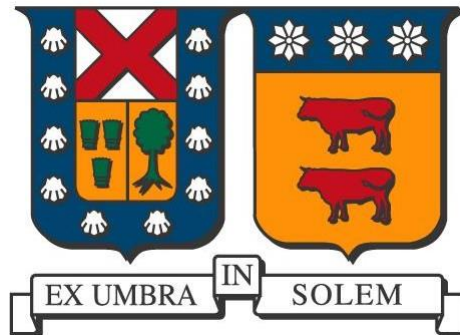


**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y DE MATERIALES
SANTIAGO - CHILE**



**EVALUACIÓN DE UNA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA
LA DETERMINACIÓN DE ORO Y COBRE EN LA PEQUEÑA
MINERÍA**

STEFAN LOJZE ERJAVEC SNEBERGER

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

Profesor Guía:

Víctor Encina Montenegro

Profesora Co-Guía:

Dra. Belén Barraza

Profesora Comisión:

Dra. Francisca San Martín

Enero de 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Evaluación de una metodología experimental para la determinación de oro y cobre en la pequeña minería.

Nombre del candidato(a): Stefan Lojze Erjavec Sneberger

Carrera / Grado: Ingeniería civil de minas

Campus: San Joaquín Departamento: Departamento de ingeniería metalúrgica y materiales

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Víctor Encina Montenegro, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

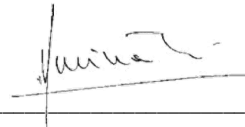
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 20/01/2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 20/01/2026 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi madre, quien ha sido un apoyo incondicional durante toda mi vida, brindándome no solo su amor, sino también su constante preocupación por mi bienestar, tanto físico como emocional. Asimismo, agradezco profundamente a mi hermano, quien me permitió completar mi carrera universitaria entregándome su respaldo en todo momento.

A los académicos de la universidad, en especial al profesor Víctor Encina, por brindarme la oportunidad de desarrollar este trabajo de titulación, así como por su constante disposición para guiarme y apoyarme durante todo el proceso, convirtiéndose en un referente no solo en el ámbito académico, sino también en el personal. Del mismo modo, quiero destacar al profesor Marcelo Molina, quien fue un pilar fundamental en el desarrollo de este trabajo, guiándome en diversos procesos de laboratorio que inicialmente no dominaba y que, gracias a su acompañamiento, logré ejecutar de manera satisfactoria, mostrando siempre una actitud de apoyo y compromiso durante mi permanencia en el laboratorio.

Por último, agradezco a todas aquellas personas que estuvieron presentes durante mi proceso universitario, desde amigos y compañeros con quienes compartí tanto éxitos como fracasos, hasta profesores que no solo me entregaron conocimientos académicos, sino que también contribuyeron a mi formación integral. A cada persona que, de una u otra forma, me brindó su ayuda, les expreso mi más sincero agradecimiento por acompañarme en esta importante etapa de mi vida.

Resumen

En la pequeña minería existe una serie de limitaciones que dificultan la adecuada caracterización y recuperación de metales preciosos, particularmente en la obtención de cobre y oro, los cuales constituyen los principales productos extraídos dentro de este sector. Frente a esta problemática, el presente trabajo abarca la evaluación experimental de un procedimiento para la determinación de cobre y oro de muestras de mineral proveniente de la pequeña minería, con el objetivo de que los productores puedan avanzar hacia la posibilidad de obtener análisis de contenido mineralógico dentro de la faena minera.

Para la ejecución de este procedimiento se realiza, en primera instancia, una preparación mecánica del mineral mediante un chancado manual y una posterior molienda en un molino de barras, con el objetivo de alcanzar una granulometría adecuada que facilite los procesos fisicoquímicos posteriores. Posteriormente, se aplican metodologías específicas para cada mineral. En el caso del cobre, se emplea una digestión ácida que permite liberar los iones de cobre en solución, para luego determinar su concentración mediante una titulación yodométrica apropiada. Para el oro se utiliza un método de cloración, en el cual, mediante la implementación de gas cloro, se logra solubilizar el metal, permitiendo su posterior precipitación y, finalmente, su separación mediante un proceso de calcinación que elimina los últimos elementos no deseados, obteniendo así el oro presente en la muestra.

Para validar los procedimientos empleados, se realiza una comparación entre los valores obtenidos y los resultados proporcionados por un laboratorio externo certificado, con el fin de evaluar la precisión y confiabilidad de la metodología aplicada. Finalmente, se efectúa un análisis económico orientado a determinar si estos procesos representan una mejora respecto a los valores actualmente manejados en la industria, comparando el costo por muestra con los precios asociados a los análisis realizados en laboratorios certificados.

De esta manera, el trabajo tiene como eje principal evaluar la practicidad de implementar estos métodos dentro de la pequeña minería, considerando sus implicancias técnicas y económicas.

Palabras clave: pequeña minería, cobre, oro, cloración, titulación yodométrica, análisis fisicoquímico, chancado, molino, costos económicos.

Abstract

Small-scale mining faces significant limitations that hinder the adequate characterization and recovery of economically relevant metals, particularly copper and gold, which represent the main products extracted in this sector. In response to this challenge, this study presents an experimental evaluation of low-complexity procedures for the determination of copper and gold in mineral samples from small-scale mining operations, with the objective of advancing toward in situ mineral content analysis and reducing dependence on external certified laboratories.

The methodology begins with mechanical sample preparation, consisting of manual crushing followed by grinding in a rod mill to achieve an appropriate particle size for subsequent physicochemical processes. Specific analytical procedures are then applied for each metal. Copper determination is carried out through acid digestion to solubilize copper ions, followed by iodometric titration for concentration quantification. Gold determination is performed using a chlorination method, where chlorine gas is employed to solubilize the metal, allowing its subsequent precipitation and recovery through calcination, which removes residual impurities.

To validate the proposed methodologies, the experimental results are compared with those obtained from a certified external laboratory, enabling an assessment of their accuracy and reliability. Additionally, an economic analysis is conducted to evaluate whether the proposed methods represent a cost-effective alternative by comparing the cost per sample with the prices associated with certified laboratory analyses.

Overall, this work focuses on assessing the technical feasibility and economic practicality of implementing these analytical methods in small-scale mining operations.

Keywords: Small-scale mining, copper, gold, chlorination, iodometric titration, physicochemical analysis, crushing, grinding mill, economic costs.

Nomenclatura

- Au: Oro, elemento químico con numero atómico 79.
- Cl⁻: Ion Cloruro.
- HCl: Ácido clorhídrico.
- MnO₂: Oxido de manganeso.
- H₂O₂: Agua Oxigenada.
- Na₂SO₃: Sulfito de sodio.
- K₂CrO₄: Cromato potásico.
- AgNO₃: Nitro de plata.
- Na₂S₂O₃: Tiosulfato de sodio.
- NH₃: Amoniaco.
- HNO₃: Ácido nítrico.
- KI: Yoduro de potasio.
- H₂SO₄: Ácido sulfúrico.
- NaOH: Hidróxido de sodio.
- Fe₃O₄: Magnetita, óxido de hierro presente como escoria.
- pH: Potencial de hidrogeno, el cual mide la acidez o basicidad de una disolución acuosa.
- mV: Milivoltios, unidad de medida para el potencial eléctrico de una reacción química.
- UF: Unidad de fomento, utilizada para ajustar el valor del dinero y los precios de acuerdo con la inflación.
- CLP: Peso chileno, moneda oficial de Chile.

Índice

1. Introducción.....	1
1.1. Objetivos	2
1.2 Alcance	2
2. Marco teórico.....	4
2.1. Pequeña minería	4
2.2. Caracterización mineralógica y química en minería.....	5
2.2.1 Caracterización mineralógica química.....	5
2.2.2 Conceptos básicos asociados	5
2.2.3 Influencia de la mineralogía en el procesamiento.....	6
2.2.4 Influencia de la ley de mineral	6
2.3. Cloración del oro	7
2.3.1 Proceso de cloración	7
2.3.2 Riesgos y protocolos de seguridad	10
2.4. Determinación del cobre según Low	11
2.4.1 Funcionamiento general	11
2.4.2 Procedimiento	12
2.4.3 Errores más comunes	14
2.5. Métodos actuales en la industria	16
3. Metodología	19
3.1. Preparación de muestra	19
3.2. Concentración de mineral	21
3.2.1 Preparación.....	21
3.2.2 Flotación	22
3.3. Determinación de oro por cloración.....	23
3.3.1 Preparación mineral	23
3.3.2 Obtención de gas cloro.....	23
3.3.3 Reacción de cloración.....	25
3.3.4 Filtrado	25
3.3.5 Titulación argentométrica	26
3.3.6 Precipitación de oro	28

3.3.7 Calcinación	29
3.4. Determinación de cobre según Low	30
3.4.1 Preparación de muestra	31
3.4.2 Digestión ácida	31
3.4.3 Titulación yodométrica	33
3.4.4 Cálculo de cobre	36
3.5. Seguridad y manejo de residuos	36
3.5.1 Riesgos asociados a los reactivos	36
3.5.2 EPP (elementos de protección personal) obligatorio	38
3.5.3 Manejo de residuos líquidos	39
3.5.4 Manipulación de crisoles calientes	40
4. Resultados y discusión	41
4.1. Resultados del proceso de cloración del oro	41
4.2. Resultados del método de Low para la determinación de cobre	43
4.3. Comparación con resultados de laboratorio certificado	45
4.3.1 Contenido de oro	45
4.3.2 Contenido de cobre	46
4.4. Cálculo y análisis del error experimental	48
4.4.1 Error experimental del oro	48
4.4.2 Error experimental del cobre	49
4.5. Análisis económico	51
4.5.1 Costos equipos Conminución	51
4.5.2 Costos Equipo laboratorio	52
4.5.3 Costos reactivos asociados	53
4.5.4 Costos por muestra	54
4.5.5 Costos análisis laboratorio certificado	55
4.5.6 Costos experto en análisis químico	56
4.5.7 Comparativa entre costos	56
4.5.8 Resumen de costos implementados	58
4.6. Evaluación técnica de los métodos estudiados	59
5. Conclusión	60

6. Bibliografía	61
7. Anexos	63
7.1. Planos recipientes	63
7.2. Planos sujetadores de manguera	64
7.3. Planos conector manguera	65
7.4. Equipos de conminución	66
7.4.1 Combo y cincel	66
7.4.2 Chancador manual	66
7.4.3 Molino de barra	67
7.5. Figuras sistema de flotación	68
7.6. Montajes Procesos obtención de oro	69
7.6.1 Montaje cloración	69
7.6.2 Montaje precipitación de oro	70
7.6.3 Montaje eliminación de cloro	70
7.6.4 Filtrado y calcinación	71
7.7. Diagramas determinación de cobre	72
7.8. Tabla de eliminación de cloro	73
7.9. Referencias costos equipos y reactivos	74
7.9.1 Costo equipos de cloración	74
7.9.2 Costos equipos determinación de cobre	76
7.9.3 Costos reactivos	77
7.10. Análisis de laboratorio	77

Lista de Figuras

Figura 1: Diagrama proceso de cloración.	9
Figura 2: Comparativa entre técnicas de análisis.	16
Figura 3: Diagrama comparativo.	18
Figura 4: Diagrama de proceso de conminución.....	20
Figura 5: Resultado inicial con indicador cromato potásico.	27
Figura 6: Resultado final titulación.....	27
Figura 7: Diagrama Pourbaix oro (Emery-Trindade & Barbosa-Filho, 2002).	28
Figura 8: Diagrama proceso de calcinación.....	29
Figura 9: Crisol + filtro con precipitado.	30
Figura 10: Matriz de muestreo.....	31
Figura 11: Inicio titulación con KI.	35
Figura 12: Adición de segundo indicador de almidón.....	35
Figura 13: Plano y medidas recipiente grande para pulpa.	63
Figura 14: Planos y medidas sujetador de manguera.....	64
Figura 15: Plano y medidas conector para manguera.....	65
Figura 16: Combo y cincel.....	66
Figura 17: Chancador manual y pesas.....	66
Figura 18: Barras para molino.	67
Figura 19: Tablero electro molino de barras.....	67
Figura 20: Celdas de flotación.	68
Figura 21: bandeja de recolección concentrado.	68
Figura 22: Sistema de flotación.	68
Figura 23: Sistema de flotación.	69
Figura 24: Limpiador de gases.	69
Figura 25: Montaje conector y sujetador de manguera.....	69
Figura 26: Montaje completo de cloración.	70
Figura 27: Montaje eliminación de cloro residual.	70
Figura 28: Resultado filtrado de la precipitación.	71
Figura 29: Horno de calcinación.	71
Figura 30: Resultados calcinación.....	71
Figura 31: Sistema para digestión acida.....	72
Figura 32: Sistema de precipitación de cobre con aluminio.	72

Lista de tablas

Tabla 1: Comparativa entre estilo de minería (Varas Aravena, 2023).....	1
Tabla 2: Resultados cloración de oro.....	42
Tabla 3: Resultados experimentales de cobre.	44
Tabla 4: Comparación resultados de oro experimental vs laboratorio certificado.	45
Tabla 5: Comparación resultados de concentrados de oro experimental vs laboratorio certificado.	46
Tabla 6: Comparación ley de cobre experimental vs laboratorio certificado.	47
Tabla 7: Comparación ley concentrado de cobre experimental vs laboratorio certificado.....	47
Tabla 8: Tabla resultados errores del oro.	48
Tabla 9: Resultados errores ley de cobre.	50
Tabla 10: Costos equipos de conminución.....	51
Tabla 11: Costo insumos y equipos para determinación de oro.	52
Tabla 12: Costo insumos y equipos para determinación de cobre.	53
Tabla 13: Costo de reactivos.	54
Tabla 14: Costo por muestra de oro.....	55
Tabla 15: Costo por muestra de cobre.....	55
Tabla 16: Costo análisis de oro laboratorio certificado.....	56
Tabla 17: Costo análisis de cobre laboratorio certificado.....	56
Tabla 18: Comparativa de costo análisis de oro.	57
Tabla 19: Comparativa de costo análisis de cobre.....	57
Tabla 20: Costos de implementación.....	58
Tabla 21: Costo análisis por muestra.....	58
Tabla 22: Medidas chancador manual.	66
Tabla 23: Medidas molino de barras.....	67
Tabla 24: Tabal consumo de NaSo3.....	73
Tabla 25: Costos y referencias de equipos cloración de oro.....	74
Tabla 26: Costos y referencias equipos de determinación de cobre.....	76
Tabla 27: Costos y referencias reactivos.....	77

1. Introducción

En Chile, la minería se clasifica en tres grandes categorías: gran minería, mediana minería y pequeña minería. Esta clasificación, establecida por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), se basa principalmente en el número de trabajadores y las horas de trabajo anuales, especialmente para los casos de pequeña y mediana minería. En contraste, la gran minería se define principalmente por sus niveles de producción (Comisión Chilena del Cobre [COCHILCO], 2024).

Específicamente, se considera pequeña minería a toda faena que cuente con menos de 80 trabajadores o registre menos de 200.000 horas trabajadas al año. La mediana minería, por su parte, corresponde a operaciones que emplean entre 80 y 400 trabajadores, o que presentan entre 200.000 y 1.000.000 de horas trabajadas anualmente. Finalmente, la gran minería se identifica por su nivel de producción de cobre fino, que se sitúa aproximadamente entre 40.000 y 50.000 toneladas anuales (Sociedad Nacional de Minería [SONAMI], 2014).

A pesar de su baja contribución relativa al volumen nacional de producción metálica, la pequeña minería cumple un rol social y territorial fundamental, especialmente en zonas rurales y aisladas, donde constituye una de las principales fuentes de empleo formal e informal (Comisión Chilena del Cobre [COCHILCO], 2024). Diversos informes estatales señalan que este segmento emplea a miles de trabajadores y sostiene actividades productivas locales que dependen directamente de su continuidad.

En 2023 se reportó que la pequeña minería empleó alrededor de 20.000 trabajadores. Además, en 41 comunas del país, el empleo directo o indirecto asociado a este sector alcanzó al menos un 3% del total, lo que demuestra que la pequeña minería presenta una mayor intensidad de empleo directo en comparación con la gran minería (Donoso R., F. 2024).

Históricamente, este tipo de minería se ha desarrollado bajo modelos de trabajo tradicionales, como la explotación “al pirquén”, donde la operación depende en gran medida de la experiencia directa del pirquinero. Si bien este sistema forma parte del patrimonio minero del país, también ha perpetuado limitaciones estructurales, entre ellas la baja disponibilidad de exploración geológica formal y la frecuente ausencia de caracterización mineralógica sistemática (Varas Aravena, 2023) (ver tabla 1).

Tabla 1: Comparativa entre estilo de minería (Varas Aravena, 2023).

Variables	Pequeña Minería	Mediana Minería	Gran Minería
Etapas básicas en la Explotación Mina (operaciones unitarias)	Perforación- Tronadura- Carguío minera/estéril y Transporte	Perforación- Tronadura- Carguío minera/estéril y Transporte	Perforación- Tronadura- Carguío minera/estéril y Transporte
Precio Cu Referente	LME (Bolsa de Metales de Londres)	LME (Bolsa de Metales de Londres)	LME (Bolsa de Metales de Londres)
Reservas conocidas	No	Si, proyectos evaluados	Si, proyectos evaluados
Tecnologías de punta	No	Si, mejoramiento continuos de procesos	Si, mejoramiento continuos de procesos
Ampliaciones de capacidad	No	Si, mejoramiento de productividad	Si, mejoramiento de productividad
Gestión Profesionalizada	No	Si, de primer nivel	Si, de primer nivel
Propiedad Minera	70% arrenda	Propia	Propia

SONAMI

La falta de caracterización adecuada del mineral tiene efectos directos en múltiples aspectos de la operación minera. Sin conocer la ley de oro o cobre, ni la mineralogía predominante, los pequeños productores enfrentan dificultades para valorar económicamente el mineral, seleccionar rutas de procesamiento, estimar recuperaciones metalúrgicas, definir consumos de reactivos o energía y negociar de manera justa con plantas de procesamiento. En consecuencia, gran parte de las decisiones se basa en criterios empíricos más que en información cuantitativa, lo que incrementa la incertidumbre operacional (Varas Aravena, 2023).

En contraste, la mediana y gran minería han incorporado durante décadas métodos analíticos estandarizados —como absorción atómica, ICP-OES o fluorescencia de rayos X— cuya disponibilidad ha impulsado mejoras significativas en la precisión analítica, el control de calidad y la eficiencia operacional. Esta evolución tecnológica ha contribuido además a mejorar la trazabilidad y sostenibilidad de las operaciones mineras (Comisión Chilena del Cobre [COCHILCO], 2024).

1.1. Objetivos

Objetivo general

Evaluar una metodología experimental de bajo costo para la determinación del contenido de oro y cobre en muestras de mineral provenientes de la pequeña minería, con el fin de analizar su precisión, reproducibilidad y viabilidad técnica y económica en condiciones de terreno.

Objetivos específicos

- i. Determinar la adecuación de un procedimiento de preparación y homogenización de muestras para obtener submuestras representativas destinadas al análisis de oro y cobre en minerales de pequeña minería.
- ii. Evaluar la capacidad del método de cloración para identificar y cuantificar el contenido de oro, considerando su reproducibilidad, sus restricciones operativas y los factores que influyen en su precisión.
- iii. Evaluar la efectividad del método de Low para la determinación de cobre, analizando la estabilidad del procedimiento, la exactitud obtenida y las condiciones experimentales que afectan su confiabilidad.
- iv. Establecer el grado de concordancia entre los resultados de la metodología experimental y los reportes de un laboratorio certificado, con el fin de analizar su viabilidad técnica y económica como alternativa para la pequeña minería.

1.2 Alcance

El presente trabajo se centra en la evaluación de una metodología experimental de bajo costo para la determinación del contenido de oro y cobre en muestras de mineral provenientes de la pequeña minería. El estudio se delimita a analizar la viabilidad técnica y económica de los métodos seleccionados —cloración para oro y método de Low para cobre— considerando las condiciones típicas de operación de este segmento productivo.

El alcance incluye la estandarización de un procedimiento de preparación y homogenización de muestras, la evaluación del desempeño analítico de ambos métodos en términos de precisión, reproducibilidad y coherencia con valores reportados por un laboratorio certificado, y la estimación comparativa de costos asociados a su implementación.

El trabajo no aborda el diseño de procesos metalúrgicos a escala industrial, la optimización avanzada de reactivos ni la modelación química de los sistemas involucrados, sino que se enfoca exclusivamente en determinar si estas metodologías pueden constituir una alternativa válida y accesible para apoyar la toma de decisiones operativas en faenas de pequeña minería.

2. Marco teórico

2.1. Pequeña minería

La pequeña minería constituye una actividad productiva de gran relevancia en las regiones norte y centro del país, especialmente en zonas alejadas de los grandes centros urbanos. En muchas de estas localidades, la pequeña minería representa la principal —y en ocasiones la única— fuente de empleo y sustento económico para la comunidad (Varas Aravena, 2023).

De acuerdo con la definición establecida por SERNAGEOMIN, la pequeña minería corresponde a operaciones que emplean entre 12 y 80 trabajadores o que registran entre 30.000 y 200.000 horas-hombre anuales. Esta clasificación se fundamenta principalmente en la magnitud del empleo más que en el volumen de producción. Para el año 2023, se registró un total de 21.476 trabajadores vinculados a la pequeña minería, lo que equivale aproximadamente a un 8% del empleo total del sector minero. Estas cifras se concentran predominantemente en las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo, que en conjunto agrupan 11.181 trabajadores, equivalente al 52% del empleo total en este segmento (Comisión Chilena del Cobre [COCHILCO], 2024).

En términos productivos, los principales minerales extraídos por la pequeña minería son cobre, oro y, en menor medida, plata. En 2023, este sector aportó 50.246 toneladas de cobre fino, representando alrededor del 0,9% de la producción nacional anual. En el caso del oro, la producción alcanzó los 1.394 kg, mientras que la plata registró 25.728 kg (Comisión Chilena del Cobre [COCHILCO], 2024). Se contabilizaron aproximadamente 625 faenas de pequeña minería dedicadas a la extracción de cobre y cerca de 140 orientadas a la explotación de oro; la plata, en general, se obtiene como subproducto dentro de estas mismas operaciones (Varas Aravena, 2023).

Históricamente, las labores de la pequeña minería se han caracterizado por corresponder a emprendimientos de escala reducida, usualmente sin acceso a maquinaria altamente especializada. Este tipo de operación depende en gran medida de la experiencia empírica de los trabajadores, conocimiento que, de manera tradicional, se transmite de generación en generación.

No obstante, el sector enfrenta importantes desafíos. Entre los principales problemas destacan el agotamiento de los recursos superficiales, que conduce a leyes más bajas y disminuye la rentabilidad económica; la limitada caracterización mineralógica, que impide conocer con precisión la calidad del mineral extraído y por extraer; y la escasa exploración destinada a identificar nuevos yacimientos con mejores condiciones de explotación (Varas Aravena, 2023).

La falta de caracterización adecuada representa uno de los factores más críticos. Sin información confiable sobre la ley del mineral, las decisiones operacionales —como la continuidad de la extracción, la selección de zonas de explotación y la venta del mineral— quedan sujetas a incertidumbre. Esta situación puede provocar que los productores tomen decisiones desfavorables o incluso operen con pérdidas. Adicionalmente, cuando el mineral se comercializa a terceros, la ausencia de análisis propios puede generar discrepancias o desconfianzas respecto de las leyes reportadas por el comprador, generando conflictos que afectan negativamente la relación comercial y la sostenibilidad económica de la faena.

2.2. Caracterización mineralógica y química en minería

Uno de los requisitos fundamentales para la operación de un proyecto minero es la caracterización mineralógica y química de los minerales, debido a que esta información permite determinar el comportamiento del mineral en las distintas etapas del procesamiento. Tal como señalan Wills y Napier-Munn (2016), una comprensión detallada de la composición mineralógica influye directamente en la eficiencia de los procesos de conminución, concentración y refinación, ya que define parámetros críticos como la dureza, la liberación mineral y la respuesta a los agentes de separación. Asimismo, Habashi (1993) destaca que la ausencia de una caracterización adecuada puede conducir a pérdidas metalúrgicas significativas, errores en la toma de decisiones operacionales, incrementos en los costos de procesamiento y una disminución general en la rentabilidad del proyecto.

2.2.1 Caracterización mineralógica química

- **Caracterización mineralógica**
La caracterización mineralógica tiene como objetivo la identificación y cuantificación de los minerales presentes en la muestra. Según Gupta y Yan (2016), esta información es fundamental para predecir el desempeño del mineral en operaciones como flotación, lixiviación o cualquier otro proceso de concentración.
- **Caracterización química**
La caracterización química, por su parte, se orienta a determinar la composición elemental del mineral para establecer la concentración de los metales de interés y evaluar su potencial económico. Wills y Napier-Munn (2016) señalan que el análisis químico permite definir la ley del mineral, identificar elementos penalizadores y estimar el valor económico del yacimiento, constituyendo un insumo clave para la toma de decisiones operacionales y estratégicas.

2.2.2 Conceptos básicos asociados

Existe una serie de conceptos fundamentales estrechamente vinculados a la minería, ampliamente descritos en la literatura especializada (Habashi, 1993; Wills & Napier-Munn, 2016; Gupta & Yan, 2016). Estos conceptos permiten comprender el comportamiento del mineral, su valor económico y su respuesta durante las distintas operaciones de procesamiento.

