operativa mejora la eficiencia general de la planta al reducir la carga de trabajo del circuito convencional de flotación y disminuir pérdidas por fines difíciles de flotar (Newcombe et al., 2013).

2.2.3. Flotación del oro

En el contexto de metales preciosos como el oro, la flotación flash resulta especialmente útil cuando parte del oro está asociado a minerales sulfurados o como partículas gruesas liberadas que, sin intervención temprana, recircularían en el circuito de molienda provocando mayor consumo energético y pérdidas de recuperación. Estudios han demostrado que la incorporación de celdas flash puede aumentar la recuperación de oro en una sola etapa y contribuir a una mejor recuperación global del circuito (Arellano et al., 2023).

En el caso del oro, su comportamiento en flotación está condicionado por propiedades físico-químicas de la superficie, su asociación mineralógica y el tamaño de partícula, lo cual influye directamente en su capacidad de ser recuperado mediante este proceso. El oro nativo tiene una alta densidad (≈19 300 kg/m³) y suele presentarse asociado a sulfuros como pirita y arsenopirita, o como partículas libres embebidas en

ganga. Debido a su alta densidad y a la posible adhesión de partículas de ganga o ferrosas en su superficie durante la molienda, la flotabilidad del oro puro puede verse limitada, ya que las partículas tienden a desprenderse de las burbujas o a no adherirse eficazmente si su superficie está contaminada. Esto complica la flotación directa del oro libre, por lo que la mayoría de circuitos de flotación se enfocan en la recuperación de sulfuros auríferos que contienen oro asociado (Revista Minería, 2022).

2.2.4. Recuperación de oro

La recuperación de oro se refiere al porcentaje de metal valioso que se logra extraer de un mineral dado durante su procesamiento metalúrgico, en relación con la cantidad que estaba presente inicialmente en la mena. Este concepto es clave para evaluar la eficiencia de cualquier flujo tecnológico de beneficio, ya que determina tanto el rendimiento económico como el aprovechamiento del recurso mineral (p. ej., en procesos de flotación, gravedad y lixiviación) (Özçelik y Ekmekçi, 2024).

En minerales auríferos, la recuperación depende de múltiples factores, entre los cuales se encuentran la naturaleza mineralógica del oro, su distribución en la ganga o en sulfuros, el tamaño de partícula, y la tecnología de procesamiento empleada. El oro puede presentarse como partículas libres o finamente incorporadas en fases minerales como pirita y arsenopirita; esta última situación suele requerir procesos de liberación mineralógica más complejos para que sea accesible a los agentes que lo extraen (por ejemplo, reactivos de flotación o soluciones cianuradas) (Özçelik y Ekmekçi, 2024).

La eficiencia del proceso de recuperación también depende de la selección del método metalúrgico adecuado. Por ejemplo, en concentrados finos que combinan gravedad y flotación, la recuperación de oro puede mejorar al emplearse reactivos que favorezcan la lixiviación o la oxidación previa del concentrado, aumentando así la accesibilidad del metal al agente extractante (como surfactantes y oxidantes). En

trabajos recientes se ha demostrado que la recuperación de oro puede incrementarse significativamente al aplicar tratamientos químicos previos a la lixiviación, logrando mejoras sobre el porcentaje de recuperación inicial incluso sin cambios drásticos en la granulometría del material (Koizhanova et al., 2022).

2.3. Definición de términos básicos

- Flotación de minerales: la flotación de minerales consiste en un proceso fisicoquímico de concentrado en el cual se separan los minerales valiosos de la ganga a través de la fuerza de adhesión selectiva entre las partículas hidrófobas y las burbujas de aire que suben hasta la superficie creando una espuma recuperable. Este proceso se basa en la modificación controlada de las propiedades superficiales de los minerales mediante reactivos específicos (Wills y Finch, 2016).
- Flotabilidad del oro: se define como la capacidad de las partículas auríferas, libres o asociadas, para adherirse a burbujas de aire durante el proceso de flotación. Esta propiedad depende del tamaño de partícula, la condición superficial, la asociación mineralógica y la adsorción de reactivos que incrementan la hidrofobicidad del sistema mineral (Bulatovic, 2015).
- Celda de flotación: es un equipo metalúrgico diseñado para promover el contacto eficiente entre partículas minerales y burbujas de aire dentro de una pulpa, permitiendo la separación selectiva del mineral valioso. Su desempeño depende del diseño hidrodinámico, el tiempo de residencia, la aireación y el régimen de agitación (Wills y Finch, 2016).
- Flotación flash: es una operación de flotación rápida integrada al circuito de molienda-clasificación, generalmente instalada en la descarga del hidrociclón o del molino, cuyo objetivo es recuperar de manera inmediata partículas valiosas

liberadas, evitando su sobremolienda y mejorando la recuperación global del circuito metalúrgico (Newcombe et al., 2013).

- Reactivos de flotación: son sustancias químicas adicionadas a la pulpa mineral para modificar selectivamente las propiedades superficiales de los minerales. En la flotación de oro, los colectores (xantatos, ditiofosfatos), espumantes y activadores juegan un rol fundamental en la selectividad, estabilidad de espuma y eficiencia de recuperación (Bulatovic, 2015).
- Recuperación metalúrgica de oro: es el indicador que expresa el porcentaje de oro extraído en el concentrado respecto al contenido total presente en la alimentación del proceso. Este parámetro refleja la eficiencia del método de beneficio y está directamente influenciado por la mineralogía del mineral, la liberación y las condiciones operativas del proceso (Özçelik y Ekmekçi, 2024).

2.4. Formulación de hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

La implementación de una celda de flotación flash en la descarga del hidrociclón incrementa significativamente la recuperación de oro en la planta procesadora *El Tambo* de la Empresa Qori Ñahuin S.A., al permitir la recuperación temprana del oro liberado y reducir las pérdidas metálicas en el relave final durante el año 2023.

2.4.2. Hipótesis específicas

- El nivel de recuperación de oro del proceso actual de la planta El Tambo es limitado, debido a la ausencia de una etapa de flotación flash, lo que ocasiona pérdidas de oro fino y parcialmente liberado en el circuito de molienda y clasificación.

- El balance granulométrico del mineral en el proceso de molienda y conminución presenta una fracción significativa de partículas finas y parcialmente liberadas en la descarga del hidrociclón, las cuales son técnicamente aptas para ser recuperadas mediante la implementación de una celda de flotación flash.
- La implementación de la celda de flotación flash reduce de manera significativa las pérdidas de oro en el relave, incrementando la ley de oro del concentrado y mejorando la recuperación global del proceso en comparación con el esquema operativo anterior.

2.5. Identificación de variables

2.5.1. Variable independiente

Implementación de una celda flash

2.5.2. Variable dependiente

Recuperación de oro

2.6. Definición operacional de las variables

Tabla 1. *Operacionalización de variables*

Variable	Dimensión	Indicador	Técnica
V. Independiente: Implementación de celda flash	Condiciones operativas	Caudal de alimentación	Medición directa
		Porcentaje de sólidos	Análisis de pulpa
		Granulometría de alimentación	análisis granulométrico
	Parámetros de flotación	Dosificación del flotador	Registro operacional
		Dosificación de espumante	Registro operacional
		Tiempo de residencia	Observación
		Condiciones de aireación	Medición directa
V. Dependiente recuperación de oro	Recuperación metalúrgica	Recuperación global	Análisis químico
		Recuperación en flotación flash	balance metalúrgico
	Leyes metalúrgicas	Ley de cabeza	Análisis químico
		Ley de concentrado	Análisis químico
		Ley de relave	Análisis químico
	Pérdida de oro	Oro perdido en relave	balance metalúrgico

Fuente: Elaborado por el tesista.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

La investigación aplicada es aquella que se enfoca en el análisis de una realidad o contexto específico con la finalidad de generar soluciones o resultados de aplicación inmediata (Carrasco, 2017). De esta manera, la presente investigación es aplicada ya que busca mejorar el proceso productivo actual mediante la implementación de una celda de flotación flash que maximice la recuperación del oro libre en los gruesos a la salida del proceso de molienda.

3.2. Nivel de investigación

El nivel de la investigación es explicativo ya que, se determinan las causas de los fenómenos analizados, profundizando en el tema más allá de la simple descripción o la relación entre las variables estudiadas (R. Hernández et al., 2014). De esta manera, se busca analizar como la implementación de una celda flash a la salida del hidrociclón, logra una mayor recuperación de oro al tratar el flujo de gruesos que contienen oro libre.

3.3. Método de investigación

El método cuantitativo de la investigación es un enfoque sistemático que se basa en la medición numérica de las variables, la recolección de datos objetivos y el análisis estadístico para describir, explicar o comprobar relaciones entre variables. Este método utiliza procedimientos estructurados y controlados, permitiendo la formulación y contrastación de hipótesis mediante datos cuantificables, con el fin de obtener resultados generalizables y verificables (Hernández y Mendoza, 2018).

3.4. Diseño de investigación

La investigación se enmarca dentro de un diseño cuasi – experimental, ya que se interviene deliberadamente el proceso metalúrgico mediante la implementación y operación de una celda de flotación flash a nivel piloto. Se evalúa el efecto de esta intervención sobre la recuperación de oro. No existe aleatorización estricta ni grupos de control totalmente independientes, ya que se trabaja sobre un proceso real de planta/piloto (Hernández y Mendoza, 2018).

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

La población de la investigación se refiere al grupo de elementos que comparten características específicas (A. Hernández et al., 2018). Para este estudio, la población se conformará por el mineral “gruesos” de 30 Tm.

3.5.2. Muestra

La muestra fue seleccionada criterio del investigador obteniendo 30 Kg., de acuerdo con los requisitos los experimentos metalúrgicos a nivel de laboratorio. Se tomaron cantidades de mineral grueso para las pruebas de flotación. Para lograr un análisis comparativo entre el sistema convencional y el sistema con la implementación de la celda de flotación flash.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.6.1. Técnicas

Las técnicas empleadas en esta investigación, fueron la observación experimental, el análisis químico y la revisión documental de los registros de planta sobre las leyes de mineral en la entrada, concentrado y cola.

3.6.2. Instrumentos

Como instrumento, se empleó la ficha de observación, los balances metalúrgicos y la bitácora de laboratorio.

3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Se realizó la codificación y sistematización de los datos recopilados mediante la herramienta Ms. Excel. Se aplicó la técnica de balance metalúrgico. También se aplicaron técnicas de estadística descriptiva, incluyendo medidas de tendencia central, así como la elaboración de gráficos y tablas. Para el análisis inferencial y descriptivo de los datos, se utilizó el software estadístico SPSS.

3.8. Tratamiento estadístico

El tratamiento estadístico de los datos se realizó considerando que el estudio se desarrolló a nivel piloto, con un número limitado de repeticiones experimentales (n = 3) por condición de operación, lo cual es común en estudios metalúrgicos exploratorios y de optimización preliminar de procesos.

En una primera etapa, los datos obtenidos de las pruebas piloto fueron tabulados y procesados en Microsoft Excel, donde se efectuó la verificación de consistencia, depuración y estandarización de las variables metalúrgicas, tales como leyes de cabeza, concentrado y relave, caudales y porcentajes de recuperación de oro.

Posteriormente, se aplicó estadística descriptiva, calculando medidas de tendencia central (promedio) y dispersión (desviación estándar y rango), con el fin de

caracterizar el comportamiento del proceso de flotación antes y después de la implementación de la celda de flotación flash.

Debido al tamaño reducido de la muestra, no se asumió normalidad de los datos. En consecuencia, para el análisis inferencial y la contrastación de hipótesis se emplearon pruebas no paramétricas, principalmente la prueba de Wilcoxon para muestras relacionadas, con el objetivo de evaluar si las diferencias observadas en la recuperación de oro y en las pérdidas al relave entre el proceso convencional y el proceso con celda de flotación flash son estadísticamente significativas.

El nivel de significancia adoptado fue de $\alpha = 0.05$, y los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software SPSS, complementando los resultados con el análisis técnico de los balances metalúrgicos, los cuales constituyen el principal criterio de evaluación del desempeño del proceso.

