



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

**ESTUDIO DE CALIDAD DE CONCENTRADO UTILIZANDO UNA MINI  
PLANTA PILOTO DE FLOTACIÓN (MPP)**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO  
DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

**JAIME ANTONIOTO DÍAZ CATALÁN**

PROFESOR GUÍA:  
Willy Kracht Gajardo

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
Jaime Morales Orellana  
Leandro Voisin Aravena

SANTIAGO DE CHILE  
2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS  
POR: JAIME ANTONIOTO DÍAZ CATALÁN  
FECHA: 2024  
PROF. GUÍA: WILLY KRACHT GAJARDO

## **ESTUDIO DE CALIDAD DE CONCENTRADO UTILIZANDO UNA MINI PLANTA PILOTO DE FLOTACIÓN (MPP)**

En el negocio minero, conocer la calidad de concentrado, en términos de ley de cobre, subproductos y contaminantes, para los proyectos en desarrollo o en operación es muy importante, porque permite, por una parte, establecer una estrategia de venta de concentrado, y, por otra parte, obtener una licencia ambiental para el transporte y almacenamiento de concentrado, sobre todo cuando las regulaciones internacionales son cada vez más exigentes en materia de explotación, transporte y almacenamiento de sustancias peligrosas. En virtud de lo expuesto, el objetivo de este trabajo es presentar un análisis técnico de diferentes metodologías existentes para estimar la calidad de concentrado. Las metodologías que se analizan son las pruebas de flotación colectiva en la innovadora Mini Planta Piloto de Flotación (MPP), las tradicionales pruebas de flotación en ciclo cerrado (TCC) realizadas a escala de laboratorio y las onerosas pruebas de flotación en plantas piloto convencional (PPC) de 100 a 500 kg/h. La MPP presenta la ventaja de requerir una reducida masa (de muestra) de 150 a 180 kilogramos por prueba, la cual puede ser extraída desde rechazos de sondajes geológicos (tipo NQ o HQ), lo que facilita la ejecución de un elevado número de pruebas, a un costo razonable, y, realizar pruebas con muestras ubicadas a 1000 o 2000 metros de profundidad en un yacimiento. La MPP no sólo permite conocer la calidad de concentrado, sino también, la recuperación metalúrgica de cobre y otros elementos de interés (molibdeno, plata, oro, arsénico, etc.). Además, la MPP permite generar: a) concentrado colectivo para pruebas de sedimentación y filtración, b) relave final para pruebas de sedimentación, transporte y disposición de relaves, y, c) agua recirculada de relave final para caracterización fisicoquímica. Se presentan dos aplicaciones de la MPP en la industria del cobre nacional, la primera, para evaluar el efecto de tipos de agua en la recuperación de cobre y molibdeno, y, la segunda, para validar que una remolienda fina ( $P_{80}=30\ \mu\text{m}$ ) aumenta la ley de cobre en el concentrado colectivo desde 20 a 25-30 % CuT. Finalmente, se presentan algunos desafíos y oportunidades que han sido identificadas para el mejoramiento continuo de la tecnología MPP.

# Abstract

In the mining business, knowing the concentrate quality in terms of copper grade, by-products, and contaminants for projects in development or operation is of paramount importance. This knowledge enables, on the one hand, the establishment of a concentrate sales strategy and, on the other hand, the acquisition of an environmental license for the transportation and storage of concentrate, especially as international regulations become increasingly stringent regarding the exploitation, transportation, and storage of hazardous substances. In light of the above, the objective of this work is to present a technical analysis of various existing methodologies to estimate concentrate quality. The methodologies analyzed include collective flotation tests in the innovative Mini Pilot Plant (MPP), traditional closed-circuit flotation tests (TCC) conducted at a laboratory scale, and the costly conventional pilot plant flotation tests (PPC) with capacities ranging from 100 to 500 kg/h. The MPP offers the advantage of requiring a reduced sample mass of 150 to 180 kilograms per test, which can be extracted from geological drill core rejects (NQ or HQ type), facilitating the execution of a large number of tests at a reasonable cost, and allowing for testing with samples located at 1000 or 2000 meters depth within a deposit. The MPP not only allows for determining concentrate quality but also for assessing the metallurgical recovery of copper and other elements of interest (molybdenum, silver, gold, arsenic, etc.). Additionally, the MPP allows for the generation of: a) bulk concentrate for sedimentation and filtration tests, b) final tailings for sedimentation, transportation, and disposal tests, and c) recirculated water from final tailings for physicochemical characterization. Two applications of the MPP in the national copper industry are presented: the first, to evaluate the effect of water types on copper and molybdenum recovery, and the second, to validate that a fine regrinding ( $P_{80}=30 \mu\text{m}$ ) increases the copper grade in the bulk concentrate from 20 to 25-30% CuT. Finally, some challenges and opportunities that have been identified for the continuous improvement of MPP technology are presented.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivo General . . . . .	2
1.2. Objetivos Específicos . . . . .	2
1.3. Alcances . . . . .	2
<b>2. Estado del Arte</b>	<b>3</b>
2.1. Calidad de Concentrado . . . . .	3
2.2. Pruebas de Flotación en Ciclo Cerrado (TCC) . . . . .	5
2.3. Pruebas de flotación colectiva en planta piloto . . . . .	8
2.4. Mini Planta Piloto de Flotación Continua (MPP) . . . . .	12
<b>3. Metodología</b>	<b>17</b>
3.1. Preparación mecánica de muestras . . . . .	17
3.2. Caracterización física, química y mineralógica de cabeza . . . . .	18
3.3. Prueba de flotación primaria en laboratorio . . . . .	18
3.4. Cinética de molienda en MPP . . . . .	18
3.5. Sintonización o calibración de MPP . . . . .	19
3.6. Pruebas de flotación MPP . . . . .	19
3.7. Caracterización física, química y mineralógica de productos . . . . .	20
3.8. Informe final . . . . .	23
<b>4. Resultados</b>	<b>25</b>
4.1. Aplicaciones en la Industria Minera . . . . .	25
4.1.1. Proyecto 1 . . . . .	25
4.1.2. Proyecto 2 . . . . .	32
<b>5. Discusión</b>	<b>37</b>
5.1. Desafíos . . . . .	37
5.1.1. Celdas de Flotación en CFM . . . . .	37
5.1.1.1. Control de Nivel de Pulpa . . . . .	37
5.1.1.2. Traspaso de pulpa entre celdas . . . . .	38
5.1.2. Control de Nivel de Pulpa en Columna . . . . .	39
5.1.3. Estanques de Almacenamiento y Alimentación a CFM . . . . .	40
5.1.4. Molino de Remolienda . . . . .	41
5.2. Oportunidades . . . . .	43
5.2.1. Captación de Gases . . . . .	43
5.2.2. Medición de Leyes On-line . . . . .	43
5.2.3. Gemelo Digital . . . . .	43

<b>6. Conclusiones</b>	<b>44</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>46</b>
<b>Anexo</b>	<b>47</b>
A. Protocolo de Preparación Mecánica de Muestras para MPP. . . . .	47

# Índice de Tablas

2.1.	Valores referenciales de penalizaciones por impurezas en concentrados. Fuente: (Cochilco, 2015). . . . .	5
2.2.	Estimación costo total de programa metalúrgico 10 TCC. . . . .	8
2.3.	Estimación costo total de programa metalúrgico 3 pruebas piloto. . . . .	12
2.4.	Estimación costo total de programa metalúrgico 10 MPP. . . . .	15
2.5.	Costos y principal ventaja-desventaja de las metodologías TCC, PP y MPP. . .	15
2.6.	Casos de aplicación de las metodologías MPP y PP, parte 1. . . . .	16
2.7.	Casos de aplicación de las metodologías MPP y PP, parte 2. . . . .	16
3.1.	Caracterización mineralógica para circuito de flotación colectiva en MPP. . . .	21
3.2.	Caracterización física para circuito de flotación colectiva en MPP. . . . .	21
3.3.	Caracterización química para circuito de flotación colectiva en MPP. . . . .	22
4.1.	Resultados metalúrgicos para muestras M1 a M15 (Parte 1). . . . .	27
4.2.	Resultados metalúrgicos para muestras M1 a M15 (Parte 2). . . . .	28
4.3.	Resultados metalúrgicos para muestras M16 a M20 (Parte 1). . . . .	31
4.4.	Resultados metalúrgicos para muestras M16 a M20 (Parte 2). . . . .	31
4.5.	Muestras usadas en pruebas de flotación colectiva MPP. . . . .	33
4.6.	Mezclas de agua usadas en pruebas de flotación colectiva MPP. . . . .	33
4.7.	Resultados pruebas de flotación colectiva MPP con PPSAG-26 . . . . .	34
4.8.	Resultados pruebas de flotación colectiva MPP con PPSAG-27 . . . . .	35
4.9.	Resultados pruebas de flotación colectiva MPP con PPSAG-29 . . . . .	36
5.1.	Diferencia entre ley de cobre en cabezas y alimentación MPP. . . . .	40
5.2.	Grado de Remolienda alcanzado en estudio MPP 2022. . . . .	42

# Índice de Figuras

2.1.	Diagrama de pruebas de flotación de limpieza en ciclo cerrado. . . . .	7
2.2.	Diagrama de flujos de circuito piloto de molienda y flotación colectiva. . . . .	10
2.3.	Módulos de la mini planta de flotación continua. . . . .	13
2.4.	Módulos de la mini planta piloto de flotación continua. . . . .	14
3.1.	Marinas de frente de banco y sondajes a diamantina tipo PQ. . . . .	17
3.2.	Configuración de circuito de flotación colectiva en MPP . . . . .	20
3.3.	Diagrama lógico de procesos de procedimiento experimental de MPP. . . . .	24
4.1.	Configuración de circuito de flotacion colectiva en MPP. . . . .	26
4.2.	Análisis mineralógico QEMSCAN muestras M1 a M15 (cabezas). . . . .	29
4.3.	Análisis mineralógico QEMSCAN muestras M1 a M15 (concentrado). . . . .	30
4.4.	Configuración de circuito de flotación colectiva en MPP. . . . .	33
5.1.	Control de nivel de pulpa en celda. . . . .	37
5.2.	Inyección (inferior) y succión (lateral) de pulpa. . . . .	38
5.3.	Celdas de flotación ubicadas en desnivel. . . . .	39
5.4.	Columna de flotación con sensor de presión. . . . .	39
5.5.	Estanques de almacenamiento y alimentación a CFM. . . . .	40
5.6.	Molino de remolienda de MPP. . . . .	41
5.7.	Asociaciones de pirita-calcopirita-bornita-calcosina. . . . .	42

# Capítulo 1

## Introducción

En el negocio minero, conocer la calidad de concentrado, en términos de ley de cobre, sub-productos y contaminantes, para los proyectos mineros en desarrollo o en operación es muy importante, porque permite, por una parte, establecer una estrategia de venta de concentrado, y, por otra parte, obtener una licencia ambiental para el transporte y almacenamiento de concentrado, sobre todo cuando las regulaciones internacionales son cada vez más exigentes en materia de explotación, transporte terrestre-marítimo y almacenamiento de sustancias peligrosas.

En ese contexto, se presenta un análisis técnico de las diferentes metodologías utilizadas para estimar o determinar la calidad de concentrado en la industria minera nacional e internacional.

Las metodologías que se analizan son las pruebas de flotación colectiva en la innovadora Mini Planta Piloto de Flotación (MPP), las tradicionales pruebas de flotación en ciclo cerrado (TCC) realizadas a escala de laboratorio y las onerosas pruebas de flotación en plantas piloto convencional (PPC) de 100 a 500 kg/h.

La MPP presenta la ventaja de requerir una reducida masa (de muestra) de 150 a 180 kilogramos por prueba, la cual puede ser extraída desde rechazos de sondajes geológicos tipo NQ ( $\phi=47.6$  mm) o HQ ( $\phi=63.5$  mm), lo que facilita la ejecución de un elevado número de pruebas, a un costo razonable, y, además, realizar pruebas con muestras ubicadas a 1000 o 2000 metros de profundidad en un yacimiento (Andrade, Santos, y Goncalves, 2004).

Se presentan dos aplicaciones de la MPP en la industria del cobre nacional, la primera, para evaluar el efecto de tipos de agua en la recuperación de cobre y molibdeno, y, la segunda, para validar que una remolienda fina ( $P80=30$   $\mu\text{m}$ ) aumenta la ley de cobre en el concentrado colectivo desde 20 a 25-30 % CuT.

Finalmente, se presentan algunos desafíos y oportunidades que han sido identificadas para el mejoramiento continuo de la MPP y las principales conclusiones.



## **1.1. Objetivo General**

Presentar un análisis técnico de las diferentes metodologías utilizadas para determinar la calidad de concentrado, en términos de ley de cobre, subproductos y contaminantes, en los proyectos mineros en desarrollo y/o en operación.

## **1.2. Objetivos Específicos**

- Comparar el tipo y cantidad de muestra requerida para la MPP, TCC y PPC.
- Explicar los procedimientos experimentales de MPP, TCC y PPC.
- Indicar las ventajas/desventajas de la MPP respecto a los TCC y/o PPC.
- Presentar aplicaciones de la MPP en la industria del cobre.
- Identificar los desafíos y oportunidades de la tecnología MPP.

## **1.3. Alcances**

Las metodologías que se analizan son las pruebas de flotación colectiva en la Mini Planta Piloto de Flotación (MPP), las pruebas de flotación en ciclo cerrado (TCC) realizadas a escala de laboratorio y las pruebas de flotación en plantas piloto convencional (PPC) de 100 a 500 kg/h.

# Capítulo 2

## Estado del Arte

Este capítulo presenta en forma detallada las metodologías experimentales utilizadas, actualmente, en la industria del cobre para estimar o proyectar la calidad del concentrado en un plan de producción de corto y/o largo plazo, ya sea en un proyecto nuevo o en operaciones.

Se comenta el concepto de **calidad de concentrado**, su uso en proyectos mineros en desarrollo y operación, su importancia desde la perspectiva económica y medio ambiente y los desafíos para el negocio minero, en el corto y mediano plazo, producto de las regulaciones internacionales cada vez más exigentes en materia de explotación, transporte y almacenamiento de sustancias peligrosas.

Se revisan las metodologías experimentales tradicionales para determinar la recuperación metalúrgica y calidad de concentrado en muestras puntuales y/o muestras compósito, las **pruebas de flotación en ciclo cerrado (TCC)** y las **pruebas de flotación colectiva en plantas piloto** de 100, 200 y 500 kg/h. Se comentan los tipos y tamaño de muestras requeridas y el costo asociado a la extracción, mapeo geológico y transporte de estas muestras.

Se presenta en forma detallada la tecnología denominada **Mini Planta Piloto** de Flotación (MPP), se describe sus componentes y funcionamiento, así como el tipo y tamaño de muestras requeridas para ejecutar las pruebas de flotación en la MPP. Se revisa el costo asociado a la extracción, mapeo geológico y transporte de estas muestras y se compara con las muestras masivas.