- **Mineral**
Es un sólido natural, inorgánico, con estructura cristalina definida y composición química característica. En minería, no todos los minerales se consideran económicamente explotables; únicamente aquellos que contienen elementos o metales de interés representan un potencial de beneficio para su extracción.
- **Mena**
La mena corresponde al conjunto de minerales que contienen elementos valiosos susceptibles de ser extraídos económicamente. Una misma mena puede incluir más de un mineral de interés, cada uno con comportamientos fisicoquímicos particulares que influyen en la selección de las rutas de procesamiento. La extracción de los minerales valiosos presentes en la mena constituye el objetivo central del proceso minero.
- **Ganga**
La ganga comprende todos aquellos minerales sin valor económico que se encuentran asociados a los minerales valiosos dentro de la mena. Aunque no son objeto de

recuperación, su presencia influye de manera significativa en las etapas de procesamiento, ya que modifica las propiedades del material y puede generar dificultades operacionales para la obtención eficiente del mineral de interés.

- **Ley**
La ley representa la concentración del mineral valioso dentro de la mena y constituye uno de los parámetros principales para evaluar la viabilidad económica de su explotación. Se expresa comúnmente como porcentaje en masa (%), partes por millón (ppm) o gramos por tonelada (g/ton).
- **Recuperación**
La recuperación corresponde a la relación entre la cantidad de mineral valioso finalmente recuperado y la cantidad originalmente presente en la alimentación del proceso. Su magnitud depende de las características mineralógicas y químicas del material, ya que estas condicionan la selección de los parámetros operacionales y la eficiencia de cada etapa de procesamiento.

2.2.3 Influencia de la mineralogía en el procesamiento

Existen diversas características operacionales que son influenciadas directamente por la mineralogía del material, las cuales determinan el comportamiento del mineral durante las distintas etapas del procesamiento. A continuación, se describen algunas de las más relevantes.

- **Dureza y conminución**
Conocer la dureza del mineral es fundamental para el diseño y operación de los procesos de conminución, ya que esta propiedad condiciona la selección de los equipos y el consumo energético asociado. Wills y Napier-Munn (2016) destacan que minerales con alto contenido de cuarzo u otros silicatos generan mayores costos de operación debido al incremento en el desgaste de los equipos y la energía necesaria para lograr la reducción de tamaño requerida.
- **Selección de colectores y reactivos**
La mineralogía es determinante para definir el sistema de reactivos adecuado en procesos como la flotación, ya que permite anticipar el comportamiento superficial de los minerales. Habashi (1993) señala que los sulfuros primarios presentan una alta afinidad por colectores como los xantatos, mientras que minerales oxidados requieren etapas adicionales, como la sulfidización, o el uso de reactivos específicos tales como los hidroxámicos para lograr una recuperación eficiente.
- **Procesamiento de óxidos vs. Sulfuros**
La identificación de si un mineral corresponde a una fase oxidada o sulfurada es crítica, dado que este parámetro define la ruta de procesamiento más eficiente. Gupta y Yan (2016) indican que los minerales oxidados son generalmente aptos para procesos de lixiviación en medio ácido, mientras que los sulfuros como la calcopirita requieren ser concentrados previamente por flotación para obtener un producto comercializable. Esta distinción asegura una selección adecuada de las operaciones unitarias y un desempeño metalúrgico óptimo.

2.2.4 Influencia de la ley de mineral

La ley del mineral es uno de los parámetros más determinantes en la planificación minera, ya que constituye el primer indicador de la viabilidad económica de un yacimiento. Este valor permite

estimar el potencial de generación de ingresos y, por ende, es uno de los criterios más relevantes para decidir si un depósito es económicamente explotable.

2.3. Cloración del oro

La cloración es uno de los métodos clásicos de extracción y análisis de oro, ampliamente descrito en la literatura metalúrgica como una alternativa eficaz para solubilizar el metal mediante la acción del gas cloro en medios húmedos (Habashi, 1999; Marsden & House, 2006). Su relevancia radica en que transforma el oro metálico en un compuesto clorado soluble, permitiendo su posterior recuperación mediante precipitación controlada. Aunque este proceso ha sido históricamente desplazado en la industria por tecnologías más modernas —como los métodos cianurados y los procesos a base de tiosulfato— continúa siendo una técnica de interés para escalas pequeñas o condiciones de laboratorio debido a su bajo costo y a la relativa simplicidad de los reactivos requeridos (Monhemius, 1996; Habashi, 1999). En el contexto de la pequeña minería, la cloración adquiere especial valor como alternativa analítica accesible para la estimación de leyes de oro, siempre que se implementen adecuadamente las condiciones de reacción, el control de pH y el manejo seguro del cloro (Marsden & House, 2006; Fleming, 1992).

La correcta implementación del método requiere considerar aspectos como la granulometría del mineral, la estabilidad del gas cloro, la cinética de solubilización del oro y las potenciales interferencias derivadas de otros compuestos presentes en la muestra (Marsden & House, 2006; Habashi, 1999). Asimismo, las etapas posteriores de filtración, eliminación del exceso de cloro y precipitación deben ejecutarse bajo parámetros controlados que garanticen una recuperación reproducible del metal (Monhemius, 1996; Fleming, 1992).

2.3.1 Proceso de cloración

- Características generales

La cloración es un proceso químico cuyo objetivo es transformar el oro presente en una muestra de mineral en cloruro de oro (AuCl_3), compuesto que se caracteriza por ser soluble en agua. Este procedimiento se realiza mediante la acción del gas cloro sobre el mineral, permitiendo separar el oro de las impurezas y de otros metales presentes en la matriz (Marsden & House, 2006; Habashi, 1999).

Para que el proceso se lleve a cabo de manera eficiente, es necesario cumplir ciertas condiciones específicas de preparación de la muestra. El mineral, previamente sometido a conminución, se humedece hasta obtener una pulpa compuesta por aproximadamente un 60 % en peso de mineral y un 40 % de agua destilada. Esta proporción favorece la adecuada interacción entre las partículas sólidas y el gas cloro, aumentando la eficiencia de reacción y facilitando la disolución del oro (Taggart, 1945).

Una vez preparada la pulpa, esta se traspasa a vasijas de barro con fondo en forma de embudo, el cual se rellena con arena u otro material filtrante que permite retener las partículas sólidas no reaccionadas. Este diseño facilita la separación entre la fase líquida y los residuos sólidos, permitiendo recolectar la solución rica en cloruro de oro en un recipiente ubicado bajo la vasija (Marsden & House, 2006).

El gas cloro necesario para la reacción se obtiene a partir de una mezcla de dióxido de manganeso (MnO_2) y ácido clorhídrico (HCl), la cual se calienta para favorecer la liberación del cloro. Esta mezcla se coloca en recipientes de barro que se mantienen en un baño de arena caliente, asegurando un calentamiento uniforme y reduciendo el

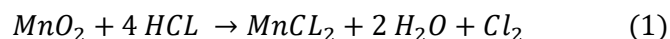
riesgo de choques térmicos. Los gases generados se conducen a través de tubos de plomo hacia una vasija lavadora, cuyo objetivo es eliminar impurezas y permitir que solo cloro gaseoso puro ingrese al sistema (Monhemius, 1996).

Finalmente, el gas cloro se introduce desde el fondo de la vasija que contiene la pulpa, permitiendo que burbujee a través de ella y se asegure una dispersión eficiente del reactivo. Este diseño maximiza el contacto entre el cloro y el mineral, promoviendo la formación de complejos de cloruro de oro y la separación de las demás especies metálicas (Marsden & House, 2006).

- Reacción empleada para producir gas cloro (Cl_2)

La producción del gas cloro se logra mediante la interacción entre dióxido de manganeso (MnO_2) y ácido clorhídrico (HCl), según la siguiente reacción:

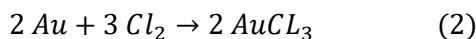
Reacción química;



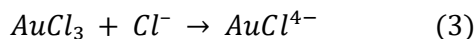
Los gases producidos se conducen a un lavador de gases con el fin de eliminar impurezas que pudieran interferir en el proceso posterior, asegurando así que el gas que llegue a la pulpa sea lo más puro posible (ver figura 1).

- Formación de cloruro áurico

El gas cloro generado se hace burbujear a través de la pulpa que contiene oro, provocando la formación de cloruro de oro III ($AuCl_3$), según la siguiente reacción:



Posterior a la formación del cloruro de oro (III), este compuesto no permanece en forma neutra. En presencia de iones cloruro libres (Cl^-), continúa reaccionando para formar el anión tetrachloraurato (III) ($AuCl_4^-$), de acuerdo con la siguiente reacción (Marsden & House, 2006):



La característica principal de este compuesto es su solubilidad el cual permite que atraviese el lecho de arena, reteniendo las impurezas presentes en la mena dentro de la vasija y obteniendo así una solución relativamente libre de contaminantes. Para lograr una reacción completa, se mantiene el burbujeo del gas durante 5 a 6 horas, asegurando que todo el oro presente reaccione con el cloro.

- Filtrado

La solución obtenida tras la reacción se deja reposar durante 24 horas para favorecer la completa solubilización del oro. Posteriormente, se procede al filtrado de la pulpa, separando la solución del material sólido con el fin de eliminar las impurezas restantes.

A continuación, se realiza un lavado de la pulpa con agua templada para garantizar que no queden restos de cloruro de oro. Este procedimiento se repite aproximadamente cuatro veces, reutilizando parte del agua del filtrado anterior en los lavados siguientes, con el objetivo de maximizar la recuperación de oro.

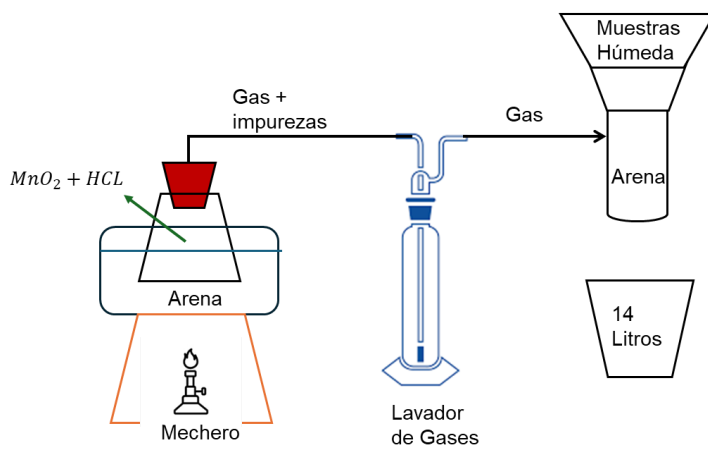
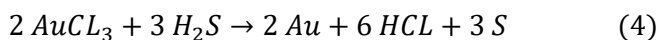


Figura 1: Diagrama proceso de cloración.

- Precipitación del oro

Como etapa final del proceso de cloración, se procede a precipitar el oro disuelto en la solución, con el fin de obtenerlo en su forma elemental. Para ello, la solución se expone a gas sulfuro de hidrógeno (H_2S), el cual actúa como agente reductor, permitiendo la precipitación del oro metálico.

Reacción química;



Es importante destacar que durante este proceso pueden formarse diversas interferencias en la etapa de precipitación. En particular, existe el riesgo de coprecipitación de otros metales, como hierro, cobre o plata, los cuales pueden incorporarse al sólido final y aumentar artificialmente la masa precipitada, generando errores significativos en la cuantificación del oro.

Para asegurar una precipitación adecuada, es fundamental mantener valores de pH controlados que favorezcan la reducción y posterior recuperación del metal. Un pH inapropiado puede inhibir la precipitación del oro desde la solución, lo que provoca pérdidas y afecta la estimación de la eficiencia del proceso (Marsden & House, 2006).

Durante la precipitación, el oro reducido se obtiene en estado metálico, generalmente en forma de un polvo fino de color negro, característico de partículas coloidales. Este sólido se recupera mediante filtración utilizando papel libre de cenizas, lo que permite retener completamente el precipitado y evita su contaminación en las etapas posteriores de secado y calcinación.

- **Calcinación**
Posteriormente, el polvo obtenido se somete a un proceso de secado y calcinación, con el propósito de eliminar impurezas residuales y material orgánico presente en la muestra, obteniéndose como resultado oro sólido como único compuesto remanente.

En esta etapa, el papel filtro se consume completamente debido a la combustión, lo que permite la recuperación final de oro metálico de alta pureza, apto para su posterior cuantificación gravimétrica.

2.3.2 Riesgos y protocolos de seguridad

En el proceso de cloración existe una serie de riesgos para el personal que realiza los distintos procesos, por lo cual es imprescindible contar los adecuados protocolos de seguridad que garanticen la seguridad de todas las personas que interactúan con los distintos procesos.

- **Riesgos gases tóxicos**

Uno de los riesgos más críticos en estos procesos es la generación de gases tóxicos, particularmente gas cloro (Cl_2), el cual es altamente nocivo para la salud humana. La exposición a cloro gaseoso puede provocar irritación severa en ojos, nariz y garganta, dificultades respiratorias y edema pulmonar; y, en concentraciones elevadas o exposiciones prolongadas, puede llegar a causar la muerte debido a su potente efecto corrosivo sobre los tejidos respiratorios.

Por estas razones, resulta indispensable implementar medidas de resguardo estrictas y utilizar el equipo de protección personal (EPP) adecuado. Entre los elementos mínimos requeridos se incluyen mascarillas con filtro para gases, bata de laboratorio, zapatos de seguridad, lentes de protección y guantes resistentes al tipo de reactivo manipulado.

Asimismo, para la ejecución segura de estos experimentos es fundamental trabajar en un espacio con ventilación adecuada, idealmente en una campana extractora o, en su defecto, en un área abierta con circulación constante de aire. Esto evita la acumulación de cloro u otros vapores tóxicos en espacios reducidos, reduciendo significativamente el riesgo de intoxicación.

- **Riesgos asociados a la calcinación**

El proceso de calcinación implica riesgos relevantes debido a las altas temperaturas alcanzadas y a la manipulación del crisol caliente. En términos generales, los principales peligros corresponden a quemaduras térmicas derivadas tanto del contacto directo con superficies calientes como de una manipulación inadecuada de los equipos.

Para prevenir estos accidentes, es indispensable contar con los elementos de protección personal adecuados y cumplir estrictamente los protocolos de trabajo seguro. Entre los implementos requeridos se consideran zapatos de seguridad, bata de laboratorio, lentes de protección o pantalla facial, guantes resistentes al calor y un delantal térmico. Estos elementos permiten reducir significativamente el riesgo de quemaduras durante la operación del horno y la manipulación de materiales expuestos a temperaturas elevadas (OSHA, s. f.).

Adicionalmente, se debe prestar especial atención al manejo del crisol caliente. Para ello, se utilizan pinzas metálicas diseñadas para soportar altas temperaturas, lo que permite manipular el crisol de forma segura, mantener las manos alejadas de la fuente de calor y minimizar el riesgo de accidentes.

2.4. Determinación del cobre según Low

La determinación de la ley de cobre en minerales constituye una de las operaciones fundamentales en el control metalúrgico y económico de las faenas mineras. Conocer el porcentaje real de cobre contenido en el mineral permite estimar el valor del yacimiento, calcular las recuperaciones metalúrgicas y optimizar los procesos de beneficio.

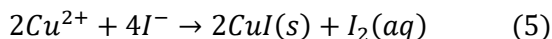
En la pequeña minería, donde los recursos técnicos y económicos son limitados, resulta indispensable contar con métodos analíticos simples, de bajo costo y razonablemente exactos. Dentro de esta categoría se encuentra el método de Low, descrito por F. P. Treadwell (1943) en su Tratado de Química Analítica, como una técnica volumétrica para la determinación cuantitativa de cobre mediante yodometría.

Este método clásico sigue siendo aplicable a escala de laboratorio minero, especialmente en plantas de pequeña y mediana minería que carecen de equipos instrumentales avanzados como la espectroscopía de absorción atómica (AAS) o la espectrometría de plasma (ICP-OES).

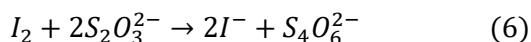
2.4.1 Funcionamiento general

El método de Low se basa en la reducción del ion cúprico (Cu^{2+}) a cuproso (Cu^+) y la posterior liberación de yodo (I_2) por acción de una disolución de yoduro de potasio (KI) en medio ácido. El yodo liberado es titulable con tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), lo que permite determinar cuantitativamente el contenido de cobre en la muestra.

La reacción global puede representarse como:



El yodo liberado se titula con tiosulfato de sodio estándar:



De esta manera, el volumen de tiosulfato consumido es directamente proporcional a la cantidad de cobre presente en la muestra analizada.

Este método es de tipo volumétrico-redox, y pertenece a la familia de las titulaciones yodométricas indirectas, ampliamente descritas en la literatura clásica (Treadwell, 1943).

I. Reactivos implementados

Este método se basa en la disolución completa del mineral mediante una digestión ácida utilizando diversos ácidos, los cuales permiten que la muestra se disuelva completamente, liberando los iones de cobre contenidos en el mineral.

Para esto, los reactivos ocupados son los siguientes:

- Ácido sulfúrico (H_2SO_4)
- Ácido clorhídrico (HCl)

- Ácido nítrico (HNO_3)
- Ácido acético (CH_3COOH)
- Yoduro de potasio (KI)
- Tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)
- Almidón (indicador)

2.4.2 Procedimiento

El procedimiento general consta de tres etapas principales, en las cuales la muestra es sometida a diferentes condiciones con el fin de obtener las condiciones necesarias para determinar el cobre presente en la muestra.

- Disolución de la muestra

Se toma una cantidad representativa del mineral, usualmente entre 0,5 y 1 g, la cual se somete a tratamiento con una mezcla de ácidos minerales fuertes. La disolución se calienta suavemente con el fin de acelerar la descomposición química de la matriz y favorecer la liberación del cobre presente en la muestra.

Este procedimiento corresponde a la digestión ácida, etapa fundamental en técnicas analíticas húmedas. En ella, el uso de ácidos fuertes como ácido clorhídrico (HCl), ácido nítrico (HNO_3), ácido sulfúrico (H_2SO_4) o combinaciones de estos permite descomponer las fases minerales sólidas mediante reacciones de disolución y oxidación, dependiendo de la naturaleza del mineral. Este proceso ha sido ampliamente descrito en textos clásicos de análisis químico (Skoog et al., 2014) y en literatura metalúrgica orientada a la disolución de sulfuros y óxidos metálicos (Habashi, 1999).

El objetivo de la digestión es romper la estructura del mineral y liberar los iones metálicos atrapados en la matriz. En el caso del cobre, la digestión ácida permite transformarlo en especies solubles principalmente Cu^{2+} y, en presencia de cloruros, complejos como $[\text{CuCl}_4]^{2-}$ lo que facilita su posterior cuantificación mediante la metodología de Low u otros métodos volumétricos o colorimétricos (Christian & Dasgupta, 2014; Harris, 2015). La eficiencia del proceso depende fuertemente de la mineralogía, la concentración ácida, la temperatura y el tiempo de digestión, factores ampliamente documentados en la literatura hidrometalúrgica (Habashi, 1999; Marsden & House, 2006).

- Ajuste de condiciones:

La solución resultante debe estabilizarse antes de proceder con la titulación, con el fin de asegurar que las reacciones posteriores ocurran bajo las condiciones adecuadas. Para ello, es fundamental ajustar el pH mediante la adición de NaOH concentrado, hasta situarlo en un rango entre 2 y 5. Este intervalo es crítico, ya que valores de pH inferiores pueden generar descomposición del yoduro, mientras que valores demasiado altos pueden provocar la precipitación de hidróxidos metálicos y la desactivación del agente titulante. Mantener el pH dentro de este rango garantiza la estabilidad de los iones liberados durante la reacción y permite un desarrollo correcto de la titulación yodométrica.

- Titulación yodométrica

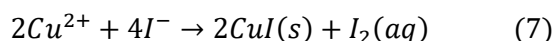
La titulación yodométrica es una técnica mediante la cual se puede determinar de forma indirecta el cobre contenido en una solución. Para esto se emplean diversos reactivos que interactúan entre sí dando forma al proceso de titulación. En primera instancia se cuenta con dos indicadores: yoduro de potasio (KI) y almidón, además del titulante tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), cuyo comportamiento redox permite cuantificar el cobre presente. Este

método se ha descrito ampliamente en análisis clásicos de metales en solución (Vogel, 1989; Harris, 2015).

Existen tres etapas dentro de la titulación, cada una con un rol definido para completarla de forma correcta:

I. Primer indicador

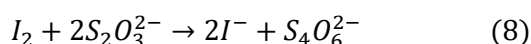
Una vez que la solución se encuentra estabilizada dentro del rango de pH recomendado (aprox. pH 2–5) para evitar la descomposición del yodo o la formación de especies no deseadas (Skoog, West & Holler, 1996), se procede a añadir el primer indicador: el yoduro de potasio (KI). El yoduro reacciona con los iones de cobre presentes según la siguiente ecuación:



En esta reacción, el ion yoduro (I^{-}) reduce al ion cúprico (Cu^{2+}) a Cu^{+} , precipitando como $\text{CuI}(s)$, mientras que parte del yoduro se oxida a yodo elemental (I_2). Todo el yodo generado es estequiométricamente equivalente al cobre presente, lo que constituye la base cuantitativa de la titulación (Svehla, 1996).

La evidencia visual de esta transformación es el tono amarillento que adquiere la solución, indicando la liberación de yodo elemental.

Una vez liberado el yodo, se procede a titular con tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), el cual reacciona con el yodo de la siguiente manera:



Esta reacción genera que, mediante el goteo continuo del titulante, el yodo elemental presente se vaya consumiendo progresivamente, lo que provoca que el color amarillo se atenúe hasta quedar una solución prácticamente incolora.

II. Segundo indicador

Una vez que la solución pierde la mayor parte de su color amarillo, se adiciona el segundo indicador: el almidón. Esto se realiza en esta etapa y no al inicio para evitar que el complejo almidón–yodo se degrade prematuramente (Christian & Dasgupta, 2014).

El almidón forma un complejo de color azul intenso a morado al reaccionar con el yodo, permitiendo identificar si aún queda yodo sin reducir en la solución. Su alta sensibilidad convierte a este indicador en una herramienta clave para determinar la proximidad del punto final.

III. Término de la titulación

Una vez incorporado el almidón, se continúa la titulación mediante la adición del titulante hasta que desaparece completamente la coloración azul–morada de la solución. Este cambio indica que todo el yodo presente ha sido reducido por el tiosulfato, señalando el punto final de la titulación.

Posteriormente, se registra el volumen de tiosulfato consumido para calcular la concentración de cobre. La relación estequiométrica entre el yodo liberado en la reacción inicial con el cobre y su posterior reducción por el tiosulfato permite

cuantificar indirectamente el contenido de cobre en la muestra (Harris, 2015; Vogel, 1989).

2.4.3 Errores más comunes

Es necesario considerar que este tipo de métodos presentan una alta sensibilidad a variaciones operacionales, por lo que cualquier desviación en las etapas del proceso desde la digestión ácida hasta la titulación final puede generar errores significativos en la cuantificación del cobre. A continuación, se describen los errores más frecuentes asociados a cada etapa crítica del procedimiento.

- **Digestión ácida**
Dentro del proceso de digestión ácida existen diversos factores que, si no se controlan de manera adecuada, pueden generar interferencias significativas y, en consecuencia, errores importantes en los resultados analíticos.
 - I. **Granulometría**
Una granulometría adecuada es esencial para asegurar que la digestión se lleve a cabo correctamente. Si la muestra no se encuentra suficientemente pulverizada, se reduce la superficie de contacto con los ácidos, lo que puede producir disoluciones incompletas del cobre. Esto aumenta el riesgo de que parte del metal quede atrapado dentro de una fracción sólida que no reacciona con el medio ácido, impidiendo su completa liberación y afectando la cuantificación final.
 - II. **Digestión ácida**
Algunos de los factores que generan mayor fuente de error en esta etapa son:
 - a. **Temperatura:** Temperaturas insuficientes disminuyen la cinética de reacción, ralentizando la disolución de los componentes metálicos y pudiendo dejar fracciones sin digerir.
 - b. **Tiempos:** Si el proceso no se mantiene durante el tiempo necesario para completar la disolución, parte del cobre puede permanecer en la matriz sólida, generando subestimación de la concentración real.
 - c. **Relación ácido/ muestra:** Una proporción inadecuada entre el volumen de ácido y la cantidad de muestra puede impedir la completa disolución del material. Una cantidad insuficiente de ácido limita la capacidad de reacción, mientras que un exceso no controlado puede generar reacciones secundarias no deseadas.
- **Proceso de Filtrado**
En las etapas posteriores de filtrado existen diversos factores que pueden generar pérdidas de analito o introducir errores significativos en los resultados finales.
 - I. **Pérdida de solución**
Durante el trasvase o manipulación de la solución digerida, existe el riesgo de pérdida de pequeñas fracciones del líquido. Debido a que esta solución contiene la totalidad del cobre disuelto, cualquier pérdida directa implica una disminución proporcional en la concentración final reportada.

- II. Retención de cobre
En el proceso de filtrado destinado a remover impurezas sólidas, parte del cobre disuelto puede quedar retenido en el material filtrante, ya sea por adsorción o por atrapamiento dentro de los sólidos retenidos. Esto provoca que la solución final presente una concentración menor a la real, afectando la exactitud del análisis.
- III. Filtros inadecuados
El uso de filtros no apropiados para el tipo de matriz puede generar dos tipos de problemas:
 - a. Retención no deseada de partículas finas que contengan cobre.
 - b. Ruptura del filtro, lo que introduce contaminantes sólidos en la solución y puede alterar la lectura final.