Finalmente, los resultados estadísticos fueron interpretados de manera conjunta con los indicadores metalúrgicos, reconociendo que las conclusiones obtenidas son válidas para condiciones piloto y sirven como base para futuras pruebas a escala industrial.

3.9. Orientación ética filosófica y epistémica

La presente investigación se desarrolló bajo principios éticos fundamentales de la actividad científica, garantizando la honestidad, objetividad y transparencia en la recolección, procesamiento y análisis de los datos obtenidos durante las pruebas piloto de flotación. Los resultados reportados reflejan fielmente el desempeño del proceso evaluado, sin manipulación, omisión ni alteración de la información experimental. Asimismo, el estudio respetó los lineamientos técnicos y operativos de la empresa donde se realizaron las pruebas, asegurando un uso responsable de los recursos, materiales y equipos empleados. Desde el punto de vista ambiental y de seguridad, las

actividades experimentales se llevaron a cabo cumpliendo las normas internas de seguridad y gestión ambiental, evitando riesgos innecesarios para el personal y el entorno. Finalmente, se reconocen y citan adecuadamente las fuentes bibliográficas utilizadas, respetando los derechos de autor y promoviendo la integridad académica.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo

El trabajo de campo se desarrolló en la planta procesadora “El Tambo”, específicamente en el circuito de molienda–clasificación. El mineral fino acumulado en la tolva de finos es alimentado al molino de bolas primario de 3.5’ x 5’, cuya descarga es conducida hacia un hidrociclón D-6 para su clasificación. El producto del underflow del hidrociclón retorna al molino de bolas secundario de 3’ x 3’ como carga circulante, mientras que el overflow es derivado al circuito de cianuración.

Con el propósito de evaluar la recuperación de oro presente en el underflow del hidrociclón mediante el uso de la tecnología Flash Flotation, se diseñó un programa de muestreo sistemático en los principales puntos del circuito de molienda–clasificación. En una primera etapa, se realizaron muestreos bajo condiciones normales de operación de la planta, es decir, sin la aplicación de la celda Flash Flotation, con el fin de establecer una línea base del comportamiento del proceso.

El muestreo en planta se efectuó durante jornadas operativas continuas, con una frecuencia de recolección cada 30 minutos durante un periodo de 10 horas por guardia.

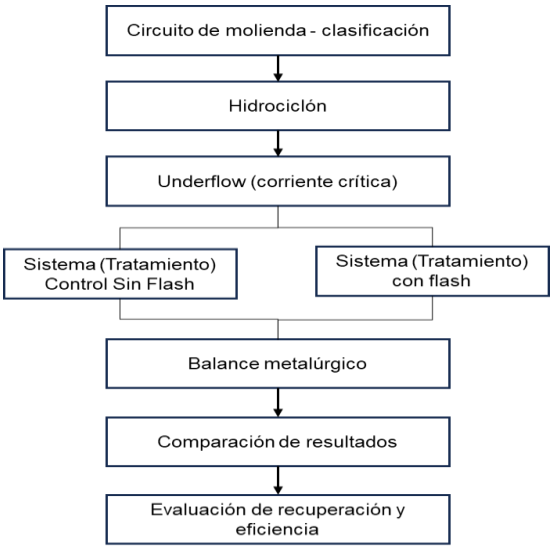
Las muestras recolectadas fueron homogenizadas y analizadas, obteniéndose valores promedio representativos para los ensayos metalúrgicos correspondientes.

Posteriormente, en una segunda etapa, las muestras de underflow del hidrociclón fueron sometidas a pruebas experimentales a nivel de laboratorio mediante una celda Flash Flotation, con el objetivo de determinar su potencial de recuperación de oro bajo condiciones controladas.

La evaluación del desempeño del sistema se realizó comparando los resultados obtenidos en condiciones reales de operación (sin celda Flash) con los resultados experimentales obtenidos a nivel de laboratorio (con celda Flash Flotation). Como técnica de recolección de datos, se empleó el diagrama de flujo del circuito de molienda–clasificación para la identificación de los puntos críticos de muestreo, desarrollándose un estudio de carácter experimental basado en la observación sistemática y el análisis comparativo.

A continuación, se muestra es diagrama que resume el proceso de trabajo de campo realizado.

Figura 1. *Diagrama general del proceso de trabajo de campo*



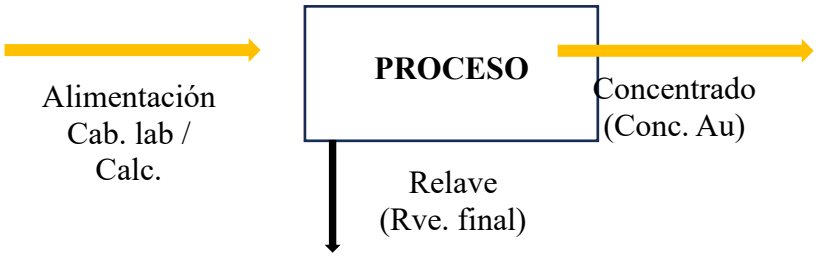
Fuente: Elaborado por el tesista.

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

4.2.1. Análisis del nivel de recuperación de oro y plata con el proceso actual

Para realizar el análisis del nivel de recuperación de oro y plata con el proceso actual, se partió del balance metalúrgico para cada una de las cinco (5) pruebas realizadas, según el esquema básico de balance de masa del proceso mostrado en la Figura 2.

Figura 2. *Esquema básico del balance de masa del sistema*



Fuente: Elaborado por el tesista.

Los resultados de los balances metalúrgicos para las cinco repeticiones con el sistema actual, sin flotación flash, e muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. *Balances metalúrgicos en sistema actual sin flotación flash*

N° Prueba	Producto	Mineral tratado (TMS)	Leyes (g/TM)		Contenido metálico (g/TM)		Recuperaciones (%)		
			Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	RADIO
1	Cabeza de lab.	390.000	14.50	18.50	5,655.00	7215.000			
	Concentración Au	59.182	74.80	106.26	4,426.84	6288.710	89.92	87.16	6.590
	Relave Final	330.818	1.50	2.80	496.23	926.290	10.08	12.84	
	Cabeza Calc.	390.000	12.62	18.50	4,923.06	7,215.000	100.00	100.00	
2	Cab. Lab.	385.000	15.10	17.90	5,813.50	6891.500			
	Conc. Au	54.675	73.60	104.90	4,024.05	5735.361	87.13	83.22	7.042
	Rve. Final	330.325	1.80	3.50	594.59	1156.139	12.87	16.78	
	Cab. Calc.	385.000	12.00	17.90	4,618.63	6,891.500	100.00	100.00	
3	Cab. Lab.	395.000	13.80	19.00	5,451.00	7505.000			
	Conc. Au	57.468	75.10	107.10	4,315.88	6154.874	91.42	82.01	6.873
	Rve. Final	337.532	1.20	4.00	405.04	1350.126	8.58	17.99	
	Cab. Calc.	395.000	11.95	19.00	4,720.92	7,505.000	100.00	100.00	
4	Cab. Lab.	380.000	13.50	15.70	5,130.00	5966.000			
	Conc. Au	48.283	73.80	105.70	3,563.30	5103.536	88.47	85.54	7.870
	Rve. Final	331.717	1.40	2.60	464.40	862.464	11.53	14.46	
	Cab. Calc.	380.000	10.60	15.70	4,027.71	5,966.000	100.00	100.00	
5	Cab. Lab.	400.000	14.20	18.40	5,680.00	7360.000			
	Conc. Au	60.725	74.50	106.90	4,523.98	6491.455	90.19	88.20	6.587
	Rve. Final	339.275	1.45	2.56	491.95	868.545	9.81	11.80	
	Cab. Calc.	400.000	12.54	18.40	5,015.93	7,360.000	100.00	100.00	

Fuente: Elaborado por el tesista.

De manera general, los resultados del balance metalúrgico evidencian un comportamiento consistente del proceso de concentración para las cinco pruebas evaluadas. El mineral tratado presenta leyes de cabeza relativamente homogéneas, con valores de oro entre 13.50 y 15.10 g/TM y plata entre 15.70 y 19.00 g/TM, lo que indica una alimentación estable al circuito de procesamiento.

En cuanto a la distribución de productos, se observa que la mayor parte del material se dirige al relave final, mientras que una menor proporción corresponde al concentrado, lo cual es característico de procesos de concentración donde se busca maximizar la ley del producto valioso. Esto se refleja en los radios de concentración obtenidos, que varían entre 6.59 y 7.87, evidenciando un adecuado grado de enriquecimiento del mineral.

Asimismo, las leyes del concentrado de oro y plata son significativamente superiores a las de la cabeza, lo que confirma la eficiencia del proceso en la concentración del metal valioso. Por otro lado, las leyes del relave final son considerablemente bajas en comparación con la alimentación, lo que indica una adecuada separación, aunque aún se evidencia la presencia de contenido metálico que representa pérdidas en el sistema.

Finalmente, la concordancia entre la cabeza de laboratorio y la cabeza calculada, junto con el cierre cercano al 100% en contenido metálico, valida la consistencia de los balances metalúrgicos realizados, lo que permite considerar los resultados como confiables para su posterior análisis en términos de recuperación y pérdidas.

En la siguiente Tabla 3, se muestra los estadísticos descriptivos de los resultados metalúrgicos respecto a recuperación de los metales valiosos.

Tabla 3 *Estadísticos descriptivos de la recuperación de Au del proceso actual*

Estadístico	%Recuperación Au	Contenido Au (g/TM)	Ley Au (g/TM)
Media	89.43	4170.81	74.36
DE	1.48	346.97	0.575
CV (%)	1.66%	8.32%	0.77%

Fuente: Elaborado por el tesista.

Los resultados estadísticos muestran que la recuperación promedio de oro alcanza un valor de 89.43%, lo que evidencia un desempeño eficiente del proceso de concentración. Asimismo, la baja desviación estándar (1.48) y el coeficiente de variación de 1.66% indican una alta estabilidad operativa y una mínima dispersión de los datos, lo que refleja consistencia en la recuperación del metal valioso a lo largo de las pruebas realizadas.

Por otro lado, el contenido de oro presenta un valor promedio de 4170.81 g/TM, con una desviación estándar de 346.97 y un coeficiente de variación de 8.32%, lo que

evidencia una variabilidad moderada en la distribución del metal. Esta mayor dispersión, en comparación con la recuperación, sugiere que el contenido metálico está influenciado por factores propios del mineral, como la heterogeneidad de la mena o el grado de liberación.

En cuanto a la Ley de oro, se determinó un promedio de 74.36 g/TM con una desviación estándar de 0.575, lo cual indica una baja dispersión de los valores respecto a la media, con un coeficiente de variabilidad que lo demuestra con un valor de 0.77%, indicando un comportamiento similar entre las muestras analizadas.

En conjunto, los resultados indican que, si bien el proceso presenta una recuperación de oro altamente consistente, existe cierta variabilidad en el contenido metálico, lo cual es característico en operaciones metalúrgicas y no compromete la eficiencia global del proceso.

4.2.2. Determinación del balance granulométrico del mineral en el proceso de molienda y conminución a partir del cual se analizó el proceso de flotación a instalar

El balance granulométrico se realizó con el propósito de evaluar la cantidad de metal valioso que se encuentra de forma libre en las partículas de fino y que no se estaban considerando en la recuperación final. Para ello, primero se realizó el análisis de granulometría con las mallas y luego se determinaron las leyes de mineral de los flujos de fino y grueso. A continuación, se muestra el resumen de resultados del análisis granulométrico para cada una de las corrientes de proceso actual.