### 2.1. Calidad de Concentrado

En la industria del cobre, el concepto calidad de concentrado se refiere a la ley de cobre que alcanza un concentrado colectivo, los sub-productos obtenidos tales como molibdeno, plata y oro y las impurezas contenidas tales como arsénico, antimonio, bismuto, plomo, zinc, mercurio, entre otros.

Los proyectos mina-planta en operación, periódicamente, actualizan sus estimaciones de calidad de concentrado, por una parte, para revisar/generar estrategias de ventas de sus productos, y, por otra parte, para respaldar los contratos de ventas de corto, mediano y largo plazo que realiza comercialización.

Para los proyectos mina-planta en desarrollo (estudios de prefactibilidad y factibilidad), también es necesario estimar la calidad de concentrado para los primeros dos o tres quinquenios de operación del proyecto. Esta información permite respaldar la valorización de ingresos en todo el horizonte del proyecto.

Evidentemente, la calidad de concentrado no solo tiene importancia desde la perspectiva económica de un proyecto mina-planta (desarrollo u operación), sino también, desde la perspectiva ambiental, considerando las regulaciones ambientales cada vez más exigentes en Chile y el mundo.

Respecto a los sub-productos molibdeno, plata y oro, generalmente, la mayoría de los proyectos mina-planta en desarrollo y operación mejoran sus indicadores económicos o resultados por los créditos obtenidos. Incluso, hay algunos proyectos mina-planta que alcanzan un costo C1 (cUS\$/lb Cu) negativo debido al elevado crédito alcanzado por los contenidos de oro en el concentrado.

En relación a las impurezas contenidas en el concentrado, se debe indicar que las impurezas representan uno de los principales desafíos de la industria minera en Chile y el mundo. Los mercados internacionales están, continuamente, incrementando las exigencias respecto a las impurezas contenidas en el concentrado para su explotación, producción y transporte. Existe una heterogeneidad de regulaciones para las diferentes impurezas o contaminantes y están aumentando los ámbitos de aplicación, como en la seguridad y salud ocupacional, el medio ambiente (aire, suelo y agua) y el transporte aéreo.

La Tabla 2.1 presenta la Tolerancia (valor del contenido sobre el cual se penaliza) y Penalización para las impurezas o contaminantes más importantes presentes en la industria del cobre en Chile (EcoMetales, 2017). Para el arsénico, destaca el incremento importante en la Penalización cuando la Tolerancia supera el 0,5 %.

Tabla 2.1: Valores referenciales de penalizaciones por impurezas en concentrados. Fuente: (Cochilco, 2015).

Tolerancia			Penalización	
Elemento	Unidad	Valor	Unidad	Rango Cargo
As	%	0,2	US\$/TMS-0,1 %	1,5-2,5
As	%	0,5	US\$/TMS-0,1 %	6-7,5
As	%	1	US\$/TMS-0,1 %	8,5-15
Sb	%	0,05	US\$/TMS-0,01 %	1-2
Zn	%	3	US\$/TMS-0,1 %	0,1-0,5
Pb	%	1	US\$/TMS-0,1 %	0,1-0,5
Hg	ppm	5	US\$/TMS-10ppm	1-5
Cd	ppm	50	US\$/TMS-10ppm	1-5
MgO	%	0,8	US\$/TMS-0,1 %	0,5
Cr2O3	%	0,1	US\$/TMS-0,1 %	0,5
Cl	%	0,5	US\$/TMS-0,1 %	4
Bi	ppm	200	US\$/TMS-100ppm	1,5-3
Al2O3	%	3	US\$/TMS-1 %	2
F	ppm	300	US\$/TMS-100ppm	1-2
Ni+Co	%	0,5	US\$/TMS-0,1 %	1
Se	ppm	300	US\$/TMS-100ppm	1,5
SiO2	%	10	US\$/TMS-1 %	2-3
Humedad	%	10	US\$/TMS-1 %	2-3
MgO+Al2O3	%	4	US\$/TMS-1 %	4,5
Zn+Pb	%	4	US\$/TMS-1 %	3

Algunas de las impurezas no solo producen problemas al medio ambiente, sino también, generan problemas técnicos en la fundición (flúor, cloro y zinc) y refinería (bismuto).

## 2.2. Pruebas de Flotación en Ciclo Cerrado (TCC)

Las pruebas de flotación en ciclo cerrado (TCC) son ensayos metalúrgicos, a escala de laboratorio, destinados a establecer la respuesta metalúrgica de una muestra de mineral (pura o mezcla), específicamente, la recuperación del circuito de flotación de limpieza y la calidad del concentrado colectivo.

Estos ensayos (TCC) se realizan para verificar las condiciones y parámetros de operación de los circuitos de flotación primaria y flotación limpieza, identificados, previamente, a través de pruebas de flotación en circuito abierto. En otras palabras, los TCC se realizan una vez que ha sido seleccionado el diagrama de flujos de flotación colectiva, los grados de molienda y remolienda, los tiempos de residencia de cada etapa de flotación y los tipos, dosis y puntos de aplicación de colectores, espumantes, depresores y modificadores, entre otros.

Los circuitos de flotación de minerales de cobre-molibdeno, plomo-zinc, cobre-plomo-zinc y plata-oro, generalmente, requieren la ejecución de TCC para respaldar la respuesta metalúrgica.

Para realizar un TCC, se deben ejecutar, previamente, pruebas de flotación primaria (estándar de flotación) para generar concentrado primario que permita, a su vez, realizar pruebas de remolienda (cinética de remolienda).

La cantidad de pruebas de flotación primaria, por cada ciclo, dependerá de la ley de cobre del mineral, la recuperación en peso en flotación primaria y la concentración de sólido en peso de alimentación (CpA) en flotación primera limpieza. Así, para lograr un CpA en flotación primera limpieza ( $V_p = 2,7$  l) de 15 a 18 % se necesita 450 a 550 g de concentrado primario. Por lo tanto, si la recuperación en peso de flotación primaria es 10 %, unos 100 g, aproximadamente, se necesitan 5 a 6 pruebas de flotación primaria por ciclo.

Para lograr el estado estacionario en un TCC, se recomienda al menos 6 ciclos.

Una vez realizado el primer ciclo del TCC, se generan productos intermedios y finales. Los productos intermedios tales como el relave de flotación segunda limpieza y el concentrado de flotación barrido son recirculados al segundo ciclo del TCC (ver Figura 2.1). El relave de flotación segunda limpieza se recircula como alimentación a flotación primera limpieza y el concentrado de flotación barrido se recircula como alimentación a remolienda. De esta manera, la alimentación al circuito de remolienda del segundo ciclo está compuesta por el concentrado de flotación primaria del segundo ciclo y el concentrado de flotación barrido del primer ciclo, y, la alimentación de flotación primera limpieza del segundo ciclo está compuesta por el producto del circuito de remolienda del segundo ciclo y el relave de flotación segunda limpieza del primer ciclo. Los productos intermedios que se generan en el segundo ciclo son recirculados al tercer ciclo y así sucesivamente hasta el sexto ciclo.

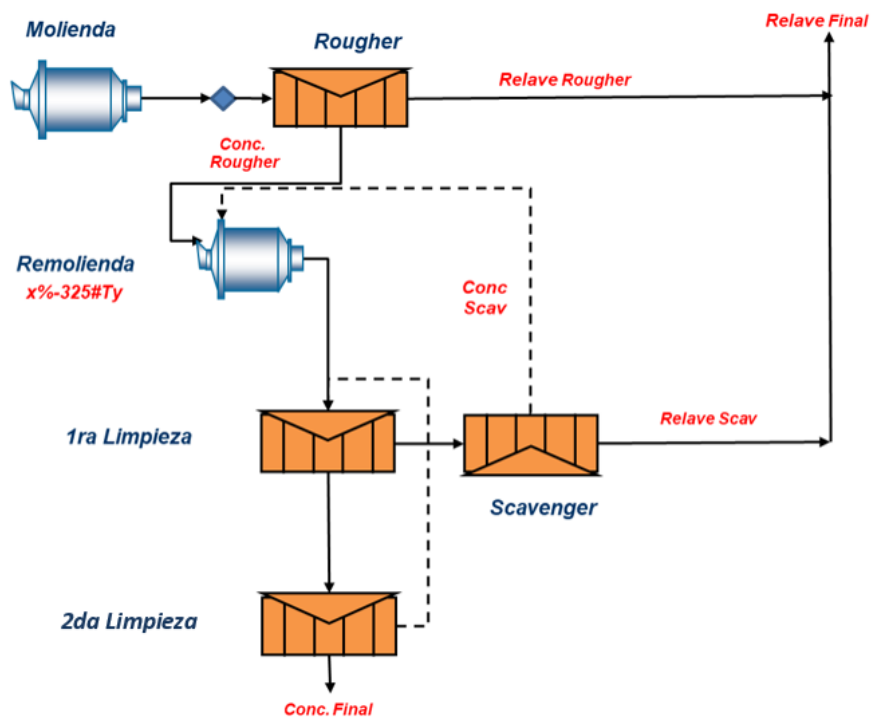


Figura 2.1: Diagrama de pruebas de flotación de limpieza en ciclo cerrado.

Es importante mencionar que los productos intermedios que se recirculan contienen agua con reactivos de flotación que es necesaria utilizar como agua de reposición en la etapa de flotación respectiva.

Respecto a los productos finales, el concentrado de flotación segunda limpieza, el relave de flotación primaria y el relave de flotación barrido son enviados a filtración, secado en horno, a temperatura controlada, extracción de sub-muestra para análisis químico y preparación del balance metalúrgico. Se debe generar igual número de alimentación a flotación primaria, concentrado de flotación segunda limpieza, relave de flotación primaria y relave de flotación barrido.

La generación de productos intermedios y finales es un método iterativo que considera desde el primer hasta el último ciclo. Los productos intermedios del último ciclo (N° 6) son enviados a filtración, secado en horno, a temperatura controlada, extracción de sub-muestra para análisis químico y preparación del balance metalúrgico.

Los análisis químicos dependen del tipo de mineral en estudio, por ejemplo, para un mineral de cobre se debe solicitar análisis químicos de cobre, molibdeno, plata, hierro y azufre, y, para un mineral de plomo-zinc (polimetálico) se debe solicitar análisis químico de plomo, zinc, plata y azufre.

La principal debilidad de los TCC es alcanzar el estado estacionario, estabilidad y conservación de masa debido al elevado número de flotaciones que involucra varios operadores y un tiempo de ejecución superior a 12 horas. El estado estacionario y estabilidad se puede verificar por leyes, finos y/o carga circulante.

Por lo indicado, se recomienda preparar un balance metalúrgico proyectado con la información generada por los últimos tres (3) ciclos.

Respecto al costo y plazo de ejecución de los TCC, depende del número de muestras involucradas. Por ejemplo, un programa metalúrgico que considera 10 TCC, requiere 10 muestras de 50 a 60 kg de masa cada una, provenientes de sondajes DDH tipo NQ, HQ o PQ, marinas de labores subterráneas o marinas de frente de banco. El costo de extracción y mapeo debería ser cero porque las actividades son realizadas, generalmente, por personal propio (geólogos) de la empresa minera. El costo de transporte de las muestras desde la operación minera (norte de Chile) a un laboratorio metalúrgico comercial en Santiago se estima en US\$ 1500. El costo de ejecución de 1 TCC se estima, actualmente, en US\$ 3000 (cotización telefónica) y el plazo de ejecución de los 10 TCC debería estar entre 2 y 3 meses. La Tabla 2.2 muestra la estimación del costo total del programa metalúrgico indicado, US\$ 31500.

Tabla 2.2: Estimación costo total de programa metalúrgico 10 TCC.

Actividad	Cantidad	Costo U.	Costo T.
Unidad	-	US\$	US\$
Extracción de Muestras	10	0	0
Mapeo Geológico de Muestras	10	0	0
Transporte de Muestras	10	Global	1500
Ejecución de TCC	10	3000	30000
Costo Total [US\$]		31500	

Finalmente, destacar que la principal debilidad de los TCC es alcanzar el estado estacionario, estabilidad y conservación de masa debido al elevado número de flotaciones que involucra varios operadores y un tiempo de ejecución superior a 12 horas.

### 2.3. Pruebas de flotación colectiva en planta piloto

Las pruebas de flotación colectiva en planta piloto (PP) son ensayos metalúrgicos, a escala piloto, destinados a establecer la respuesta metalúrgica de una muestra de mineral (pura o mezcla) al proceso de concentración por flotación.

Generalmente, estos ensayos metalúrgicos se realizan en la etapa de desarrollo de los proyectos nuevos (greenfield), ya sea en los estudios de pre-factibilidad o factibilidad, para respaldar los criterios y parámetros de diseño del proceso flotación colectiva. También se realizan este tipo de ensayos, cuando el proyecto incorpora una planta de flotación selectiva (molibdeno), para producir concentrado colectivo (cobre-molibdeno) en cantidad suficiente para un estudio de flotación de molibdeno, a escala de laboratorio.

Los proyectos en operación (complejos mina-planta), prácticamente, no requieren este tipo de ensayos. De hecho, la División Chuquicamata (DCH) de Codelco tiene una planta piloto de flotación llamada Planta Piloto Sulfuros (PPS) que se utilizaba para evaluar reactivos, diferentes configuraciones de circuitos de flotación y nuevas tecnologías de flotación, pero fue cerrada por reducción de costos hace unos 10 años.

La ejecución de estos ensayos metalúrgicos, a escala piloto, permiten coleccionar muestras puntuales o compósitos de diferentes flujos del circuito de flotación en estudio, cuando la operación se encuentra en estado estacionario, para el balance metalúrgico y pruebas complementarias. Se pueden tomar muestras de concentrado primario para pruebas de remolienda, muestras de concentrado colectivo para pruebas de espesamiento y filtración de concentrado y muestras de relave final para pruebas de espesamiento, transporte y depositación de relaves.

Las pruebas de transporte y depositación de relaves antes indicada, dependiendo de la escuela de Canadá o Australia, requieren muestras de relave final con masas del orden de 5 a 10 toneladas. Para la escuela de Canadá, las pruebas de transporte y depositación necesitan 3 y 5 t, respectivamente. Para la escuela de Australia, las pruebas de transporte y depositación necesitan 5 y 10 t, respectivamente. En los proyectos greenfield, la forma más eficiente y efectiva para generar esas masas de relave final es realizar pruebas de flotación colectiva en planta piloto.

Por lo tanto, las pruebas de flotación colectiva en planta piloto no solo permiten respaldar los criterios y parámetros de diseño del proceso de flotación colectiva, sino también, generar las muestras necesarias para estudios de flotación de molibdeno, a escala de laboratorio, y para realizar pruebas de remolienda, espesamiento y filtración de concentrado y espesamiento, transporte y depositación de relaves.

A modo ilustrativo, la Figura 2.2 presenta un diagrama de flujos de un circuito piloto de molienda y flotación (colectiva). La tarea de molienda es realizada en un molino de bolas de 3' x 4' operando en circuito cerrado directo con un clasificador de espiral de 12". El circuito de flotación está compuesto por una etapa de flotación primaria en seis (6) celdas Denver 8 (85 l), un molino de remolienda cónico de 3' x 8" operando en circuito cerrado inverso con un hidrociclón de 1", una etapa de flotación primera limpieza en dos (2) celdas C-32 (32 l), una etapa de flotación segunda limpieza en una (1) celda columna (D=4") y una etapa de flotación repaso en seis (6) celdas Denver 7 (40 l).