Una selección incorrecta del poro o del material del filtro compromete la confiabilidad del proceso.

- Titulación

La etapa de titulación es particularmente sensible, ya que pequeñas desviaciones en las condiciones experimentales pueden generar errores importantes en la cuantificación del cobre. Entre las principales fuentes de error se encuentran:

- I. Alteración de pH
Si el pH de la solución no se encuentra estabilizado dentro del rango adecuado, el yodo liberado puede descomponerse parcial o totalmente, generando lecturas erróneas del consumo de titulante y afectando la determinación del cobre.
- II. Adición temprana de almidón
El almidón debe incorporarse únicamente cuando la concentración de yodo libre es lo suficientemente baja. Si se agrega de forma prematura, se forman complejos demasiado estables que alteran la cinética de la reacción y modifican el volumen de titulante requerido.
- III. Liberación incompleta de yodo
En presencia de ciertas interferencias, particularmente iones metálicos, puede no liberarse completamente el yodo requerido para la titulación. Si la cantidad liberada es inferior a la esperada, el cálculo del cobre resultará subestimado.
- IV. Preparación de tiosulfato
El tiosulfato es susceptible a oxidarse si no se prepara correctamente o si se almacena por periodos prolongados sin protección adecuada. La degradación del titulante conduce a una concentración efectiva menor a la declarada, lo que genera lecturas falsas al momento de la titulación.
- V. Lectura incorrecta
El punto final en la titulación yodométrica se identifica por el cambio preciso de color de la solución. Si el analista no detecta correctamente este punto, puede añadir más titulante del necesario, generando una sobreestimación del volumen consumido y, por ende, una subestimación de la concentración de cobre.

2.5. Métodos actuales en la industria

En la actualidad, la determinación cuantitativa de metales de interés económico, como el oro y el cobre, es esencial para los procesos metalúrgicos, ya que permite establecer con alta precisión las leyes del mineral. Esta información resulta clave para estimar su valor económico y optimizar las decisiones operacionales a lo largo de las distintas etapas del procesamiento mineral (Skoog et al., 2014; Wills & Napier-Munn, 2016). En la industria minera, estos análisis se realizan habitualmente en laboratorios especializados, donde se emplea una variedad de técnicas analíticas que requieren equipamiento avanzado y personal altamente capacitado. La selección del método analítico depende de factores como los requerimientos de sensibilidad, los límites de detección, el tipo de matriz y los costos operacionales asociados.

A lo largo de las últimas décadas, los métodos analíticos han experimentado una evolución significativa, orientada principalmente a la obtención de mediciones con mayor precisión, reproducibilidad y rapidez. Para alcanzar estos objetivos, ha sido necesario incorporar equipos con mayor sensibilidad y niveles de automatización, capaces de detectar concentraciones muy bajas de metales y procesar un alto volumen de muestras en tiempos reducidos (Harris, 2016; Jenkins, 1999). Sin embargo, este tipo de tecnologías representa una barrera relevante para su implementación en la pequeña minería, debido principalmente a los elevados costos de inversión, operación y mantención, así como a la necesidad de infraestructura especializada y personal calificado para su correcta operación.

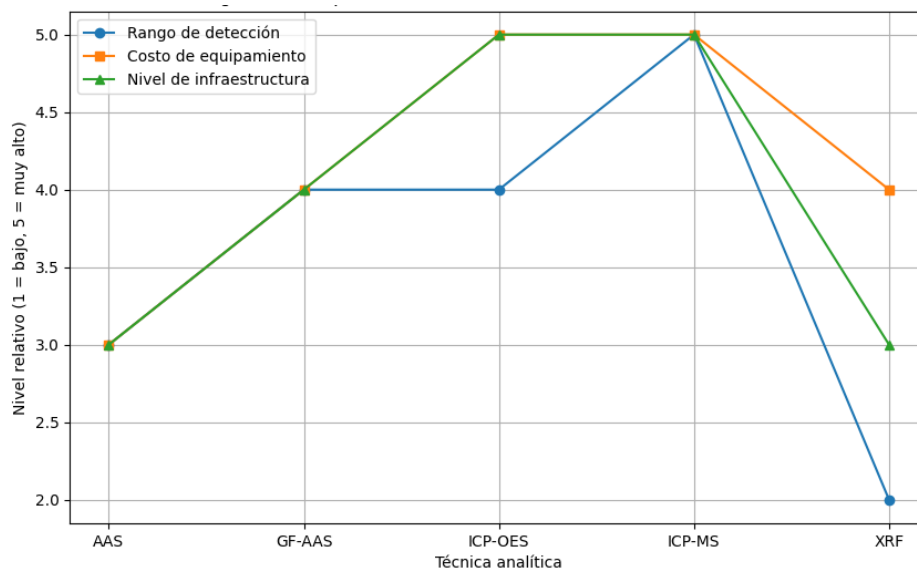


Figura 2: Comparativa entre técnicas de análisis.

- **Espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS)**
La espectrofotometría de absorción atómica (AAS) es una técnica instrumental basada en la atomización de una muestra líquida mediante una llama o una fuente térmica, lo que permite que los átomos libres del elemento de interés absorban radiación electromagnética a longitudes de onda específicas. La intensidad de esta absorción es directamente proporcional a la concentración del analito presente en la muestra (Harris, 2016; Skoog et al., 2014).

Se trata de un método altamente sensible y confiable, ampliamente utilizado en la industria para la determinación de bajas concentraciones de cobre y otros metales. No obstante, presenta ciertas limitaciones, principalmente asociadas a la necesidad de contar con equipamiento especializado, calibraciones periódicas, suministro continuo de gases y operadores capacitados. Estos factores incrementan los costos operacionales, lo que dificulta su implementación directa en faenas de pequeña minería.

- **Espectrometría de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES / ICP-MS)**
Las técnicas de espectrometría de plasma acoplado inductivamente, tanto ICP-OES como ICP-MS, se encuentran entre los métodos analíticos más avanzados y sensibles disponibles en la industria minera. Estas técnicas funcionan mediante la introducción de una muestra previamente disuelta en un plasma de argón a alta temperatura, donde sus componentes se atomizan y se ionizan.

En el caso del ICP-OES, los átomos excitados emiten radiación electromagnética característica, mientras que en el ICP-MS los iones generados son separados y detectados según su relación masa/carga, permitiendo una cuantificación altamente precisa (Skoog et al., 2014; Harris, 2016).

Estas técnicas destacan por su capacidad multielemental, elevada precisión analítica y límites de detección muy bajos, lo que las hace especialmente adecuadas para el análisis de metales preciosos en matrices minerales complejas. Sin embargo, su implementación implica altos costos asociados al consumo de argón, mantenimiento de sistemas de vacío, calibraciones especializadas y la necesidad de personal altamente capacitado. Estos factores representan una barrera significativa para su aplicación en la pequeña minería.

- **Fluorescencia de Rayos X (XRF)**
La fluorescencia de rayos X (XRF) es una técnica analítica que permite obtener resultados de forma rápida sin necesidad de disolver o descomponer químicamente la muestra. El equipo irradia la muestra con rayos X de alta energía, lo que provoca la emisión de fluorescencia secundaria característica de los elementos presentes, permitiendo su identificación y cuantificación (Jenkins, 1999; Skoog et al., 2014).

Su principal ventaja radica en la rapidez del análisis y en la posibilidad de realizar mediciones directamente en terreno mediante equipos portátiles, lo que la convierte en una herramienta útil para evaluaciones preliminares. No obstante, diversos autores señalan que la precisión y los límites de detección de la XRF son inferiores para elementos presentes en bajas concentraciones, especialmente en el caso de metales preciosos como el oro, en comparación con técnicas instrumentales de mayor sensibilidad como ICP-OES o ICP-MS (Jenkins, 1999; Potts, 2003). Estas limitaciones restringen su aplicabilidad cuando se requiere una cuantificación precisa de elementos traza en matrices minerales complejas.

- **Espectrometría de Absorción Atómica con Horno de Grafito (GF-AAS)**
La espectrometría de absorción atómica con horno de grafito (GF-AAS) constituye una variante de mayor sensibilidad respecto a la AAS convencional. Esta técnica emplea un horno de grafito que permite la atomización de la muestra en ausencia de llama y bajo condiciones estrictamente controladas, lo que posibilita alcanzar límites de detección significativamente menores, del orden de $\mu\text{g/L}$ a ng/L (Harris, 2016; Skoog et al., 2014).

Si bien este método presenta claras ventajas en términos de sensibilidad analítica, su implementación requiere un mayor control operacional, equipamiento más costoso y mantenciones más frecuentes. En consecuencia, su aplicación suele limitarse a

laboratorios especializados, lo que la hace poco viable para su implementación directa en faenas de pequeña minería (Harris, 2016; Welz & Sperling, 1999).

En síntesis, los métodos utilizados actualmente en la industria minera ofrecen altos niveles de precisión y exactitud; sin embargo, requieren la implementación de equipamiento e infraestructura especializada, personal altamente calificado y costos constantes asociados a mantención y consumibles. Estos requerimientos limitan su aplicación en la pequeña minería, donde los recursos disponibles son restringidos y suelen estar orientados a soluciones de menor costo y rápida implementación (Hilson, 2002; Bascompta et al., 2020).

En este contexto, surge el interés por desarrollar y validar métodos analíticos alternativos, de bajo costo y menor complejidad operativa, que permitan a los pequeños mineros determinar de manera autónoma las leyes de oro y cobre, sin depender exclusivamente de laboratorios externos. Si bien este tipo de metodologías presenta, en general, menores niveles de precisión en comparación con técnicas instrumentales avanzadas constituyen una opción viable para la estimación preliminar del contenido metálico, apoyando la toma de decisiones operacionales en etapas tempranas del proceso productivo.

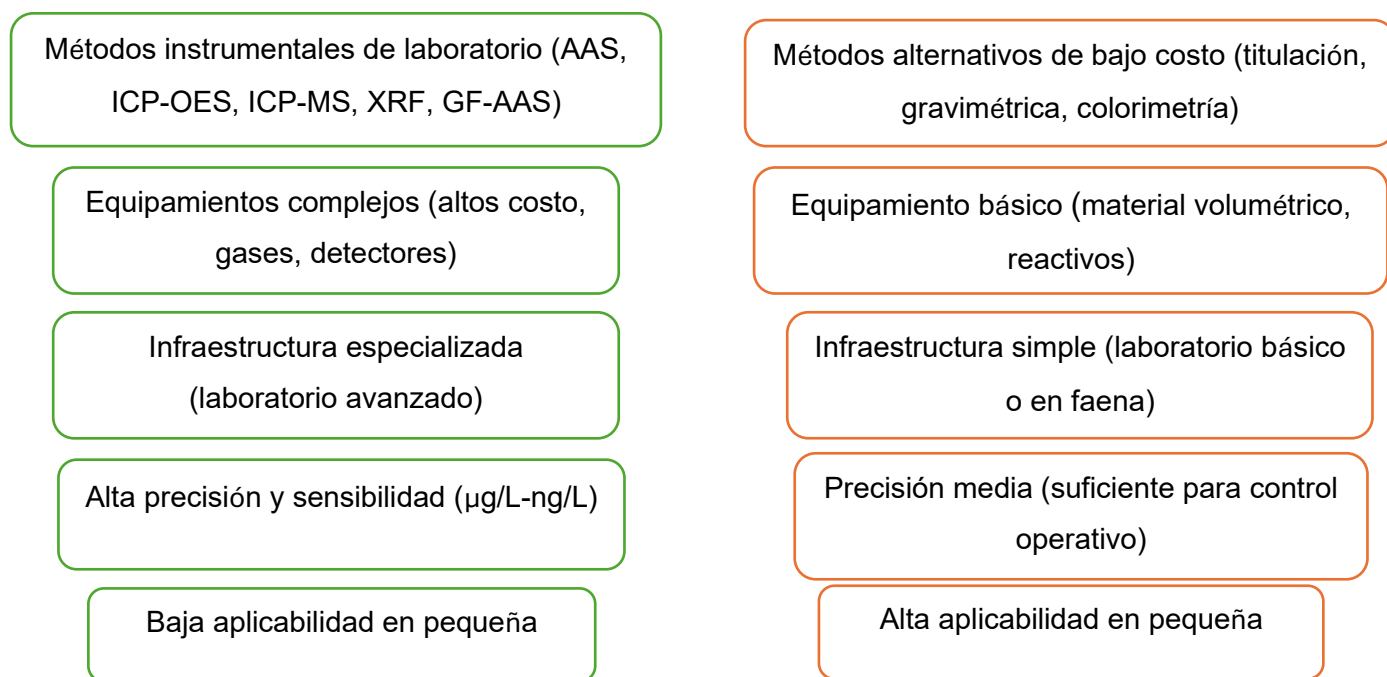


Figura 3: Diagrama comparativo.

3. Metodología

3.1. Preparación de muestra

Las muestras analizadas pasan por un proceso de conminución primaria con el objetivo de obtener una granulometría adecuada, que permita llevar a cabo los análisis fisicoquímicos necesarios para una correcta determinación del mineral.

Proceso de preparación muestra

- **Origen de las muestras**
Las muestras son obtenidas desde faenas de pequeños mineros, para lo cual se realizó un muestreo desde diversos puntos de interés dentro de la veta del mineral con el fin de analizar las muestras desde distintos puntos dentro de la mina, asegurando un adecuado análisis de la mina.
- **Homogenización**
Las muestras deben homogenizarse con el fin de que todas presenten una granulometría adecuada para las condiciones de los procesos de análisis que se realizan posteriormente. Para ello, la muestra pasa por una serie de procesos físicos mediante los cuales se reduce progresivamente su tamaño y, al mismo tiempo, se logra una homogenización apropiada del material.
- **Chancado primario**
Dependiendo del tamaño inicial de la muestra, es necesario realizar un primer proceso de reducción. Para ello se utiliza un combo y un cincel, lo que permite disminuir el tamaño del mineral hasta dimensiones que sean manejables para el chancador manual (véase anexos).
- **Chancado manual**
Como primera etapa en la reducción de tamaño, se utiliza un chancador manual, el cual permite disminuir el tamaño inicial del mineral para facilitar los procesos posteriores. Este equipo opera mediante la aplicación de presión mecánica, fragmentando la roca en porciones más pequeñas y manejables, adecuadas para la etapa de molienda.

Una vez que el mineral presenta un tamaño compatible con la apertura del chancador, se introduce dentro del cilindro para su tratamiento. El proceso es completamente manual y permite obtener partículas con un tamaño menor a 1,5 pulgadas.

El procedimiento seguido fue el siguiente:

1. Introducir en el cilindro una cantidad de mineral menor al diámetro interno del equipo.
2. Aplicar golpes con el peso metálico del chancador; la cantidad de impactos depende de la dureza del mineral y del tamaño requerido.
3. Repetir el proceso hasta obtener el tamaño de partícula deseado.

En promedio, se procesaron aproximadamente 1 kg de mineral cada 10 minutos, recolectándose el material chancado en bandejas para su posterior pesaje y análisis.

- Molienda húmeda

Una vez chancado el mineral, se procede a la molienda en un molino de barras, con el fin de alcanzar una granulometría específica que maximice la eficiencia de las reacciones químicas posteriores. Este proceso es controlado y permite, independientemente del tipo de mineral, obtener un tamaño de partícula por debajo del límite establecido, asegurando una mayor superficie de contacto para los procesos de cloración y digestión ácida.

El procedimiento de molienda se desarrolla de la siguiente manera:

- a. Preparación de la carga: se preparan cargas de mineral no superiores a 5 kg, con el fin de evitar la sobrecarga del molino.
- b. Preparación de la pulpa: el mineral se introduce en forma de pulpa con aproximadamente un 60% en peso de sólidos, lo que permite obtener un acabado más homogéneo.
- c. Ciclo de molienda: la duración de cada ciclo varía entre 1,5 y 2 horas, dependiendo de la dureza del mineral. La velocidad del molino se incrementa progresivamente hasta alcanzar los 50 Hz, garantizando un proceso fluido y controlado.

Una vez finalizada la molienda, se inspecciona el material para verificar la presencia de partículas de gran tamaño. En caso de detectarlas, el mineral se somete a un nuevo ciclo de molienda hasta alcanzar una granulometría uniforme. Posteriormente, se retira el mineral del molino para su almacenamiento y análisis (ver figura 4).

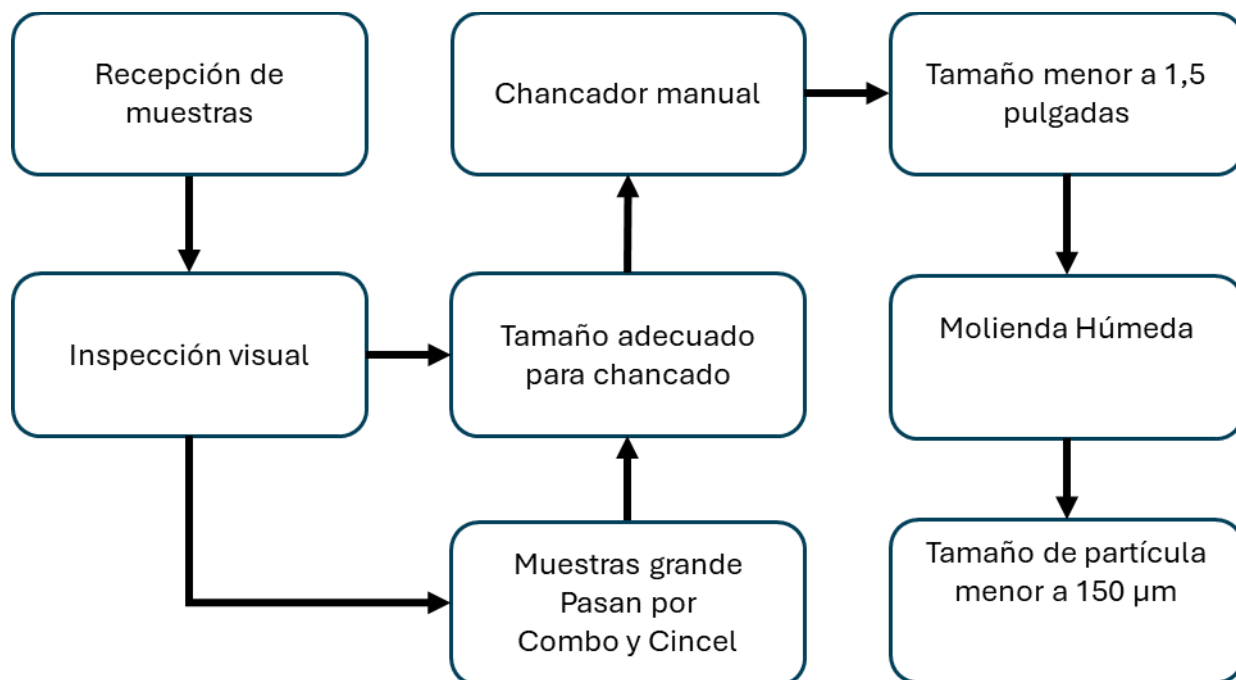


Figura 4: Diagrama de proceso de conminución.

Finalmente, el material se seca en horno para facilitar su manipulación. Una vez seco, se procede al roleo y cuarteo de la muestra con el propósito de obtener submuestras representativas, asegurando la disponibilidad de dos submuestras para cada proceso experimental.

3.2. Concentración de mineral

Una vez obtenido un tamaño de partícula suficientemente fino, se procede a la concentración del mineral mediante la técnica de flotación, con el objetivo de concentrar los minerales de interés en una masa reducida. Esto permite mejorar la interacción entre el mineral y los reactivos empleados en los procesos posteriores.

Este proceso se realiza de forma preventiva, ya que las muestras pueden no presentar la ley adecuada que permita que los análisis posteriores se desarrollen bajo parámetros óptimos. En caso de que las muestras presenten una baja ley, pueden generarse interferencias en las mediciones, provocando que los resultados se vean distorsionados respecto de la realidad.

La flotación es un proceso fisicoquímico en el que se genera una pulpa de mineral tratada con reactivos específicos que favorecen la separación del mineral valioso de la ganga, aprovechando las diferencias en sus propiedades superficiales (Wills & Finch, 2016).

Este proceso se divide en dos etapas principales: la preparación de la pulpa y la flotación propiamente tal.

3.2.1 Preparación

- Preparación pulpa

La preparación consiste en ajustar la pulpa de manera que cumpla con un contenido de mineral del $30\% \pm 5\%$ en peso; es decir, que el 30% del peso corresponda a mineral y el 70% restante a agua destilada.

El volumen total de pulpa preparado depende del tamaño de la celda de flotación utilizada. En este trabajo se emplearon dos tamaños de celda: una pequeña, con un volumen aproximado de 1200 mL, y una mediana, con un volumen aproximado de 2300 mL. Por lo tanto, según la masa de mineral inicial, es necesario realizar varias flotaciones utilizando diferentes combinaciones de celdas pequeñas y medianas (véase anexos).

Con los cálculos realizados para obtener la pulpa adecuada, se añade primero el mineral en la celda y, posteriormente, se agrega el agua de forma controlada hasta completar el volumen total. Con la pulpa ya preparada, se continúa con la siguiente subetapa.

- Ajuste pH

El siguiente paso consiste en ajustar el pH de la pulpa para generar condiciones óptimas que permitan una flotación eficiente.

Durante el ajuste, la celda de flotación se mantiene en agitación constante para asegurar la homogeneización de la pulpa. Asimismo, se utiliza un medidor de pH para monitorear continuamente su variación. El valor recomendado de pH es 10.

Para alcanzarlo, se añade cal, dado que la pulpa suele presentar un pH inicial entre 6 y 7. Una vez ajustado el pH, se procede a la siguiente fase de la preparación.

- Adición de reactivos

En esta etapa se incorporan dos reactivos esenciales para la flotación: el colector, que se une a los minerales permitiendo su adhesión a las burbujas, y el espumante, que aumenta la cantidad de burbujas en la pulpa, favoreciendo la interacción con el mineral.

I. Colector

El colector utilizado es Aero 3894 Promoter, cuyo objetivo principal es la recuperación de cobre, aunque también se emplea para la flotación de oro, ya que mejora su recuperación en comparación con el cobre.

La dosificación depende de la densidad del colector y de la masa de mineral. Se mide en microlitros, por lo que se utiliza una micropipeta para garantizar una dosificación precisa.

II. Espumante

El espumante utilizado es Aerofroth 70 MIBC, que aumenta la concentración de burbujas en la pulpa, favoreciendo la interacción entre el colector y el mineral, y facilitando la separación de la ganga.

La dosis se determina de manera similar a la del colector, considerando su densidad y la masa de mineral. También se utiliza una micropipeta para su adición en la celda de flotación.

Todo este proceso se realiza bajo agitación constante, lo que asegura una pulpa homogénea, permite la completa interacción del colector con el mineral y garantiza la distribución uniforme del espumante. La preparación tiene una duración máxima de 12 minutos: durante los primeros minutos se llevan a cabo las acciones descritas, y el tiempo restante se destina a asegurar una adecuada homogeneización de los reactivos y la pulpa.

3.2.2 Flotación

- Inicio del proceso

Este paso se realiza una vez finalizado el acondicionamiento y verificando que se cumplan todas las condiciones necesarias para una flotación adecuada. Durante la flotación, se inyecta aire desde el fondo de la celda para generar una elevada concentración de burbujas, que, en conjunto con el colector y el espumante, facilitan la adhesión del mineral y su transporte hacia la superficie.

El mineral flotado es recolectado por aspas automáticas, que operan con un paleteo de 10 segundos, permitiendo la formación estable de espuma en la superficie. Dado que durante esta etapa se extrae pulpa de manera constante, es necesario controlar el nivel de pulpa para mantener la eficiencia del proceso, lo que se logra añadiendo agua desmineralizada de forma continua.

- Duración y control del proceso

El proceso de flotación tiene una duración total de 15 minutos. Los primeros minutos son críticos, ya que es cuando se genera la mayor cantidad de espuma y ocurre la mayor interacción entre el colector y el mineral. Por ello, se debe prestar especial atención al nivel de pulpa durante esta fase inicial.

El concentrado obtenido se recolecta en bandejas plásticas, mientras que la ganga permanece dentro de la celda (véase anexos).

- Finalización y recuperación del concentrado
Al finalizar el tiempo de flotación, el concentrado se somete a filtración al vacío para obtenerlo en forma sólida, permitiendo su posterior pesado y el cálculo de la recuperación del mineral respecto del peso inicial. La ganga se deposita en bidones plásticos para su eliminación. Este procedimiento garantiza que las muestras obtenidas presenten una mayor concentración de los minerales valiosos.

Una vez completada la flotación, las muestras quedan listas para los análisis correspondientes de cobre y oro.

3.3. Determinación de oro por cloración

Con las muestras previamente acondicionadas mediante los procesos descritos en las secciones anteriores, el mineral se separa en distintas fracciones para llevar a cabo el proceso de cloración, el cual permite disolver el oro presente en la mena. Este procedimiento transforma el oro metálico en cloruro de oro (AuCl_3), con el objetivo de obtener una especie soluble en agua que facilite su separación del resto de los minerales presentes (Habashi, 1999).