Tabla 4. *Resumen del análisis granulométrico para el flujo de cabeza*

Tamiz		CABEZA			
#	µm	Peso (g)	Peso (%)	%Ac (-)	D50
14	1400		0.0	100.0	
20	850		0.0	100.0	
30	600		0.0	100.0	
40	425	0.00	0.0	100.0	
50	300	1.40	0.1	99.9	
70	212	28.20	1.2	98.7	
100	150	132.80	5.7	93.0	
140	106	182.20	7.8	85.2	93.1
200	75	303.30	13.1	72.1	
270	53	423.00	18.2	53.9	
325	45	236.70	10.2	43.7	
400	38	58.40	2.5	41.2	
500	25	209.90	9.0	32.2	
635	20	11.50	0.5	31.7	
-635	<20	736.30	31.7		
Total		2323.7	100.0		

Fuente: Elaborado por el tesista.

El análisis granulométrico de la muestra de cabeza evidencia que el mineral presenta una distribución predominantemente fina, con una fracción significativa del 31.7% por debajo de 20 µm. Asimismo, se observa que el tamaño medio de partícula (D50 ≈ 93 µm) indica que el 50% del material se encuentra por debajo de este tamaño, lo que sugiere un grado moderado de conminución.

Por otro lado, la mayor concentración de material se ubica en el rango de tamaños intermedios (entre 53 µm y 75 µm), donde se concentra una proporción importante del peso total. La ausencia de material en tamaños gruesos (>300 µm) indica que el mineral ha sido sometido a un proceso de molienda eficiente.

Tabla 5. *Resumen del análisis granulométrico para el flujo de concentrado*

Tamiz		CONCENTRADO			
#	µm	Peso (g)	Peso (%)	%Ac (-)	D50
14	1400	0.0	0.0	100.0	
20	850	0.0	0.0	100.0	
30	600	0.0	0.0	100.0	
40	425	0.0	0.0	100.0	
50	300	0.7	0.1	99.9	
70	212	8.0	0.8	99.1	
100	150	35.3	3.6	95.5	
140	106	46.7	4.8	90.6	
200	75	88.2	9.1	81.5	70.8
270	53	84.2	8.7	72.8	
325	45	46.3	4.8	68.0	
400	38	38.3	4.0	64.1	
500	25	122.9	12.7	51.4	
635	20	15.8	1.6	49.7	
-635	<20	481.1	49.7		
Total		967.5	100.0	K80	70.8

Fuente: Elaborado por el tesista.

El análisis granulométrico del concentrado muestra una distribución predominantemente fina, donde cerca del 49.7% del material se encuentra por debajo de 20 µm, evidenciando una alta proporción de partículas finas en el producto concentrado. Asimismo, el tamaño característico K80 de 70.8 µm indica que el 80% del material se encuentra por debajo de este tamaño, lo que refleja un producto más fino en comparación con la alimentación. La mayor concentración de peso se presenta en tamaños finos e intermedios, particularmente en el rango menor a 75 µm, lo cual es característico de procesos de concentración donde el metal valioso tiende a recuperarse en fracciones más finas debido a un mayor grado de liberación.

La ausencia de material en tamaños gruesos confirma que el proceso favorece la recuperación de partículas finas, lo que sugiere una adecuada liberación del oro en estas fracciones. Sin embargo, esta distribución también podría indicar que partículas más gruesas con contenido metálico no están siendo eficientemente recuperadas, lo cual

resulta relevante para evaluar posibles pérdidas en el relave y la necesidad de optimizar el proceso mediante tecnologías complementarias.

Tabla 6 *Resumen del análisis granulométrico para el flujo de relave*

Tamiz		RELAVE			
#	**µm**	**Peso (g)**	**Peso (%)**	**%Ac (-)**	**D50**
14	1400	0.0	0.0	100.0	
20	850	0.0	0.0	100.0	
30	600	0.0	0.0	100.0	
40	425	0.0	0.0	100.0	
50	300	1.3	0.1	99.9	
70	212	26.0	1.2	98.7	
100	150	122.9	5.8	92.9	
140	106	168.8	8.0	84.9	94.0
200	75	279.7	13.3	71.6	
270	53	394.9	18.7	52.8	
325	45	221.1	10.5	42.4	
400	38	51.2	2.4	39.9	
500	25	186.0	8.8	31.1	
635	20	9.1	0.4	30.7	
-635	<20	646.2	30.7		
Total		2107.1	100.0	K80	94.0

Fuente: Elaborado por el tesista.

El análisis granulométrico del relave evidencia una distribución de tamaños similar a la de la alimentación, con un tamaño característico K80 de 94.0 µm, lo que indica que una parte importante del material descargado no ha sido significativamente reducida en tamaño respecto a la cabeza. Asimismo, se observa que el 30.7% del material se encuentra por debajo de 20 µm, mientras que una proporción considerable se concentra en tamaños intermedios entre 53 µm y 75 µm.

La presencia de material en fracciones gruesas e intermedias dentro del relave sugiere que partículas con potencial contenido metálico no están siendo eficientemente recuperadas en el circuito de concentración. Este comportamiento es característico de sistemas donde existe oro libre o parcialmente liberado que, debido a su tamaño o condiciones de operación, no es capturado por los mecanismos convencionales de

flotación. A continuación, muestra el resumen del análisis de ley de mineral para los finos y gruesos.

Tabla 7. *Resumen del análisis de leyes finos y gruesos*

Peso muestra mineral		Ley Grueso	Contenido metal (g/TM)	Ley Fino	Contenido metal (g/TM)	Ley Mallas
%Peso grueso	%Peso fino					
1.53%	98.5%	3.10	23.70	10.42	5130.98	13.519
2.49%	97.5%	5.13	64.00	9.82	4785.40	14.948
3.25%	96.8%	6.06	98.48	9.30	4500.87	15.364
4.67%	95.3%	4.93	115.06	9.52	4536.71	14.450
4.60%	95.4%	6.43	147.94	10.37	4944.96	16.799
3.62%	96.4%	3.89	70.45	9.28	4474.25	13.177
2.12%	97.9%	4.78	50.55	9.89	4838.55	14.664
1.68%	98.3%	4.52	37.98	9.95	4889.80	14.469
3.10%	96.9%	3.69	57.16	11.19	5422.50	14.880
7.02%	93.0%	2.39	83.80	10.91	5071.46	13.295

Fuente: Elaborado por el tesista.

Los resultados de la Tabla 8, se procesaron estadísticamente para obtener las medidas de tendencia central de los mismos en término de media, desviación estándar (DE) y %CV para los parámetros de Ley de fino, Ley de grueso, Ley de mallas, contenido de metal y Peso.

Tabla 8. *Descriptivos del análisis de leyes de finos y gruesos*

Fracción	Estadístico	%Peso	Ley (g/TM)	Contenido de meta (g/TM)
Grueso	Media	3.41%	4.49	74.91
	DE	0.017	1.260	37.44
	CV (%)	49.16%	28.05%	49.97%
Fino	Media	96.59%	10.06	4859.55
	DE	0.017	0.649	288.266
	CV (%)	1.73%	6.45%	5.93%

Fuente: Elaborado por el tesista.

El análisis por fracciones granulométricas evidencia que la mayor proporción del material corresponde a la fracción fina, con un 96.59% del peso total, mientras que la fracción gruesa representa solo el 3.41%. Esto indica que el proceso de conminución

genera predominantemente partículas finas, lo cual es consistente con los resultados del análisis granulométrico global.

En términos de ley de oro, la fracción fina presenta un valor promedio de 10.06 g/TM, significativamente superior al de la fracción gruesa (4.49 g/TM), lo que demuestra que el oro se encuentra mayormente concentrado en tamaños finos, donde existe un mayor grado de liberación.

Asimismo, el contenido metálico muestra una marcada diferencia entre ambas fracciones, siendo mucho mayor en la fracción fina (4859.55 g/TM) en comparación con la fracción gruesa (74.91 g/TM), lo que confirma que la mayor cantidad de oro recuperable está asociada a partículas finas.

Por otro lado, el coeficiente de variación de la fracción gruesa es elevado (≈50%), lo que indica una alta dispersión y heterogeneidad en la distribución del oro en estos tamaños, comportamiento típico de la presencia de oro libre o partículas gruesas irregulares. En contraste, la fracción fina presenta baja variabilidad (CV < 7%), evidenciando una distribución más homogénea del metal.

4.2.3. Descripción del proceso metalúrgico actual y aspectos técnicos – operativos de la celda de flotación flash

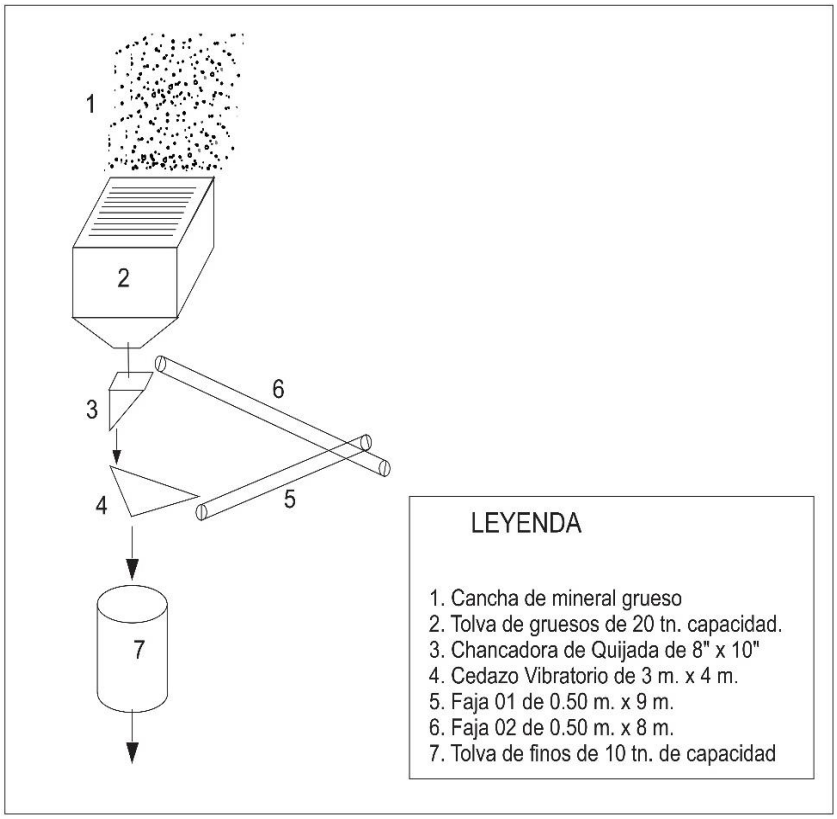
La planta procesa minerales auríferos asociados con chalcopirita, arsenopirita, pirita, caliza, entre otros. Las etapas que comprende el tratamiento del mineral aurífero son los siguientes: circuito de chancado, circuito de molienda – clasificación, circuito de cianuración y circuito de disposición de relaves.

Circuito de chancado

El mineral es transportado con volquetes de 30 Tm. de capacidad, el mineral se deposita en la cancha de adyacente a la tolva de gruesos, el mineral que se recepciona es controlado con una balanza electrónica con mayormente pirita, chalcopirita, caliza

con contenido de oro con una humedad promedio de 7%. De la cancha el mineral se alimenta a la tolva de gruesos de 20 toneladas de capacidad que tiene parrillas de rieles de 6” de abertura de la tolva de gruesos se alimentara a una chancadora de quijadas de 8” *10” con set de descarga de 3/8” el mineral fino -3/8” va a una tolva de finos de 10 toneladas de capacidad el producto grueso del cedazo retorna a la chancadora de quijadas (Figura 3).