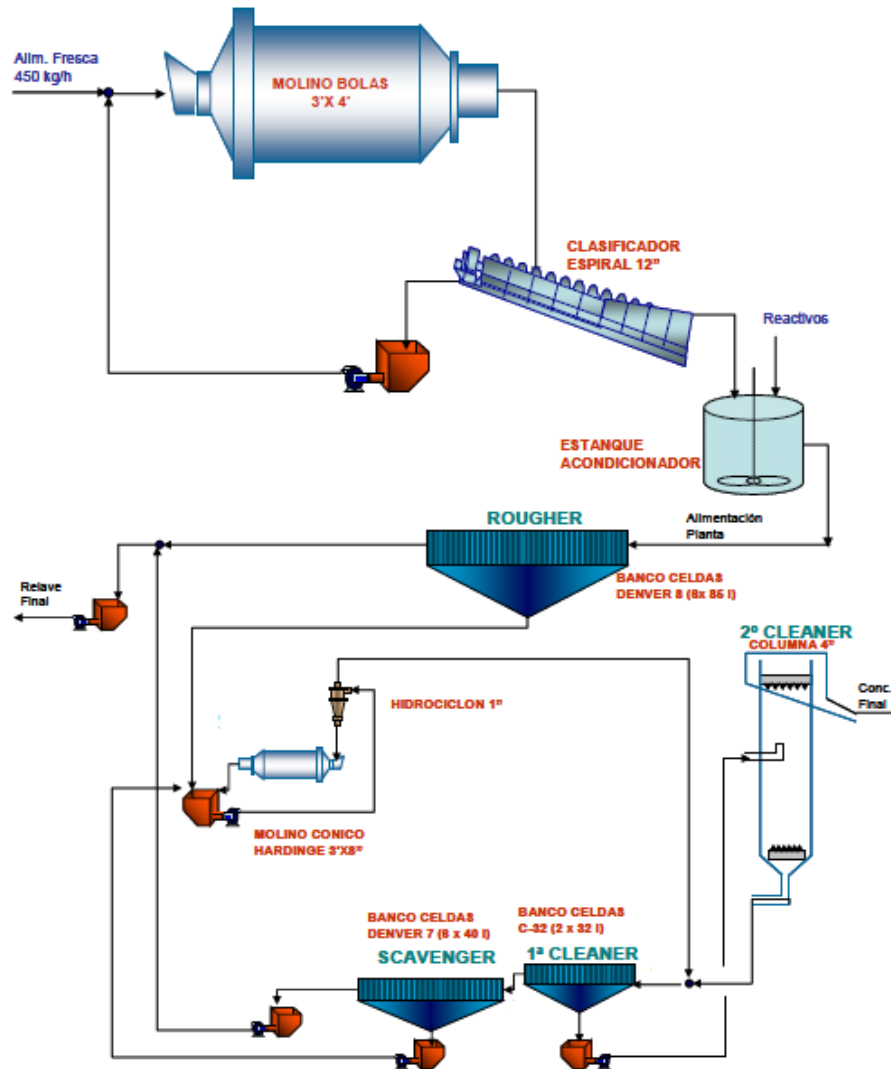


Figura 2.2: Diagrama de flujos de circuito piloto de molienda y flotación colectiva.

Este circuito piloto de molienda y flotación considera también equipos complementarios e instrumentación que se indica a continuación:

### Equipos Complementarios

- Correas transportadoras para el manejo de materiales en molienda.
- Bombas para transporte de pulpas.
- Filtro de placas a presión para filtrado de relaves.
- Estanques para almacenamiento de agua recirculada y agua fresca.
- Piscina de emergencia para derrames.

### Instrumentación

- Balanzas (2 y 60 kg) para control de flujos másico.

- Balanza tipo Marcy para control de concentración de sólido en pulpas.
- pH metro para control de pH y Eh.
- Flujómetros para control de agua adicionada al circuito de molienda y flotación.
- Analizador por Fluorescencia de Rayos X (FRX) para análisis químico rápido.

Antes de iniciar la operación de circuito piloto de molienda y flotación se establecen las condiciones y parámetros de operación para cada etapa de circuito piloto. Para la molienda se establece, por ejemplo, el porcentaje de velocidad crítica del molino (72 %), la concentración de sólido en peso en descarga molino (75 %), la carga circulante del circuito (250 %), la granulometría de producto del circuito (P80=210  $\mu\text{m}$ ), entre otros. Para la flotación se establece, por ejemplo, los tiempos de residencia de cada etapa de flotación, el pH para cada etapa de flotación, los tipos, dosis y puntos de aplicación de colectores, espumantes, activadores y depresantes, la granulometría de producto del circuito de remolienda (P80=30  $\mu\text{m}$ ), etc.

Cuando se inicia la operación del circuito piloto, la primera fase consiste en estabilizar el circuito de molienda y alcanzar la granulometría de producto objetivo, por ejemplo, P80=210  $\mu\text{m}$ . A continuación, se inicia la segunda fase que consiste en llenar las celdas de la flotación primaria y alcanzar la estabilidad operacional para, posteriormente, continuar llenando las celdas de las etapas de flotación primera limpieza, flotación segunda limpieza y flotación repaso y lograr la estabilidad operacional de todo el circuito de flotación. La tercera fase se alcanza cuando se logra el estado estacionario del circuito de flotación, por ejemplo, no hay variación en las leyes de cobre y molibdeno del relave de la flotación barrido. La cuarta fase consiste en realizar un muestreo general de todos los flujos de interés (muestras compósitos), que permita establecer un balance metalúrgico del circuito de flotación en estudio.

Respecto al costo y plazo de ejecución de las pruebas de flotación colectiva en planta piloto, depende del número de muestras involucradas. Por ejemplo, un programa metalúrgico que considera 3 pruebas de flotación colectiva en planta piloto, requiere 3 muestras de 10 t de masa cada una, provenientes de marinas de labores subterráneas o marinas de frente de banco. El costo de extracción y mapeo debería ser cero porque las actividades son realizadas, generalmente, por personal propio (geólogos) de la empresa minera. El costo de transporte de las muestras desde la operación minera (norte de Chile) a un laboratorio metalúrgico comercial en Santiago se estima en US\$ 6000. El costo de ejecución de 1 prueba de flotación colectiva en planta piloto se estima, actualmente, en US\$ 15000 y el plazo de ejecución de 3 pruebas piloto debería estar entre 2 y 3 meses. Se eligen 3 muestras por restricción de presupuesto. La Tabla 2.3 muestra la estimación del costo total del programa metalúrgico indicado, US\$ 51000.

Tabla 2.3: Estimación costo total de programa metalúrgico 3 pruebas piloto.

Actividad	Cantidad	Costo U.	Costo T.
Unidad	-	US\$	US\$
Extracción de Muestras	3	0	0
Mapeo Geológico de Muestras	3	0	0
Transporte de Muestras	3	Global	6000
Ejecución de pruebas en PP	3	15000	45000
Costo Total [US\$]		51000	

Finalmente, es importante indicar que la principal debilidad de las pruebas de flotación colectiva en planta piloto es el reducido número de pruebas que se pueden ejecutar debido al elevado costo de las mismas. Es decir, este tipo de pruebas piloto no permite estudiar la variabilidad de la Calidad del Concentrado en un sector del yacimiento o período específico del plan minero asociado al proyecto u operación.

Por lo indicado, estas pruebas piloto se realizan, generalmente, sólo para respaldar los criterios y parámetros de diseño de los procesos de flotación y espesamiento-transporte-depositación de relaves.

## 2.4. Mini Planta Piloto de Flotación Continua (MPP)

La Mini Planta Piloto de Flotación Continua (MPP) es un sistema compuesto por diferentes módulos que funcionan en forma continua e inter-conectados, excepto el módulo de molienda, que funciona en forma discontinua como se explica más adelante.

El primer módulo corresponde a un Molino de Barras/Bolas y su función es la reducción de tamaño del mineral. Las muestras de mineral de 10 kg cada una (cargas), son reducidas de tamaño desde una granulometría de alimentación  $F80 = 10$  M Tyler hasta una granulometría de producto, por ejemplo,  $P80 = 210 \mu\text{m}$ . Este es el único módulo que opera en forma discontinua.

El segundo módulo corresponde a un Estanque de Almacenamiento (Holding Tank) y su función es la acumulación de varias cargas de mineral y ajuste del pH y densidad de la pulpa de mineral (Concentración de sólido en peso, Cp).

El tercer módulo corresponde a un Estanque de Alimentación (Feed Tank) y su función es mantener una alimentación controlada hacia la máquina de flotación continua, en términos de flujo volumétrico de pulpa (l/min), granulometría de alimentación (F80) y Concentración de sólido en peso (%).

El cuarto módulo corresponde a una Máquina de Flotación Continua (Continuous Flotation Machine, CFM) cuya función es realizar el proceso de concentración por flotación. Este módulo está compuesto por doce (12) celdas convencionales de flotación de laboratorio de 1,7 litros cada una, tipo Denver. Cada celda de flotación tiene su sistema de agitación e inyección de aire. Los concentrados y relaves generados en las diferentes etapas de flotación en la CFM son transportados a través de bombas peristálticas.

El quinto módulo corresponde a un Molino de Remolienda (Pin Mill) cuya función es realizar la remolienda del concentrado primario y concentrado de barrido (opcional). El molino de remolienda es del tipo vertical con un sistema que permite agitar un lecho de bolas de acero ( $D = 5 \text{ mm}$ ). La alimentación y producto del molino de remolienda son transportados a través de bombas peristálticas.

El sexto módulo corresponde a una Columna de Flotación cuya función es realizar una etapa de flotación columnar (primera o segunda limpieza). Esta columna de flotación tiene en la parte superior un sistema de lavado de espuma y cuenta con un sistema de inyección de burbujas de aire. La alimentación, concentrado y relave de la columna de flotación son transportados a través de bombas peristálticas.

El séptimo módulo corresponde a un Sistema Dispensador de Reactivos cuya función es adicionar colectores, espumantes y/o depresores en diferentes puntos del circuito de flotación en estudio (CFM, Pin Mill y/o Columna de Flotación).

El octavo y último módulo corresponde a un Sistema de Adquisición de Datos cuya función es registrar en línea un conjunto de parámetros operacionales de la MPP a través de un controlador lógico programable (PLC). Las variables operacionales tales como pH, Cp, leyes y otros en diferentes puntos del circuito de flotación en estudio deben ser registrados en forma manual.

La *Figura 2.3* muestra los diferentes módulos que conforman la Mini Planta Piloto de Flotación y la interconexión entre ellos.

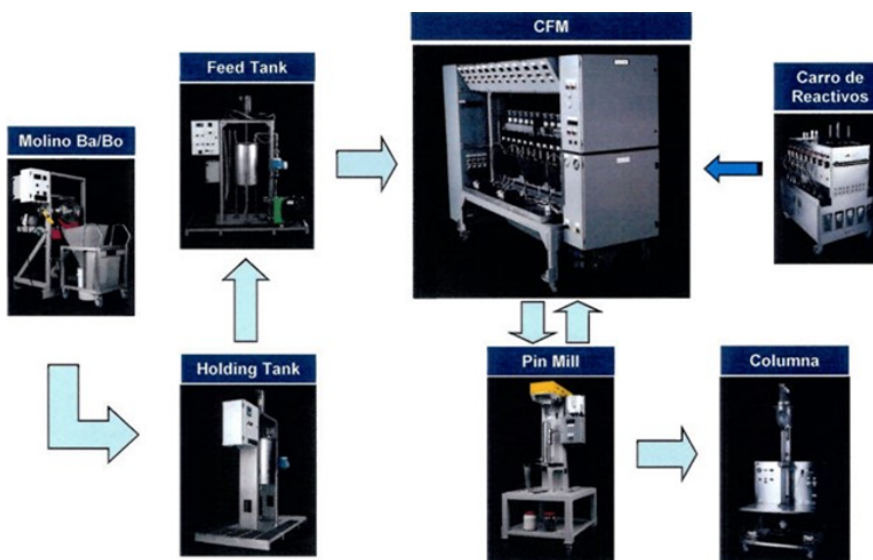


Figura 2.3: Módulos de la mini planta de flotación continua.

La *Figura 2.4* muestra los principales módulos que conforman la Mini Planta Piloto de Flotación Continua de Codelco y que se encuentra ubicada en instalaciones del laboratorio metalúrgico SGS Minerals, en Santiago de Chile.



Figura 2.4: Módulos de la mini planta piloto de flotación continua.

Respecto al costo y plazo de ejecución de las pruebas de flotación colectiva en MPP, depende del número de muestras involucradas. Por ejemplo, un programa metalúrgico que considera 10 pruebas de flotación colectiva en MPP, requiere 10 muestras de 180 kg de masa cada una, provenientes de sondajes DDH tipo NQ, HQ o PQ, marinas de labores subterráneas o marinas de frente de banco (experiencia laboral del autor). El costo de extracción y mapeo debería ser cero porque las actividades son realizadas, generalmente, por personal propio (geólogos) de la empresa minera. Además, las muestras indicadas son extraídas de sondajes geológicos que ya fueron mapeados por Geología. El costo de transporte de las muestras desde la operación minera (norte de Chile) a un laboratorio metalúrgico comercial en Santiago se estima en US\$ 2000. El costo de ejecución de 1 prueba de flotación colectiva en MPP se estima, actualmente, en US\$ 6500 y el plazo de ejecución de 10 pruebas de flotación colectiva en MPP se estima en 2 a 3 meses. La Tabla 2.4 muestra la estimación del costo total del programa metalúrgico indicado, US\$ 67000.

Tabla 2.4: Estimación costo total de programa metalúrgico 10 MPP.

Actividad	Cantidad	Costo U.	Costo T.
Unidad	-	US\$	US\$
Extracción de Muestras	10	0	0
Mapeo Geológico de Muestras	10	0	0
Transporte de Muestras	10	Global	2000
Ejecución de pruebas en MPP	10	6500	65000
Costo Total [US\$]		67000	

Importante destacar que la principal fortaleza de las pruebas de flotación colectiva en MPP, son la reducida masa (180 kg) requerida de muestra para ejecutar una prueba MPP. Esto permite, por una parte, estudiar la variabilidad de la Calidad del Concentrado en un sector del yacimiento o período específico del plan minero asociado al proyecto u operación, y, por otra parte, respaldar los criterios y parámetros de diseño de los procesos de flotación y espesamiento de relaves para los proyectos.

A continuación, en Tabla 2.5 se presenta un resumen de los costos asociados para una evaluación metalúrgica típica en la industria y la principal ventaja y desventaja que tienen las metodologías analizadas (TCC, PP y MPP).

Tabla 2.5: Costos y principal ventaja-desventaja de las metodologías TCC, PP y MPP.