Para la cloración se emplearon recipientes para pulpa diseñados e impresos mediante tecnología de impresión 3D, con el propósito de generar condiciones óptimas para el burbujeo del gas cloro dentro de la pulpa y garantizar una distribución homogénea durante todo el proceso. En este estudio se utilizaron dos tipos de recipientes, seleccionados en función de la cantidad de pulpa disponible. A continuación, se describen las etapas del procedimiento experimental.

3.3.1 Preparación mineral

Para llevar a cabo la cloración, es necesario preparar una pulpa con una concentración aproximada del 60 % en peso de sólidos, lo que permite mantener una suspensión adecuada del material y favorece la reacción de cloración.

La pulpa se prepara utilizando agua destilada, con el fin de obtener una mezcla limpia y libre de impurezas. La proporción empleada corresponde a un 60 % de sólidos y un 40 % de agua. La preparación se realiza directamente dentro del recipiente impreso en 3D (ver anexos), con el objetivo de minimizar pérdidas de material, ya que el trasvase desde otro contenedor podría generar pérdidas de mineral. En primer lugar, se adiciona el agua destilada y, posteriormente, se incorpora el mineral. Una vez completada la mezcla, se realiza una agitación mecánica para asegurar una adecuada homogeneización de la pulpa.

3.3.2 Obtención de gas cloro

El gas cloro se genera en un matraz balón de 500 mL dispuesto sobre una manta calefactora, lo que permite mantener condiciones de temperatura constantes y controladas durante el proceso. Para su generación se emplean peróxido de manganeso (MnO_2) y ácido clorhídrico (HCl), reactivos que, al reaccionar, producen cloro gaseoso de manera controlada.

El gas cloro generado es conducido a través de mangueras adecuadamente acopladas al cuello del matraz, el cual se mantiene sellado para evitar fugas y minimizar riesgos operacionales.

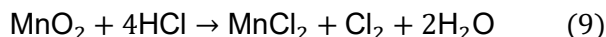
Posteriormente, el flujo gaseoso pasa por un sistema de lavado de gases, cuya función es remover posibles impurezas y vapores residuales, obteniéndose así un gas de mayor pureza para el proceso de cloración.

Finalmente, el gas cloro purificado se introduce en el recipiente que contiene la pulpa mineral. Con el fin de asegurar un contacto eficiente entre el gas y el sólido, se utiliza un sistema difusor provisto de pequeñas perforaciones, el cual permite una distribución homogénea del gas desde el fondo del recipiente, favoreciendo la solubilización del oro presente en la muestra.

- Cálculo de gas cloro que reacciona

De acuerdo con las relaciones estequiométricas, por cada mol de oro presente se requieren 1,5 moles de gas cloro. A partir de esta relación se determina la cantidad mínima de Cl_2 necesaria para la reacción. Conociendo este valor, se calculan también las cantidades de peróxido de manganeso (MnO_2) y ácido clorhídrico (HCl) requeridas para generar dicho volumen de gas.

La reacción de generación del cloro se describe mediante la siguiente ecuación:



Por lo tanto, para producir 1 mol de Cl_2 se requiere 1 mol de MnO_2 y 4 moles de HCl . A partir de los moles de cloro calculados se determinan los gramos de MnO_2 y el volumen de ácido necesarios, considerando además la pureza de los reactivos para ajustar los valores teóricos a los reales.

Cabe destacar que estos cálculos corresponden a la cantidad mínima de gas cloro requerida para reaccionar con todo el oro presente. En consecuencia, se realizaron ajustes adicionales con el fin de asegurar que la reacción se mantuviera activa durante un tiempo suficiente para completar el proceso de cloración.

- Ajuste generación gas cloro

Para garantizar una duración del proceso de entre 5 y 6 horas, se implementó un procedimiento escalonado, modificando progresivamente las cantidades de reactivos utilizados.

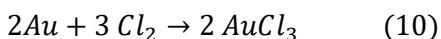
En una primera prueba se emplearon 100 mL de ácido clorhídrico y 30 g de MnO_2 , evaluando la duración de la reacción sobre una manta calefactora con temperatura controlada. Sin embargo, esta condición no permitió mantener la generación de gas durante el tiempo requerido, por lo que se incrementaron gradualmente las cantidades de reactivos hasta alcanzar un comportamiento estable.

Finalmente, se logró mantener la generación de gas cloro durante aproximadamente 5 horas utilizando 200 mL de ácido clorhídrico y 60 g de MnO_2 . Esta proporción se aplicó a todas las muestras sometidas a cloración, ya que, independientemente de la cantidad de oro presente, la cantidad de gas generada bajo estas condiciones resultó suficiente para reaccionar completamente con el metal. Por este motivo, dichas cantidades de reactivos se adoptaron como estándar experimental.

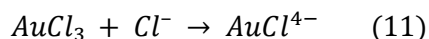
3.3.3 Reacción de cloración

El proceso de cloración involucra tanto la generación continua de gas cloro como la pulpa mineral previamente homogenizada. El gas es conducido hacia la pulpa de manera controlada y segura, permitiendo que ocurra la reacción con el oro y se forme cloruro de oro (III). En los anexos se presenta la figura correspondiente al sistema completo de cloración.

La reacción principal se describe mediante la siguiente ecuación:



En una primera etapa se forma cloruro áurico (III), el cual posteriormente continúa reaccionando en presencia de iones cloruro, dando origen al complejo tetraclorourato (III), según la reacción:



El gas cloro se distribuye desde el fondo del recipiente mediante una manguera perforada a lo largo de toda su extensión, lo que permite que las burbujas se dispersen de manera uniforme en el volumen de la pulpa. Este diseño favorece una interacción eficiente entre el gas cloro y el oro presente en la muestra, optimizando la eficiencia del proceso.

El tiempo de reacción durante el cual el gas cloro es producido y dirigido a la pulpa se establece entre 5 y 6 horas, utilizándose en este estudio un tiempo promedio de 5 horas para todas las muestras. Finalizado este periodo, el sistema se deja en reposo durante 24 horas, lo que permite la finalización de las reacciones químicas y la ventilación del sistema, reduciendo la concentración de cloro residual y los riesgos asociados a su manipulación.

3.3.4 Filtrado

Transcurrido el tiempo de reposo, la pulpa se somete a un proceso de filtración con el objetivo de separar la fase líquida, que contiene el oro disuelto, de la fase sólida constituida principalmente por impurezas no reaccionadas. Para ello se emplea un sistema de filtración al vacío compuesto por un matraz Erlenmeyer, una bomba de vacío y un embudo Büchner con papel filtro adecuado.

La pulpa se filtra cuidadosamente y, con el fin de maximizar la recuperación del oro soluble, el residuo sólido se lava en cuatro ocasiones con agua templada. En una primera etapa, el licor de filtración inicial se hace pasar nuevamente a través del sólido, favoreciendo la recuperación de oro remanente. Posteriormente, se realizan los lavados sucesivos con agua templada, asegurando que no permanezcan especies de valor en la fase sólida.

La solución obtenida se recolecta y almacena en botellas de vidrio debidamente selladas, evitando su contaminación o pérdida por evaporación y manteniéndola en condiciones adecuadas hasta la siguiente etapa del procedimiento.

3.3.5 Titulación argentométrica

La solución obtenida tras el proceso de cloración del oro puede contener un exceso de cloro libre o cloruros residuales, los cuales podrían interferir en las etapas posteriores del procedimiento, particularmente durante la precipitación y recuperación del metal. Por esta razón, resulta necesario cuantificar y eliminar dicho exceso, asegurando condiciones químicas controladas y reproducibles.

Para este propósito se empleó la titulación argentométrica, siguiendo los lineamientos descritos por Vogel (1989), quien detalla los métodos de precipitación basados en la reacción entre el ion cloruro y el nitrato de plata (AgNO_3), formando cloruro de plata (AgCl) como precipitado insoluble. Este método permite determinar de manera precisa el contenido de cloro residual presente en la solución.

- Preparaciones iniciales

La preparación para la titulación se organizó en tres etapas principales: preparación de la alícuota, preparación de los reactivos y ajuste del pH de la muestra, con el objetivo de estandarizar las condiciones analíticas y minimizar posibles interferencias.

- Preparación alícuota

Se extrajo una alícuota de 50 mL desde la solución total, previa agitación manual de la muestra, con el fin de asegurar su homogenización y garantizar que la alícuota fuese representativa del volumen total analizado.

- Preparación Reactivos

Durante la titulación se emplean dos reactivos principales:

- Nitrato de plata (AgNO_3): utilizado como titulante. Se preparó una solución 0,5 M, disolviendo aproximadamente 2,4 g de AgNO_3 en 30 mL de agua destilada. Este reactivo reacciona estequiométricamente con los iones cloruro presentes en la solución.

- Cromato de potasio (K_2CrO_4), utilizado como indicador. Se preparó una solución 0,1 M, disolviendo 1 g de K_2CrO_4 en 50 mL de agua destilada. El indicador se adicionó a la alícuota en un rango de 3 a 7 gotas, cantidad suficiente para permitir la identificación clara del punto final de la titulación mediante el cambio de color característico.

- Ajuste de pH

Previo a la titulación, fue necesario ajustar el pH de la alícuota, debido a que la solución presenta un carácter ácido como resultado del proceso de cloración. El ajuste se realizó utilizando hidróxido de sodio (NaOH) 2 M, añadido gota a gota hasta alcanzar un pH comprendido entre 6,5 y 10, rango recomendado para la correcta aplicación del método argentométrico.

Como criterio de estandarización, el pH se ajustó a un valor cercano a 7 en todas las muestras, con el objetivo de reducir variaciones en los resultados analíticos y asegurar la comparabilidad entre ensayos.

- Titulación con nitrato de plata

La alícuota, mantenida bajo agitación mecánica constante para preservar su homogenización, fue tratada inicialmente con el indicador cromato de potasio (K_2CrO_4). La solución adquirió una coloración amarillenta, indicando que se encontraba en condiciones adecuadas para iniciar la titulación (véase figura 5).



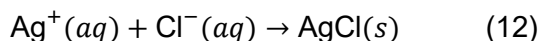
Figura 5: Resultado inicial con indicador cromato potásico.

La titulación se realizó mediante la adición controlada de nitrato de plata 0,5 M, utilizando una bureta de 25 mL, lo que permitió registrar con precisión el volumen consumido. El punto final se identificó por la aparición de una coloración rojo-anaranjada persistente, correspondiente a la formación de cromato de plata, lo que indica que todo el cloruro presente ha reaccionado con el AgNO_3 (véase figura 6).



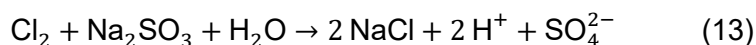
Figura 6: Resultado final titulación.

El volumen de titulante consumido fue registrado para el cálculo del contenido de cloro residual, de acuerdo con la reacción de precipitación:



- Cálculo cloro residual

A partir del volumen de nitrato de plata consumido y su concentración conocida, se determinó la cantidad de cloro libre presente en la alícuota. Este valor fue posteriormente extrapolado al volumen total de la solución, permitiendo estimar la cantidad total de cloro residual generado durante el proceso de cloración.



- Eliminación del cloro

Una vez cuantificado el cloro residual, este fue neutralizado mediante la adición de sulfito de sodio (Na_2SO_3), empleado como agente reductor. La cantidad requerida de sulfito se calculó a partir de la relación estequiométrica correspondiente, asegurando la completa reacción con el cloro presente en la solución, según la siguiente ecuación:



Para llevar a cabo la eliminación del cloro, la solución total se mantuvo bajo agitación constante con el fin de garantizar una adecuada homogenización. El sulfito de sodio se agregó de forma progresiva y, una vez completada la adición, se continuó la agitación durante algunos minutos adicionales para asegurar la finalización de la reacción y la eliminación completa del cloro libre. El esquema general del proceso se presenta en los anexos.

Todos los valores calculados y empleados para este procedimiento se presentan en la Tabla 24, en los anexos.

3.3.6 Precipitación de oro

Para lograr la precipitación del oro disuelto en la solución, es necesario ajustar las condiciones químicas del sistema, específicamente el pH y el potencial redox. Estos parámetros determinan la estabilidad de las especies químicas del oro en solución, de acuerdo con el diagrama de Pourbaix, el cual permite identificar las condiciones bajo las cuales el oro puede precipitar en forma sólida (véase figura 7).

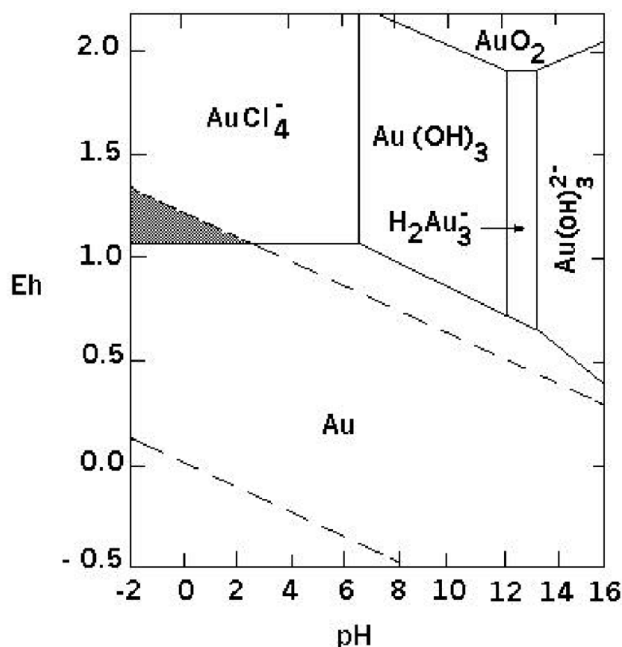


Figura 7: Diagrama Pourbaix oro (Emery-Trindade & Barbosa-Filho, 2002).

- Ajuste pH

El ajuste del pH se realizó con el objetivo de situar el sistema en un rango comprendido entre 3 y 6, intervalo en el cual la posterior reacción de reducción del oro ocurre de manera estable y controlada. Para este fin se empleó hidróxido de sodio (NaOH) a una concentración de 2 M, el cual fue añadido de forma gradual a la solución.

Durante este proceso, la solución se mantuvo bajo agitación constante, lo que permitió una adecuada homogenización y un control más preciso del ajuste. El pH fue monitoreado de manera continua mediante un medidor, registrando su variación hasta alcanzar el rango establecido (véase anexos). Este control es fundamental para evitar condiciones extremas que puedan afectar la eficiencia de la precipitación o generar reacciones indeseadas.

- **Ajuste potencial redox**

Una vez ajustado el pH, se procedió a regular el potencial redox de la solución, el cual debe mantenerse dentro de un rango entre 200 mV y 500 mV (Bonilla Sanabria, 2008). Este rango asegura la estabilidad de las especies de oro en condiciones favorables para su precipitación.

Para modificar el potencial redox se utilizó peróxido de hidrógeno (H_2O_2), empleado como agente oxidante. La adición del reactivo se realizó de manera controlada y gradual, mediante goteo continuo, con el fin de evitar incrementos bruscos de temperatura y la liberación violenta de gases, fenómenos que podrían comprometer la seguridad del proceso y la estabilidad del sistema.

Durante todo el ajuste, la solución se mantuvo bajo agitación constante y el potencial redox fue monitoreado de forma permanente mediante un medidor, asegurando la estabilidad de los valores alcanzados y un control adecuado del proceso (véase anexos).

Una vez completados ambos ajustes, la solución se dejó reaccionar durante un periodo aproximado de 2 horas, con el objetivo de asegurar la precipitación del oro presente. En aquellos casos en que se observó una formación lenta del precipitado, se incorporó un tiempo de reposo adicional de hasta 24 horas, con el fin de garantizar que la totalidad del contenido sólido precipite de manera adecuada. Esta decisión se basó en la observación visual de la formación y sedimentación de los sólidos en la solución.

3.3.7 Calcinación

Como etapa final del proceso se realizó la calcinación, procedimiento mediante el cual se determina la cantidad de oro recuperado a partir de la muestra tratada. Previamente, es necesario efectuar la filtración del precipitado obtenido en la etapa de precipitación, con el objetivo de separar la fase sólida que contiene el oro del resto de la solución (véase figura 8).

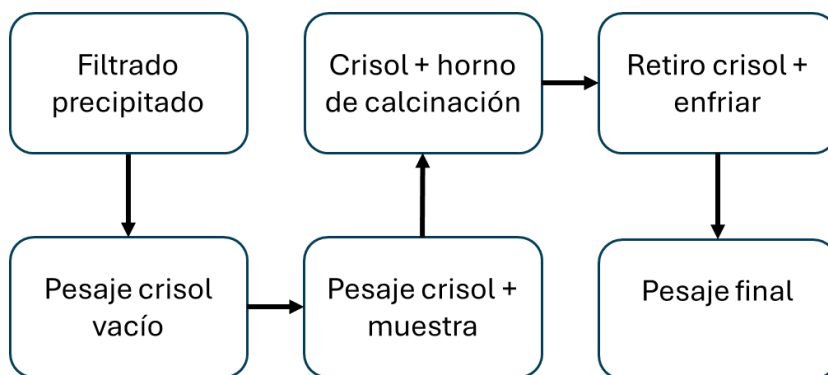


Figura 8: Diagrama proceso de calcinación.

- Filtración

La filtración de la solución se llevó a cabo una vez finalizada la reacción de precipitación. Este proceso pudo realizarse de manera inmediata o después de un periodo de reposo, dependiendo de la estabilidad y velocidad de sedimentación del precipitado formado.

Para esta etapa se utilizó papel filtro sin cenizas, con el fin de evitar la incorporación de residuos adicionales durante la posterior calcinación y asegurar que las mediciones de masa no se vean afectadas. Mediante este procedimiento se logró la separación completa de los sólidos generados en la etapa anterior respecto de la fase líquida (véase anexos).

- Calcinación

Una vez completada la filtración y retenidos los sólidos en el papel filtro, se procedió a la preparación para la calcinación. En primer lugar, se efectuó el pesaje del crisol vacío, con el propósito de registrar su masa inicial. Posteriormente, los filtros con el precipitado se introdujeron en el crisol, distribuyéndolos de manera uniforme para favorecer una combustión homogénea del material (véase figura 9).



Figura 9: Crisol + filtro con precipitado.

El crisol preparado se introdujo en un horno de fundición previamente precalentado a una temperatura superior a 900 °C. La calcinación se mantuvo durante un periodo comprendido entre 1 y 2 horas, tiempo suficiente para asegurar la eliminación completa de los materiales orgánicos presentes en el papel filtro y permitir la obtención del residuo metálico correspondiente (véase anexos).

Finalizado el proceso de calcinación, el crisol se dejó enfriar a temperatura ambiente antes de realizar el pesaje final en una balanza analítica, la cual permite obtener mediciones de alta precisión. La diferencia entre la masa del crisol vacío y la masa del crisol con el residuo metálico corresponde a la cantidad de oro recuperada en la muestra.

A partir de este valor, es posible calcular la ley de oro presente en el mineral analizado, completando así el procedimiento de recuperación y cuantificación del metal.

3.4. Determinación de cobre según Low

La determinación de cobre se llevó a cabo mediante el método de Low, el cual se basa en una etapa inicial de digestión ácida destinada a disolver el cobre presente en la muestra y separarlo de otros elementos que podrían generar interferencias en las etapas posteriores del análisis. Este procedimiento permite obtener una solución homogénea y adecuada para la cuantificación del metal mediante titulación yodométrica.

El proceso se desarrolló siguiendo un procedimiento estructurado y controlado, orientado a asegurar la reproducibilidad de los resultados y a minimizar errores asociados a pérdidas de material, reacciones incompletas o interferencias químicas.

3.4.1 Preparación de muestra

Como etapa inicial del proceso, se realizó la verificación y acondicionamiento de la muestra, asegurando que esta cumpliera con las condiciones necesarias para un análisis representativo.

Para ello, se obtuvo aproximadamente 1 g de muestra mediante un proceso de roleo y cuarteo, partiendo desde una masa inicial cercana a 100 g. A partir de esta fracción se elaboró una matriz de muestreo, como se muestra en la figura 10, que permitió realizar un punteo sistemático dentro de cada cuadrante hasta completar la masa requerida para el análisis (ver figura 10).



Figura 10: Matriz de muestreo.

Una vez obtenida la muestra, se verificó visualmente la ausencia de partículas de gran tamaño que pudieran interferir con el proceso de digestión ácida. En caso de detectarse alguna, esta fue retirada y reemplazada hasta completar nuevamente el peso total de 1 g.

3.4.2 Digestión ácida

Con la muestra ya preparada, se procede a realizar el proceso de digestión ácida, mediante el cual la muestra es sometida a diversas etapas de disolución con distintos ácidos. Este procedimiento permite separar el cobre de las impurezas presentes y obtener una solución homogénea que servirá para su posterior análisis.

- Primera digestión con ácido sulfúrico (H_2SO_4)
La digestión inicial se realizó en un matraz Erlenmeyer de 200 mL, en el cual se introdujo la muestra junto con 50 mL de ácido sulfúrico concentrado. La mezcla se agitó suavemente para favorecer el contacto entre el sólido y el reactivo.

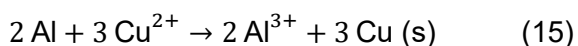
Posteriormente, el matraz se dispuso sobre una bandeja con arena (véase anexos), permitiendo un calentamiento uniforme hasta alcanzar el punto de ebullición. La mezcla se mantuvo en estas condiciones durante algunos minutos, observándose una disminución progresiva en la emisión de gases, indicativa del avance de la reacción.

Finalizada esta etapa, el matraz se retiró de la fuente de calor y se dejó enfriar hasta alcanzar una temperatura segura para su manipulación.

- **Ácido clorhídrico (HCl)**
Una vez enfriada la solución, se agregaron 25 mL de ácido clorhídrico, con el objetivo de disolver los residuos sólidos remanentes de la etapa anterior. La mezcla se sometió nuevamente a calentamiento, manteniéndose en ebullición por un periodo breve, no superior a dos minutos, con el fin de evitar pérdidas por evaporación excesiva. Posteriormente, se dejó enfriar.
- **Segunda digestión con ácido sulfúrico (H_2SO_4)**
En esta etapa se adicionaron 35 mL adicionales de ácido sulfúrico concentrado, reforzando la disolución del material y asegurando que el cobre se mantuviera completamente en solución. El calentamiento se realizó bajo las mismas condiciones que en la primera digestión, seguido de un periodo de enfriamiento.
- **Adición de agua destilada**
Posteriormente, se incorporaron 125 mL de agua destilada fría y la mezcla se llevó nuevamente a ebullición por menos de un minuto. En esta etapa se observó un cambio en la coloración de la solución, la cual se tornó incolora, indicando un avance significativo en la digestión. La solución se dejó enfriar antes de continuar con el proceso.
- **Filtrado**
Una vez enfriada la mezcla, se realizó un filtrado para eliminar los residuos sólidos no disueltos. Este procedimiento se efectuó utilizando papel filtro sin cenizas, asegurando la recuperación completa de la fracción soluble. El matraz fue enjuagado con agua caliente, incorporando estos lavados al filtrado para evitar pérdidas de cobre.
- **Precipitación de cobre**
El cobre presente en la solución se precipitó mediante la adición de una lámina de aluminio, la cual actúa como agente reductor, provocando la reducción de los iones Cu^{2+} y su depósito en forma de cobre metálico.

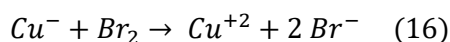
La solución filtrada se transfirió a un matraz de 500 mL, en el cual se introdujo la lámina de aluminio. El sistema se selló y se calentó sobre una bandeja con arena durante aproximadamente una hora (véase anexos), evitando un calentamiento excesivo que pudiera provocar evaporación.

La finalización de la reacción se evidenció por la disminución del espesor de la lámina de aluminio, producto de su consumo durante el proceso, según la reacción global:



- **Filtrado del cobre precipitado**
El cobre precipitado se separó mediante filtración, utilizando agua acidificada ($pH \approx 1,5$) para estabilizar el papel filtro y evitar rupturas. El filtro se mantuvo constantemente húmedo, asegurando la retención completa del cobre metálico.
- **Digestión con ácido nítrico (HNO_3)**
El cobre retenido en el filtro se disolvió nuevamente mediante la adición de 25 mL de ácido nítrico. La solución obtenida se calentó hasta alcanzar el punto de ebullición y luego se dejó enfriar antes de continuar.

- Oxidación con agua de bromo
A la solución resultante se añadió agua de bromo, actuando como agente oxidante y transformando el cobre a su estado cúprico (Cu^{2+}), según la reacción:



Para esta etapa se probaron dos métodos, con el fin de comparar su efecto sobre el resultado final:

- Método 1: Se agregan 25 mL de agua de bromo directamente al matraz. Este proceso libera una cantidad considerable de gas de bromo, el cual es tóxico, por lo que debe realizarse bajo campana extractora. El filtro se enjuaga con agua caliente, y la mezcla se calienta nuevamente hasta que deje de liberarse gas (de color anaranjado característico).
- Método 2: Se agregan los 25 mL de agua de bromo sobre el papel filtro, permitiendo que el líquido arrastre cualquier residuo hacia el matraz. Luego se enjuaga el filtro con agua caliente, y la mezcla se somete al mismo proceso de calentamiento.

En ambos casos, la principal acción del agua de bromo es actuar como agente oxidante.