Figura 3. *Diagrama del chancado*



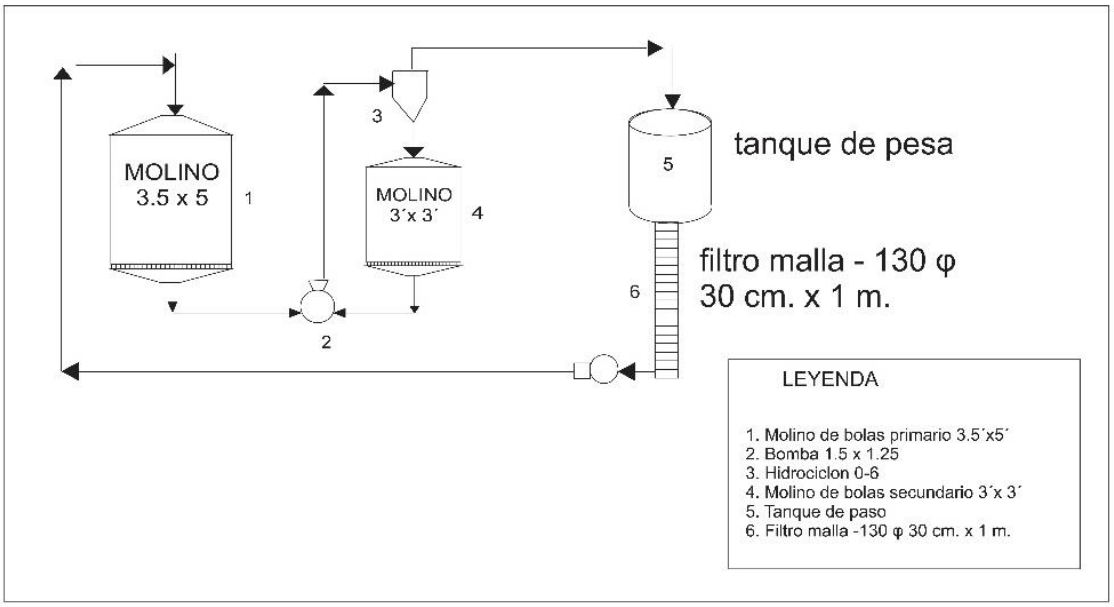
Fuente: Elaborado por el tesista.

Circuito de molienda – clasificación

De la tolva de fino se alimenta el mineral al molino de bolas primario de 3.5” *5” mediante la faja N°3, la descarga del molino va a la bomba de 1.5*1.25 que alimenta al hidrociclón D-6 el grueso retorna al molino de bolas 3” *3” secundario, el producto del molino secundario vuelve al hidrociclón como carga circulante, el fino del

hidrociclón va a la etapa de agitación (cianuración), previo peso por filtro de malla -130Ø (Figura 4).

Figura 4. *Diagrama del circuito molienda – clasificación*



Fuente: Elaborado por el tesista.

Circuito de cianuración

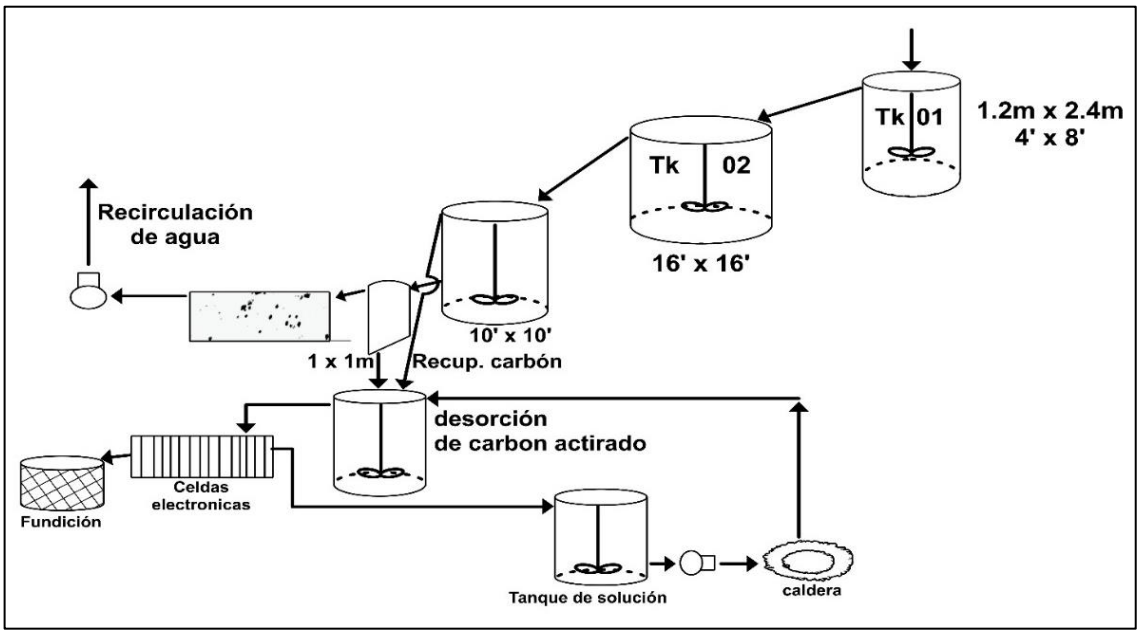
En este etapa e realiza la disolución del metal valioso (Au) con la adición de Cal y NaCN siendo la reacción química:

$$4Au + 8NaCN + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4AuNa(CN)_2 + 4NaOH$$

El tiempo de retención de la pulpa en los tanques es de 48 horas. El tanque de agitación TK1 (4” x 8”), tanque primario donde se disuelve el oro hasta 20% de recuperación y a la vez realiza adsorción de aurocianuro en los microporos del carbón activado. El tanque de agitación TK2 (16” x 16”), tanque secundario donde se disuelve al 50% de oro que pasa del tanque N°1. Tanque de agitación TAK3 (10” x 10”), tanque tercero donde se disuelve el 30% de oro que queda del tanque N°2.

Cajón de cosecha. En este cajón se realiza la cosecha de carbón activado cargado de aurocianuro. La separación se realiza mediante una malla inoxidable N°25 y la pulpa ya pobre de metal de oro se envía a la relavera.

Figura 5. *Diagrama de cianuración – carbón activado – obtención de doré*



Fuente: Elaborado por el tesista.

Aspectos técnicos – operativos de la celda de flotación flash

El propósito del uso de la celda Flash Flotation es recuperar los minerales valioso y liberados en el circuito de molienda – clasificación, los cuales por su selectiva de alta gravedad especifica son retornados al circuito de molienda por medio del underflow del hidrociclón, donde son remolidos.

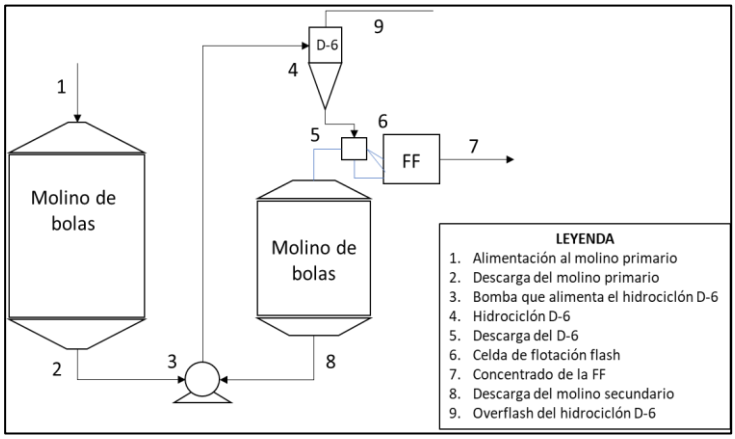
La utilización de la celda Flash Flotation de OutoKumpu, permite que los minerales procesados, sean retirados del circuito de molienda – clasificación evitando la sobremolienda y la pérdida del oro cuando se pega o adhiere en las bolas o en los forros del molino.

Ubicación de la celda de flotación

La ubicación de para la operación de la celda Flash Flotation, donde se logró los mejores resultados para el tratamiento de los minerales auríferos en la planta procesadora El Tambo, se muestra en el diagrama de la Figura 6. Este circuito final permite que el oro liberado sea extraído del underflow del hidrociclón por flotación con una densidad de 1800 gr/L, que luego es enviado al circuito de cianuración. De esta

manera en base a un análisis exhaustivo de seguimiento, control y mucha persistencia se ha podido que toda partícula de oro ya liberado que se encuentra en la pulpa en el underflow del hidrociclón sea recuperada por medio de la flotación.

Figura 6. *Diagrama de ubicación de la celda de flotación flash en zona de molienda*

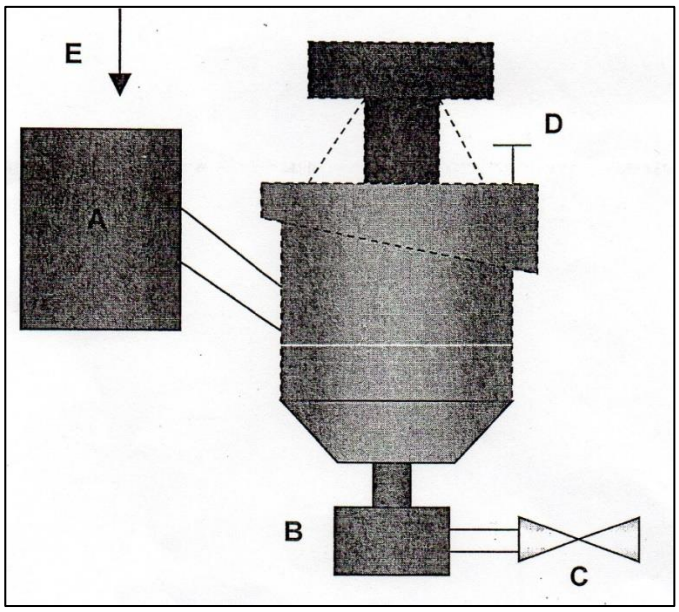


Fuente: Elaborado por el tesista.

Parámetros de operación de la celda de flotación

Los parámetros de la celda de flotación flash se describe conforme los componentes ilustrados en el diagrama de la Figura 7.

Figura 7. *Diagrama de la celda de flotación*



Fuente: Elaborado por el tesista.

- E (alimentación): la alimentación de pulpa la mejor densidad es de 1800gr/lt y la dosificación de xantato, espumante MIBC, con dosificaciones controladas por electro válvulas, las cantidades de reactivos señaladas anteriormente y referidas a toneladas de mineral fresco que ingresa al molino.
- A (caja de alimentación a la celda): debe tener el tamaño adecuado para absorber la fluctuación de flujo debido a las pequeñas variaciones de este cajón tiene una salida graduable para que el flujo alimentado a la celda sea lo más constante posible.
- D (control de nivel de pulpa): control de nivel de pulpa que tiene relación directa con la operación de la válvula automática de la descarga de la celda.
- B (Descarga de la celda): en la descarga de la celda, antes de la válvula de control automático debe haber un cajón o deposito que también atenué las variaciones de flujo producto de la corrección de nivel de pulpa a largo del sensor de nivel
- C (Válvula de control): válvula Pinch de control automático con actuador neumático, el factor más importante es la calidad de la manga de jebe, se debe seleccionar una que por lo menos dure 3 meses, no todas las mangas son de la misma calidad.

4.2.4. Evaluación de reducción de las pérdidas de oro en el relave y la nueva ley de salida que se logra con la implementación de la celda flotación

La evaluación de las pérdidas de oro en el relave y la nueva ley de salida lograda con la implementación se realizaron mediante el análisis del flujo de relave final del balance metalúrgico y mediante pruebas del proceso de flotación para obtener nuevos balances metalúrgicos.