Aspecto	TCC	PP	MPP
Costo	10 ensayos	3 ensayos	10 ensayos
	30-35 kUS\$	50-60 kUS\$	65-70 kUS\$
Ventajas	Requiere masas de 50 a 80 kg, lo que implica muy bajos costos y tiempos en extracción y transporte de muestras y experimentación.	Permite generar concentrado colectivo (Cu-Mo) y relaves en cantidad y calidad suficiente para realizar evaluaciones metalúrgicas.	Requiere una baja masa de muestra (150 a 180 kg) para caracterizar minerales presentes y futuros a partir de sondajes geológicos.
Desventajas	Generalmente, no logran estabilidad, estado estacionario y conservación de masa, subestimando las concentraciones de subproductos y contaminantes en los concentrados.	Requiere masas de 5 a 25 t, lo que implica muy elevados costos y tiempos en extracción y transporte de muestras y experimentación.	Existe sólo un (1) proveedor del servicio para la industria minera en Chile.

Finalmente, la Tabla 2.6 y Tabla 2.7 muestran diferentes casos que se presentan en la industria minera del cobre donde no es posible a veces utilizar la metodología MPP, y, por lo tanto, se deben realizar pruebas de flotación en planta piloto.

Tabla 2.6: Casos de aplicación de las metodologías MPP y PP, parte 1.

Casos	TCC	MPP	PP
<p>1. Planificación de la Producción de mediano y largo plazo.</p> <p>Utilizando muestras de sondajes geológicos o metalúrgicos DDH, muestras de frente de banco en minas a rajo abierto o muestras de puntos de extracción (drawpoint) en minas subterráneas, se pueden realizar pruebas de flotación colectiva en MPP para determinar la recuperación de cobre y molibdeno, calidad del concentrado colectivo (Cu-Mo) y sedimentación y reología de relaves.</p>		✓	
<p>2. Desarrollo de Proyectos Brownfield (Expansión).</p> <p>Similar al caso 1.</p>		✓	
<p>3. Desarrollo de Proyectos Greenfield (Nuevos).</p> <p>Utilizando muestras de sondajes geológicos DDH o marinas de piques y túneles de exploración, se pueden realizar pruebas de flotación colectiva en MPP para determinar la recuperación de cobre y molibdeno, calidad del concentrado colectivo (Cu-Mo) y sedimentación y reología de relaves.</p>		✓	
<p>4. Evaluación de nuevas tecnologías de flotación.</p> <p>Para evaluar nuevas tecnologías de flotación como la celda Jameson o la celda Hydrofloat, a escala semi-piloto, es necesario realizar pruebas de flotación primaria, a escala piloto, para generar concentrados y colas primarias en cantidad y calidad suficiente para ejecutar los protocolos de evaluación establecidos por los proveedores.</p>			✓
<p>5. Evaluación de tipos de aguas en flotación colectiva (Cu-Mo).</p> <p>Para evaluar el efecto de diferentes tipos de aguas (agua fresca, agua de mar, agua de mar desalada, agua recirculada del depósito de relaves (TSF), agua recirculada de espesadores, etc.) y las mezclas, se pueden realizar pruebas de flotación colectiva en MPP para conocer los efectos en la recuperación de cobre y molibdeno, calidad de concentrado y sedimentación y reologías de relaves.</p>		✓	

Tabla 2.7: Casos de aplicación de las metodologías MPP y PP, parte 2.

Casos	TCC	MPP	PP
<p>6. Diseño de un circuito de flotación de molibdeno.</p> <p>Para diseñar un circuito de flotación de molibdeno seguro, técnicamente, es necesario realizar pruebas de flotación colectiva en planta piloto para generar concentrado colectivo (Cu-Mo) en cantidad y calidad suficiente para ejecutar, posteriormente, una prueba de flotación de molibdeno. Estas pruebas permiten respaldar los criterios y parámetros de diseño de procesos, como el número de etapas, tiempos de residencia, consumos de reactivos, etc.</p>			✓
<p>7. Diseño de sistema de transporte y depositación de relaves en pasta o filtrado.</p> <p>Para diseñar un sistema de transporte y depositación de relaves en pasta o filtrado, es necesario realizar pruebas de flotación colectiva en planta piloto para generar relaves en cantidad y calidad suficiente que permita ejecutar, posteriormente, pruebas de transporte y depositación que requieren masas de 1 a 5 ton.</p>			✓

# Capítulo 3

## Metodología

Este capítulo presenta en forma detallada el procedimiento experimental para ejecutar una prueba de flotación colectiva en MPP. Se incluye los procedimientos previos a la ejecución de la prueba MPP tales como, la preparación mecánica de las muestras, la caracterización física, química y mineralógica de las muestras, la prueba de flotación primaria en cinética de laboratorio (estándar de la operación), entre otras.

Además, se presenta la metodología experimental para “sintonizar” o “calibrar” la MPP con el diagrama de flujos, balance metalúrgico, y, condiciones y parámetros de operación proporcionados por la operación minera o proyecto.

### 3.1. Preparación mecánica de muestras

Las muestras utilizadas en las pruebas de flotación en MPP deben tener una masa entre 150 y 200 kg. Las muestras pueden ser marinas de frente de bancos (minas a cielo abierto), marinas de labores subterráneas (minas subterráneas), testigos de sondajes a diamantina tipo PQ, HQ o NQ, o testigos de sondajes de aire reverso (AR), ver *Figura 3.1*.



Figura 3.1: Marinas de frente de banco y sondajes a diamantina tipo PQ.

Cada muestra debe ser sometida a un proceso de **reducción de tamaño**, hasta alcanzar una granulometría 100% bajo malla 10 Tyler (1,65 mm), y, a un proceso de corte, para obtener al menos 15 sub-muestras o lotes de 10 kg. cada una, aproximadamente.

El protocolo de preparación mecánica de muestras utilizado debe cumplir con la **Teoría de Muestreo** (Gy, 1979) & (Pitard, 2019), para asegurar la representatividad de las sub-muestras de 10 kg. generadas. Como referencia, un protocolo de preparación mecánica de muestras, utilizado por una empresa minera nacional, se presenta en el Anexo A.



Para efectos de **Control de Calidad**, se debe realizar análisis granulométrico (% bajo malla 10 Tyler) y análisis químico (% CuT) al 20 % de las sub-muestras de 10 kg. generadas en el proceso de corte.

## **3.2. Caracterización física, química y mineralógica de cabeza**

Es necesario realizar una caracterización física, química y mineralógica de cada muestra (cabeza) para entender los resultados metalúrgicos de la prueba de flotación en MPP. Para esto, se debe seleccionar, en forma aleatoria, una (1) sub-muestra de 10 kg. y realizar los ensayos y análisis que se indican a continuación:

- Gravedad específica.
- CuT, CuS Ácido Cítrico, MoT, FeT y S.
- Composición, Liberación y Asociaciones.

## **3.3. Prueba de flotación primaria en laboratorio**

Es necesario realizar una prueba de flotación primaria en cinética, con el estándar de flotación de la operación minera o proyecto, para tener una referencia (recuperación primaria de cobre y razón de enriquecimiento) durante la ejecución de la prueba de flotación en MPP. Para esto, se debe seleccionar, en forma aleatoria, una (1) sub-muestra de 10 kg. y realizar los ensayos que se indican a continuación:

- Prueba de Molienda (Cinética de Molienda).
- Consumo de Modificador de pH.
- Prueba de Flotación Primaria en Cinética (CuT y MoT).

## **3.4. Cinética de molienda en MPP**

Es necesario realizar una cinética de molienda en el molino de bolas (batch) de la MPP con el propósito de determinar el tiempo requerido por cada muestra (en estudio) para alcanzar el P80 objetivo, por ejemplo, 180  $\mu\text{m}$ . Para esto, se debe seleccionar, en forma aleatoria, tres (3) sub-muestras de 10 kg. cada una y realizar los ensayos que se indican a continuación:

- Pruebas de Molienda (Cinética de Molienda).
- Determinación pH natural.
- Consumo de Modificador de pH.

### 3.5. Sintonización o calibración de MPP

La etapa de Sintonización o Calibración de la MPP consiste en **modificar las condiciones y/o parámetros de operación de la MPP** tales como: dosis y puntos de aplicación de reactivos, número de celdas, nivel de pulpa por celda, grado de agitación (rpm) por celda y cantidad de aire por celda en cada etapa del circuito de flotación en evaluación, grado de agitación en molino de remolienda, altura de espuma o nivel de aireación en las columnas de flotación, entre otros, hasta alcanzar las recuperaciones metalúrgicas y leyes indicadas en el balance metalúrgico de referencia, proporcionado por la operación minera o proyecto.

Si existe la operación minera, se utiliza una muestra compósito colectada en la alimentación a flotación primaria industrial. Si no existe la operación minera (proyecto), se utiliza una muestra compósito a partir de los sondeos geológicos ubicados en los primeros años de operación del proyecto.

### 3.6. Pruebas de flotación MPP

Las pruebas de flotación en MPP se inician una vez terminada la etapa de Sintonización, y, realizadas las cinéticas de molienda en MPP para cada una de las muestras en estudio. Estas pruebas de flotación en MPP tienen una duración máxima de 12 horas.

Cada prueba de flotación en MPP considera las actividades siguientes:

- Molienda de doce (12) sub-muestras de 10 kg. cada una, según tiempo indicado por Cinética de Molienda en MPP.
- Llenado de Estanque de Almacenamiento (Holding Tank) y ajuste de pH y densidad de pulpa.
- Llenado de Estanque de Alimentación (Feed Tank).
- Preparación de reactivos para el Sistema Dispensador de Reactivos de MPP.
- Llenado de celdas de flotación, molino de remolienda y columnas de flotación.
- Control de tarea de remolienda (P80).
- Verificación de mediciones de pH y potencial en MPP.
- Verificación de estabilidad y estado estacionario del circuito de flotación utilizando FRX a muestras puntuales.
- Muestreo completo del circuito de flotación para la muestra en evaluación.
- Recopilación de condiciones y parámetros de operación del circuito de flotación en evaluación (PLC).
- Vaciado y lavado de celdas de flotación, molino de remolienda y columnas de flotación.

La configuración del circuito de flotación en MPP más utilizada corresponde al circuito de flotación con una etapa de flotación primaria y dos (2) etapas de flotación de limpieza, la primera etapa, en celdas convencionales, y, la segunda etapa, en celda columnar (ver *Figura 3.2*).

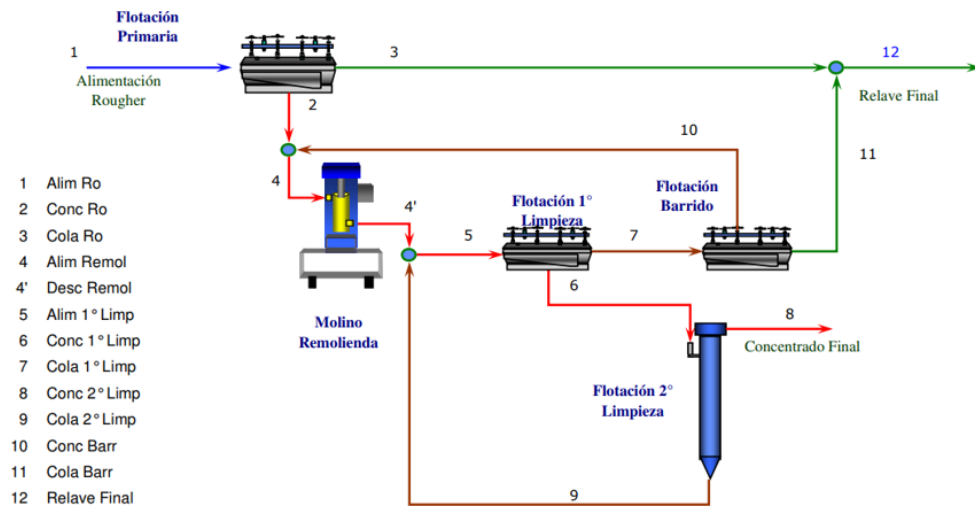


Figura 3.2: Configuración de circuito de flotación colectiva en MPP

### 3.7. Caracterización física, química y mineralógica de productos

Todas las muestras colectadas durante el muestreo completo del circuito de flotación en MPP deben ser enviadas al laboratorio metalúrgico para realizar los ensayos y análisis que se indican a continuación:

- Concentración de sólido en peso ( $C_p$ ).
- Análisis químico al agua del relave final.
- Filtración y Secado.
- Gravedad específica.
- Análisis granulométrico.
- Preparación de muestras para análisis químico.
- Preparación de muestras para análisis mineralógico.

Las *Tablas 3.1, 3.2 y 3.3* presentan la caracterización mineralógica, física y química que se debe realizar a los diferentes flujos del circuito de flotación colectiva ensayado y muestreado en MPP, respectivamente.

Tabla 3.1: Caracterización mineralógica para circuito de flotación colectiva en MPP.

Flujo	Análisis Mineralógico (QEMSCAN)	Muestra
1. Alimentación Flotación Primaria	AM	1
2. Concentrado Flotación Primaria	AM	1
3. Cola Flotación Primaria	AM	1
4. Alimentación Remolienda		1
5. Alimentación Flotación 1° Limpieza		1
6. Concentrado Flotación 1° Limpieza		1
7. Cola Flotación 1° Limpieza		1
8. Concentrado Flotación 2° Limpieza	AM	1
9. Cola Flotación 2° Limpieza		1
10. Concentrado Flotación Barrido		1
11. Cola Flotación Barrido		1
12. Relave Final		1

**AM:** Análisis Mineralógico

Tabla 3.2: Caracterización física para circuito de flotación colectiva en MPP.

Flujo	Análisis Físico			Muestra
	GE	AG		
1. Alimentación Flotación Primaria	GE	AG		1
2. Concentrado Flotación Primaria	GE			1
3. Cola Flotación Primaria	GE			1
4. Alimentación Remolienda	GE	AG		1
5. Descarga Remolienda		AG		1
6. Alimentación Flotación 1° Limpieza	GE			1
7. Concentrado Flotación 1° Limpieza	GE			1
8. Cola Flotación 1° Limpieza	GE			1
9. Concentrado Flotación 2° Limpieza	GE	AG		1
10. Cola Flotación 2° Limpieza	GE			1
11. Concentrado Flotación Barrido	GE			1
12. Cola Flotación Barrido	GE			1
13. Relave Final	GE			1

**GE:** Gravedad Específica **AG:** Análisis Granulométrico

Tabla 3.3: Caracterización química para circuito de flotación colectiva en MPP.