- Amoníaco (NH_3)
Posteriormente, se añadieron 20 mL de amoníaco, con el propósito de neutralizar la solución y controlar el pH, evitando la formación de especies que pudieran afectar la solubilidad del cobre. La mezcla se calentó suavemente hasta la desaparición del olor característico del amoníaco y se dejó enfriar.
- Ácido acético
Finalmente, se incorporaron 20 mL de ácido acético, asegurando que el cobre permaneciera completamente en solución. La mezcla se llevó brevemente a ebullición, completando así el proceso de digestión ácida. La solución final se almacenó en recipientes de vidrio sellados hasta la etapa de titulación.

Con esto se completa el proceso de digestión ácida. La solución final se almacena en recipientes de vidrio sellados, asegurando su conservación hasta la etapa siguiente de titulación, donde se determinará el contenido de cobre.

3.4.3 Titulación yodométrica

La titulación yodométrica es una valoración redox utilizada en química analítica, en la que intervienen iones yoduro (I^-) como agentes reductores u oxidantes. Este método permite determinar cuantitativamente el cobre presente en la muestra.

- Preparación reactivos
Se emplean tres reactivos principales para esta titulación: dos indicadores, cuya función es generar cambios en la coloración de la solución, y el titulante, que permite cuantificar el cobre presente en la muestra.

- I. Yoduro de potasio (KI)
Para preparar el indicador de yoduro de potasio, se utiliza una solución al 10%, la cual se obtiene al mezclar una cantidad conocida de agua desionizada con yoduro de potasio, hasta alcanzar la concentración deseada.
- II. Almidón
La preparación del almidón se realiza al 1%, mezclando 100 mL de agua desionizada con 1 g de almidón, obteniendo así la solución al 1%.
- III. Titulante de tiosulfato de sodio ($Na_2S_2O_3$)
Para preparar el titulante se debe tener precaución con el recipiente en que se almacenará, ya que esta solución es sensible a la luz, lo que podría provocar una pérdida de efectividad.

Por esta razón, el recipiente se recubre con papel aluminio, evitando la exposición lumínica.

Posteriormente, se prepara la solución de tiosulfato de sodio disuelto en agua desionizada, para obtener una concentración de 0,025 M.

- Titulación con tiosulfato de sodio

- I. Toma de alícuota:
Para realizar la titulación, se extrae una alícuota de 25 mL de la solución obtenida tras el proceso de digestión ácida. Esta alícuota se considera representativa de la muestra total, permitiendo extrapolar posteriormente los resultados obtenidos.
- II. Ajuste de pH:
La alícuota se coloca bajo agitación constante mediante un agitador magnético, con el objetivo de asegurar una solución homogénea. El pH se mide utilizando un medidor de pH calibrado.

En caso de ser necesario, se ajusta el pH mediante la adición lenta y controlada de hidróxido de sodio ($NaOH$), preferentemente en forma de perlas, evitando variaciones bruscas que puedan afectar el equilibrio de la reacción o provocar precipitación indeseada del cobre.
- III. Adición del primer indicador (yoduro de potasio, KI):
Una vez alcanzado el pH adecuado, se adiciona el yoduro de potasio directamente sobre la alícuota. Esta adición provoca la liberación de yodo molecular, lo que se manifiesta visualmente mediante un cambio de color de la solución, desde incoloro a amarillento o marrón, dependiendo de la concentración de cobre presente.

Se deja reaccionar durante algunos minutos para asegurar que la reacción se complete de manera uniforme en toda la solución (ver figura 11).



Figura 11: Inicio titulación con KI.

- IV. Titulación con tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$):
Se llena una bureta de 10 mL con la solución titulante de tiosulfato de sodio y se inicia la titulación añadiendo el titulante gota a gota sobre la alícuota. Durante esta etapa se observan cuidadosamente los cambios de color de la solución, los cuales indican el avance de la reacción.

La titulación se continúa hasta que la solución adquiere una coloración pálida o casi incolora, señal de que el yodo libre ha sido prácticamente consumido.

- V. Adición del segundo indicador (almidón):
En este punto se adiciona el almidón, el cual produce un cambio de color característico, generalmente hacia un tono azul o morado intenso (ver figura 12), debido a la formación del complejo almidón-yodo.

Con la solución nuevamente homogénea, se continúa agregando el titulante gota a gota hasta que el color desaparece por completo, volviendo la solución incolora. Este cambio marca el punto final de la titulación.

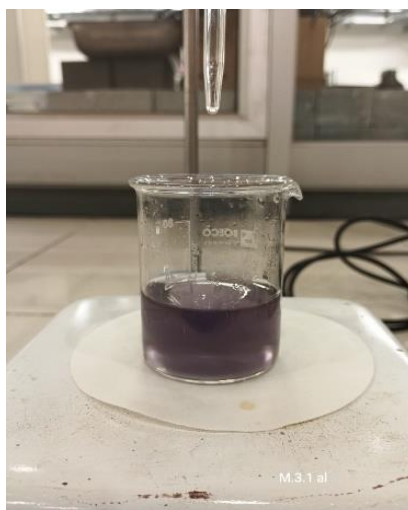


Figura 12: Adición de segundo indicador de almidón.

- VI. Registro del consumo de titulante:
Finalmente, se registra el volumen total de tiosulfato de sodio consumido durante la titulación. Este valor constituye el dato experimental fundamental para el cálculo de la cantidad de cobre presente en la muestra, mediante las correspondientes relaciones estequiométricas.

3.4.4 Cálculo de cobre

Teniendo todos los resultados disponibles, se procede a realizar los cálculos correspondientes para determinar la ley de cobre en la muestra. Para esto, se considera el volumen de titulante consumido durante la titulación. Mediante la relación estequiométrica, se sabe que 1 mol de tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) equivale a 1 mol de cobre, lo que permite calcular la cantidad de cobre presente en la alícuota analizada, mediante la ecuación 17.

$$g \text{ Cu} = n_{\text{Cu}} \times PM_{\text{Cu}} \quad (17)$$

Posteriormente, este resultado se extrapola a la muestra total, asumiendo que la alícuota es representativa de la muestra original.

3.5. Seguridad y manejo de residuos

3.5.1 Riesgos asociados a los reactivos

El uso de reactivos considerados tóxicos y peligrosos para la salud implica riesgos significativos durante su manipulación. Por ello, es fundamental mantener en todo momento medidas de seguridad estrictas y conocer los peligros asociados a cada sustancia empleada.

- Gas cloro
El gas cloro utilizado en el procedimiento se genera a partir de la reacción entre ácido clorhídrico (HCl) y dióxido de manganeso (MnO_2). Se trata de un gas altamente peligroso, por lo que su producción y manipulación requiere estrictas medidas de control.
 - Toxicidad aguda
El cloro gaseoso es altamente irritante para las vías respiratorias. La exposición prolongada o sin protección adecuada puede causar irritación severa en ojos, nariz y garganta. En concentraciones mayores, puede producir dificultad respiratoria, edema pulmonar, pérdida de conciencia e incluso la muerte.
 - Corrosividad
El cloro puede reaccionar con la humedad presente en los tejidos, generando ácido clorhídrico (HCl) y ácido hipocloroso (HClO), ambos corrosivos. Esto implica riesgo de quemaduras químicas en piel y ojos, además de daños en equipos de laboratorio que no estén adecuadamente protegidos.
 - Impacto ambiental
El cloro liberado al ambiente puede ocasionar contaminación atmosférica, afectando vegetación y fauna cercana. Asimismo, si el gas entra en contacto con cuerpos de

agua, puede generar compuestos clorados tóxicos, representando un riesgo significativo para los ecosistemas.

- Ácidos inorgánicos fuertes

La manipulación de los denominados ácidos fuertes implica una serie de riesgos asociados a su elevada corrosividad y reactividad, capaces de generar desde quemaduras químicas severas hasta la liberación de gases tóxicos. Dentro de esta categoría se encuentran el ácido sulfúrico (H_2SO_4), el ácido clorhídrico (HCl), el ácido nítrico (HNO_3) y el ácido acético glacial (CH_3COOH), todos empleados en distintas etapas del procedimiento.

- Corrosividad

La característica principal de estos ácidos es su fuerte acción corrosiva, capaz de producir quemaduras químicas graves en la piel y los tejidos humanos. Además, pueden corroer metales, vidrio no adecuado y superficies de trabajo, comprometiendo la integridad del material de laboratorio.

- Reacción exotérmica con el agua

La mezcla de ácidos fuertes con agua puede generar una liberación de calor intensa y repentina, pudiendo provocar ebulliciones violentas y proyecciones del ácido fuera del recipiente. Por esta razón, según las normas de seguridad química, “el ácido siempre debe agregarse al agua y nunca a la inversa” (OSHA, s. f.).

- Liberación de vapores tóxicos

Muchos ácidos fuertes liberan vapores irritantes o tóxicos, especialmente cuando reaccionan con otros compuestos. Estos vapores pueden provocar irritación ocular y respiratoria, y en casos de exposición prolongada pueden causar daño pulmonar. Asimismo, representan un riesgo ambiental si no se contienen adecuadamente.

- Riegos para el medio ambiente

Una manipulación deficiente puede generar derrames o emisiones accidentales que afecten los suelos, ya sea por corrosión directa o por reacciones químicas secundarias. En cuerpos de agua cercanos, estos ácidos pueden provocar acidificación, alterando de manera significativa la vida acuática y vegetal.

- Agua de bromo

Es un reactivo químico compuesto por bromo elemental (Br_2) disuelto en agua. Aunque se encuentra en una concentración diluida, conserva en gran medida las propiedades tóxicas, corrosivas y oxidantes del bromo puro, por lo que su manipulación requiere estrictos controles de seguridad.

- Toxicidad elevada

Incluso en solución, el bromo libera vapores de forma continua. La exposición a estos vapores puede causar irritación severa en nariz, garganta y pulmones. En concentraciones elevadas o exposiciones prolongadas, puede producir edema pulmonar, una condición potencialmente fatal si no se trata de inmediato.

- Oxidante fuerte

El bromo es un oxidante potente capaz de reaccionar vigorosamente con sustancias orgánicas e incluso con ciertos compuestos inorgánicos. Estas reacciones suelen ser exotérmicas, generando calor y vapores tóxicos, lo que incrementa el riesgo para el personal si no se controla adecuadamente.

- Corrosividad

La solución de bromo es altamente corrosiva. El contacto con la piel puede provocar quemaduras químicas, mientras que el contacto con los ojos puede causar daños severos e incluso permanentes. Asimismo, puede deteriorar materiales de laboratorio no compatibles.
- Contaminación química

Debido a su alta reactividad, el bromo puede contaminar residuos y generar subproductos peligrosos, como bromatos y bromuros, los cuales deben ser gestionados mediante protocolos específicos de tratamiento de residuos peligrosos.
- Amoníaco (NH_3)

La solución de amoníaco se emplea en forma acuosa, lo que reduce parcialmente los riesgos asociados al gas anhidro. Sin embargo, no elimina el peligro, ya que la solución libera vapores de amoníaco de manera continua y pasiva, especialmente en ambientes cálidos o poco ventilados.

 - Toxicidad

El amoníaco es un gas altamente irritante para el sistema respiratorio. La inhalación de sus vapores provoca irritación intensa en nariz, garganta y vías respiratorias superiores, pudiendo causar dificultad respiratoria. En exposiciones elevadas, existe riesgo de edema pulmonar, una condición grave que requiere atención médica inmediata.
 - Reacción exotérmica

El amoníaco puede generar reacciones exotérmicas cuando se mezcla con agua, liberando una cantidad significativa de calor y vapores tóxicos. Además, al reaccionar con ácidos fuertes, libera grandes cantidades de gas amoníaco, lo que incrementa el riesgo de exposición aguda.
 - Corrosividad

Al ser una base fuerte, la solución de amoníaco puede causar quemaduras químicas en la piel, así como daños oculares severos que pueden incluir pérdida parcial o total de la visión si no se actúa rápidamente. También puede corroer ciertos materiales, especialmente metales sensibles a soluciones alcalinas.
 - Contaminación ambiental

El amoníaco es altamente tóxico para los ecosistemas acuáticos. Su liberación en cuerpos de agua eleva el pH de manera significativa, afectando la vida acuática mediante estrés fisiológico, daño celular o mortalidad directa en peces, plantas y otros organismos sensibles.

3.5.2 EPP (elementos de protección personal) obligatorio

Son elementos diseñados para prevenir y evitar riesgos específicos en las labores que se desarrollan. Entre estos riesgos se incluyen los de tipo físico, químico, biológico o mecánico que pueden producirse durante alguna actividad laboral. Por ello, estos elementos son de suma importancia, ya que ayudan a resguardar a las personas de posibles accidentes.

- Botas de seguridad

Las botas de seguridad son calzados diseñados para proteger los pies de riesgos mecánicos, químicos y térmicos. Como norma general, cuentan con una punta reforzada y están fabricadas con materiales resistentes a sustancias corrosivas.

- **Prendas de vestir**
Las principales prendas de vestir son las batas o delantales de laboratorio, los cuales actúan como una barrera entre la piel del trabajador y los posibles agentes peligrosos que se estén manipulando. Además, se exige que la ropa utilizada bajo la bata sea adecuada; en particular, se recomienda el uso de pantalones largos para prevenir el contacto directo de sustancias con la piel.
- **Lentes de protección**
Los lentes de protección están diseñados para resistir impactos mecánicos y evitar el contacto de partículas proyectadas hacia los ojos. También previenen la exposición a sustancias químicas, las cuales pueden ser altamente dañinas para la vista.
- **Mascara de gases y polvo**
Las máscaras con filtros se clasifican en dos tipos: filtros para polvo y filtros para gases.
 - Filtros para polvo: previenen la inhalación de partículas en suspensión generadas durante diversas actividades, como los procesos de conminución de minerales, los cuales producen grandes cantidades de polvo.
 - Filtros para gases: están diseñados para retener vapores tóxicos o gases irritantes generados en trabajos de laboratorio, por lo que son indispensables al manipular reacciones químicas.
- **Guantes**
Los guantes están diseñados para proteger las manos en distintos escenarios. Por ello, se dividen en:
 - Guantes para trabajo pesado: utilizados en actividades físicas, como la manipulación de rocas.
 - Guantes de laboratorio: destinados a prevenir riesgos químicos o biológicos. Estos pueden estar fabricados con diferentes materiales, dependiendo del tipo de sustancia con la cual se esté trabajando.

3.5.3 Manejo de residuos líquidos

El manejo adecuado de los residuos líquidos es de suma importancia en el desarrollo de cualquier experimento donde se generen este tipo de desechos. En este trabajo se abordan tres categorías de residuos: ácidos, básicos e inertes, cada una con procedimientos específicos de manejo y almacenamiento.

- **Residuos ácidos**
Los residuos ácidos generados en los distintos procesos se almacenan en bidones plásticos resistentes a la corrosión, con el fin de evitar derrames y asegurar su confinamiento. Es fundamental verificar que todos los residuos depositados en estos contenedores correspondan efectivamente a soluciones ácidas y que se encuentren a temperatura ambiente, lo que previene reacciones exotérmicas indeseadas. Además, los bidones deben estar claramente rotulados indicando el tipo de residuo y su posible peligrosidad.

- **Residuos básicos**
El manejo de los residuos básicos es similar al de los ácidos. Estos se depositan en bidones resistentes y debidamente etiquetados, asegurando que únicamente soluciones básicas sean incorporadas en el contenedor para evitar reacciones químicas involuntarias. Esta segregación es esencial para prevenir riesgos asociados a mezclas incompatibles, así como para facilitar su posterior neutralización o disposición final.
- **Pulpa de mineral**
Los residuos de pulpa de mineral se clasifican en dos categorías principales:
 - **Pulpa sin presencia de reactivos peligrosos o tóxicos:**
Este tipo de pulpa corresponde a material mineral sin valor económico y sin contaminación química significativa. Se almacena en bidones o baldes convencionales, sin requerir consideraciones especiales más allá de su identificación y almacenamiento temporal, para luego ser eliminada mediante los canales de disposición autorizados para residuos no peligrosos.
 - **Pulpa con presencia de reactivos químicos peligrosos:**
Cuando la pulpa ha sido sometida a procesos químicos que dejan trazas de sustancias peligrosas (ácidos, bases fuertes, metales pesados, oxidantes, entre otros), se clasifica como residuo peligroso. En estos casos debe ser almacenada en bidones de alta resistencia química, asegurando que no existan filtraciones que puedan generar daños o contaminar el entorno. Su disposición final debe realizarse a través de un gestor autorizado, cumpliendo la normativa vigente para residuos peligrosos.

3.5.4 Manipulación de crisoles calientes

El manejo adecuado del crisol caliente comienza con la correcta implementación de los elementos de protección personal (EPP). En particular, se deben utilizar zapatos de seguridad, bata de laboratorio, delantal resistente al calor, máscara protectora o, en su defecto, lentes de protección, además de guantes con resistencia térmica adecuada.

Una vez implementados los EPP, el crisol caliente se manipula mediante el uso de una pinza metálica resistente a altas temperaturas, la cual permite sujetarlo de forma segura y trasladarlo hasta una bandeja de acero inoxidable que contiene arena. La arena cumple la función de barrera térmica, evitando un enfriamiento rápido y descontrolado del crisol. Asimismo, este procedimiento favorece un enfriamiento gradual y uniforme, previniendo cambios bruscos de temperatura que puedan generar daños estructurales en el material.

Finalmente, una vez que el crisol ha alcanzado la temperatura ambiente, puede ser manipulado directamente con las manos sin que ello represente riesgos significativos para el operador.

4. Resultados y discusión

4.1. Resultados del proceso de cloración del oro

Los resultados obtenidos para la determinación de oro mediante la metodología de cloración se desarrollan bajo condiciones estrictamente controladas, las cuales son fundamentales para asegurar el adecuado funcionamiento de cada una de las etapas del procedimiento.

- Cloración

En el proceso de cloración es necesario considerar una serie de parámetros que permiten que las reacciones se desarrollen correctamente:

- i. Para asegurar la correcta generación y acción del cloro gaseoso (Cl_2), el tiempo mínimo de reacción debe ser de 5 a 6 horas. Este tiempo está condicionado por la reacción entre el óxido de magnesio y el ácido clorhídrico, cuya interacción genera el gas cloro necesario para el proceso.
- ii. Formación de complejo de oro: Para que se forme el complejo soluble de oro, el gas cloro debe reaccionar con el oro metálico presente en la matriz mineral, generando cloruro áurico (III) (AuCl_3). La solubilidad de este complejo permite separar el oro del residuo sólido.

- Titulación

Durante la titulación es fundamental controlar aspectos como el pH y los cambios de color de la solución, ya que estos parámetros permiten ejecutar el proceso de forma adecuada.

- i. Ajuste de pH: Antes de realizar la titulación, la solución debe acondicionarse mediante un ajuste de pH. Para ello, se utiliza una solución concentrada de NaOH, cuyo propósito es llevar la alícuota a pH 7.
- ii. Cambio de color en solución: Los cambios de color constituyen el indicador principal del avance y término de la titulación. Inicialmente, al añadir cromato potásico, la solución adquiere una tonalidad amarilla; posteriormente, mediante la adición gradual del titulante, se observa un cambio progresivo hasta alcanzar un color marrón rojizo que indica el punto final.

- Precipitación

La precipitación constituye una de las etapas más relevantes, ya que permite recuperar el oro en su forma sólida. Para ello es necesario ajustar el pH y el potencial de la solución a los rangos apropiados.

- i. Ajuste de pH: El ajuste se realiza mediante la adición de NaOH concentrado (o en granos en casos excepcionales). Esto es necesario debido a que la alícuota presenta inicialmente valores de pH muy bajos, incluso negativos. Para que la precipitación sea efectiva, el pH debe encontrarse entre 3 y 6.
- ii. Ajuste de potencial: De manera complementaria al ajuste de pH, se realiza el ajuste del potencial redox mediante la adición de H_2O_2 . Este reactivo permite llevar el potencial a un rango entre 200 y 500 mV y, además, actúa como agente oxidante, facilitando la precipitación del oro.

- Calcinación

La etapa final para obtener el oro metálico consiste en la calcinación del precipitado. Este proceso se realiza en un crisol de porcelana que se introduce en un horno de fundición. Para asegurar un resultado adecuado, es indispensable controlar la temperatura y el tiempo de calcinación.

- Temperatura: Para asegurar la completa descomposición de los compuestos presentes, la temperatura debe ser adecuada. En este trabajo se empleó una temperatura de 900 °C.
- Tiempo: El tiempo de calcinación influye directamente en la calidad del producto final. Si el tiempo es insuficiente, pueden permanecer residuos sin calcinar, lo que introduce impurezas. En este trabajo se emplearon tiempos entre 1 y 2 horas, dependiendo de la masa sometida al proceso.

Tabla 2: Resultados cloración de oro.

	Masa cloración (gr)	Masa final (gr)	Masa oro esperada (gr)
M.1.3	216,57	0,679	0,00030
M.1.1.C	661,19	0	0,00051
M.2.1	1292,86	1,5857	0,00025
M.2.2.C	366,14	0,2838	0,00018
M.3.3	325,81	0,3233	0,00137
M.3.2.c	1209,3	0,4934	0,00216
M.5.2	1034,18	0,0385	0,00030
M.5.4.C	333,05	0,0212	0,00040

Como se muestra en la Tabla 2, la masa final corresponde a la masa obtenida después de la calcinación. En teoría, esta debería representar la masa de oro presente en la muestra; sin embargo, dicha masa esperada se encuentra en el orden de 0,0001 g por muestra. Como se observó, los resultados obtenidos se alejaron significativamente de ese rango, lo cual no necesariamente indica que el proceso de cloración no haya funcionado, sino más bien que los valores obtenidos se desviaron en exceso respecto de los esperados. Esto puede atribuirse a múltiples factores asociados a las distintas etapas del procedimiento, donde pueden manifestarse diversas fuentes de error.

- Cloración

Una de las principales interferencias en esta etapa es la formación de complejos estables entre el cloro y otros elementos presentes, particularmente cobre y hierro, entre otros metales. Esto provoca que parte del cloro reaccione con estos elementos en vez de reaccionar con el oro, además de arrastrar impurezas a las etapas posteriores. Asimismo, pueden encontrarse compuestos resistentes a la cloración, tales como silicatos, óxidos de hierro y ciertos minerales sulfurados, los cuales pueden retener oro fino encapsulado. Como consecuencia, parte del oro puede permanecer en estado sólido, generando resultados significativamente distintos a los esperados (Marsden & House, 2006).

- Precipitación

La eficiencia de la precipitación del oro depende de diversos factores, entre ellos el pH, el cual, si se aleja de los rangos recomendados, afecta la reacción. No obstante, la principal fuente de error proviene de la precipitación simultánea de otros metales presentes como impurezas, los

cuales provienen del proceso de cloración. Esto genera un aumento artificial en la masa final obtenida (Marsden & House, 2006).

- **Calcinación**

Los errores en esta etapa suelen ocurrir cuando la temperatura aplicada es inferior a la recomendada, impidiendo la adecuada descomposición de los cloruros metálicos. Sin embargo, la mayor parte de las desviaciones se debe al arrastre de impurezas generado en las etapas anteriores, lo cual dificulta el proceso de calcinación y produce masas finales mayores a las esperadas (Marsden & House, 2006; Monhemius, 1996).

4.2. Resultados del método de Low para la determinación de cobre

Los resultados obtenidos para la determinación de cobre, siguiendo el método de Low, se realizaron bajo condiciones experimentales controladas que son fundamentales para asegurar que las reacciones ocurran de manera correcta.

- **Condiciones de digestión ácida**

Para las digestiones ácidas se emplea un mechero Bunsen, el cual permite calentar una bandeja de acero que contiene arena. Este método posibilita calentar los ácidos de forma indirecta y controlada, reduciendo el riesgo de accidentes.

La condición principal para que ocurra adecuadamente la digestión es que la solución alcance su punto de ebullición, ya que esto acelera las reacciones químicas y mejora la solubilidad de ciertos metales.

- i. **Tiempo promedio de digestión:** El tiempo promedio de digestión es de 10 a 15 minutos entre su inicio y término.
- ii. **Temperatura promedio:** En general, la temperatura alcanzada ronda los 100 °C, a excepción del ácido sulfúrico, el cual requiere temperaturas mayores, entre 250 y 300 °C.

- **Punto de control en la titulación**

En la titulación existen tres puntos de control que determinan el avance del proceso y los pasos a seguir en cada etapa.

- i. **Punto inicial**
El punto inicial se identifica cuando, tras agregar un volumen determinado de yodo, se incorpora el primer indicador, correspondiente al yoduro de potasio (KI). Este provoca que la solución adquiera un color amarillo, indicando la liberación de I_2 .
- ii. **Punto intermedio**
El punto intermedio ocurre cuando, tras el goteo del titulante, la solución se torna incolora. En esta etapa se agrega el indicador de almidón, el cual permite detectar incluso pequeñas cantidades de I_2 , generando un color azul intenso a morado.
- iii. **Punto final**
El punto final se alcanza cuando la solución vuelve a ser completamente incolora, indicando que todo el I_2 liberado ha sido consumido por el titulante.

- Valores obtenidos cobre

A continuación, se presentarán los valores de cobre obtenidos mediante la determinación con el método de Low.

Tabla 3: Resultados experimentales de cobre.