Nueva ley de salida con la celda de flotación flash

Tabla 9. *Resultado de los balances metalúrgicos con el proceso de flotación flash*

N° Prueba	Producto	Mineral tratado (TMS)	Leyes (g/TM)		Contenido metálico (g/TM)		Recuperaciones (%)		
			Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	RADIO
1	Cab. Lab.	390.000	14.20	18.10	5,538.00	7059.00			
	Conc. Au	52.881	90.00	120.10	4,759.32	6351.05	92.77	89.97	7.375
	Rve. Final	337.119	1.10	2.10	370.83	707.95	7.23	10.03	
	Cab. Calc.	390.000	13.15	18.10	5,130.15	7059.00	100.00	100.00	
2	Cab. Lab.	385.000	14.60	18.70	5,621.00	7199.50			
	Conc. Au	53.472	91.10	121.00	4,871.32	6470.14	93.93	89.87	7.200
	Rve. Final	331.528	0.95	2.20	314.95	729.36	6.07	10.13	
	Cab. Calc.	385.000	13.47	18.70	5,186.27	7199.50	100.00	100.00	
3	Cab. Lab.	395.000	14.20	18.10	5,609.00	7149.50			
	Conc. Au	53.559	90.00	120.10	4,820.34	6432.47	92.77	89.97	7.375
	Rve. Final	341.441	1.10	2.10	375.58	717.03	7.23	10.03	
	Cab. Calc.	395.000	13.15	18.10	5,195.92	7149.50	100.00	100.00	
4	Cab. Lab.	980.000	14.90	19.20	14,602.00	18816.00			
	Conc. Au	141.766	91.01	120.90	12,902.14	17139.53	94.19	91.09	6.913
	Rve. Final	838.234	0.95	2.00	796.32	1676.47	5.81	8.91	
	Cab. Calc.	980.000	13.98	19.20	13,698.46	18816.00	100.00	100.00	
5	Cab. Lab.	400.000	15.80	19.80	6,320.00	7920.00			
	Conc. Au	58.946	89.90	122.50	5,299.21	7220.84	93.67	91.17	6.786
	Rve. Final	341.054	1.05	2.05	358.11	699.16	6.33	8.83	
	Cab. Calc.	400.000	14.14	19.80	5,657.32	7920.00	100.00	100.00	

Fuente: Elaborado por el tesista.

Los resultados obtenidos tras la implementación de la celda de flotación flash evidencian una mejora significativa en el desempeño metalúrgico del proceso. Las recuperaciones de oro alcanzan valores entre 92.77% y 94.19%, mientras que para la plata oscilan entre 89.87% y 91.17%, lo que refleja una alta eficiencia en la recuperación de metales valiosos.

En cuanto a las leyes del concentrado, se observa un notable enriquecimiento, con valores de oro cercanos a 90–91 g/TM y plata entre 120.10 y 122.50 g/TM, confirmando la efectividad del proceso en la concentración del mineral. Este comportamiento se traduce en contenidos metálicos elevados en el concentrado, lo que evidencia una adecuada captura del oro en etapas tempranas del circuito.

Por otro lado, las leyes del relave final son considerablemente bajas (≈0.95–1.10 g/TM de Au), lo que indica una reducción importante de las pérdidas de metal valioso. Asimismo, los contenidos metálicos en el relave son relativamente bajos en comparación con el sistema convencional, evidenciando que una mayor fracción del oro está siendo recuperada.

El radio de concentración, con valores entre 6.78 y 7.38, muestra un comportamiento consistente del proceso, indicando un adecuado grado de concentración sin comprometer la recuperación. Finalmente, la concordancia entre la cabeza de laboratorio y la cabeza calculada, con cierres metalúrgicos del 100%, valida la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Tabla 10. *Estadísticos descriptivos del balance metalúrgico con la flotación flash*

Estadístico	%Recuperación Au	Contenido Au (g/TM)	Ley Au (g/TM)
Media	93.47	6914.79	90.40
DE	0.59	3135.30	0.535
CV (%)	0.63%	45.34%	0.59%

Fuente: Elaborado por el tesista.

Los resultados estadísticos del sistema con flotación flash evidencian un alto desempeño y una notable estabilidad en la recuperación de oro. La recuperación promedio alcanza un valor de 93.47%, acompañado de una baja desviación estándar (0.59) y un coeficiente de variación de 0.63%, lo que indica una operación altamente consistente y controlada.

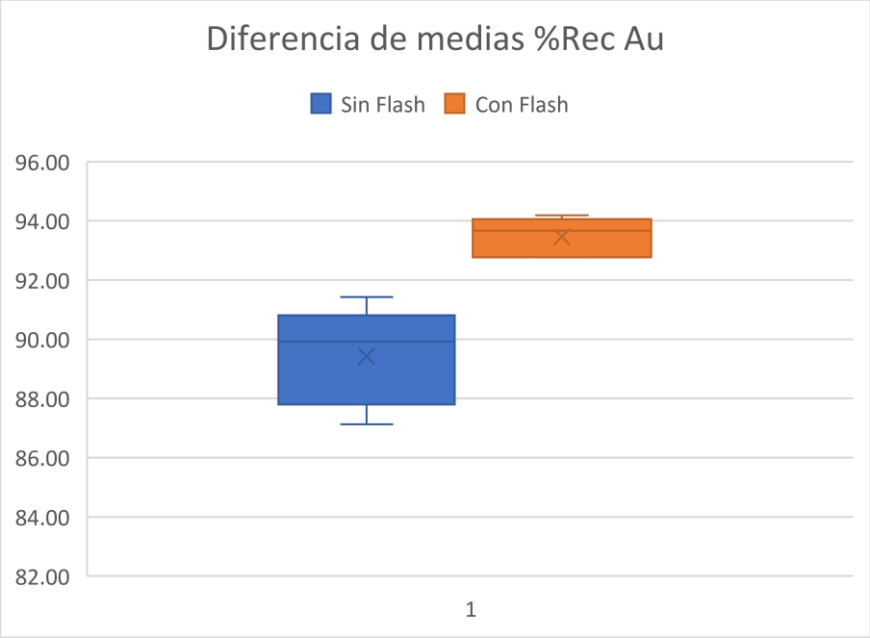
En cuanto a la ley de oro del concentrado, se observa un valor promedio de 90.40 g/TM, con una muy baja variabilidad (CV = 0.59%), lo que refleja un producto de alta calidad y uniformidad en el proceso de concentración.

Por otro lado, el contenido metálico presenta un valor promedio de 6914.79 g/TM, con una desviación estándar de 3135.30 y un coeficiente de variación de 45.34%,

evidenciando una alta dispersión en este parámetro. Esta variabilidad está asociada principalmente a cambios en el tonelaje tratado y a las variaciones en la alimentación, más que a inestabilidad del proceso.

En la Figura 8 se puede ver el diagrama de caja que representa la diferencia de medias sin y con la flotación flash respecto a la recuperación de oro.

Figura 8. *Diagrama de caja de la recuperación de oro*

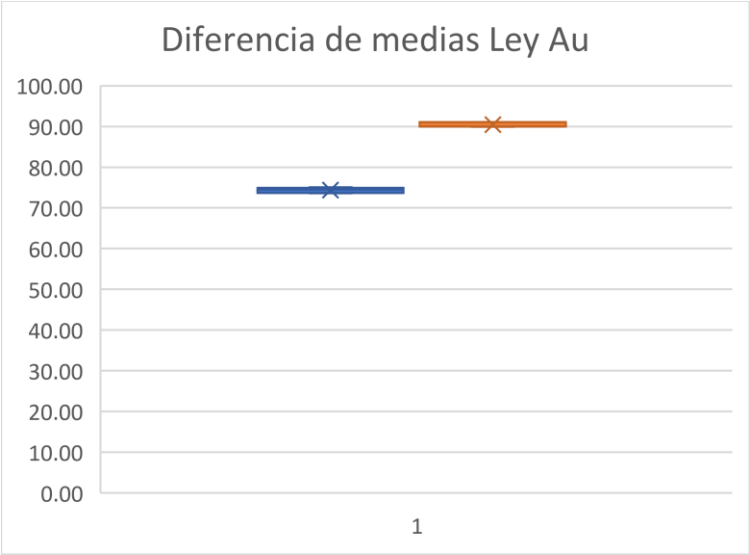


Fuente: Elaborado por el tesista.

El gráfico de cajas muestra una comparación clara entre las condiciones Sin Flash y Con Flash en la diferencia de medias del % de recuperación de Au: en la condición Sin Flash, la mediana se ubica alrededor de 89.5 y la media cerca de 89.3, con un rango aproximado entre 87.2 y 91.3 y una mayor dispersión (Q1 ≈ 88 y Q3 ≈ 90.8), lo que indica mayor variabilidad en los resultados; en cambio, en la condición Con Flash, la mediana (~93.5) y la media (~93.6) son más altas, con un rango más estrecho entre aproximadamente 92.7 y 94.1 y menor dispersión (Q1 ≈ 92.8 y Q3 ≈ 94.0), evidenciando resultados más consistentes y estables.

En la Figura 9 se puede ver el diagrama de caja que representa la diferencia de medias sin y con la flotación flash respecto a la ley de oro.

Figura 9. *Diagrama de caja de la ley de oro*

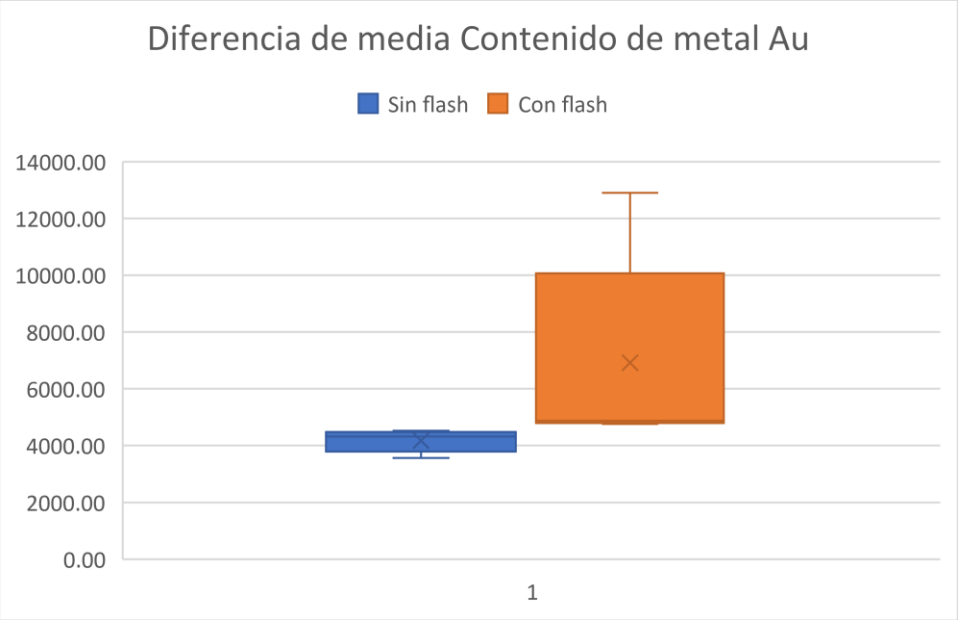


Fuente: Elaborado por el tesista.

Se observa que en Sin Flash la mediana y la media se sitúan alrededor de 74–75, con una dispersión muy baja (caja estrecha y valores muy concentrados), lo que indica resultados bastante consistentes pero en un nivel menor; por otro lado, en la condición Con Flash, tanto la mediana como la media se ubican cerca de 90–91, también con muy poca variabilidad, lo que refleja un comportamiento igualmente estable pero significativamente superior; en conjunto, no se aprecian valores atípicos en ninguno de los casos y la diferencia entre ambas condiciones es marcada, evidenciando que la aplicación de Flash incrementa de forma importante la ley de Au (del orden de 15 puntos), manteniendo además una alta consistencia en los resultados.

En la Figura 10 se puede ver el diagrama de caja que representa la diferencia de medias sin y con la flotación flash respecto al contenido de oro.