Flujo	Análisis Químico													Muestra
1. Alimentación Flotación Primaria	CuT	CuS	MoT	FeT	S	As	Ag	Au						1
2. Concentrado Flotación Primaria	CuT		MoT	FeT	S									1
3. Cola Flotación Primaria	CuT		MoT	FeT	S									1
4. Alimentación Remolienda	CuT		MoT	FeT										1
5. Alimentación Flotación 1° Limpieza	CuT		MoT											1
6. Concentrado Flotación 1° Limpieza	CuT		MoT											1
7. Cola Flotación 1° Limpieza	CuT		MoT											1
8. Concentrado Flotación 2° Limpieza	CuT		MoT		S	As	Ag	Au	Sb	Bi	Pb	Zn	Ins	1
9. Cola Flotación 2° Limpieza	CuT		MoT		S									1
10. Concentrado Flotación Barrido	CuT		MoT											1
11. Cola Flotación Barrido	CuT		MoT											1
12. Relave Final	CuT		MoT		S									1
13. Agua Relave Final	$Cu^{+2}$	MoT	$Ca^{+2}$	$Cl^{-}$	$SO_4^{-2}$	pH								1

### 3.8. Informe final

El informe final, en formato digital o papel, debe presentar para cada muestra al menos los contenidos siguientes:

- Objetivo y Alcance de prueba de flotación en MPP.
- Resumen de Caracterización Física, Química y Mineralógica de Cabeza (Muestra).
- Resumen de Pruebas de Flotación Primaria en Lab y Cinética de Molienda en MPP.
- Diagrama de Flujos del Circuito de Flotación MPP.
- Sintonización de Circuito de Flotación MPP.
- Condiciones y Parámetros de Operación del Circuito de Flotación MPP.
- Informe de Operación y Control Metalúrgico.
- Resumen de Caracterización Física, Química y Mineralógica de Productos.
- Balance de Materiales y Metalúrgico.
- Análisis de Resultados.
- Conclusiones
- Anexos:
  - Descripción de Muestra Recibida en Lab.
  - Control de Calidad (Preparación mecánica de muestra).
  - Respaldos de Caracterización Física, Química y Mineralógica de Cabeza.
  - Respaldos de Pruebas de Flotación Primaria en Lab y Cinética de Molienda en MPP.
  - Respaldos de Caracterización Física, Química y Mineralógica de Productos.

Finalmente, la *Figura 3.3*. presenta un diagrama lógico de procesos que resume el procedimiento experimental de la MPP explicado en este capítulo.

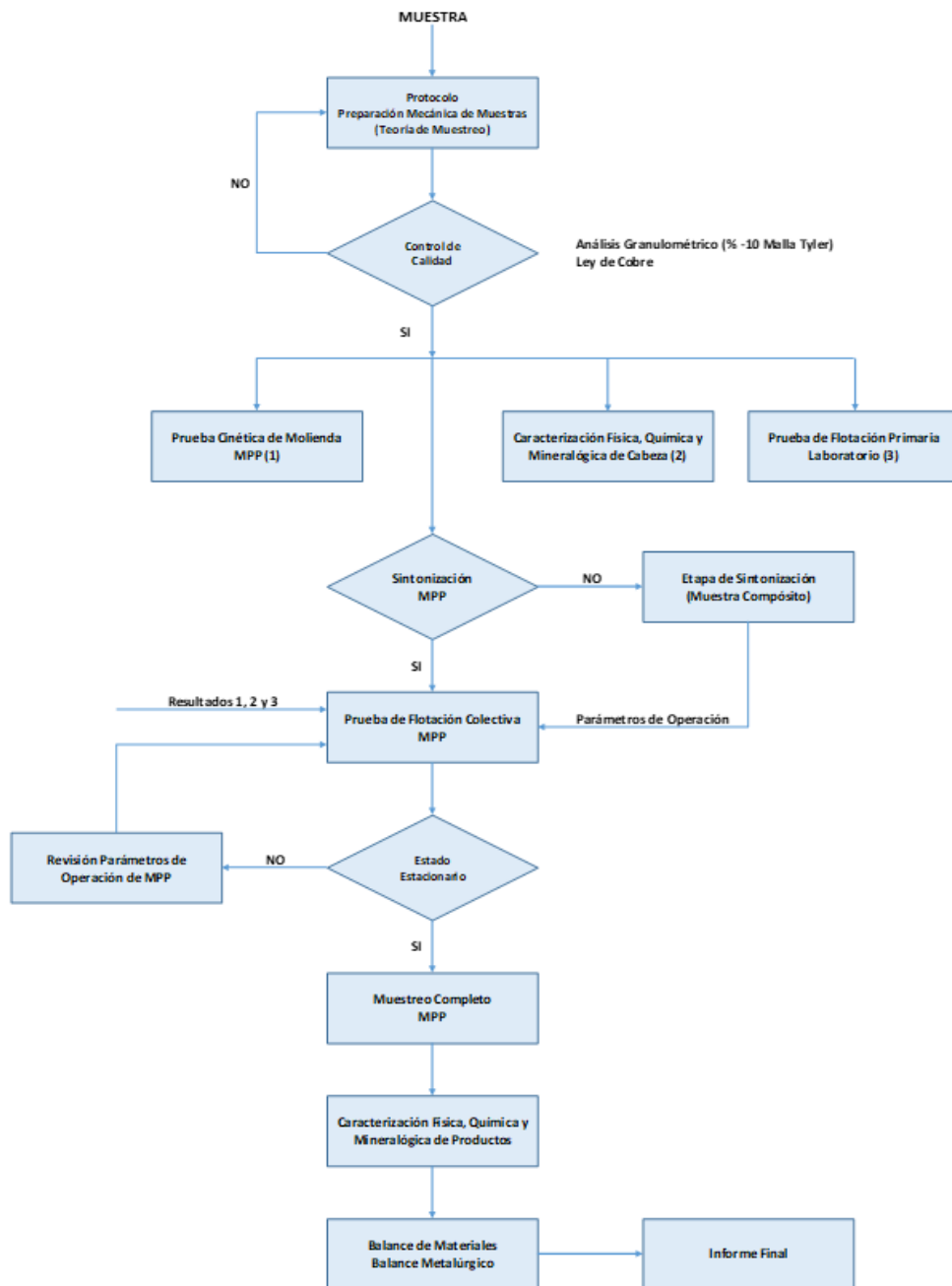


Figura 3.3: Diagrama lógico de procesos de procedimiento experimental de MPP.

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1. Aplicaciones en la Industria Minera

Este capítulo presenta dos (2) proyectos de la industria del cobre nacional donde han aplicado la tecnología MPP, uno en el norte (Proyecto 1) y otro en la zona central de Chile (Proyecto 2). Se presenta una breve descripción de los proyectos, el objetivo de las pruebas MPP, los resultados experimentales obtenidos y los principales hallazgos.

#### 4.1.1. Proyecto 1

Este proyecto minero consiste, básicamente, en el cambio del método de explotación del yacimiento de minería subterránea a rajo abierto para continuar explotando las reservas remanentes, in-situ y quebrado, durante los próximos 40 años. El proyecto considera, además, el reemplazo e incorporación de equipos nuevos en algunas de las etapas del proceso productivo en las plantas de Concentración y Lixiviación. Con todo, el proyecto aumenta un 50 % la producción de cobre fino contenido en concentrados y cátodos de cobre.

Producto del cambio del método de explotación del yacimiento de minería subterránea a minería rajo abierto, aparecen unidades geológicas menos competentes por la presencia de la **alteración Argílica y Argílica Avanzada**, con menor resistencia a la molienda pero con altos contenidos de **limonitas, arcillas y piritita**, lo que genera problemas en la recuperación metalúrgica y calidad del concentrado de cobre, según los estudios realizados en la etapa de pre-factibilidad del proyecto y otros antecedentes históricos.

Por lo indicado, el proyecto conceptualizó un programa de pruebas de flotación colectiva en MPP con el objetivo de respaldar y/o sustentar la **calidad del concentrado de cobre para los primeros 10 años del plan de producción**. Estas pruebas de flotación colectiva en MPP fueron realizadas durante el estudio de factibilidad del proyecto (Codelco, 2019).

Las muestras utilizadas en estas pruebas, fueron seleccionadas desde sondajes DDH tipo PQ ( $\varnothing = 82$  mm) realizados en una campaña de sondajes geológico, durante el estudio de pre-factibilidad del proyecto.

La configuración del circuito de flotación en MPP ensayado, corresponde al circuito de flotación con una etapa de flotación primaria y dos (2) etapas de flotación de limpieza, la primera etapa, en celdas convencionales, y, la segunda etapa, en celda columnar (ver *Figura 4.1*).



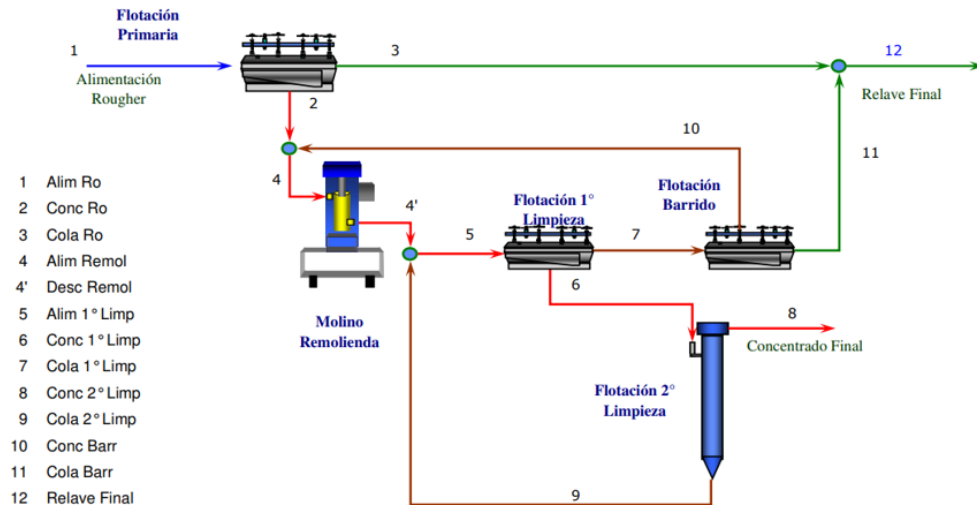


Figura 4.1: Configuración de circuito de flotación colectiva en MPP.

La *Tabla 4.1 y 4.2* presenta los resultados metalúrgicos obtenidos en las pruebas de flotación colectiva en MPP para quince (15) muestras seleccionadas en diferentes unidades geológicas del yacimiento. Las muestras de sulfuros primarios (6) tienen una ley de cabeza promedio de 0,36 % CuT y 0,009 % MoT. Las muestras de sulfuros secundarios (7) tienen una ley de cabeza promedio de 1,05 % CuT y 0,007 % MoT.

Las muestras de **sulfuros primarios** lograron, para el cobre, una recuperación primaria promedio de 78,5 %, una recuperación limpieza promedio de 96,9 % y una recuperación global promedio de 76,1 %, y, para el molibdeno, una recuperación global promedio de 62,1 %. La ley de cobre y molibdeno en el concentrado colectivo alcanzó un valor promedio de 20,6 % CuT y 0,43 % MoT.

Las muestras de **sulfuros secundarios** lograron, para el cobre, una recuperación primaria promedio de 86,1 %, una recuperación limpieza promedio de 96,7 % y una recuperación global promedio de 83,3 %, y, para el molibdeno, una recuperación global promedio de 58,9 %. La ley de cobre y molibdeno en el concentrado colectivo alcanzó un valor promedio de 21,5 % CuT y 0,21 % MoT.

Tabla 4.1: Resultados metalúrgicos para muestras M1 a M15 (Parte 1).

Muestra	Sondaje N°	ZM	Preparación Mecánica de Muestras				Laboratorio	
			CuT	MoT	CuS <sub>Ctrico</sub>	Rs	CuT Alim.	Rec. Ro CuT
			(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	Std. Nuevo
M1	DD 10932	Sulfuro 2°	1,57	0,005	0,12	7,7	1,60	92,6
M2	DD 10954	Sulfuro 1° Py > Cpy	0,29	0,008	0,01	1,9	0,30	87,5
M3	DD 10954	Sulfuro 1° Py > Cpy	0,29	0,008	0,01	2,7	0,32	84,6
M4	DD 10941	Sulfuro 2°	0,88	0,015	0,04	5,1	0,94	69,6
M5	DD 10941	Sulfuro 1° Py > Cpy	0,51	0,019	0,01	1,9	0,58	64,6
M6	DD 10941	Sulfuro 1° Py > Cpy	0,56	0,010	0,01	1,9	0,63	69,5
M7	DD 10940	Mixto	0,39		0,07	18,6	0,39	
M8	DD 10955	Sulfuro 2°	1,68	0,006	0,09	5,3	1,75	87,9
M9	DD 10931	Mixto	0,80		0,17	21,0	0,80	
M10	DD 10912	Sulfuro 2°	0,99	0,008	0,07	6,6	0,99	83,0
M11	DD 10955	Sulfuro 1° Py > Cpy	0,29	0,004	0,01	1,3	0,28	79,8
M12	DD 10932	Sulfuro 2°	0,59	0,013	0,04	6,4	0,64	76,5
M13	DD 10957	Sulfuro 2°	1,13	0,003	0,31	8,3	1,31	83,0
M14	DD 10957	Sulfuro 1° Py > Cpy	0,23	0,002	0,01	1,3	0,25	81,1
M15	DD 10941	Sulfuro 2°	0,53	0,001	0,04	7,0	0,56	79,8
<b>Promedio M1 a M15</b>			<b>0,36</b>	<b>0,009</b>	<b>0,01</b>	<b>2,2</b>	<b>0,39</b>	<b>77,8</b>
<b>Promedio Sulfuro 2°</b>			<b>1,05</b>	<b>0,007</b>	<b>0,06</b>	<b>5,3</b>	<b>1,11</b>	<b>81,8</b>

Tabla 4.2: Resultados metalúrgicos para muestras M1 a M15 (Parte 2).

Muestra	Planta Mini Piloto (MPP)					
	Rec. Ro CuT			Rec. MoT	CuCo	CuCo
	Rougher	Cleaner	Global	Global	(%) CuT	(%) MoT
M1	94,6	98,7	93,4	63,5	13,1	
M2	87,8	94,4	82,9	64,0	19,9	0,42
M3	86,8	97,8	84,9	72,0	17,3	0,35
M4	81,4	94,9	77,2	76,4	25,8	0,43
M5	64,6	97,0	62,7	43,0	27,1	0,71
M6	72,2	96,5	69,7	61,7	27,2	0,41
M7						
M8	92,3	96,3	88,9	84,6	35,2	0,12
M9						
M10	90,8	98,2	81,6	25,0	11,5	0,03
M11	83,1	97,1	81,7	70,0	20,9	0,25
M12	82,2	98,2	81,7	33,6	27,8	0,25
M13	81,8	94,6	77,4	70,0	20,7	
M14	76,8	97,7	75,0		11,1	
M15	79,3	96,4	76,4		16,2	
<b>Promedio M1 a M15</b>	<b>78,5</b>	<b>96,9</b>	<b>76,1</b>	<b>62,1</b>	<b>20,6</b>	<b>0,428</b>
<b>Promedio Sulfuro 2°</b>	<b>86,1</b>	<b>96,7</b>	<b>83,3</b>	<b>58,9</b>	<b>21,5</b>	<b>0,207</b>

Sobre la base de los resultados obtenidos, se puede comentar lo siguiente:

- Sulfuros Primarios

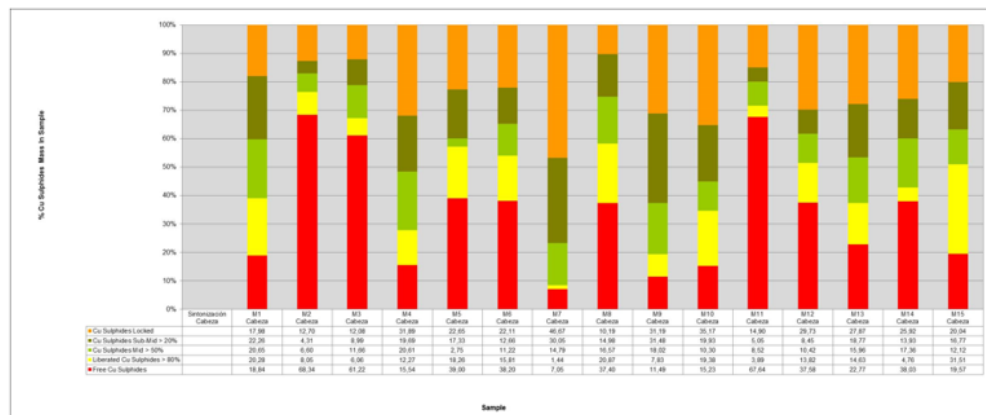
- Se observa una **recuperación primaria de cobre promedio muy baja** (78,5 %) que no se explica por la presencia de cobre soluble ya que la razón de solubilidad es sólo 2,2 % y con una alta variabilidad (64,6 a 87,8 %).
- La recuperación limpieza de cobre promedio alcanza un valor típico para este tipo de circuito de flotación (96,9 %).
- La ley de cobre en el concentrado colectivo es relativamente baja (20,6 % CuT) lo que se explica, en parte, por la baja ley de cabeza (0,36 % CuT).