ID Muestra	volumen titulante Consumido (ml)	Mol titulante (gr/PM)	Mol de cobre (gr/PM)	Ley de cobre (%)
M.1.4	0,65	0,000016	0,000016	0,103
M.1.2.C	1,2	0,000030	0,000030	0,191
M.2.4	0,7	0,000018	0,000018	0,111
M.2.3.C	0,8	0,000020	0,000020	0,127
M.3.4	0,85	0,000021	0,000021	0,135
M.3.1.C	0,8	0,000020	0,000020	0,127
M.5.3	1	0,000025	0,000025	0,151
M.5.1.C	0,95	0,000024	0,000024	0,159

- Confiabilidad del método

Para evaluar la confiabilidad del método, se consideran distintos factores que influyen en su correcta ejecución. Entre los más relevantes destacan la estabilidad del yodo, la velocidad de titulación y el uso adecuado de la bureta.

- Estabilidad del yodo

La estabilidad del yodo es un factor crítico. Si el yodo liberado se consume antes de agregar el titulante, se obtendrán lecturas erróneas.

Para comprobar la estabilidad, se debe observar que el color amarillento inicial no se desvanezca sin adición de titulante. Como medida preventiva, puede agregarse un exceso de KI para estabilizar la solución.

- Adecuada velocidad de titulación

La velocidad de titulación debe ser lo más rápida posible. La estabilidad del yodo no es prolongada, y a medida que pasa el tiempo, este puede descomponerse, afectando los resultados.

Por esta razón, la titulación debe realizarse dentro de los 5 minutos posteriores a la adición inicial de KI.

- Uso adecuado de la bureta

La correcta selección de la bureta influye directamente en la precisión del volumen de titulante gastado.

Buretas de gran volumen pueden generar gotas demasiado grandes, afectando la sensibilidad requerida. Se recomienda utilizar buretas acordes al nivel de precisión de la reacción.

- Marca de colores

Los cambios de color son indicadores clave a lo largo de la titulación:

a. Amarillo inicial por el KI, indicando liberación de I_2 .

- b. Color azul intenso o morado con almidón, señalando presencia de I_2 residual.
- c. Desaparición completa del color al finalizar la titulación.

Durante los procedimientos realizados, se observó una adecuada estabilidad del yodo y todas las titulaciones se ejecutaron dentro de los tiempos establecidos, lo que aumenta la confiabilidad del proceso.

Esto no garantiza una titulación perfecta, pero constituye una base sólida para considerar el método como suficientemente estable y replicable bajo las condiciones descritas.

Por último, cabe destacar que en los resultados obtenidos se aprecia una clara tendencia en los valores de ley, los cuales presentan una desviación estándar de 0,028%, pese a las variaciones esperadas en la ley real de las muestras. Este comportamiento puede indicar la presencia de alguna interferencia sistemática en el método, o bien que, bajo ciertos parámetros de ley de cabeza, el procedimiento tiende a entregar valores relativamente constantes, generando un resultado estandarizado.

4.3. Comparación con resultados de laboratorio certificado

Parte de las muestras son mandadas a analizar a un laboratorio externo con el objetivo de determinar los contenidos de oro (Au) y cobre (Cu) presentes en cada muestra trabajada. El laboratorio escogido para realiza estos análisis fue Andes Analytical Assay, el cual determino el cobre y oro presente en las muestras.

4.3.1 Contenido de oro

El oro fue analizado mediante dos metodologías diferenciadas: un primer método aplicado a muestras sin concentrar y un segundo método destinado al análisis de muestras previamente concentradas. En ambos casos, los resultados obtenidos a partir del proceso de cloración fueron comparados con los valores entregados por un laboratorio certificado, con el fin de evaluar la concordancia entre los métodos.

Tabla 4: Comparación resultados de oro experimental vs laboratorio certificado.

Id. Muestra	FA-AA-1E42 Au (g/t)	Masa oro esperada (gr)	Masa final (gr)
M.1	0,70	0,00030	0,679
M.2	0,19	0,00025	1,586
M.3	1,79	0,00137	0,3233
M.5	0,29	0,00030	0,0385

En la Tabla 4 se presentan los resultados correspondientes a las muestras sin concentrar, donde se incluyen las leyes de oro determinadas por el laboratorio, la masa de oro esperada calculada a partir de dichas leyes y considerando la masa de muestra tratada y la masa final obtenida tras el proceso de cloración y calcinación.

Tabla 5: Comparación resultados de concentrados de oro experimental vs laboratorio certificado.

Id. Muestra	FA-AA-1E5g-10_Conc Cu Au (g/t)	Masa oro esperada (gr)	Masa final (gr)
M-1-1 C	1,4	0,00051	0
M-2-2 C	0,5	0,00088	0,2838
M.3.2.c	4,2	0,00216	0,4934
M.5.4.C	1,2	0,00040	0,0212

En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos para las muestras concentradas, incorporando de igual forma la ley de oro entregada por el laboratorio, la masa de oro esperada al finalizar el proceso de cloración y la masa final obtenida luego de la calcinación.

Al analizar ambas tablas, se observa una marcada discrepancia entre las masas de oro esperadas y las masas finales obtenidas experimentalmente. Esta diferencia se presenta tanto en las muestras sin concentrar como en aquellas que fueron sometidas previamente a un proceso de concentración, lo que sugiere que las desviaciones no están asociadas exclusivamente a la etapa de concentración del mineral.

Las diferencias observadas pueden atribuirse a diversas interferencias generadas durante el proceso de cloración y las etapas posteriores, tales como la coprecipitación de otros metales, pérdidas de material durante el filtrado, y la presencia de impurezas que incrementan artificialmente la masa final obtenida tras la calcinación. Estas interferencias afectan de manera significativa la exactitud del método, generando resultados alejados de los valores de referencia entregados por el laboratorio certificado.

En función de los resultados obtenidos, se concluye que la metodología evaluada no presenta un nivel de precisión aceptable para su implementación directa en terreno dentro del contexto de la pequeña minería. Para considerar su aplicación práctica, sería necesario introducir una serie de ajustes técnicos orientados a mejorar la selectividad del proceso, controlar las interferencias y asegurar una cuantificación más precisa del oro presente en las muestras

4.3.2 Contenido de cobre

El cobre fue analizado mediante dos metodologías diferenciadas: un primer método aplicado a muestras sin concentrar y un segundo método destinado al análisis de muestras previamente concentradas. En ambos casos, los resultados obtenidos a partir del método de determinación de Low fueron comparados con los valores entregados por un laboratorio certificado, con el objetivo de evaluar la concordancia entre ambas aproximaciones analíticas.

En la Tabla 6 se presentan los resultados correspondientes a las muestras sin concentrar, donde se incluyen las leyes de cobre determinadas por el laboratorio certificado y las leyes obtenidas experimentalmente mediante titulación yodométrica.

Tabla 6: Comparación ley de cobre experimental vs laboratorio certificado.

Muestras	Ley de cobre (%)	
	Medido	DA-AA-4A-HF_1E01
M.1	0,103	0,266
M.2	0,111	0,422
M.3	0,135	0,36
M.5	0,151	0,29

Por su parte, en la Tabla 7 se muestran los resultados correspondientes a las muestras concentradas. En este caso, se incluyen las leyes de cobre obtenidas experimentalmente y los valores reportados por el laboratorio. Sin embargo, es importante destacar que los resultados del laboratorio no son concluyentes, dado que el límite de detección del método empleado es superior al 5 % de cobre. Esto implica que las leyes reales de las muestras concentradas se encuentran por debajo de dicho umbral, razón por la cual el laboratorio únicamente reporta valores menores a 5 %, sin una cuantificación precisa.

Tabla 7: Comparación ley concentrado de cobre experimental vs laboratorio certificado.

Muestras	Ley de cobre (%)	
	Medido	VOL_VOL_T2-LD5 Cu-T
M.1.2.C	0,191	<5,0
M.2.3.C	0,127	<5,0
M.3.1.C	0,127	<5,0
M.5.1.C	0,159	<5,0

Del análisis conjunto de ambas tablas se observa que los valores de cobre obtenidos experimentalmente presentan una tendencia a concentrarse en un rango aproximado entre 0,10 % y 0,19 %, lo que podría indicar la presencia de una interferencia sistemática en el método aplicado. Esta tendencia sugiere que el procedimiento tiende a entregar valores similares de ley, con independencia de la ley real del mineral. En el caso de las muestras sin concentrar, se evidencia además una clara discrepancia entre los valores medidos experimentalmente y los valores determinados por el laboratorio certificado.

Las diferencias observadas pueden atribuirse a diversos factores que influyen en el resultado final, tales como la presencia de impurezas que interfieren en la titulación, pérdidas de cobre durante las etapas de filtrado y trasvasije, así como posibles desviaciones asociadas al control de pH y a la liberación incompleta de yodo durante el procedimiento yodométrico.

En función de los resultados obtenidos, se concluye que la metodología evaluada no presenta un nivel de precisión suficiente para su implementación directa en terreno dentro del contexto de la pequeña minería. No obstante, en comparación con el método aplicado para la determinación de oro, el procedimiento de Low para cobre presenta un desempeño relativamente superior, al menos en términos de detección de la presencia del metal. Aun así, su aplicación práctica requeriría la introducción de ajustes técnicos orientados a mejorar el control de las variables críticas del proceso y reducir las fuentes de error identificadas, antes de considerar su implementación operativa en faenas de pequeña minería.

4.4. Cálculo y análisis del error experimental

Para analizar los resultados obtenidos en las muestras, los valores experimentales se comparan con los valores reportados por el laboratorio certificado. Esto permite evaluar el comportamiento del método experimental frente a un valor de referencia.

Para ello, se utilizan dos tipos de errores. En primer lugar, el error absoluto, el cual corresponde a la diferencia entre la masa obtenida experimentalmente y la masa real de oro presente en la muestra, indicando cuán lejos se encuentra el valor medido del valor esperado. En segundo lugar, se emplea el error relativo, expresado como porcentaje, que permite dimensionar la magnitud del error en relación con la cantidad real de oro.

- Error absoluto

El error absoluto se define como la diferencia entre el valor medido y el valor real (tomado como referencia del laboratorio) para cada muestra de forma individual:

$$\text{Error absoluto} = |\text{Valor medido} - \text{Valor real}| \quad (18)$$

- Error relativo porcentual

El error relativo (%) se calcula como:

$$\text{Error relativo (\%)} = \frac{\text{Error absoluto}}{\text{Valor real}} \times 100 \quad (19)$$

Este indicador permite evaluar la magnitud del error en relación con el valor real y facilita la comparación entre muestras de distinta concentración.

4.4.1 Error experimental del oro

A continuación, se presenta una tabla con los valores obtenidos y los valores esperados, con el fin de obtener los errores correspondientes:

Tabla 8: Tabla resultados errores del oro.

Muestra	Masa final (gr)	Masa real (gr)	Error absoluto	error relativo %
M.1.3	0,679	0,00030	0,68	223846
M.1.1.C	0	0,00030	0,00	Error
M.2.1	1,5857	0,00025	1,59	645429
M.2.2.C	0,2838	0,00018	0,28	157567
M.3.3	0,3233	0,00216	0,32	14835
M.3.2.c	0,4934	0,00137	0,49	35957
M.5.2	0,0385	0,00030	0,04	12737
M.5.4.C	0,0212	0,00040	0,02	5205

Cada muestra fue analizada sin replicación, debido a que el proceso de cloración requiere trabajar con la muestra completa, lo que impide obtener porciones más pequeñas para análisis adicionales. Esto se debe principalmente al elevado consumo de reactivos asociado al procedimiento, sumado

a la limitada disponibilidad de estos insumos durante el desarrollo del trabajo. Por este motivo, no fue posible realizar un mayor número de repeticiones, y el total de análisis efectuados no supera las ocho muestras. La baja cantidad de replicaciones limita la capacidad para estimar adecuadamente la variabilidad del método, lo cual es esencial para una evaluación estadística robusta de la precisión analítica (Miller & Miller, 2018).

Para mejorar la interpretación de los resultados, se calculó la desviación estándar, obteniéndose un valor de 0,528 g para el error absoluto y 221408 % para el error relativo. Estos valores evidencian una alta variabilidad en las mediciones, influenciada principalmente por el hecho de que la masa real de oro se encuentra en niveles traza. En consecuencia, cualquier fluctuación mínima durante el procedimiento produce discrepancias amplificadas. La desviación estándar, por tanto, se vuelve un indicador clave para evaluar la precisión del procedimiento aplicado (Miller & Miller, 2018; Eurachem, 2014).

Para este caso la muestra no llega a ser suficientemente representativas, ya que el tamaño de muestra es insuficiente y adicionalmente se observa una variabilidad muy alta en las masas experimentales vs los valores esperados de oro, lo que genera los errores relativos extremadamente altos. Es por esto por lo que para obtener mejores estimaciones es mejor implementar un número mayor de muestras.

Se pueden identificar una serie de errores que pueden influir en los resultados generando que los valores obtenidos se alejan de los valores esperados, principalmente se identifica como fuentes de errores la precipitación, filtrado y calcinación. Como las principales fuentes de error.

- i. Precipitación: Durante esta etapa, es posible que no solo precipite el oro, sino también otros metales presentes en la matriz mineral. Esto puede generar precipitados mixtos que aumentan artificialmente la masa final, afectando la exactitud de la cuantificación. La presencia de impurezas o precipitados secundarios es una causa frecuente de sobrestimación en métodos gravimétricos (Skoog, Holler & Crouch, 2014).
- ii. Filtrado: El precipitado de oro puede presentar tamaños extremadamente pequeños, lo cual dificulta su retención si no se utiliza un papel filtro adecuado. La pérdida de precipitado en esta etapa disminuye la masa final, mientras que la saturación del filtro puede retener sólidos no deseados, aumentando la masa obtenida. Ambos fenómenos afectan negativamente la precisión del análisis.
- iii. Calcinación: Si la temperatura de calcinación no es la adecuada, algunos compuestos no se descomponen completamente y permanecen como residuos impuros en el precipitado final, generando masas superiores a las reales. Por ello, la calcinación controlada es fundamental en procedimientos gravimétricos (Skoog, Holler & Crouch, 2014).

4.4.2 Error experimental del cobre

A continuación, se presenta una tabla con los valores obtenidos y los valores esperados, con el fin de obtener los errores correspondientes:

Tabla 9: Resultados errores ley de cobre.

Muestras	Ley de cobre (%)		error absoluto	error relativo (%)
	Medido	Real		
M.1.4	0,103	0,266	0,163	61,180
M.1.2.C	0,191	<5,0		
M.2.4	0,111	0,422	0,311	73,648
M.2.3.C	0,127	<5,0		
M.3.4	0,135	0,36	0,225	62,490
M.3.1.C	0,127	<5,0		
M.5.3	0,151	0,29	0,139	47,958
M.5.1.C	0,159	<5,0		

En primera instancia, es importante señalar que el valor real informado por el laboratorio certificado no se conoce con exactitud para la mitad de las muestras, debido a que el método analítico empleado por dicho laboratorio no es capaz de detectar leyes de cobre inferiores al 5 %. Por esta razón, solo cuatro muestras fueron aptas para el análisis de errores, lo que disminuye significativamente la representatividad del conjunto.

En este caso, sí se realizaron replicaciones, pero únicamente para ajustar la concentración del titulante. Inicialmente, la concentración empleada generaba lecturas de volumen insuficientemente precisas, por lo que fue necesario ajustar este parámetro. Los valores presentados en la tabla corresponden a la iteración final del proceso de titulación. En cuanto a la digestión ácida, no fue posible realizar duplicados debido al consumo elevado de reactivos, que resultó ser una limitante para llevar a cabo más repeticiones.

Para mejorar la interpretación de los resultados, se calculó la desviación estándar del conjunto de muestras, obteniéndose un valor de 0,077 % para el error absoluto y 11 % para el error relativo. La baja desviación estándar del error absoluto indica que los valores medidos no difieren excesivamente entre sí. Sin embargo, la desviación del error relativo es mayor, lo que evidencia una dispersión significativa respecto al valor real. Esto apunta a que el método presenta baja precisión en la estimación de leyes de cobre, lo cual puede deberse a diversas fuentes de error inherentes al proceso analítico.

Al igual que en el caso del oro, los resultados no logran ser representativos. Al descartar la mitad de las muestras por no contar con un valor certificado adecuado, se reduce aún más el tamaño muestral, disminuyendo la validez estadística. Por lo tanto, para obtener estimaciones más confiables, es necesario incrementar el número de muestras y asegurar que las determinaciones reales estén dentro del rango detectable por el método analítico del laboratorio certificado.

Diversas discrepancias observadas pueden deberse a factores presentes durante la toma de muestra, digestión ácida, filtrado e interferencias químicas, los cuales se detallan a continuación:

- Toma de muestra
El proceso de roleo y cuarteo es esencial para garantizar la homogeneidad del material. Cualquier alteración en este procedimiento puede generar que la porción seleccionada

no represente adecuadamente al total del mineral, afectando directamente la precisión de los resultados analíticos. (Pitard, 1993).

- **Digestión ácida**
Una digestión incompleta puede impedir la solubilización total del cobre presente en la matriz mineral, generando una subestimación de la ley real. La eficiencia de la digestión depende de la acidez, temperatura y proporción de reactivos.
- **Filtrado**
La formación de partículas extremadamente finas puede ocasionar que parte del cobre disuelto o particulado no sea retenido por el filtro, lo que disminuye artificialmente la concentración medida. La saturación del filtro o el tipo de papel utilizado también influyen en la recuperación.
- **Interferencias químicas**
Existen diversos elementos que pueden interferir en el adecuado desarrollo de los procesos químicos necesarios para obtener resultados confiables. En particular, la presencia de ciertos cationes o aniones puede afectar etapas críticas como la precipitación o la titulación, generando errores que se arrastran hasta el resultado final.

4.5. Análisis económico

En este estudio, además de centrarse en el desarrollo experimental para la obtención de leyes minerales, se debe considerar la viabilidad económica. En particular, se analizan los costos asociados a cada muestra, evaluando si resulta más accesible que enviar las muestras a laboratorios externos. Por esta razón, a continuación, se presentan todos los costos involucrados en el procesamiento de cada muestra.

4.5.1 Costos equipos Conminución

Como costos iniciales, se debe considerar la implementación de los equipos descritos en el proceso de conminución del mineral, los cuales comprenden dos equipos principales: el chancador manual y el molino de barras. Ambos equipos fueron fabricados y desarrollados para cumplir con los requerimientos de la pequeña minería.

A continuación, se presentan los costos de fabricación de cada equipo:

Tabla 10: Costos equipos de conminución.

Ítems	Descripción	Costo \$CLP
Chancador	Un cilindro de hierro	
Molino	Fabricación de molino a medida (solo estructura)	1.400.000
Motor 1 Hp	Motor trifásico con reductor y VDF ABB	850.000
Instalación eléctrica	El costo asociado a la instalación de todo el circuito eléctrico	500.000
TOTAL	Incluye todos los ítems	2.750.000

Como se aprecia en la tabla 10, el costo de fabricación de los equipos sin los componentes eléctricos es de \$1.400.000 CLP. Incluyendo el sistema eléctrico, que comprende un motor trifásico

junto con un variador de frecuencia (VDF) para regular las revoluciones del motor, y la mano de obra para la instalación del tablero eléctrico que conecta todo el sistema con el molino, el costo total asciende a \$2.750.000 CLP.

Esta inversión inicial no resulta elevada y es accesible para el pequeño minero. Cabe destacar que estos equipos constituyen la base para implementar la metodología experimental utilizada en este estudio. Además, los valores presentados son referenciales, ya que pueden variar dependiendo de diversos factores.

4.5.2 Costos Equipo laboratorio

Existen costos asociados a los insumos necesarios para realizar adecuadamente los procedimientos de análisis de las muestras. Estos insumos corresponden a elementos que no están directamente relacionados con el costo de la muestra, pero permiten desarrollar la metodología de manera segura, eficiente y confiable. Los equipos fueron seleccionados considerando su disponibilidad para el público general, lo que facilita su adquisición por parte de los pequeños mineros.

A continuación, se detallan los costos asociados a cada metodología:

Tabla 11: Costo insumos y equipos para determinación de oro.

Items	Descripción	Costo \$ CLP
Matraz de balón	Con una capacidad de 500 ml	7.270
Lavador de gases	Recipiente de 500 ml para filtrar impureza en los gases	63.000
Vaso precipitado	Capacidad de 2 litros	13.423
Vaso precipitado	Capacidad de 250 ml	3.422
Matraz Erlenmeyer	Capacidad de 1 litros	5.582
Matraz Erlenmeyer	Capacidad de 250 ml	3.800
Embudo Büchner	110 mm de diámetro	18.000
Bureta	Para titulación de 10 ml	23.627
Pinza doble bureta	Sujetador para bureta	14.900
Agitador mecánico	Agitadora para mezclas de grandes volúmenes	444.708
Horno de calcinación	Temperatura máximo 1100°C	1.190.000
Balanza analítica	Balanza con una precisión de 0.0001 g	1.857.673
Agitador magnético	Mezclador y calefactor para solución pequeñas	188.000
Medidor de pH	Medidor de bolsillo para medir el pH	169.830
Bomba de vacío	Bomba que genera presión negativa para filtrado	350.000
Manta calefactora	Calentador de matraz	150.000
Crisol de porcelana	Crisol de porcelana para calcinación de muestra	5.000
Pinza para crisol	Pinza para manipular el crisol caliente	9.900
Barra agitadora	Barras magnéticas para el agitador magnético	5.490
Papel filtro sin ceniza	Papel filtro el cual no deja ceniza al quemarse	50.950
Papel filtro	Papel para filtro convencional	10.560
Impresión 3D grande	Fabricación de recipiente grande para cloración	10.000
Impresión 3D chico	Fabricación de recipiente chico para cloración	10.000
bandeja acero inoxidable	Bandeja para calentar	6.903
Tapón de goma rígida	Tapón para filtrado	696
TOTAL		4.612.734

Como se aprecia en la tabla 11, el costo total de los insumos y equipos necesarios para el análisis de oro asciende a \$4.612.734 CLP. Este valor representa la inversión inicial requerida para implementar la metodología, excluyendo los reactivos químicos. En términos generales, se trata de un monto abordable dentro del contexto de la pequeña minería.

Tabla 12: Costo insumos y equipos para determinación de cobre.

Items	Descripción	Costo \$ CLP
Matraz Erlenmeyer	Capacidad de 1 litros	5.582
Matraz Erlenmeyer	Capacidad de 250 ml	3.422
Embudo Büchner	110 mm de diámetro	18.000
Matraz aforado 50 ml	Para soluciones volumétricas capacidad de 50 ml	7.036
Matraz aforado 25	Para soluciones volumétricas capacidad de 25 ml	6.069
Bureta	Para titulación de 10 ml	23.627
Pinza doble bureta	Sujetador para bureta	14.900
Agitador mecánico	Agitadora para mezclas de grandes volúmenes	444.708
Balanza analítica	Balanza con una precisión de 0.0001 g	1.857.673
Agitador magnético	Mezclador y calefactor para solución pequeñas	188.000
Medidor de mV	Medidor de bolsillo para medir el potencial	286.000
Medidor de pH	Medidor de bolsillo para medir el pH	169.830
Bomba de vacío	Bomba que genera presión negativa para filtrado	350.000
Barra agitadora	Barras magnéticas para el agitador magnético	5.490
Papel filtro	Papel para filtro convencional	10.560
bandeja acero inoxidable	Bandeja para calentar	6.903
Mechero bunsen	Mechero a gas para calentar muestras	30.000
Tapón de goma rígida	Tapón para filtrado	696
TOTAL		3.428.496

Como se aprecia en la tabla 12, el costo total de los insumos y equipos necesarios para la determinación de cobre es de \$3.428.496 CLP, representando también una inversión inicial factible para labores de pequeña minería.

Muchos de los implementos mencionados son compartidos entre ambos procedimientos; por ello, al unificar los valores se obtiene un costo total de \$4.941.839 CLP, monto que representa la implementación completa de ambas metodologías analíticas (véase anexos para referencia).

Estos valores pueden variar, ya que varios de los equipos pueden adquirirse en versiones más económicas o de segunda mano, reduciendo la inversión inicial. No obstante, se recomienda priorizar equipos certificados para asegurar resultados confiables, reproducibles y técnicamente válidos en el análisis de las muestras.

4.5.3 Costos reactivos asociados

Para completar los análisis de cobre y oro, se utilizan distintos reactivos químicos esenciales para garantizar la validez y confiabilidad de los resultados. La selección de los reactivos considera su disponibilidad comercial y las especificaciones técnicas necesarias para cada procedimiento. A continuación, se presentan los reactivos empleados, junto con la cantidad en que se venden y su costo aproximado:

Tabla 13: Costo de reactivos.

Compuesto	Cantidad	Costo \$ CLP
Ácido clorhídrico HCl (37%)	1 L	34.391
Oxido de manganeso MnO_2	1 kg	34.391
Agua Oxigenada H_2O_2 (50%)	1 L	8.000
Cromato potásico K_2CrO_4	500 gr	26.660
Nitro de plata $AgNO_3$	50 gr	90.000
Hidróxido de sodio $NaOH$	1 kg	12.138
Ácido nítrico HNO_3	1 L	14.000
Ácido sulfúrico H_2SO_4	1L	22.610
Ácido acético (90%)	1 L	18.754
Amoníaco NH_3 (25%)	1 L	8.330
Agua de bromo	500 ml	91.000
Yoduro de potasio KI	100 gr	46510
Sulfito de sodio Na_2SO_3	1 kg	12.840
Tiosulfato de sodio $Na_2S_2O_3$	1 kg	12.000
Total		431.624

Es importante destacar que el costo total estimado se calculó considerando el conjunto completo de reactivos, sin diferenciar entre las cantidades específicas utilizadas en cada metodología. Algunos reactivos, como el hidróxido de sodio o el sulfito de sodio, son empleados en más de un procedimiento, por lo que la cantidad comercial disponible permite realizar múltiples experimentos con la misma inversión inicial.