Figura 10. *Diagrama de caja del contenido de oro*



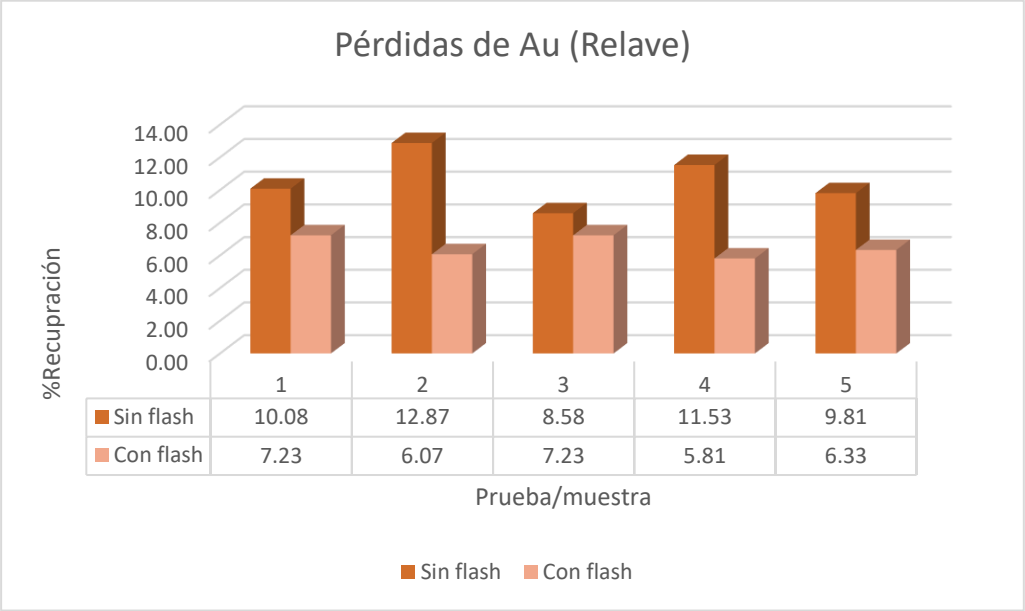
Fuente: Elaborado por el tesista.

El gráfico de la Figura 10 muestra una clara diferencia entre las condiciones Sin Flash y Con Flash. En la condición sin flash, la mediana se sitúa alrededor de 4000–4200 y la media cercana a 4100, con una dispersión relativamente baja (Q1 ≈ 3800 y Q3 ≈ 4400), lo que indica resultados bastante consistentes y concentrados; en contraste, en Con Flash, la mediana se ubica aproximadamente entre 5000 y 6000 y la media alrededor de 7000, pero con una dispersión mucho mayor (Q1 ≈ 4800 y Q3 ≈ 10000, con valores que alcanzan cerca de 13000), evidenciando una alta variabilidad en los resultados; aunque no se observan valores atípicos claros, la asimetría es notable en la condición con Flash (media mayor que la mediana), lo que sugiere la presencia de valores altos que elevan el promedio; en conjunto, el uso de Flash incrementa significativamente el contenido de metal Au.

Pérdidas de Au en relave

Respecto a las pérdidas según el porcentaje de recuperación de oro en relave antes y después de la celda de flotación flash, en la Figura 11 se muestran las diferencias.

Figura 11. *Pérdidas en relave según %Recuperación Au*

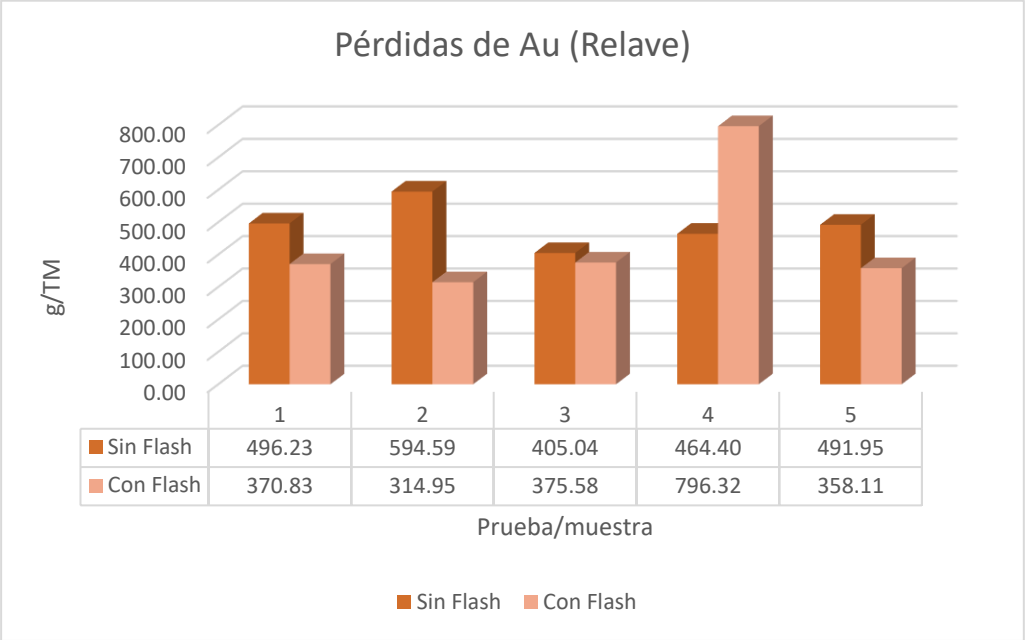


Fuente: Elaborado por el tesista.

Se pude apreciar que las pérdidas en la recuperación de oro, son menores en el sistema con flotación flash variando de 5.81 hasta un máximo de 7.23 en él %recuperación. En cambio, con el sistema sin flotación flash se aprecia que el %recuperación de oro en relave, varía entre 8.58 hasta un máximo de 12.87%.

En cuanto a las perdidas en relave representadas por el contenido de metal 8g/TM), en la Figura 12 se muestran las diferencias.

Figura 12. *Pérdidas en relave según contenido metal Au*



Fuente: Elaborado por el tesista.

Se puede apreciar que las pérdidas en relave representadas en contenido de metal, fueron menores en la mayoría a de las pruebas para el sistema de flotación flash. Cabe resaltar que un valor atípico en la muestra 4, es causado por el tamaño de la muestra tratada que fue mucho mayor, la cual que se ve, además, influenciada por las características mineralógicas y no por el procesamiento instrumental.

En la Tabla 11, se muestra la reducción de las pérdidas de oro según el contenido metálico determinado para ambos sistemas, donde se puede apreciar que el contenido metálico se reduce la pérdida en 29.45 hasta un 279.63 g/TM.

Tabla 11. *Reducción de las pérdidas de Au según contenido metálico*

Muestra	Pérdida sin flash (Cont. Metal) Au (g/TM)	Pérdidas con flash (Cont. metal) Au (g/TM)	Reducción de perdida (g/TM)
1	496.23	370.83	125.40
2	594.59	314.95	279.63
3	405.04	375.58	29.45
4	464.40	796.32	-331.92
5	491.95	358.11	133.84

Fuente: Elaborado por el tesista.

4.3. Prueba de hipótesis

Comprobación de hipótesis específica 1

"El nivel de recuperación de oro del proceso actual de la planta El Tambo es limitado, debido a la ausencia de una etapa de flotación flash, lo que ocasiona pérdidas de oro fino y parcialmente liberado en el circuito de molienda y clasificación".

Se pudo comprobar mediante los balances metalúrgicos reportados en la Tabla 2 que, la recuperación de oro varía entre 87.13% y 91.42% con una media de 89.43%, evidenciando que el proceso actual no es tan eficiente y que puede optimizarse incorporando una celda de flotación flash.

Comprobación de hipótesis específica 2

"El balance granulométrico del mineral en el proceso de molienda y conminución presenta una fracción significativa de partículas finas y parcialmente liberadas en la descarga del hidrociclón, las cuales son técnicamente aptas para ser recuperadas mediante la implementación de una celda de flotación flash"

Se pudo comprobar mediante el análisis granulométrico y la ley de finos y gruesos reportado en las Tablas 4, 5, 6, 7 y 8, que las fracciones de finos contienen mineral libre que puede ser tratado en una celda flash para lograr una mayor recuperación de oro.

Comprobación de hipótesis específica 3

"La implementación de la celda de flotación flash en la descarga del hidrociclón es técnica y operativamente viable dentro del circuito de producción actual, siempre que se cumplan los requerimientos de espacio, caudal, porcentaje de sólidos, suministro de aire y dosificación adecuada de reactivos"

La celda de flotación flash cumple con los parámetros operativos, de espacio y técnicos, de acuerdo con las especificaciones del fabricante y las condiciones del proceso del circuito de molienda – clasificación actual.

Comprobación de hipótesis específica 4

"La implementación de la celda de flotación flash reduce de manera significativa las pérdidas de oro en el relave, incrementando la ley de oro del concentrado y mejorando la recuperación global del proceso en comparación con el esquema operativo anterior"

Para comprobar está hipótesis, se hace necesario aplicar una prueba estadística de inferencia que compare si hubo una reducción de las pérdidas, en este caso, la prueba t student para muestras independientes. Esta prueba de cumplir con los siguientes criterios:

- Los datos o valores de la variable deben cumplir un comportamiento normal. Se aplicó prueba de normalidad de Shapiro – Wilk (p-valor > 0.05).
- Hipótesis nula (H0): las pérdidas de Au no se reducen significativamente
- Hipótesis alterna (H1): las pérdidas de Au se reducen significativamente
- Significancia (p-valor) = 0.05
- Si p-valor ≤ 0.05, se rechaza H0, se acepta H1.

Tabla 12. *Prueba de normalidad para las pérdidas de Au*

Variable	Agrupación	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Pérdidas Au (g/TM)	Sin Flash	0.948	5	0.720
	Con Flash	0.664	5	0.004

Fuente: Elaborado por el tesista.

La prueba de normalidad indica que la reducción de oro sigue una distribución normal al no presentar diferencias estadísticamente significativas entre los valores (p-valor >0.05) en el sistema sin flash. A continuación, se muestra los resultados de la prueba t student para muestras independientes.

Tabla 13. *Prueba t student para las pérdidas de Au*

		Prueba de Levene de igualdad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
Pérdidas Au (g/TM)	Se asumen varianzas iguales	0.981	0.355	3.677	7	0.008	135.57450	36.866	48.399	222.749
	No se asumen varianzas iguales			4.027	5.482	0.008	135.57450	33.665	51.276	219.872

Fuente: Elaborado por el tesista.

Los resultados de la prueba indican que las pérdidas de Au entre el sistema con y sin flash, muestra diferencias estadísticamente significativas con un p-valor (sig.) menor que 0.05, por tanto, sugieren que la reducción de las pérdidas de oro en el relave es significativa, aceptándose la hipótesis de la investigación.

Comprobación de hipótesis general

"Evaluar cómo la implementación de una celda de flotación flash en la salida de la descarga del hidrociclón incrementa la recuperación de oro en la planta procesadora "El Tambo" – Empresa Qori Ñahuin S.A., 2023"

Para comprobar esta hipótesis, se hace necesario aplicar una prueba estadística de inferencia que compare si hubo un incremento significativo en la recuperación de oro, en este caso, la prueba t student para muestras independientes. Esta prueba de cumplir con los siguientes criterios:

- Los datos o valores de la variable deben cumplir un comportamiento normal. Se aplicó prueba de normalidad de Shapiro – Wilk (p-valor > 0.05).
- Hipótesis nula (H0): La recuperación de oro no incrementa significativamente
- Hipótesis alterna (H1): La recuperación de oro incrementa significativamente.
- Significancia (p-valor) = 0.05
- Si p-valor ≤ 0.05, se rechaza H0, se acepta H1.

A continuación, en la Tabla 14 se muestran los resultados de la prueba de normalidad para la variable recuperación de oro con y sin flotación.

Tabla 14. *Prueba de normalidad para la recuperación de Au*

Variable	Agrupación	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
%Recuperación Au	Sin Flash	0.971	5	0.881
	Con Flash	0.856	5	0.214

Fuente: Elaborado por el tesista.

Los resultados de la prueba de normalidad muestran un p-valor >0.05, lo cual indica la ausencia de diferencia estadísticamente significativas, por lo tanto, los datos siguen un comportamiento normal. A continuación, se presentan los resultados de la prueba t student para muestras independientes en la variable de recuperación de oro.

Tabla 15. *Prueba t student para la recuperación de Au*

		Prueba de Levene de igualdad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias		Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
		F	Sig.	t	gl				Inferior	Superior
%Recuperación Au	Se asumen varianzas iguales	4.057	0.079	-5.062	8	0.001	-4.04000	0.7981	-5.880	-2.200
	No se asumen varianzas iguales			-5.062	5.242	0.003	-4.04000	0.7981	-6.063	-2.017

Fuente: Elaborado por el tesista.