- Sulfuros Secundarios

- Se observa una recuperación primaria de cobre promedio alta (86,1 %) pero con una alta variabilidad (79,3 a 94,6 %).
- La recuperación limpieza de cobre promedio alcanza un valor típico para este tipo de circuito de flotación (96,7 %).
- La **ley de cobre en el concentrado colectivo es relativamente baja** (21,5 % CuT) que no se explica por la ley de cabeza (1,05 % CuT).

Con el propósito de entender la causa que genera una baja recuperación primaria de cobre en los sulfuros primarios y una baja ley de cobre en el concentrado colectivo de los sulfuros secundarios, se revisaron los análisis mineralógicos QEMSCAN de cabeza, concentrado y relaves asociados a M1 a M15.

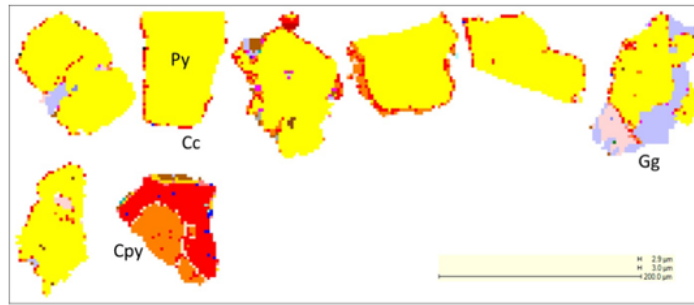
Se concluye que: a) el grado de liberación de los sulfuros de cobre alcanza 65 a 70 % al P80=180 µm (grado de molienda del proyecto), debido a la mineralización finamente diseminada de los sulfuros de cobre, provocando una baja recuperación primaria de cobre (ver *Figura 4.2*), y, b) el enriquecimiento débil de los sulfuros secundarios (calcosina sobre pirita) facilita la flotación de abundante cantidad de pirita con trazas de calcosina, provocando una baja ley de cobre en el concentrado colectivo (ver *Figura 4.3*).



≈ 68 % liberación de Cc + Cpy

Figura 4.2: Análisis mineralógico QEMSCAN muestras M1 a M15 (cabezas).

### Sulfuros Secundario Débil



### Sulfuros Primario

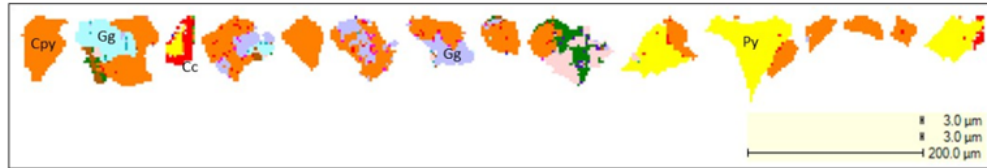


Figura 4.3: Análisis mineralógico QEMSCAN muestras M1 a M15 (concentrado).

Para aumentar el grado de liberación de los sulfuros de cobre a niveles de 80 a 90% y con ello la recuperación primaria de cobre, se requiere incrementar el grado de molienda, por ejemplo,  $P_{80} = 120 \mu\text{m}$ , pero esto no fue posible debido a la necesidad de minimizar la inversión inicial del proyecto.

Para reducir, parcialmente, la cantidad de pirita con trazas de calcosina en el concentrado colectivo, se decide aumentar el grado de remolienda de 45-50  $\mu\text{m}$  (muestras M1 a M15) a 30-35  $\mu\text{m}$  (M16 a M20) y adicionar un depresor de pirita en el circuito de flotación de limpieza.

La *Tabla 4.3 y 4.4* presenta los resultados metalúrgicos obtenidos en las pruebas de flotación colectiva en MPP para las muestras M16 a M20 y con grado de remolienda 30-35  $\mu\text{m}$ . Sólo se debe considerar los resultados metalúrgicos asociados a las muestras M16 y M17 porque las muestras M18, M19 y M20 pertenecen a otro sector del yacimiento que no participa en el plan minero del proyecto.

Tabla 4.3: Resultados metalúrgicos para muestras M16 a M20 (Parte 1).

Muestra	Sondaje N°	ZM	Preparación Mecánica de Muestras				Laboratorio	
			CuT	MoT	CuS <sub>Ctrico</sub>	Rs	CuT Alim.	Rec. Ro CuT
			(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	Std. Nuevo
M16	DD 10941	Sulfuro 2° (debil)	0,39	0,010	0,01	1,8	0,39	65,0
M17	DD 10955	Sulfuro 2° (debil)	0,40	0,007	0,01	2,8	0,40	88,7
M18	DD 10959	Sulfuro 2° (debil)	0,33	0,013	0,01	1,5	0,31	78,6
M19	DD 10958	Sulfuro 2° (debil)	0,62	0,011	0,03	5,2	0,65	87,8
M20	DD 10959	Sulfuro 2° (debil)	0,51	0,008	0,02	2,9	0,53	89,3
<b>Promedio M16 a M17</b>		<b>Sulfuro 2°</b>	<b>0,39</b>	<b>0,009</b>	<b>0,01</b>	<b>2,3</b>	<b>0,39</b>	<b>76,9</b>
<b>Promedio M18 a M20</b>		<b>Sulfuro 2°</b>	<b>0,49</b>	<b>0,011</b>	<b>0,02</b>	<b>3,2</b>	<b>0,50</b>	<b>85,2</b>

Tabla 4.4: Resultados metalúrgicos para muestras M16 a M20 (Parte 2).

Muestra	Planta Mini Piloto (MPP)						
	Rec. Ro CuT			Rec. MoT	CuCo	CuCo	
	Rougher	Cleaner	Global	Global	(%) CuT	(%) MoT	
M16	71,5	96,2	68,7	47,0	25,2	0,45	
M17	85,7	96,4	82,6	49,6	21,8	0,20	
M18	80,9	97,2	78,6	80,2	29,7	1,26	
M19	86,8	95,4	82,8	76,2	35,1	0,50	
M20	92,7	98,9	91,6	74,9	39,3	0,36	
<b>Promedio M16 a M17</b>		<b>78,6</b>	<b>96,3</b>	<b>75,7</b>	<b>48,3</b>	<b>23,5</b>	<b>0,323</b>
<b>Promedio M18 a M20</b>		<b>86,8</b>	<b>97,2</b>	<b>84,3</b>	<b>77,1</b>	<b>34,7</b>	<b>0,707</b>

Se observa un incremento de 3 puntos porcentuales en la ley de cobre del concentrado colectivo (23,5 % CuT) debido al aumento del grado de remolienda de 45-50  $\mu\text{m}$  a 30-35  $\mu\text{m}$ . Sobre la base de esta información, el proyecto toma la decisión de incrementar la potencia del nuevo molino de remolienda considerado para este proyecto.

Finalmente, este programa de pruebas de flotación colectiva en MPP, realizado por el proyecto, permitió establecer que: a) la recuperación global de cobre promedio alcanza un 79,4 %, valor similar al estimado por el modelo geometalúrgico del proyecto (79,2 %), pero con una alta variabilidad (62,7 a 93,4 %), y, b) la ley de cobre en el concentrado colectivo se estima en el rango de 22,0 a 25,0 % CuT pero debe ser confirmado con pruebas de flotación colectiva en MPP adicionales durante la Ingeniería de Detalles del proyecto.

#### 4.1.2. Proyecto 2

Este proyecto minero consiste, básicamente, en una expansión de la capacidad de tratamiento desde 90 a 150 ktpd (= 60 ktpd) para alcanzar una capacidad de producción de 300 ktpa de cobre fino en concentrado y 5 ktpa de molibdeno fino en concentrado.

El concentrado de cobre, con una ley estimada de 30,0 % CuT, presenta bajos contenidos de oro, plata e insolubles pero un alto poder calorífico (pirita). El concentrado de molibdeno, con una ley estimada de 50,0 % MoT, presenta un alto contenido de cobre (3,9 % CuT) que requiere un proceso metalúrgico previo para su comercialización.

El proyecto considera la construcción de una nueva planta de chancado y molienda SAG-Bolas para 60 ktpd ubicada en la cordillera (cavernas) y una nueva planta de flotación colectiva y selectiva para 150 ktpd ubicada en el valle, incluyendo una planta de filtración, almacenamiento y carguío de concentrados. La puesta en marcha del proyecto está programada para el año 2026 y considera un horizonte de 27 años.

Uno de los objetivos estratégicos del proyecto es alcanzar altos estándares ambientales, en consecuencia, **el proyecto incrementa el uso de agua recirculada desde el depósito de relaves** y mantiene el actual consumo de agua fresca de cordillera. Esto podría generar un efecto en la recuperación metalúrgica de cobre y molibdeno y/o en la calidad del concentrado de cobre, según algunos antecedentes operacionales históricos.

Por lo indicado, el proyecto conceptualizó un programa de pruebas de flotación colectiva en MPP con el objetivo de respaldar y/o sustentar el **efecto del agua de proceso (agua fresca + agua recirculada) en la recuperación metalúrgica de cobre y molibdeno y calidad del concentrado de cobre** para los primeros 10 años del plan de producción.

Estas pruebas de flotación colectiva en MPP fueron realizadas durante el estudio de pre-factibilidad del proyecto (Codelco, 2021). Las muestras utilizadas en estas pruebas (ver *Tabla 4.5*), fueron seleccionadas desde frentes de banco en la mina a rajo abierto.

Tabla 4.5: Muestras usadas en pruebas de flotación colectiva MPP.

	PPSAG-26	PPSAG-27	PPSAG-29
Ley Cu, %	0,73	0,59	0,67
Ley Mo, %	0,010	0,014	0,009
Roca	BXPR*	AN*	GDRB*
Tipo	Secundario	Secundario	Primario

\*10# = 2mm **BXPR**: Brecha de polvo de roca **AN**: Andesita **GDRB**: Granodiorita Río Blanco

La configuración del circuito de flotación en MPP ensayado, corresponde al circuito de flotación con una etapa de flotación primaria y dos (2) etapas de flotación de limpieza, la primera etapa, en celdas convencionales, y la segunda etapa, en celda columnar (ver *Figura 4.4*).

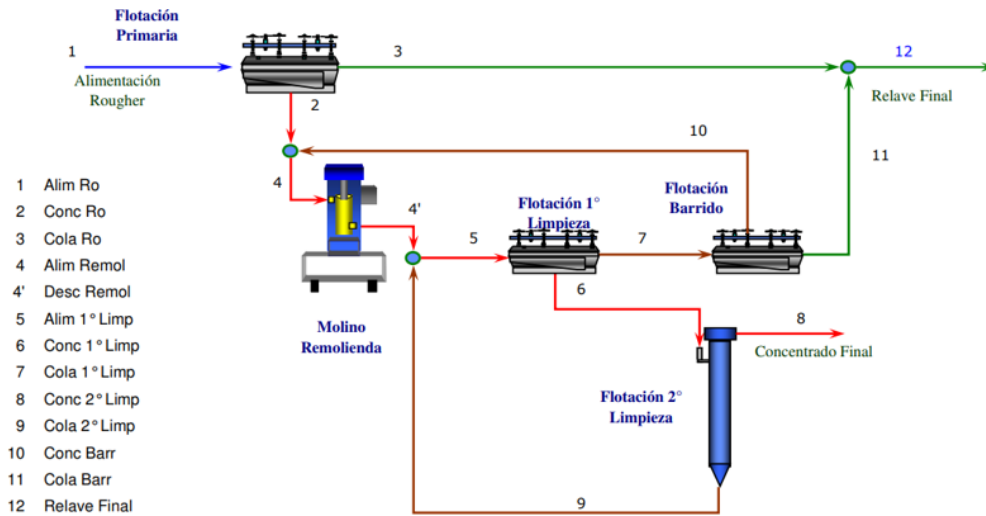


Figura 4.4: Configuración de circuito de flotación colectiva en MPP.

La *Tabla 4.6* indica los tipos o mezclas de agua utilizada en las pruebas de flotación colectiva en MPP (Guarda, 2017). Se observa que la Condición Actual hace uso intensivo de agua fresca de cordillera. La Mezcla 1 corresponde a la condición máxima de agua recirculada desde el depósito de relaves. La Mezcla 2 corresponde a la condición máxima de agua fresca y agua de osmosis. La Mezcla 2 Nueva corresponde a la condición máxima de sólo agua fresca. La Mezcla 3 corresponde a la condición máxima de agua recuperada desde espesadores. Para efectos del proyecto, la Mezcla 1 es la más importante.

Tabla 4.6: Mezclas de agua usadas en pruebas de flotación colectiva MPP.

N°	Prueba	Fresca	Espesador	Tranque	Osmosis
1	Fresca	100 %	-	-	-
2	Tranque	-	-	100 %	-
3	Osmosis	-	-	-	100 %
4	Condición actual	73 %	27 %	0 %	-
5	Mezcla 1	45 %	28 %	27 %	-
6	Mezcla 2	45 %	14 %	-	41 %
6'	Mezcla 2 Nueva	45 %	55 %	-	-
7	Mezcla 3	11 %	62 %	27 %	-

La *Tabla 4.7* presenta los resultados metalúrgicos obtenidos en las pruebas de flotación colectiva en MPP con la muestra PPSAG-26.