El valor total de \$431.624 CLP corresponde a precios comerciales de referencia y representa un estimado general del costo de reactivos por lote completo de análisis (véase anexos para referencia).

4.5.4 Costos por muestra

El costo por muestra se determina considerando únicamente la cantidad de reactivos empleados en el análisis de una sola muestra, sin incluir el costo de equipos e insumos de laboratorio. Este valor permite estimar el costo directo de un análisis químico y evaluar la viabilidad económica de realizar el procedimiento internamente frente a enviarlo a laboratorios externos, proporcionando al pequeño minero opciones accesibles y confiables.

Los costos se presentan por separado para el análisis de oro y el análisis de cobre, debido a que cada procedimiento utiliza diferentes cantidades de reactivos.

- Oro
Como se aprecia, el costo de reactivos por muestra de oro es de \$14.606 CLP, un valor accesible y razonable para la pequeña minería, considerando que incluye reactivos de alta especificación.

Tabla 14: Costo por muestra de oro.

Compuesto	Cantidad por muestra	Costo \$ CLP
Ácido clorhídrico HCl (37%)	200 ml	6.878
Oxido de manganeso MnO_2	60 gr	2.063
Agua Oxigenada H_2O_2 (50%)	100 ml	800
Cromato potásico K_2CrO_4	0,15 gr	8
Nitro de plata $AgNO_3$	2,6 gr	4.680
Hidróxido de sodio $NaOH$	5 gr	61
Sulfito de sodio Na_2SO_3	9 gr	116
Total		14.606

- Cobre

Tabla 15: Costo por muestra de cobre.

Compuesto	Cantidad por muestra	Costo \$ CLP
Ácido clorhídrico HCl (37%)	25 ml	860
Ácido nítrico HNO_3	25 ml	350
Ácido sulfúrico H_2SO_4	85ml	1.922
Ácido acético (90%)	20 ml	375
Amoniaco NH_3 (25%)	20 ml	167
Agua de bromo	25 ml	4.550
Yoduro de potasio KI	1 gr	465
Hidróxido de sodio $NaOH$	8 gr	97
Tiosulfato de sodio Na_2SO_3	0.0034 gr	1
Total		8.787

El costo de reactivos por muestra de cobre es de \$ 8.787 CLP, valor inferior al del análisis de oro, lo que refuerza la viabilidad económica de su implementación en pequeña minería.

Se debe considerar que estos costos son promedios, ya que el consumo de ciertos reactivos puede variar ligeramente entre muestras. Sin embargo, estas estimaciones ofrecen una referencia clara del gasto directo por análisis, permitiendo al minero planificar sus recursos de manera eficiente.

4.5.5 Costos análisis laboratorio certificado

En el laboratorio certificado Andes Analytical Assay se realizan un total de cuatro tipos de análisis, dependiendo del tipo de muestra y del mineral a evaluar. En general, estos se dividen en análisis para muestras sin procesar y análisis para muestras concentradas.

A continuación, se presentan los costos para el análisis de oro y cobre:

- Costos por muestras de oro

Como se aprecia en la tabla 16, los códigos correspondientes al tipo de análisis implementado se encuentran detallados en los anexos.

Se observa que, independiente del análisis realizado, ambos presentan el mismo costo, equivalente a \$17.814 CLP. Este valor considera que la muestra se encuentra en condiciones óptimas para su análisis.

Tabla 16: Costo análisis de oro laboratorio certificado.

Código de análisis	FA-AA-1E42	FA-AA-1E5g-10_Conc Cu
Valor por muestra (UF)	0,45	0,45
Valor por muestra (CLP)	17.814	17.814

- Costo por muestra de cobre

Tabla 17: Costo análisis de cobre laboratorio certificado.

Código de análisis	DA-AA-4A-HF_1E01	VOL_VOL_T2-LD5
Valor por muestra (UF)	0,4	0,95
Valor por muestra (CLP)	15.835	37.608

Como se aprecia, los códigos correspondientes al tipo de análisis se encuentran detallados en los anexos.

En este caso, existe una diferencia significativa entre los valores de cada tipo de análisis. Es importante señalar que, en ambos procedimientos, se emplea un método de digestión ácida para realizar la determinación.

4.5.6 Costos experto en análisis químico

Para la correcta ejecución de los procesos químicos descritos en este estudio, es fundamental contar con personal certificado y debidamente capacitado. La precisión y confiabilidad de los resultados dependen en gran medida de la experiencia y formación del analista, por lo que se considera la incorporación de un profesional con competencias acreditadas en química, capaz de realizar los análisis en tiempo real dentro de la operación minera.

Se proyecta la contratación de un técnico o químico analista bajo una jornada laboral de 20 horas semanales, cuya función principal será la aplicación de las metodologías analíticas implementadas en este trabajo, así como el control de calidad básico asociado al procesamiento de las muestras.

El sueldo mensual promedio para un profesional con este perfil se estima en aproximadamente \$700.000 CLP, considerando una experiencia laboral previa de entre 2 y 3 años, requisito habitual para asegurar un manejo adecuado de reactivos, equipos e interpretaciones analíticas. Este nivel de experiencia permite minimizar errores operativos, garantizar la correcta aplicación de los procedimientos y asegurar la trazabilidad de los resultados.

4.5.7 Comparativa entre costos

A continuación, se comparan los costos por muestra entre el laboratorio certificado y el valor experimental; para este último, solo se consideran los costos asociados a los reactivos.

- **Comparativa del oro**
Para obtener el valor por muestra se consideran los costos de los reactivos y la remuneración del técnico analítico encargado de ejecutar los ensayos. En el caso del oro, se estima que es posible procesar en promedio dos muestras por día, lo que corresponde a un costo de 16.200 CLP por muestra.

Como se aprecia en la Tabla 18, ambos métodos presentan una diferencia del 73 % entre el valor experimental y el costo del laboratorio certificado. Esto implica que el análisis experimental resulta aproximadamente un 73 % más caro que el realizado en un laboratorio certificado. En consecuencia, no se identifica un beneficio económico en la implementación de estos ensayos para la determinación de oro.

Tabla 18: Comparativa de costo análisis de oro.

Método de análisis	Valor por muestras (CLP)	Valor experimental (CLP)	Diferencia (%)
FA-AA-1E42	17.814	30.806	-73
FA-AA-1E5g-10_Conc Cu	17.814	30.806	-73

- **Comparativa del cobre**
Para estimar el costo por muestra se consideran los gastos asociados al consumo de reactivos y el tiempo del técnico analítico encargado de ejecutar los ensayos. En el caso del oro, se estima que es posible procesar en promedio seis muestras por día, lo que equivale a un costo de \$5.400 CLP por concepto de mano de obra.

Como se aprecia en la Tabla 19, existe una diferencia moderada entre el valor obtenido mediante el análisis experimental y el reportado por el laboratorio certificado para el primer caso, mientras que en el segundo caso la diferencia es considerablemente mayor. En términos específicos, las discrepancias alcanzan aproximadamente un 10 % y un 62 %, respectivamente. Desde la perspectiva económica, no se observa una mejora significativa en los costos al comparar el análisis experimental con el servicio del laboratorio certificado. La única excepción corresponde al método de análisis VOL_VOL_T2-LD5, donde se evidencia un ahorro económico más relevante.

Tabla 19: Comparativa de costo análisis de cobre.

Método de análisis	Valor por muestras (CLP)	Valor experimental (CLP)	Diferencia (%)
DA-AA-4A-HF_1E01	15.835	14.187	10
VOL_VOL_T2-LD5	37.608	14.187	62

Es importante recalcar que esta comparativa no representa un promedio general de los costos de la industria, sino que constituye un primer acercamiento a los costos actuales. Adicionalmente, se debe destacar que, en el caso del cobre, la disparidad entre ambos métodos genera una diferencia notoria en el ahorro obtenido. En cambio, para el oro esto no ocurre, debido a que ambos métodos comparten el mismo valor de análisis.

4.5.8 Resumen de costos implementados

En este trabajo se evaluaron dos tipos de costos diferenciados. Por una parte, se consideran los costos asociados a la implementación inicial del método, los cuales incluyen la adquisición de equipos, insumos y la contratación de personal especializado. Por otra parte, se analizan los costos variables asociados al análisis de una muestra individual.

En la Tabla 20 se detallan los costos de implementación necesarios para poner en marcha el procedimiento analítico, los cuales comprenden los equipos de conminución, los equipos e insumos generales de laboratorio, los reactivos utilizados y el costo asociado a un técnico de análisis.

Tabla 20: Costos de implementación.

Costo de implementación	Valor (\$CLP)
Equipos conminución	2.750.000
Equipos e insumos generales	4.941.839
Costos reactivos	431.624

Como se aprecia en la Tabla 20, estos costos corresponden a la inversión inicial requerida para implementar los equipos, adquirir los insumos y disponer del personal necesario para el desarrollo de los análisis propuestos.

En la Tabla 21 se presentan los costos asociados al análisis por muestra, comparando los valores obtenidos mediante la metodología experimental con aquellos correspondientes a análisis realizados en un laboratorio certificado.

Tabla 21: Costo análisis por muestra.

Costo por muestra	Valor (\$CLP)
Oro Experimental	34.014
Oro FA-AA-1E42	17.814
Oro FA-AA-1E5g-10_Conc Cu	17.814
Cobre Experimental	14.187
Cobre DA-AA-4A-HF_1E01	15.835
Cobre VOL_VOL_T2-LD5	37.608

La información presentada en la Tabla 21 permite comparar no solo los costos entre la metodología experimental y los análisis realizados en laboratorios certificados, sino también evidenciar las diferencias de costo existentes entre la determinación de oro y cobre. Estos resultados constituyen un insumo relevante para evaluar la viabilidad económica de la implementación de los métodos propuestos en el contexto de la pequeña minería.

4.6. Evaluación técnica de los métodos estudiados

Se analizará la viabilidad de la implementación de estos métodos considerando todos los aspectos mencionados, desde los costos asociados a los reactivos hasta los resultados obtenidos, con el fin de comprender el comportamiento real de las metodologías estudiadas.

En primera instancia, ambos métodos requieren el uso de reactivos que implican un costo para su aplicación. En el caso del oro, el reactivo más costoso es el nitrato de plata, ya que, al contener plata en su composición, presenta un valor significativamente mayor que el resto de los reactivos empleados. Sin embargo, en términos generales, los demás insumos no presentan costos elevados. Para el caso del cobre, el reactivo de mayor costo corresponde al agua de bromo, la cual no solo es más cara en comparación con otros reactivos, sino que además es de difícil adquisición en Chile, lo que podría representar una limitante para la implementación práctica del método.

La realización de ambas metodologías requiere una serie de equipos, que abarcan desde implementos básicos como vasos precipitados hasta instrumentos más especializados, como el horno de calcinación. No obstante, estos equipos no corresponden a tecnología altamente compleja ni demandan un nivel elevado de especialización para su operación. Por lo tanto, desde la perspectiva del equipamiento, estos métodos no representan un impedimento significativo para su implementación en la pequeña minería.

Donde se requiere mayor cuidado y resguardo es en la manipulación de los reactivos químicos utilizados, ya que muchos de ellos presentan riesgos para la salud y la seguridad de los operadores. Por esta razón, es indispensable contar con un especialista en análisis químico capacitado para trabajar de manera segura y adecuada con estos reactivos. Este requisito es de gran relevancia, ya que la falta de experiencia puede derivar en accidentes con consecuencias graves. En este sentido, la disponibilidad de personal calificado puede constituir una limitante para la implementación accesible de estas metodologías en zonas donde opera la pequeña minería.

En relación con los resultados obtenidos, tanto para el caso del oro como del cobre, estos no fueron satisfactorios. Tal como se evidenció en los análisis de error, no se alcanzó un nivel de precisión aceptable. Particularmente, en el caso del oro, las interferencias en la masa obtenida fueron tan significativas que los resultados prácticamente no permiten confirmar la presencia de oro en las muestras, lo que evidencia deficiencias importantes en la metodología aplicada. Para el cobre, si bien los resultados no son suficientemente representativos ni precisos, al menos se confirma la presencia del metal. No obstante, se observa una tendencia marcada hacia valores cercanos a 0,14%, lo que podría indicar la existencia de una interferencia sistémica que afecta los valores obtenidos.

5. Conclusión

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar técnica y económicamente la implementación de metodologías experimentales de bajo costo para la determinación de oro y cobre en faenas de pequeña minería. Los resultados obtenidos constituyen un primer acercamiento a la aplicabilidad de estos métodos en condiciones reales de terreno. Sin embargo, la evidencia experimental demuestra que, en su estado actual, las metodologías evaluadas presentan errores elevados y limitaciones significativas, lo que impide su aplicación directa en campo. Estas deficiencias se asocian principalmente a interferencias no controladas, alta variabilidad en las condiciones de reacción y restricciones inherentes al diseño experimental.

Por el contrario, la metodología de cloración para la determinación de oro arrojó resultados ampliamente alejados de los valores de referencia, descartando su viabilidad técnica en el estado actual. La presencia de impurezas, la elevada sensibilidad del proceso y la acumulación de errores en las etapas sucesivas afectaron de manera crítica la confiabilidad del método, evidenciando la necesidad de un rediseño integral antes de cualquier aplicación práctica.

En el caso del método de Low para la determinación de cobre, se observó una funcionalidad conceptual adecuada, obteniéndose resultados del mismo orden de magnitud que los reportados por un laboratorio acreditado. No obstante, la alta dispersión y la baja reproducibilidad evidencian una precisión insuficiente, lo que limita su confiabilidad. Aun así, mediante un mayor control de interferencias y condiciones analíticas, este método podría considerarse como una herramienta preliminar para la estimación de la ley de cobre en faenas sin instrumental especializado.

Un factor determinante en los resultados fue la alta heterogeneidad de las muestras de pequeña minería, la cual incrementó la dispersión analítica. La limitada replicación experimental, asociada a restricciones de muestra y reactivos, acentuó los errores y redujo la validez estadística de las estimaciones, haciendo necesaria la repetición de los ensayos bajo condiciones más controladas y con un mayor número de réplicas.

La comparación con técnicas industriales como AAS, ICP-OES, ICP-MS y XRF confirma que las metodologías evaluadas presentan desventajas en precisión, sensibilidad y reproducibilidad. No obstante, su bajo costo y simplicidad operativa permiten considerarlas, con cautela, como herramientas de preevaluación, siempre que no se planteen como sustitutos de análisis certificados.

Adicionalmente, se identificaron riesgos operacionales relevantes asociados al uso de reactivos peligrosos, así como la necesidad de una adecuada gestión de residuos, lo que representa una limitante adicional para su implementación en pequeña minería.

Desde el punto de vista económico, las metodologías evaluadas no representan una mejora significativa. En el caso del oro, el valor experimental es considerablemente mayor que el del laboratorio certificado. Para el cobre se observa una reducción de costos, pero esta no alcanza un nivel económicamente relevante. En consecuencia, no se identifica un beneficio económico real que permita justificar la aplicabilidad de estos métodos, especialmente considerando otros factores críticos como la baja precisión obtenida.

En síntesis, los resultados indican que las metodologías estudiadas no cumplen actualmente con los requisitos de precisión y reproducibilidad necesarios para su aplicación en terreno, debido al alto error experimental observado. Sin embargo, presentan potencial como herramientas preliminares de bajo costo, condicionado a mejoras sustanciales en el control experimental, la seguridad operativa y el diseño metodológico, antes de considerar su viabilidad técnica y económica en la pequeña minería chilena.

6. Bibliografía

- Bascompta, M., et al. (2020). *Sustainable mineral processing practices*. Springer.
- Bonilla Sanabria, O. D. (2008). *Obtención de oro a partir de cloruro de oro (III) utilizando peróxido de hidrógeno como agente reductor en el proceso de refinación química de la empresa Produmin S.A., Machala, Ecuador*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Christian, G. D., & Dasgupta, P. K. (2014). *Analytical chemistry* (7th ed.). Wiley.
- Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). (2024). *Caracterización de la pequeña y mediana minería en Chile* [Presentación en PowerPoint]. Dirección de Estudios y Políticas Públicas. <https://www.cochilco.cl>
- Donoso R., F. (2024). *Pequeña y mediana minería* [Presentación en PowerPoint]. Sociedad Nacional de Minería (SONAMI). <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2024/03/PPT-SONAMI-14-03-2024.pdf>
- Emery-Trindade, R., & Barbosa-Filho, O. (2002). *Extração de ouro: princípios, tecnologia e meio ambiente*. Diagrama Eh–pH do sistema ouro-cloro-água a 25 °C ([Cl] = 0,01 M; [Au] = 5×10^{-5} M) (Hyskey & Atlury, 1988). Revista/Capítulo de libro. Recuperado de https://www.researchgate.net/figure/Figura-8-Diagrama-Eh-pH-do-sistema-ouro-cloro-agua-a-25-o-C-Cl-0-01M-Au-5x10-5_fig27_277076949
- Eurachem. (2014). *Quantifying uncertainty in analytical measurement* (3rd ed.).
- Fleming, C. A. (1992). Hydrometallurgy of precious metals. *Minerals Engineering*, 5(9), 999–1010.
- Gupta, A., & Yan, D. (2016). *Mineral processing design and operations*. Elsevier.
- Habashi, F. (1993). *Extractive metallurgy*. CRC Press.
- Habashi, F. (1999). *Hydrometallurgy: Fundamentals and applications*. Métallurgie Extractive Québec.
- Harris, D. C. (2016). *Quantitative chemical analysis* (9th ed.). W. H. Freeman.
- Hilson, G. (2002). The sustainability of small-scale mining in developing countries. *Resources Policy*, 28(3–4), 131–142.
- Jenkins, R. (1999). *X-ray fluorescence spectrometry* (2nd ed.). Wiley-Interscience.
- Marsden, J. O., & House, C. I. (2006). *The chemistry of gold extraction* (2nd ed.). SME.
- Miller, J. N., & Miller, J. C. (2018). *Statistics and chemometrics for analytical chemistry* (7th ed.). Pearson.
- Monhemius, A. J. (1996). Refractory gold ores: Mineralogical characteristics and treatment options. *Minerals Engineering*, 9(5), 513–526.
- National Institute for Occupational Safety and Health. (2020). *Ammonia: IDLH concentrations*.
- Pitard, F. F. (1993). *Theory of sampling and sampling practice*. CRC Press.
- Potts, P. J. (2003). *A handbook of silicate rock analysis*. Springer.
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2014). *Principios de análisis instrumental*. Cengage Learning.

- Skoog, D. A., West, D. M., & Holler, F. (1996). *Fundamentals of analytical chemistry*. Saunders College Publishing.
- Sociedad Nacional de Minería (SONAMI). (2014). *Importancia de la pequeña y mediana minería en Chile*. <https://sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2016/03/01.-Importancia-de-la-pequena-y-mediana-mineria-Chile-VP11.pdf>
- Svehla, G. (1996). *Vogel's qualitative inorganic analysis* (7th ed.). Longman.
- Taggart, A. F. (1945). *Handbook of mineral dressing*. Wiley.
- Treadwell, F. P. (1943). *Tratado de química analítica: Análisis cuantitativo* (Tomo II).
- Varas Aravena, R. (2023). *Caracterización de la pequeña minería: Revisión del estado actual de la pequeña minería extractiva* [Documento PDF]. Sociedad Nacional de Minería (SONAMI). <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2023/11/Caracterizacion-de-la-Pequena-Mineria-noviembre-2023.pdf>
- Vogel, A. I. (1989). *Análisis químico cuantitativo* (5ª ed.). Reverté.
- Welz, B., & Sperling, M. (1999). *Atomic absorption spectrometry* (3rd ed.). Wiley-VCH.
- Wills, B. A., & Napier-Munn, T. (2016). *Wills' mineral processing technology* (8th ed.). Butterworth-Heinemann

7. Anexos

7.1. Planos recipientes

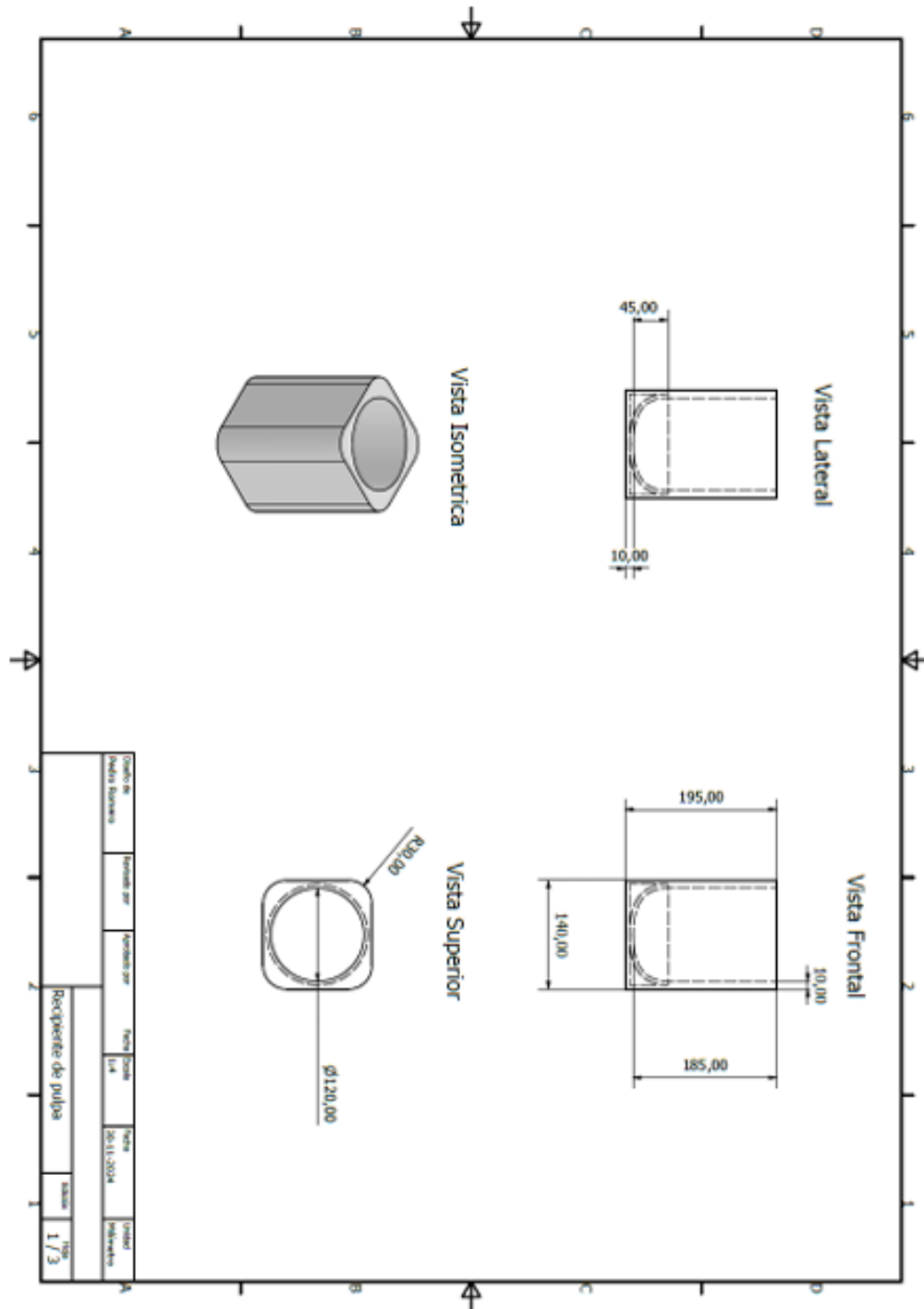


Figura 13: Plano y medidas recipiente grande para pulpa.