Los resultados de la prueba muestran un p-valor (sig.) < 0.05, lo cual indica que entre los valores de recuperación de oro hay diferencias estadísticamente significativas entre los dos grupos (con y sin flash), por lo tanto, el porcentaje de recuperación de oro se incrementa significativamente con la incorporación de la celda de flotación flash, por consiguiente, se acepta la hipótesis de la investigación.

4.4. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en la presente investigación evidencian que el proceso convencional de concentración presenta un comportamiento estable, con leyes de cabeza homogéneas y recuperaciones de oro consistentes. Sin embargo, a pesar de esta estabilidad operativa, se identificó la presencia de contenido metálico en el relave, lo que indica la existencia de pérdidas metalúrgicas asociadas principalmente a limitaciones en la liberación del mineral y a la ineficiencia en la recuperación de partículas de oro en determinadas fracciones granulométricas.

Este comportamiento coincide con lo reportado por Barbouchi et al. (2026), quienes evidenciaron que la recuperación de oro está fuertemente condicionada por la mineralogía y el tamaño de partícula, especialmente en minerales donde el oro se encuentra como inclusiones finas dentro de sulfuros. En el presente estudio, el análisis granulométrico mostró que, si bien la mayor proporción del oro se encuentra en la fracción fina, existe una fracción gruesa con alta variabilidad en su contenido metálico, lo cual sugiere la presencia de oro libre o parcialmente liberado, susceptible de ser recuperado mediante tecnologías complementarias.

En este contexto, la implementación de la celda de flotación flash permitió mejorar significativamente la recuperación de oro, alcanzando un promedio de 93.47%, en comparación con el sistema convencional. Este resultado es consistente con lo reportado por Arellano et al., quienes demostraron que la incorporación de flotación

flash en circuitos de molienda permite recuperar partículas de oro menores a 100 µm, incrementando la recuperación global del proceso. De manera similar, en esta investigación se evidenció que la flotación flash permitió capturar oro de rápida flotabilidad que no era recuperado en el circuito convencional.

Asimismo, los resultados muestran una reducción significativa de las pérdidas de oro en el relave, tanto en términos de porcentaje de recuperación como de contenido metálico. Este comportamiento concuerda con lo señalado por Huacca (2021) y Huamán (2024), quienes reportaron incrementos en la recuperación de oro tras la implementación de celdas flash, atribuyendo esta mejora a la recuperación temprana del mineral valioso antes de que sea sobremolido o perdido en el circuito.

Por otro lado, el incremento en la ley del concentrado y el adecuado radio de concentración evidencian que la mejora en la recuperación no compromete la calidad del producto, sino que optimiza el equilibrio entre recuperación y enriquecimiento. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Gonzales y Arroyo (2022), quienes observaron que la implementación de celdas flash permite obtener concentrados de mayor ley y reducir la sobremolienda de minerales valiosos, mejorando el desempeño global del circuito.

Adicionalmente, la estabilidad del proceso observada en los bajos coeficientes de variación de la recuperación y ley del concentrado indica que la implementación de la flotación flash no introduce variabilidad operativa significativa, sino que mantiene condiciones controladas del proceso. Este resultado guarda relación con lo reportado por Huaman, quien evidenció que la incorporación de celdas flash contribuye a estabilizar los parámetros operativos y mejorar el control del proceso.

Desde el punto de vista estadístico, las pruebas inferenciales realizadas demostraron que las diferencias en la recuperación de oro y en la reducción de pérdidas

en el relave son significativas ($p < 0.05$), lo que confirma que la mejora observada no es producto del azar, sino del efecto directo de la implementación de la celda de flotación flash. Este resultado refuerza lo señalado por Suca y Palomino, quienes destacan la importancia de optimizar las variables del proceso para maximizar la recuperación del oro.

En conjunto, los resultados de la presente investigación confirman que las pérdidas de oro en el circuito convencional están asociadas principalmente a la recuperación ineficiente de partículas gruesas o parcialmente liberadas, y que la implementación de la flotación flash constituye una solución efectiva para capturar este oro remanente. De esta manera, se logra optimizar la recuperación global, reducir las pérdidas metalúrgicas y mejorar el aprovechamiento del recurso mineral, validando la hipótesis planteada.

CONCLUSIONES

Se concluye que la implementación de la celda de flotación flash en la descarga del hidrociclón permitió incrementar significativamente la recuperación de oro en la planta "El Tambo", elevando la recuperación promedio de aproximadamente 89.43% en el sistema convencional a 93.47% con el sistema modificado. Asimismo, la prueba estadística ($p < 0.05$) confirma que esta mejora es significativa, validando la hipótesis de la investigación y demostrando la efectividad de la tecnología para optimizar el proceso.

Respecto al primer objetivo específico, se determinó que el proceso actual presenta una recuperación de oro estable y consistente, con baja variabilidad (CV = 1.66%), lo que evidencia un adecuado control operativo. Sin embargo, la presencia de contenido metálico en el relave (≈8.58% a 12.87% en recuperación) indica pérdidas relevantes de oro, asociadas principalmente a limitaciones en la liberación y recuperación del mineral valioso.

Con relación al segundo objetivo específico, el análisis granulométrico evidenció que el 96.59% del material corresponde a la fracción fina, donde se concentra la mayor cantidad de oro (ley promedio de 10.06 g/TM), mientras que la fracción gruesa presenta baja proporción, pero alta variabilidad (CV ≈ 50%), lo que sugiere la presencia de oro libre o parcialmente liberado. Este comportamiento justifica la necesidad de implementar tecnologías como la flotación flash para recuperar oro en etapas tempranas del proceso.

En cuanto al tercer objetivo específico, se evidenció una reducción significativa de las pérdidas de oro en el relave con la implementación de la celda flash, disminuyendo tanto el contenido metálico como la ley de salida (≈0.95 – 1.10 g/TM de Au). Asimismo, se logró un incremento en la ley del concentrado (≈90 g/TM), lo que confirma una mejora simultánea en recuperación y calidad del producto, optimizando el aprovechamiento del recurso mineral.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda mantener y consolidar la operación de la celda de flotación flash en la descarga del hidrociclón, asegurando un control adecuado de variables críticas como porcentaje de sólidos, dosificación de reactivos y tiempo de residencia, con el fin de sostener los niveles de recuperación alcanzados y evitar desviaciones operativas.
- Se recomienda implementar un control más riguroso de la granulometría de alimentación (especialmente del tamaño de corte del hidrociclón), orientado a maximizar la liberación del oro sin generar sobremolienda. Esto permitirá mejorar la eficiencia de la flotación flash y reducir la pérdida de partículas valiosas en el relave.
- Se recomienda realizar estudios mineralógicos más detallados (como microscopía o análisis automatizado) para caracterizar la forma de ocurrencia del oro, especialmente en la fracción gruesa, lo que permitirá optimizar aún más las condiciones operativas de la celda flash y del circuito global.
- Se recomienda complementar el estudio con un análisis económico detallado que cuantifique el beneficio generado por la reducción de pérdidas de oro, considerando precios de mercado, costos operativos y retorno de inversión de la implementación de la celda flash.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acasiete Vicente, A. M. (2025). *Influencia del colector y del pH en la flotación de mineral de oro con bajo contenido de sulfuros*. https://hdl.handle.net/20.500.13028/6937

Arellano-Piña, R., Sanchez-Ramirez, E. A., Emmanuel Vázquez-Sánchez, E., Pérez-Garibay, R., y Rojas-Montes, J. C. (2023). Gold recovery improvements in grinding and flash flotation circuit. *Minerals Engineering*, *199*, 108130. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108130

Barbouchi, A., Dachri, K., Labbilta, T., Naji, K., Benzakour, I., y Abouelfida, A. (2026). Improving flotation recovery of gold in a refractory gold ore: An integrated approach between response surface methodology and automated quantitative mineralogy. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, *62*(1). https://doi.org/10.37190/ppmp/216390

Bulatovic, S. (2015). *Handbook of flotation reagents: Chemistry, theory and practice*. Elsevier. https://www.sciencedirect.com/book/monograph/9780444530837/handbook-of-flotation-reagents-chemistry-theory-and-practice

Carrasco, S. (2017). *Metodología de la investigación*. San Marcos.

Errol, K. (2003). Mineral Processing. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 29-57. https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00870-X

Fuerstenau, M. C., Jameson, G. J., y Yoon, R.-H. (2007). *Froth Flotation: A Century of Innovation*. SME.

Gonzales Canchari, J. W., y Arroyo Robles, J. A. (2022). *Estudio de los parámetros de la materia prima, operación, recuperación y optimización del circuito de flotación minera Raura S.A.C*. https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/5964

Han, J., Chen, P., Liu, T., y Li, Y. (2023). Research and application of fluidized flotation units: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *126*, 50-68. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.06.016

Hernández, A., Ramos, M., Placencia, B., Indacochea, B., Quimis, A., y Moreno, L. (2018). *Metodología de la investigación científica*. Editorial Área de Innovación y Desarrollo, S.L.

Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw Hill.

Hernández Sampieri, R., y Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas: cuantitativa, cualitativa y mixta*. Mc Graw Hill educación. http://repositorio.uasb.edu.bo/handle/54000/1292

Huacca Mamani, E. (2021). *Optimización del proceso de flotación de minerales auríferos en celda flash para mejorar la recuperación de oro en la empresa minera Cori Puno* [Tesis, Universidad Nacional del Altiplano]. https://repositorio.unap.edu.pe/items/11e7e24e-c7b7-42fa-8ccb-4eea228e0e80

Huamán Segura, I. A. (2023). Implementación de una celda de flotación flash para optimizar la recuperación de oro en el proceso de flotación en una compañía minera aurífera al norte del Perú. *Universidad Nacional de Ingeniería*. https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/27174

Huaman Torres, R. P. (2024). *Implementación de una celda unitaria en el circuito de molienda secundaria para mejorar la flotación de plomo grueso en la Compañía Minera Kolpa S.A.C*. https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/10579

Koizhanova, A. K., Berkinbayeva, A. N., Magomedov, D. R., Azlan, M. N., Atanova, O. V., Kamalov, E. M., y Erdenova, M. B. (2022). Study of the Technology for Gold Recovery from Gravity-Flotation Concentrate from Ore Beneficiation with the use of Oxidizing

Reagents. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, *103*(2), 663-672. https://doi.org/10.1007/s40033-022-00366-6

Newcombe, B., Wightman, E., y Bradshaw, D. (2013). The role of a flash flotation circuit in an industrial refractory gold concentrator. *Minerals Engineering*, *53*, 57-73. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.06.016

Özçelik, S., y Ekmekçi, Z. (2024). Surface Chemistry and Flotation of Gold-Bearing Pyrite. *Minerals*, *14*(9). https://doi.org/10.3390/min14090914

Ran, J., Qiu, X., Hu, Z., Liu, Q., Song, B., y Yao, Y. (2019). Effects of particle size on flotation performance in the separation of copper, gold and lead. *Powder Technology*, *344*, 654-664. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.045

Revista Minería. (2022). *Recuperación de oro en flotación y desafíos en partículas finas*. https://revistamineria.com.pe/mineria/540/43/?utm_source=chatgpt.com

Suca, J., y Palomino, G. (2022). Optimización del proceso de flotación para la recuperación de un preconcentrado de oro en minerales sulfurados. *Technological Innovations Journal*, *1*(1), 23-40. https://doi.org/10.35622/j.ti.2022.01.002

Vashisth, S., Bennington, C. P. J., Grace, J. R., y Kerekes, R. J. (2011). Column Flotation Deinking: State-of-the-art and opportunities. *Resources, Conservation and Recycling*, *55*(12), 1154-1177. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.013

Wills, B., y Finch, J. (2015). *Wills' Mineral Processing Technology. An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery* (8.ª ed.). https://www.sciencedirect.com/book/monograph/9780080970530/wills-mineral-processing-technology?via=ihub%3D