Tabla 4.7: Resultados pruebas de flotación colectiva MPP con PPSAG-26

	<b>FRESCA</b>	<b>TRANQUE</b>	<b>OSMOSIS</b>	<b>ACTUAL</b>	<b>MEZCLA 1</b>	<b>MEZCLA 2 NUEVA</b>	<b>MEZCLA 3</b>
<b>COBRE</b>							
Ley Cabeza	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
Ley Conc. Rougher	5,3	5,7	5,0	4,5	6,7	5,7	6,6
Ley Conc. Final	27,2	27,6	28,5	27,9	20,4	27,9	31,6
Rec. Peso Rougher	12,9	10,9	13,0	14,7	9,6	11,3	9,8
Rec. Finos Rougher	91,9	87,3	90,7	91,1	90,0	91,2	90,8
Rec. Finos Global	86,6	82,8	88,1	89,1	89,1	89,5	89,3
<b>MOLIBDENO</b>							
Ley Cabeza	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
Ley Conc. Rougher	0,055	0,050	0,056	0,055	0,073	0,069	0,060
Ley Conc. Final	0,247	0,163	0,286	0,305	0,208	0,330	0,267
Rec. Finos Rougher	74,1	73,8	83,3	76,7	73,2	82,6	82,5
Rec. Finos Global	61,3	47,1	72,2	67,9	68,1	79,5	72,6

## Cobre

- El agua Fresca y agua Tranque (agua recirculada desde el depósito de relaves) reducen la recuperación global de cobre en 2,5 y 6,3 puntos porcentuales, respectivamente. El agua Osmosis, Mezcla 1, Mezcla 2 Nueva y Mezcla 3 no genera efecto en la recuperación global de cobre (89,1%). El agua Fresca, agua Tranque y agua Osmosis no generan efecto en la ley de cobre del concentrado colectivo. **La Mezcla 1 reduce en 7,5 puntos porcentuales la ley de cobre del concentrado colectivo** y la Mezcla 3 aumenta en 3,7 puntos porcentuales la ley de cobre del concentrado colectivo.

## Molibdeno

- El agua Fresca y agua Tranque reducen la recuperación global de molibdeno en 6,6 y 20,8 puntos porcentuales, respectivamente. El agua Osmosis, Mezcla 1, Mezcla 2 Nueva y Mezcla 3 aumentan, levemente, la recuperación global de molibdeno. El agua Fresca, agua Tranque, agua Osmosis, Mezcla 1 y Mezcla 3 reducen, levemente, la ley de molibdeno del concentrado colectivo.

La *Tabla 4.8* presenta los resultados metalúrgicos obtenidos en las pruebas de flotación colectiva en MPP con la muestra PPSAG-27.

Tabla 4.8: Resultados pruebas de flotación colectiva MPP con PPSAG-27

	FRESCA	TRANQUE	OSMOSIS	ACTUAL	MEZCLA 1	MEZCLA 2	MEZCLA 3
<b>COBRE</b>							
Ley Cabeza	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
Ley Conc. Rougher	4,0	5,2	4,9	4,6	6,1	5,8	3,9
Ley Conc. Final	25,8	24,1	20,1	22,0	22,1	17,4	17,3
Rec. Peso Rougher	13,6	9,9	10,5	11,5	8,7	9,2	13,3
Rec. Finos Rougher	93,2	88,7	89,9	90,9	92,7	92,6	89,7
Rec. Finos Global	89,6	85,6	89,0	89,3	91,4	91,0	85,6
<b>MOLIBDENO</b>							
Ley Cabeza	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014
Ley Conc. Rougher	0,075	0,081	0,090	0,079	0,102	0,099	0,082
Ley Conc. Final	0,397	0,323	0,334	0,322	0,298	0,281	0,282
Rec. Finos Rougher	74,8	54,9	67,7	68,0	67,2	67,9	81,6
Rec. Finos Global	58,7	45,0	60,9	56,7	60,4	63,6	60,5

## Cobre

- El agua Tranque y Mezcla 3 reducen la recuperación global de cobre en 3,7 puntos porcentuales. El agua Fresca y agua Osmosis no generan efecto en la recuperación global de cobre (89,3%). La Mezcla 1 y Mezcla 2 Nueva **aumentan la recuperación global de cobre** en 2,1 y 1,7 puntos porcentuales, respectivamente. El agua Fresca y agua Tranque aumentan la ley de cobre del concentrado colectivo en 3,8 y 2,1 puntos porcentuales, respectivamente. El agua Osmosis disminuye la ley de cobre del concentrado colectivo en 1,9 puntos. La Mezcla 1 no afecta la ley de cobre del concentrado colectivo y la Mezcla 2 Nueva y Mezcla 3 reducen la ley de cobre del concentrado colectivo en 4,7 puntos porcentuales.

## Molibdeno

- El agua Tranque reduce la recuperación global de molibdeno en 11,7 puntos porcentuales. El agua Fresca, agua Osmosis, Mezcla 1, Mezcla 2 Nueva y Mezcla 3 aumentan, levemente, la recuperación global de molibdeno. El resto de aguas no afecta la ley de molibdeno del concentrado colectivo.

La *Tabla 4.9* presenta los resultados metalúrgicos obtenidos en las pruebas de flotación colectiva en MPP con la muestra PPSAG-29.

Tabla 4.9: Resultados pruebas de flotación colectiva MPP con PPSAG-29

	FRESCA	TRANQUE	OSMOSIS	ACTUAL	MEZCLA 1	MEZCLA 2	MEZCLA 3
<b>COBRE</b>							
Ley Cabeza	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Ley Conc. Rougher	6,1	7,6	7,1	7,8	7,2	6,8	6,1
Ley Conc. Final	30,8	22,4	25,9	29,6	29,0	21,1	24,1
Rec. Peso Rougher	10,3	8,1	8,6	7,9	8,7	9,1	10,0
Rec. Finos Rougher	95,6	93,7	92,9	93,4	95,1	94,6	92,9
Rec. Finos Global	93,7	89,5	89,5	91,1	92,8	92,4	89,3
<b>MOLIBDENO</b>							
Ley Cabeza	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
Ley Conc. Rougher	0,077	0,092	0,088	0,095	0,087	0,082	0,073
Ley Conc. Final	0,364	0,268	0,293	0,355	0,338	0,249	0,261
Rec. Finos Rougher	82,1	79,5	79,6	79,3	79,6	79,7	79,9
Rec. Finos Global	75,7	74,5	70,6	76,0	74,9	76,1	70,1

### Cobre

- El agua Fresca, Mezcla 1 y Mezcla 2 Nueva **aumentan la recuperación global de cobre** en 2,6, 1,7 y 1,3 puntos porcentuales, respectivamente. El agua Tranque y agua Osmosis reducen la recuperación global de cobre en 1,6 puntos porcentuales y la Mezcla 3 reduce la recuperación global de cobre en 1,8 puntos porcentuales. El agua Tranque, agua Osmosis, Mezcla 2 Nueva y Mezcla 3 reducen la ley de cobre del concentrado colectivo en 7,2, 3,7, 8,5 y 5,5 puntos porcentuales, respectivamente. El agua Fresca aumenta la ley de cobre del concentrado colectivo en 1,2 puntos. La Mezcla 1 no afecta la ley de cobre del concentrado colectivo.

### Molibdeno

- El agua Fresca, agua Tranque, Mezcla 1 y Mezcla 2 Nueva no afectan la recuperación global de molibdeno. El agua Osmosis y Mezcla 3 reducen la recuperación global de molibdeno en 5,4 y 5,9 puntos porcentuales, respectivamente. El agua Tranque, agua Osmosis, Mezcla 2 Nueva y Mezcla 3 reducen la ley de molibdeno del concentrado colectivo de 0,36 a 0,25-0,29 % MoT. El agua Fresca y Mezcla 1 no afectan la ley de molibdeno.

Finalmente, este programa de pruebas de flotación colectiva en MPP, realizado por el proyecto, permitió establecer que: a) la Mezcla 1 (condición máxima de agua recirculada desde el depósito de relaves) genera **aumentos marginales de la recuperación global de cobre y molibdeno que, probablemente, están dentro del error experimental** de la metodología, b) sólo en una de las tres muestras, la Mezcla 1 redujo la ley de cobre y molibdeno del concentrado colectivo, c) los mayores efectos negativos sobre la recuperación global de cobre los produce el **agua Tranque** (condición extrema, no operativa).

# Capítulo 5

## Discusión

Este capítulo presenta los principales desafíos y oportunidades que se identifican en la MPP, después de 15 años de uso en la gran minería del cobre de Chile (Codelco y Privados). Estos desafíos y oportunidades pueden ser investigados y desarrollados a través de tesis de pre y post grado en el área de procesamiento de minerales.

### 5.1. Desafíos

#### 5.1.1. Celdas de Flotación en CFM

##### 5.1.1.1. Control de Nivel de Pulpa

Como se indica en el *Capítulo 3*, la Máquina de Flotación Continua (CFM) está compuesta por doce (12) celdas de flotación de laboratorio de 1,7 litros marca Denver y con agitadores de 0,5 HP (0,375 kW).

Para controlar el nivel de pulpa en cada celda de flotación se utiliza una compuerta metálica regulable que tienen las celdas en la parte posterior (ver detalle en *Figura 5.1*). Este sistema presenta dos problemas, el primero, una pequeña variación en la altura de la compuerta ( $\Delta h=1$  mm) genera un cambio importante en la recuperación en peso de la celda, y, el segundo, se debe registrar en forma manual el nivel de cada celda para las diferentes etapas de flotación del circuito en evaluación.



Figura 5.1: Control de nivel de pulpa en celda.

Un cambio en la geometría y/o tamaño de las celdas, por ejemplo, celdas de 2,7 a 3,0 litros, podría facilitar el diseño de un nuevo sistema de control de nivel de pulpa que al operar mantenga la estabilidad operacional de la celda, generando variaciones en la recuperación en peso inferior al 10 %.

Ahora bien, aumentar el volumen de las celdas de 1,7 a 2,7 o 3,0 litros para la flotación primaria, implica aumentar el flujo másico de sólido a la CFM de 10 a 16 o 15 kg/h, respectivamente, dependiendo si se usan 7 o 6 celdas para mantener el tiempo de residencia constante ( $\approx 20$  min). En ambos casos, la masa total de muestra requerida (184 y 175 kg) es inferior a la masa de muestra generalmente solicitada al cliente (200 kg).

Este nuevo sistema de control de nivel de pulpa, necesariamente, debe ser digital para registrar en forma automática los niveles de pulpa en las celdas de cada etapa de flotación.

Con el sistema de control de aire (l/min) y el sistema de control de velocidad de agitación (rpm) que tiene la MPP para cada celda de flotación y este nuevo sistema de control de nivel de pulpa se podría estar más cerca de la implementación de un sistema de control experto.

### 5.1.1.2. Traspaso de pulpa entre celdas

El traspaso de pulpa entre una celda y otra en la CFM es por medio de bombas peristálticas y mangueras de plástico. La pulpa se inyecta a la celda por la parte inferior (lado posterior), rebalsa por una compuerta metálica regulable hacia una pequeña caja y se succiona con una bomba peristáltica para inyectar a la siguiente celda (ver *Figura 5.2*).

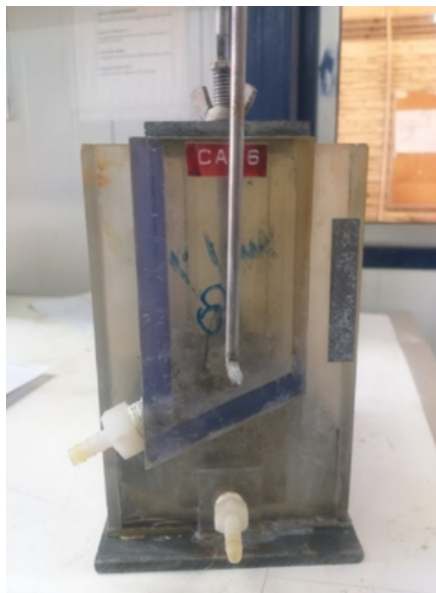


Figura 5.2: Inyección (inferior) y succión (lateral) de pulpa.

Este sistema de traspaso afecta la confiabilidad (tiempo entre fallas) de la CFM porque si se produce una obstrucción en las mangueras de plástico o falla en las bombas peristáltica se detiene la operación de la CFM afectando, directamente, el desarrollo de la prueba de flotación.

Un cambio en la geometría, tamaño y ubicación de las celdas podría evitar el uso de bombas peristálticas entre celdas y dejarlas sólo para traspasar concentrados y relaves desde una etapa de flotación a otra.

Al aumentar el tamaño de las celdas de flotación (como se comentó en el punto anterior) y colocar las celdas en desnivel como se muestra en la *Figura 5.3*, se puede lograr que los relaves fluyan de una celda a la siguiente por diferencia de presión y/o por succión de los sistemas de agitación.



Figura 5.3: Celdas de flotación ubicadas en desnivel.

### 5.1.2. Control de Nivel de Pulpa en Columna

La MPP contiene un módulo de flotación columnar para incorporarlo en los circuitos de flotación de limpieza que lo requieran, por ejemplo, como segunda o tercera etapa de flotación de limpieza. Esta columna de flotación tiene en la parte superior un sistema de lavado de espuma y cuenta con un sistema de inyección de burbujas de aire. La alimentación, concentrado y relave de la columna de flotación son transportados a través de bombas peristálticas.

Para medir el nivel de pulpa en la columna de flotación y, en consecuencia, la altura de espuma, se utiliza el sistema tradicional de medición indirecta a través de un sensor de presión ubicado en la zona de colección de la columna (ver *Figura 5.4*).



Figura 5.4: Columna de flotación con sensor de presión.

Este sistema de medición de nivel de pulpa tiene el problema que, frente a cambios en la densidad de la pulpa de alimentación a la columna de flotación, se producen mediciones erróneas del nivel de pulpa, lo

que provoca una operación fuera de rango en términos de recuperación en peso y recuperación de cobre. En algunas pruebas se han detectado recuperaciones de cobre, extremadamente bajas (20%) o altas (80%), lo que afecta la calidad del concentrado colectivo alcanzado.

Por lo indicado, se requiere otro sistema de medición de nivel de pulpa, en base a otro principio como, por ejemplo, la tecnología láser, que permita una operación estable en la columna de flotación y en el rango que lo hacen las columnas de flotación industrial (recuperaciones de cobre entre 40 y 60%).

### 5.1.3. Estanques de Almacenamiento y Alimentación a CFM

Como se indica en el *Capítulo 3*, la MPP tiene un estanque de almacenamiento (Holding Tank, X kW) y un estanque de alimentación (Feed Tank, Y kW) para la CFM (ver *Figura 5.5*).



Figura 5.5: Estanques de almacenamiento y alimentación a CFM.

Estos estanques tienen un problema de diseño porque se produce segregación en el interior de ellos y en los flujos de descarga respectivos. Cuando se toman muestras cada cierto intervalo de tiempo, se observa variaciones en la distribución de tamaño de partículas (F80 y F20), en la densidad de la pulpa ( $C_p$ ), y, por lo tanto, en las leyes de cobre y otros elementos químicos. Una práctica operacional que minimiza el problema de la segregación es operar el estanque de alimentación entre un nivel mínimo y un nivel máximo.

La *Tabla 5.1* muestra un caso real del efecto segregación, donde la ley de cobre medida promedio para las 7 cabezas es 1,11 % CuT y para las 7 alimentaciones en MPP es 1,12 % CuT. Sin embargo, a nivel de prueba las diferencias de leyes de cobre medidas varía entre 1 y 13% con un valor promedio de 7%.