7.2. Planos sujetadores de manguera

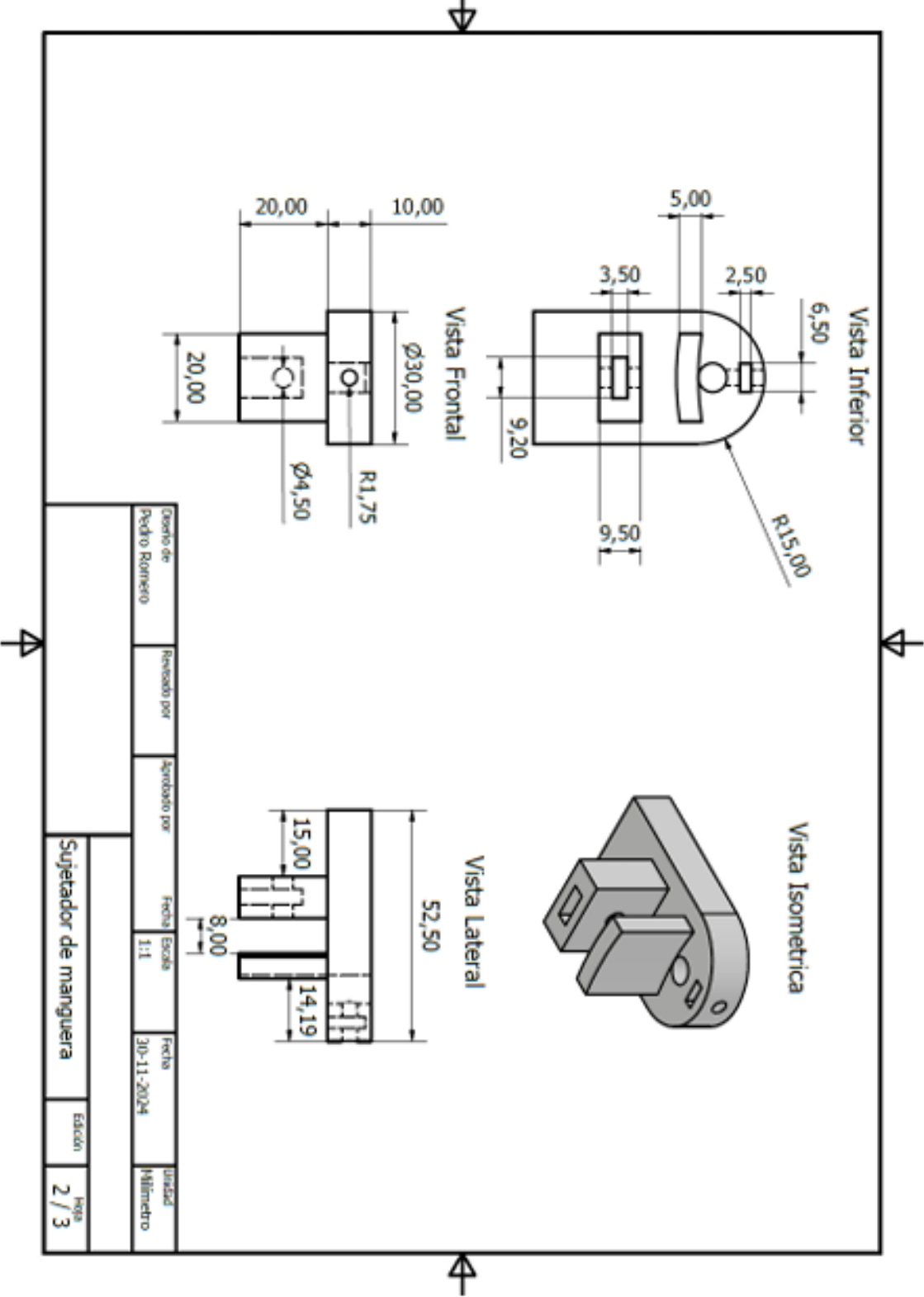


Figura 14: Planos y medidas sujetador de manguera.

7.3. Planos conector manguera

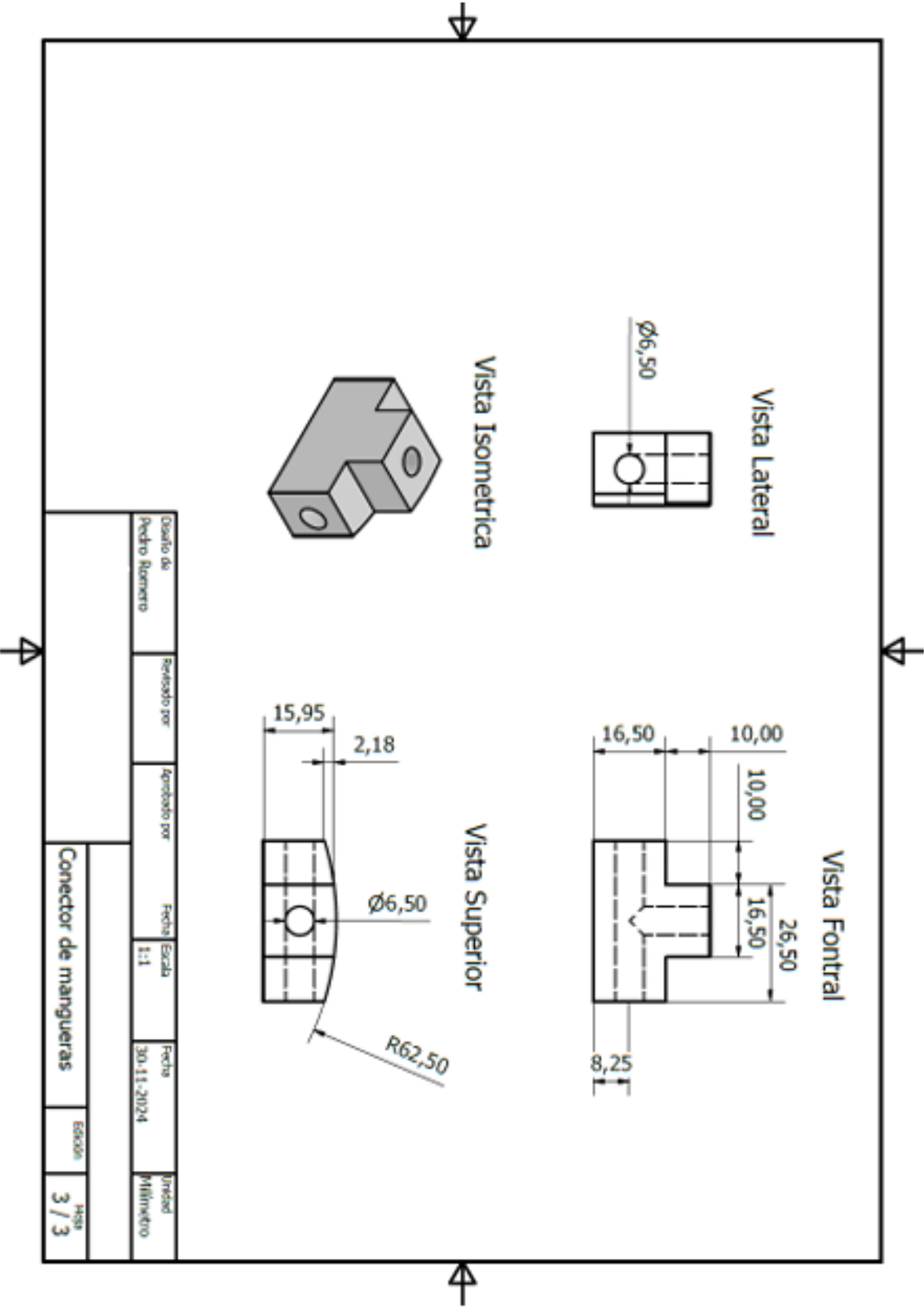


Figura 15: Plano y medidas conector para manguera.

7.4. Equipos de conminución

7.4.1 Combo y cincel



Figura 16: Combo y cincel.

7.4.2 Chancador manual

El chancador manual consta de la utilización de pesas, que ayudan a la inercia del movimiento con el fin de triturar a las rocas.

- Cantidad de pesas:
 - 2 pesas chicas, de 1 Kg.
 - 2 pesas grandes, de 2 Kg.

Las dimensiones del chancador manual son las siguientes:

Tabla 22: Medidas chancador manual.

	Diámetro cm	Alto cm
Chancador manual	16	60



Figura 17: Chancador manual y pesas.

7.4.3 Molino de barra

El molino de barras cuenta con un cuerpo cilindro fabricado a medida y la adición de dos barras interiores para realizar la molienda.

- Se tiene dos barras de 55 kg.
- Medidas molino:

Tabla 23: Medidas molino de barras.

	Largo cm	Diámetro cm	Ancho cm
Cuerpo de molino	62	50	-
Puerta de alimentación	28	-	13



Figura 18: Barras para molino.



Figura 19: Tablero electro molino de barras.

7.5. Figuras sistema de flotación

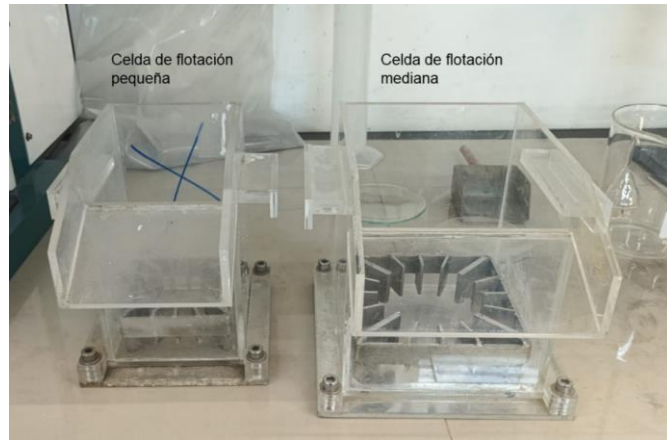


Figura 20: Celdas de flotación.

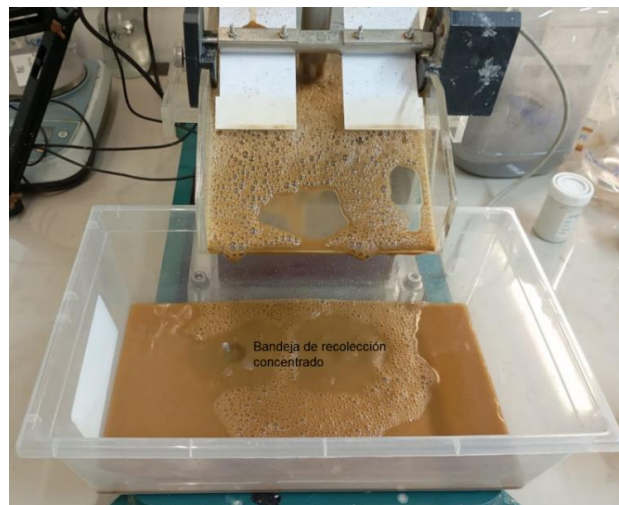


Figura 21: bandeja de recolección concentrado.



Figura 22: Sistema de flotación.



Figura 23: Sistema de flotación.

7.6. Montajes Procesos obtención de oro

7.6.1 Montaje cloración



Figura 24: Limpiador de gases.



Figura 25: Montaje conector y sujetador de manguera.

7.6.2 Montaje precipitación de oro

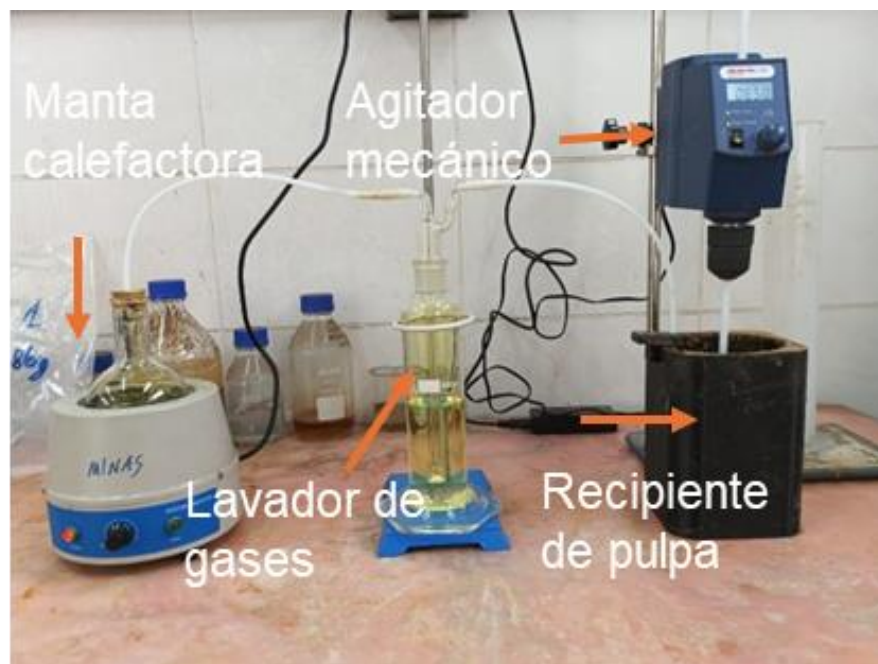


Figura 26: Montaje completo de cloración.

7.6.3 Montaje eliminación de cloro

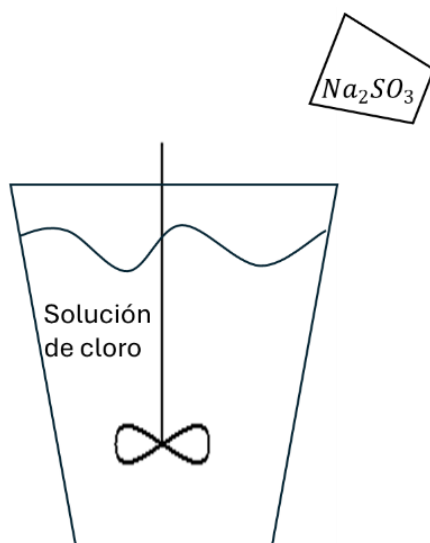


Figura 27: Montaje eliminación de cloro residual.

7.6.4 Filtrado y calcinación

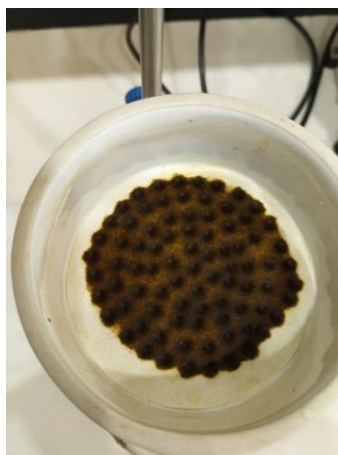


Figura 28: Resultado filtrado de la precipitación.



Figura 29: Horno de calcinación.



Figura 30: Resultados calcinación.

7.7. Diagramas determinación de cobre



Figura 31: Sistema para digestión ácida.



Figura 32: Sistema de precipitación de cobre con aluminio.

7.8. Tabla de eliminación de cloro

Tabla 24: Tabal consumo de NaSo3.

Muestra	Numero de prueba	volumen de agno3 (ml)	volumen muestra (L)	Concentración de Cl- (M)	Volumen solución inicial (L)	Moles de Cl2	Masa NaSo3 (g)	Promedio Masa NaSo3 (g)
M.1.1	1	1,7	0,05	0,017	2,05	0,035	4,39	4,82
	2	2,05		0,021		0,042	5,30	
	3	1,85		0,019		0,038	4,78	
M.1.3	1	4,7	0,1	0,024	3,7	0,087	10,96	11,15
	2	4,9		0,025		0,091	11,43	
	3	4,75		0,024		0,088	11,08	
M.2.1	1	7,6	0,05	0,038	2,05	0,078	9,82	9,47
	2	6,95		0,035		0,071	8,98	
	3	7,45		0,037		0,076	9,62	
M.2.2	1	3,65	0,05	0,018	2,75	0,050	6,33	6,64
	2	4,05		0,020		0,056	7,02	
	3	3,8		0,019		0,052	6,59	
M.3.2	1	3,8	0,05	0,038	2,05	0,078	9,82	9,78
	2	3,5		0,035		0,072	9,04	
	3	4,05		0,041		0,083	10,46	
M.3.3	1	4,8	0,05	0,024	3,9	0,094	11,80	11,88
	2	4,95		0,025		0,097	12,17	
	3	4,75		0,024		0,093	11,67	
M.5.2	1	5,25	0,05	0,026	2,7	0,071	8,93	9,47
	2	5,6		0,028		0,076	9,53	
	3	5,85		0,029		0,079	9,95	
M.5.4	1	3,35	0,05	0,034	2,07	0,069	8,74	8,31
	2	3,45		0,035		0,071	9,00	
	3	2,75		0,028		0,057	7,17	

7.9. Referencias costos equipos y reactivos

7.9.1 Costo equipos de cloración

Tabla 25: Costos y referencias de equipos cloración de oro.

Items	Descripción	Costo \$ CLP	Referencia [17-12-2025]
Matraz de balón	Con una capacidad de 500 ml	7.270	Venta y distribución de Matraz balón fondo redondo eco. grad. 500 ml v4211
Lavador de gases	Recipiente de 500 ml para filtrar impureza en los gases	63.000	Frasco Lavador De Gases 500 ML, Ns 24/29, 75 Mm Diam X 200 Mm Alto, C/Pie
Vaso precipitado	Capacidad de 2 litros	13.423	Vaso Pp. Bajo, Graduado Dwk
Vaso precipitado	Capacidad de 250 ml	3.422	Vaso Pp. Bajo, Graduado Dwk
Matraz Erlenmeyer	Capacidad de 1 litros	5.582	Matraz Erlenmeyer - Borosilicato - 1 Litro - Bioquimica.cl
Matraz Erlenmeyer	Capacidad de 250 ml	3.800	Matraz Erlenmeyer - Borosilicato - 250 mL - Bioquimica.cl
Embudo Büchner	110 mm de diámetro	18.000	EMBUDO BUCHNER 110 MM
Bureta	Para titulación de 10 ml	23.627	Bureta línea azul 10 mL Clase A Prodelab Chile
Pinza doble bureta	Sujetador para bureta	14.900	PINZA DOBLE PARA BURETA CON GOMA
Agitador mecánico	Agitadora para mezclas de grandes volúmenes	444.708	AGITADOR MECÁNICO control digital, 20 Lts, 100-2500rpm. Timer. Con soporte, hasta 10.000 Mpas, 60 Watts
Horno de calcinación	Temperatura máximo 1100°C	1.190.000	Horno de fundición, digital, 2 kg, 220 volts
Balanza analítica	Balanza con una precisión de 0.0001 g	1.857.673	Balanza analítica
Agitador magnético	Mezclador y calefactor para solución pequeñas	188.000	Agitador Magnetico Con Placa De Calentamiento Joanlab Hs17 DelCantoMedical
Medidor de pH	Medidor de bolsillo para medir el pH	169.830	Tester de pH / Temperatura pHep4 - HI98127 Hanna Instruments Chile
Bomba de vacío	Bomba que genera presión negativa para filtrado	350.000	BOMBAS DE VACÍO : ROCKER 300 BOMBA DE VACIO
Manta calefactora	Calentador de matraz	150.000	MANTA CALEFACTORA CON AGITACION 500ML – Quantech
Crisol de porcelana	Crisol de porcelana para calcinación de muestra	5.000	CRISOL DE PORCELANA PARED MEDIANA CON TAPA 40 ML
Pinza para crisol	Pinza para manipular el crisol caliente	9.900	PINZA PARA CRISOL 30 CM
Barra agitadora	Barras magnéticas para el agitador magnético	5.490	Kit 5 Barra Agitadora Magnética Ptfte Tipo B 30x6mm Mimall Cuotas sin interés
Papel filtro sin ceniza	Papel filtro el cual no deja ceniza al quemarse	50.950	Papel Filtro Circular, Caja 100 Unid. 393, Equivale A Whatman 42 Y A Mfs 5C, Cuantitativo, Sin Ceniza, Lento
Papel filtro	Papel para filtro convencional	10.560	PAPEL FILTRO 110 MM 100 UNIDADES
Impresión 3D grande	Fabricación de recipiente grande para cloración	10.000	

Impresión 3D chico	Fabricación de recipiente chico para cloración	10.000	
bandeja acero inoxidable	Bandeja para calentar	6.903	2 Piezas Bandejas De Acero Para Hornear, 40 X 30 X 4.8 Cm Cuotas sin interés
Tapón de goma rígida	Tapón para filtrado	696	Tapon Goma Solida n°1: 19X14X26 (119 Unid X Kilo)
TOTAL		4.612.734	

7.9.2 Costos equipos determinación de cobre

Tabla 26: Costos y referencias equipos de determinación de cobre.

Items	Descripción	Costo \$ CLP	Referencia [17-12-2025]
Matraz Erlenmeyer	Capacidad de 1 litros	5.582	Matraz Erlenmeyer - Borosilicato - 1 Litro - Bioquimica.cl
Matraz Erlenmeyer	Capacidad de 250 ml	3.422	Matraz Erlenmeyer - Borosilicato - 250 mL - Bioquimica.cl
Embudo Büchner	110 mm de diámetro	18.000	EMBUDO BUCHNER 110 MM
Matraz aforado 50 ml	Para soluciones volumétricas capacidad de 50 ml	7.036	Matraz Aforado con tapa 50 ml - Madigae
Matraz aforado 25	Para soluciones volumétricas capacidad de 25 ml	6.069	Matraz Aforado Clase A 25ML
Bureta	Para titulación de 10 ml	23.627	Bureta línea azul 10 mL Clase A Prodelab Chile
Pinza doble bureta	Sujetador para bureta	14.900	PINZA DOBLE PARA BURETA CON GOMA
Agitador mecánico	Agitadora para mezclas de grandes volúmenes	444.708	AGITADOR MECÁNICO control digital, 20 Lts, 100-2500rpm. Timer. Con soporte, hasta 10.000 Mpas, 60 Watts
Balanza analítica	Balanza con una precisión de 0.0001 g	1.857.673	Balanza analítica
Agitador magnético	Mezclador y calefactor para solución pequeñas	188.000	Agitador Magnetico Con Placa De Calentamiento Joanlab Hs17 DelCantoMedical
Medidor de mV	Medidor de bolsillo para medir el potencial	286.000	Tester de ORP / Temperatura - HI98120 Hanna Instruments Chile
Medidor de pH	Medidor de bolsillo para medir el pH	169.830	Tester de pH / Temperatura pHep4 - HI98127 Hanna Instruments Chile
Bomba de vacío	Bomba que genera presión negativa para filtrado	350.000	BOMBAS DE VACÍO : ROCKER 300 BOMBA DE VACÍO
Barra agitadora	Barras magnéticas para el agitador magnético	5.490	Kit 5 Barra Agitadora Magnética Ptfe Tipo B 30x6mm Mimal Cuotas sin interés
Papel filtro	Papel para filtro convencional	10.560	PAPEL FILTRO 110 MM 100 UNIDADES
bandeja acero inoxidable	Bandeja para calentar	6.903	2 Piezas Bandejas De Acero Para Hornear, 40 X 30 X 4.8 Cm Cuotas sin interés
Mechero bunsen	Mechero a gas para calentar muestras	30.000	MECHERO TIPO BUNSEN CON LLAVE
Tapón de goma rígida	Tapón para filtrado	696	Tapon Goma Solida n°1: 19X14X26 (119 Unid X Kilo)
TOTAL		3.428.496	

7.9.3 Costos reactivos

Tabla 27: Costos y referencias reactivos.

Compuesto	Cantidad	Costo \$ CLP	Referencia [17-12-2025]
Ácido clorhídrico HCl (37%)	1 L	34.391	Ácido Clorhídrico Concentrado 37% - P.A. - 1 Litro - Bioquimica.cl
Oxido de manganeso MnO_2	1 kg	34.391	Dióxido de Manganeso - Técnico - 1 kg - Bioquimica.cl
Agua Oxigenada H_2O_2 (50%)	1 L	8.000	Agua Oxigenada 50% (litro) (167 Volúmenes) – Galeca
Cromato potásico K_2CrO_4	500 gr	26.660	Potasio Cromato 99,5%, Pa, 500 Gr.
Nitro de plata $AgNO_3$	50 gr	90.000	Nitrato de plata cristales 99% pureza 50 gr - Reachem
Hidróxido de sodio $NaOH$	1 kg	12.138	Hidroxido de Sodio en Perlas - Técnico - 1 Kg - Bioquimica.cl
Ácido nítrico HNO_3	1 L	14.000	Ácido Nítrico PA (1000ml) – Galeca
Ácido sulfúrico H_2SO_4	1L	22.610	Ácido Sulfúrico Concentrado 95-98% - P.A. - 1 Litro - Bioquimica.cl
Ácido acético (90%)	1 L	18.754	Ácido Acético 90% - Técnico - 1 Litro - Bioquimica.cl
Amoníaco NH_3 (25%)	1 L	8.330	Amoniac 25% - Técnico - 1 Litro - Bioquimica.cl
Agua de bromo	500 ml	91.000	
Yoduro de potasio KI	100 gr	46510	Yoduro de Potasio - P.A. - 100 gramos - Bioquimica.cl
Sulfito de sodio Na_2SO_3	1 kg	12.840	Sulfito de Sodio Kg Productos Químicos
Tiosulfato de sodio $Na_2S_2O_3$	1 kg	12.000	Tiosulfato de Sodio - Técnico - 1 Kg - Bioquimica.cl
Total		431.624	

7.10. Análisis de laboratorio

El laboratorio de Andes Analytical Assay emplea dos métodos para determinar el oro y otros dos métodos para determinar el cobre, los cuales se presentan a continuación.

- FA-AA-1E42
Método acreditado ISO 17025:2017 Fundir porción de muestra. Copelar a 900 a 950 °C, Enfriar Disolver botón doré. Aforar y homogeneizar Medir por EAA.
- FA-AA-1E5g-10_Conc Cu
Método acreditado ISO 17025:2017 Fundir en crisol de arcilla la porción de muestra, mezclar con litargirio. Adicionar reactivos (según tipo de muestra). Copelar a 900 a 950 °C, hasta visualizar el botón doré (eliminación total de Pb). Enfriar Disolver botón doré. Adicionar al tubo HNO_3 . Enfriar. Aforar y homogeneizar Medir por EAA.
- DA-AA-4A-HF_1E01
Método acreditado ISO 17025:2017 Digerir con ácidos $HF-HNO_3-HClO_4-HCl$ (Multiácido), la porción de muestra. Aforar y homogeneizar. Medir por EAA.
- VOL_VOL_T2-LD5
Digestión ácida con temperatura, de la porción de muestra. Eliminar interferentes y ajustar pH. Titular con solución patrón de Tiosulfato de Sodio. Método con límite de detección de 5%, se debe considerar que el método presenta mayor dispersión en el rango de concentración.