ANEXOS

Anexo 1. Recolección de datos

Tamiz		CABEZA				Tamiz		CONCENTRADO				Tamiz		RELAVE			
#	µm	Peso (g)	Peso (%)	%Ac (-)	D50	#	µm	Peso (g)	Peso (%)	%Ac (-)	D50	#	µm	Peso (g)	Peso (%)	%Ac (-)	D50
14	1400		0.0	100.0		14	1400	0.0	0.0	100.0		14	1400	0.0	0.0	100.0	
20	850		0.0	100.0		20	850	0.0	0.0	100.0		20	850	0.0	0.0	100.0	
30	600		0.0	100.0		30	600	0.0	0.0	100.0		30	600	0.0	0.0	100.0	
40	425	0.00	0.0	100.0		40	425	0.0	0.0	100.0		40	425	0.0	0.0	100.0	
50	300	1.40	0.1	99.9		50	300	0.7	0.1	99.9		50	300	1.3	0.1	99.9	
70	212	28.20	1.2	98.7		70	212	8.0	0.8	99.1		70	212	26.0	1.2	98.7	
100	150	132.80	5.7	93.0		100	150	35.3	3.6	95.5		100	150	122.9	5.8	92.9	
140	106	182.20	7.8	85.2	93.1	140	106	46.7	4.8	90.6		140	106	168.8	8.0	84.9	94.0
200	75	303.30	13.1	72.1		200	75	88.2	9.1	81.5	70.8	200	75	279.7	13.3	71.6	
270	53	423.00	18.2	53.9		270	53	84.2	8.7	72.8		270	53	394.9	18.7	52.8	
325	45	236.70	10.2	43.7		325	45	46.3	4.8	68.0		325	45	221.1	10.5	42.4	
400	38	58.40	2.5	41.2		400	38	38.3	4.0	64.1		400	38	51.2	2.4	39.9	
500	25	209.90	9.0	32.2		500	25	122.9	12.7	51.4		500	25	186.0	8.8	31.1	
635	20	11.50	0.5	31.7		635	20	15.8	1.6	49.7		635	20	9.1	0.4	30.7	
-635	<20	736.30	31.7			-635	<20	481.1	49.7			-635	<20	646.2	30.7		
Total		2323.7	100.0			Total		967.5	100.0	K80	70.8	Total		2107.1	100.0	K80	94.0

Malla	Peso Analisis	Peso para Analisis		Peso muestra mineral				Pesos Boton Analisis			Ley Grueso	Contenido metal (g/TM)	Ley Fino	Contenido metal (g/TM)	Ley Mallas
		Peso Grueso	Fino	Grueso	%Peso grues	Fino	%Peso fino	Grueso	Fino 1	Fino 2					
#200	500	7.65	30	7.65	1.53%	492	98.5%	1.549	0.316	0.319	3.10	23.70	10.42	5130.98	13.519
#200	500	12.47	30	12.47	2.49%	488	97.5%	2.566	0.299	0.305	5.13	64.00	9.82	4785.40	14.948
#200	500	16.25	30	16.25	3.25%	484	96.8%	3.030	0.281	0.296	6.06	98.48	9.30	4500.87	15.364
#200	500	23.33	30	23.33	4.67%	477	95.3%	2.466	0.302	0.297	4.93	115.06	9.52	4536.71	14.450
#200	500	23.00	30	23.00	4.60%	477	95.4%	3.216	0.330	0.322	6.43	147.94	10.37	4944.96	16.799
#200	500	18.10	30	18.10	3.62%	482	96.4%	1.946	0.288	0.290	3.89	70.45	9.28	4474.25	13.177
#200	500	10.58	30	10.58	2.12%	489	97.9%	2.389	0.296	0.310	4.78	50.55	9.89	4838.55	14.664
#200	500	8.40	30	8.40	1.68%	492	98.3%	2.261	0.306	0.301	4.52	37.98	9.95	4889.80	14.469
#200	500	15.50	30	15.50	3.10%	485	96.9%	1.844	0.351	0.342	3.69	57.16	11.19	5422.50	14.880
#200	500	35.12	30	35.12	7.02%	465	93.0%	1.193	0.349	0.355	2.39	83.80	10.91	5071.46	13.295

Anexo 2. Matriz de consistencia

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
General	**General**	**General**		
¿En qué medida la implementación de una celda de flotación flash en la salida de la descarga del hidrociclón incrementa la recuperación de oro en la planta procesadora "El Tambo" – Empresa Qori Ñahuin S.A., 2023?	Evaluar cómo la implementación de una celda de flotación flash en la salida de la descarga del hidrociclón incrementa la recuperación de oro en la planta procesadora "El Tambo" – Empresa Qori Ñahuin S.A., 2023	La implementación de una celda de flotación flash en la descarga del hidrociclón incrementa significativamente la recuperación de oro en la planta procesadora El Tambo de la Empresa Qori Ñahuin S.A., 2023.	**Variable independiente:** Inorporacion de Celda de flotacion flash - Condiciones operativas - Recuperacion en flotacion flash - Parámetros de flotación **Variable dependiente:** Recuperación de oro - %Recuperaciones - Leyes metalurgicas - Pérdida de Au	**Tipo de investigación:** Aplicada - cuantitativa - Explicativa - Causal **Diseño**: Cuasiexperimental **Población y muestra:** Mineral **Técnica e instrumento de recolección:** Ficha de observación **Técnicas de análisis:** Estadística descriptiva Estadistica inferencial Balances metalurgicos
Específicos	**Específicos**	**Específicas**		
• ¿Cuál es el nivel de recuperación de oro con el proceso actual y como se describe este?	• Analizar nivel de recuperación de oro con el proceso actual y describir este.	• El nivel de recuperación de oro del proceso actual de la planta El Tambo es limitado, debido a la ausencia de una etapa de flotación flash, lo que ocasiona pérdidas de oro fino y parcialmente liberado en el circuito de molienda y clasificación.		
• ¿Cuál es el balance granulométrico del mineral en el proceso de molienda y conminución a partir del cual se analiza el proceso de flotación a instalar?	• Determinar el balance granulométrico del mineral en el proceso de molienda y conminución a partir del cual se analiza el proceso de flotación a instalar.	• El balance granulométrico del mineral en el proceso de molienda y conminución presenta una fracción significativa de partículas finas y parcialmente liberadas en la descarga del hidrociclón, las cuales son técnicamente aptas para ser recuperadas mediante la implementación de una celda de flotación flash.		

• ¿En qué medida la implementación de la celda flotación flash reduce las pérdidas de oro en el relave y que ley de salida se logra en comparación con el proceso anterior?	• Evaluar la reducción de las pérdidas de oro en el relave y la nueva ley de salida que se logra con la implementación de la celda flotación.	• La implementación de la celda de flotación flash reduce de manera significativa las pérdidas de oro en el relave, incrementando la ley de oro del concentrado y mejorando la recuperación global del proceso en comparación con el esquema operativo anterior.		

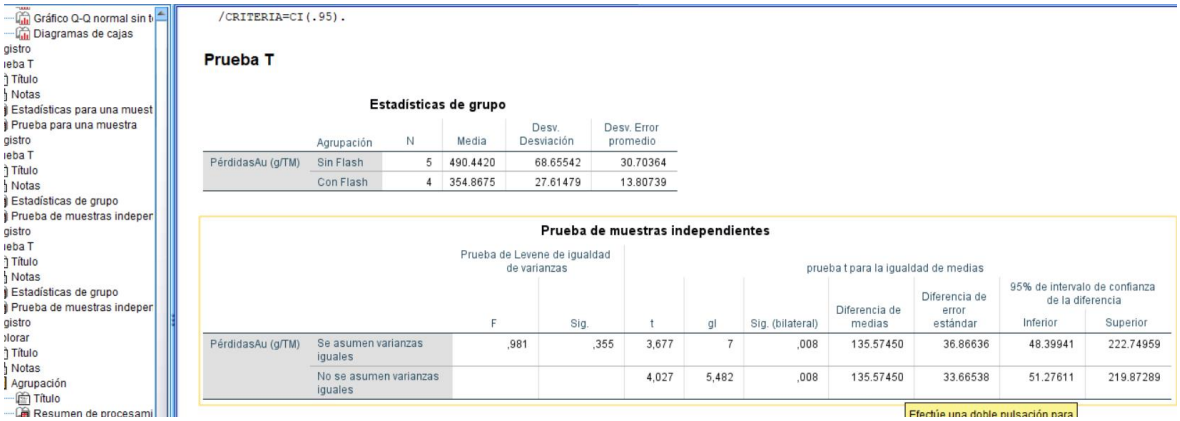
Anexo 3. Resultados del software estadístico

Pruebas de normalidad

	Agrupación	Kolmogorov-Smirnov[a] Estadístico	gl	Sig.	Shapiro-Wilk Estadístico	gl	Sig.
%Recuperación Au	Sin Flash	,217	5	,200*	,971	5	,881
	Con Flash	,254	5	,200*	,856	5	,214

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors



/CRITERIA=CI(.95).

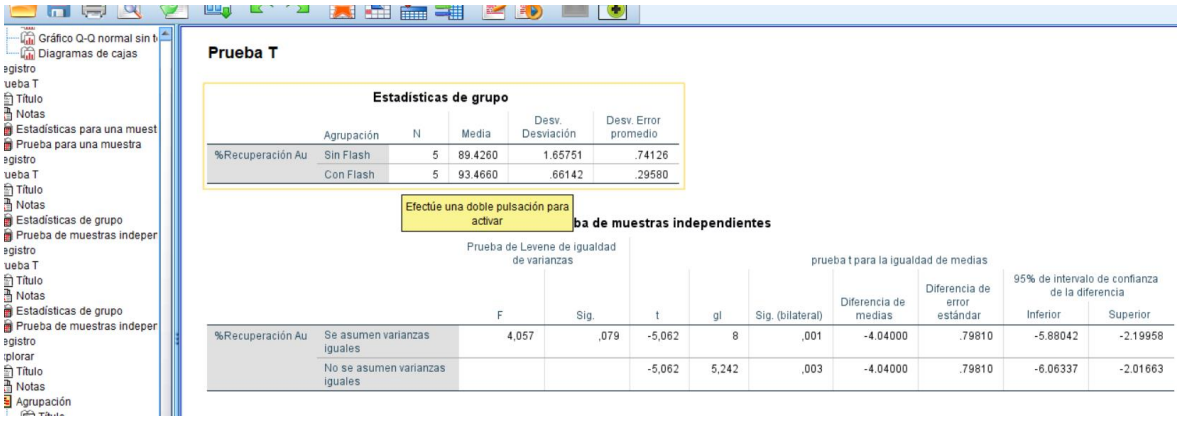
Prueba T

Estadísticas de grupo

	Agrupación	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
PérdidasAu (g/TM)	Sin Flash	5	490.4420	68.65542	30.70364
	Con Flash	4	354.8675	27.61479	13.80739

Prueba de muestras independientes

		Prueba de Levene de igualdad de varianzas F	Sig.	prueba t para la igualdad de medias t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia Inferior	Superior
PérdidasAu (g/TM)	Se asumen varianzas iguales	,981	,355	3,677	7	,008	135.57450	36.86636	48.39941	222.74959
	No se asumen varianzas iguales			4,027	5,482	,008	135.57450	33.66538	51.27611	219.87289



Prueba T

Estadísticas de grupo

	Agrupación	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
%Recuperación Au	Sin Flash	5	89.4260	1.65751	.74126
	Con Flash	5	93.4660	.66142	.29580

Efectúe una doble pulsación para activar

Prueba de muestras independientes

		Prueba de Levene de igualdad de varianzas F	Sig.	prueba t para la igualdad de medias t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia Inferior	Superior
%Recuperación Au	Se asumen varianzas iguales	4,057	,079	-5,062	8	,001	-4.04000	.79810	-5.88042	-2.19958
	No se asumen varianzas iguales			-5,062	5,242	,003	-4.04000	.79810	-6.06337	-2.01663