Tabla 5.1: Diferencia entre ley de cobre en cabezas y alimentación MPP.

<b>Cabezas Analizada</b>	<b>% CuT</b>	0,22	1,32	1,44	1,88	1,08	1,44	0,43	<b>1,11</b>
<b>Diferencias</b>	<b>%</b>	9	11	13	5	5	1	2	<b>7</b>
<b>Flujo (MPP)</b>	<b>%</b>	<b>M32</b>	<b>M33</b>	<b>M34</b>	<b>M35</b>	<b>M36</b>	<b>M37</b>	<b>M38</b>	
<b>Alimentación Rougher</b>	<b>% CuT</b>	0,24	1,18	1,63	1,78	1,14	1,42	0,44	<b>1,12</b>
<b>Concentrado Rougher</b>	<b>% CuT</b>	4,1	4,7	5,5	4,9	6,9	6,0	3,1	
<b>Relave Rougher</b>	<b>% CuT</b>	0,03	0,17	0,03	1,10	0,31	0,45	0,12	

Utilizando técnicas computacionales de modelamiento como la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se pueden rediseñar los estanques de almacenamiento y alimentación a CFM, en particular, rediseñar los baffles

y la geometría, ubicación y material del agitador en cada estanque, para evitar la segregación en alimentación a flotación primaria y su impacto en los balances metalúrgicos asociados a cada prueba de flotación en MPP.

Se pueden realizar todas las mejoras identificadas porque no existen garantías vigentes por parte del fabricante Canadian Process Technologies Inc. (CPT). Además, la empresa CPT fue vendida a ERIEZ hace algunos años atrás y descontinuada la fabricación de las MPP.

Las futuras pruebas que sean realizadas en la MPP con los estanques de almacenamiento y alimentación a CFM rediseñados deberían presentar diferencias menores a 3-5 % entre la ley de cobre analizada (muestras) y medida en alimentación a CFM, facilitando el ajuste de los balances metalúrgicos. Lo mismo debería suceder al comparar pruebas MPP realizadas antes y después de las modificaciones y con la misma muestra.

#### 5.1.4. Molino de Remolienda

El molino de Remolienda es otro de los módulos que conforman la MPP. Como se indica en el *Capítulo 3*, este molino de Remolienda es vertical, tiene un eje con pines que permite agitar un lecho de bolas de acero ( $\phi=5$  mm) para generar la remolienda y una malla para clasificar el producto (ver *Figura 5.6*). Para aumentar el grado de remolienda de la alimentación (concentrado primario + concentrado barrido), se aumenta la velocidad de giro (rpm) del eje, y, en caso de no alcanzar el grado de remolienda requerido, se aumenta el nivel de bolas en el molino. La alimentación y producto del molino de remolienda son transportados a través de bombas peristálticas.



Figura 5.6: Molino de remolienda de MPP.

El problema que tiene este molino de Remolienda es su incapacidad para alcanzar granulometrías de producto inferiores a  $P80 = 35 \mu\text{m}$ . La *Tabla 5.2* muestra los valores de  $P80$  alcanzados con el molino de Remolienda en un programa de 11 pruebas de flotación colectiva en MPP realizadas el 2022, donde se requería un  $P80 = 30 \mu\text{m}$ .



Tabla 5.2: Grado de Remolienda alcanzado en estudio MPP 2022.

Muestra	Cp Alim	Cp Conc	F80 Alim	P80 Remol
M1	28,6	46,6	188	34
M2	28,9	11,8	182	36
M4	26,9	36,7	181	39
M9	27,4	22,0	192	38
M10	27,1	26,3	188	37
M13	30,9	37,1	196	48
M16	30,1	23,5	186	36
M18	28,1	15,8	184	37
M20	26,9	36,7	176	34
M22	26,9	19,5	163	35
M25	29,4	37,1	185	36
<b>Media</b>	28,3	28,5	184	37
<b>Sigma</b>	1,4	11,0	8,7	4,0
<b>CV %</b>	5	39	5	11

Los minerales actuales y futuros son, mayoritariamente, de baja ley (0,2 a 0,5% CuT) y, por lo tanto, requieren una mayor liberación para alcanzar leyes de concentrado comerciales. Por ejemplo, si el mineral proviene de un enriquecimiento débil (pirita con una pátina o cubierta parcial de calcosina), como el indicado en el Proyecto 1 del capítulo 5, se necesita una remolienda muy fina (P80 = 30  $\mu\text{m}$ ) para alcanzar leyes de concentrado sobre 25 % CuT. Otro ejemplo, si el mineral presenta una estrecha asociación de pirita-calcopirita, también se necesita una remolienda muy fina (P80 = 20 a 30  $\mu\text{m}$ ) para alcanzar leyes de concentrado comerciales (ver *Figura 5.7*).

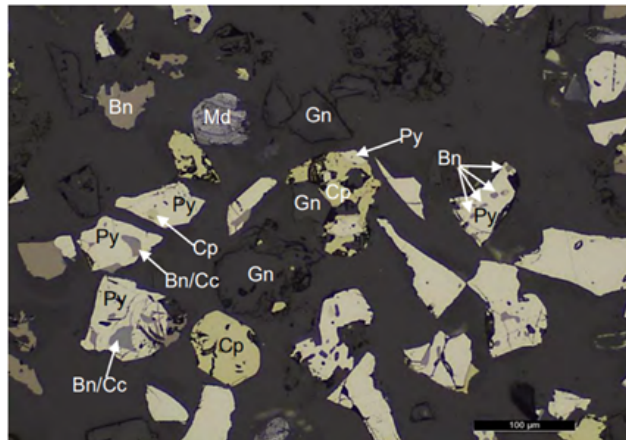


Figura 5.7: Asociaciones de pirita-calcopirita-bornita-calcosina.

Por lo expuesto, se hace necesario un rediseño del molino de Remolienda para alcanzar productos con granulometrías más finas (P80 = 20 a 30  $\mu\text{m}$ ). Una opción es estudiar la factibilidad técnica de aumentar la potencia mecánica del molino de Remolienda para alcanzar una mayor velocidad de agitación y/o investigar sobre medios molidores utilizados por otras industrias, como la farmacéutica, alimentos, etc.

Otra opción es estudiar el molino de Remolienda Isa-Mill de laboratorio, cuyos equipos industriales instalados en diferentes operaciones mineras alcanzan un producto de remolienda muy fino como en Prominente Hill (P80=20  $\mu\text{m}$ ) y Mount Isa Mines (P80=10  $\mu\text{m}$ ).

## 5.2. Oportunidades

### 5.2.1. Captación de Gases

La flotación selectiva de molibdeno es una de las principales oportunidades que tiene la MPP si logra resolver el problema de captación de gases. En la flotación de molibdeno, se utiliza sulfhidrato de sodio (NaSH) como principal depresor de los sulfuros de cobre. En caso de un descontrol del pH ( $\text{pH} < 8$ ), se genera ácido sulfhídrico el cual es muy peligroso para la salud humana.

Por tanto, es necesario diseñar un sistema de captación de gases que permita operar todos los módulos que integran la MPP. En particular, un sistema de captación de gases para todas las celdas de flotación de la CFM incluido sensores de ácido sulfhídrico gaseoso.

### 5.2.2. Medición de Leyes On-line

Para determinar que la operación de la MPP está en estado estacionario y/o confirmar las leyes y recuperaciones por etapa de flotación, es necesario tomar muestras puntuales cada una hora a los principales flujos, evitando introducir perturbaciones al estado estacionario. A continuación, estas muestras son filtradas, secadas y enviadas a lectura con una pistola de FRX, previamente calibrada. Este proceso genera un retardo en los cambios operacionales que requiere el circuito de flotación en evaluación.

Por lo indicado, es necesario el desarrollo e implementación de un sistema de medición de leyes on-line para los flujos más importantes tales como: a) relave rougher, b) relave scavenger y c) concentrado recleaner.

### 5.2.3. Gemelo Digital

El desarrollo e implementación de un gemelo digital (digital twin) que pueda replicar o simular la MPP, digitalmente, nos ofrece una gran oportunidad para el procesamiento de minerales. Al conocer, previamente, los atributos geológicos de la muestra (litología, alteración y mineralización), la caracterización física (PSD y peso específico), la caracterización química y mineralógica (composición, asociaciones y liberación), la configuración del circuito de flotación y las condiciones y parámetros de operación, el gemelo digital podría predecir el rendimiento metalúrgico de la muestra, en términos de leyes y recuperaciones por etapa de flotación, con el consiguiente beneficio de masificar la información en el modelo de recursos del yacimiento.

Actualmente, Codelco y algunas empresas mineras privadas (MEL, MLP y otras) tienen datos e información de pruebas realizadas en MPP que permitirían calibrar este gemelo Digital.

# Capítulo 6

## Conclusiones

Las principales conclusiones de este trabajo son las siguientes:

- Para determinar la calidad de concentrado se pueden realizar pruebas de flotación en Mini Planta Piloto (MPP), pruebas de flotación en ciclo cerrado (TCC) o pruebas de flotación en planta piloto convencional (PPC).

Las pruebas de flotación en MPP tienen la ventaja de requerir una reducida masa de 150 a 180 kilogramos (por prueba), lo que facilita la ejecución de un elevado número de pruebas a un costo razonable. Las muestras, generalmente, provienen de testigos de sondajes geológicos (tipo NQ o HQ) o metalúrgicos (tipo PQ), lo que permite caracterizar minerales futuros a 1000 o 2000 metros de profundidad.

Los TCC presentan la desventaja que, generalmente, no logran la estabilidad, el estado estacionario y la conservación de masa, subestimando las concentraciones de subproductos y contaminantes en los concentrados. El elevado número de pruebas de flotación y la recirculación de productos (concentrados) en los TCC, requiere la participación de varios operadores y un tiempo de ejecución superior a 12 horas, lo que afecta la estabilidad y conservación de masa.

Las pruebas de flotación en PPC, por su parte, requieren una masa de 3 a 5 toneladas de muestra (por prueba) lo que impacta en un reducido número de pruebas por su elevado costo de extracción, transporte y experimentación. Además, en los proyectos en desarrollo no siempre es posible tener acceso a este tipo de muestra.

- La MPP no sólo permite conocer la calidad de concentrado, sino también, la recuperación metalúrgica de cobre y otros elementos de interés (molibdeno, plata, oro, arsénico, etc.). Además, la MPP permite generar: a) concentrado colectivo para pruebas de sedimentación y filtración, b) relave final para pruebas de sedimentación, transporte y disposición de relaves, y, c) agua recirculada de relave final para caracterización fisicoquímica.
- Los casos de estudio presentados en este trabajo permiten concluir que la MPP es una metodología que facilita la ejecución de estudios metalúrgicos (Caso 1: efecto de tipos de aguas en la recuperación de cobre y molibdeno, y, Caso 2: remolienda fina ( $P_{80}=30\ \mu\text{m}$ ) para aumentar ley de cobre en concentrado colectivo de 20 a 25-30 % CuT).
- Los principales desafíos y oportunidades identificados son el control de nivel de pulpa y el traspaso de pulpa en las celdas de flotación convencional, el rediseño de los estanques de almacenamiento y alimentación a CFM para minimizar la segregación de la pulpa, el molino de Remolienda para alcanzar grados de remolienda ( $P_{80}$ ) entre 20 y 30  $\mu\text{m}$  que requieren algunos minerales complejos, la medición de leyes de cobre on-line y el desarrollo e implementación de un gemelo digital (digital twin) que pueda replicar o simular la MPP.

- El futuro que se visualiza para la MPP en el mediano y largo plazo es promisorio debido, por una parte, a las mejoras que se pueden introducir en los diferentes módulos, en el sistema de control y el nivel de automatización, y, por otra parte, a un uso más intensivo en proyectos y operaciones derivado de normas medioambientales más exigentes para la industria minera.
- Considerando un presupuesto de referencia de 50 a 70 kUS\$, la metodología MPP permite triplicar la generación de información metalúrgica respecto a la PP, es decir, en la MPP se pueden evaluar 10 muestras y en la PP sólo 3 muestras con el mismo presupuesto.
- Se identifican casos en la industria del cobre que no pueden aplicar la metodología MPP y deben usar PP, como, por ejemplo, la evaluación de la celda Jameson en flotación limpieza que requiere 200-300 kg de concentrado primario o la evaluación de un circuito de flotación de molibdeno que requiere 120 kg de concentrado colectivo Cu-Mo para realizar una prueba MPP.

# Bibliografía

- Andrade, V., Santos, N., y Goncalves, K. (2004, March). How to obtain continuous flotation test data on drill-core samples using a mini pilot plant. *Mining Engineering*.
- Cochilco. (2015). *Tecnologías en fundiciones de cobre*. Descargado de [https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Tecnologias\\_fundiciones\\_v1.pdf](https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Tecnologias_fundiciones_v1.pdf)
- Codelco. (2019). Capítulo 9 sic, estudio de factibilidad proyecto rajo inca. Autor. (Privado)
- Codelco. (2021). Capítulo 9 sic, estudio de factibilidad proyecto desarrollo futuro andina. Autor. (Privado)
- EcoMetales. (2017, April). Impurezas: Tendencias regulatorias, mercados y tecnologías. En *Encuentro internacional de minería y desarrollo sustentable*. (Privado)
- Gy, P. (1979). *Sampling of particulate materials: Theory and practice* (1st ed.). Elsevier.
- Pitard, F. F. (2019). *Theory of sampling and sampling practice* (3rd ed.). CRC Press.

# Anexo

## Anexo A. Protocolo de Preparación Mecánica de Muestras para MPP.

### **Etapa 1: Recepción, Identificación, Inventario y Control de Peso de Muestras**

Esta etapa tiene como propósito resguardar la trazabilidad de las muestras recibidas, asegurando que dichas muestras cumplen con lo informado por la entidad responsable del envío.

Los principales parámetros considerados son: número de muestras, identificación de cada una, fecha y datos del transporte utilizado, como también el peso neto registrado en la Guía de Despacho. Una vez identificada cada muestra se procede a realizar inventario para tener un control de peso de las muestras recibidas y poder continuar con las etapas siguientes de preparación mecánica.

### **Etapa 2: Chancado controlado 100 % -1”**

Luego de finalizar la etapa anterior, se procede a realizar la primera parte correspondiente a la preparación mecánica de las muestras, la cual consiste en un chancado controlado a 100 % -1” sobre el total del material de cada muestra.

Como proceso, la masa total de cada muestra ingresa a una etapa de chancado controlado en circuito cerrado con malla 1”, utilizando para estos efectos un chancador de mandíbulas a escala de laboratorio.

Posteriormente, el producto 100 % -1” obtenido del proceso de chancado se homogeniza por medio de paleo alternado trasladando de un lugar a otro la pila. Esta operación se realiza mediante pala JIS y se repite cinco veces con la finalidad de asegurar una homogenización óptima.

### **Etapa 3: Obtención de muestra 25 Kg para ensayos de conminución**

Una vez homogenizada el total de la muestra con granulometría 100 % -1”, se realiza un proceso de reducción másica en dos etapas con el propósito de obtener una submuestra de 25 kg para ensayos de conminución.

La primera etapa de reducción másica (RM1) se realiza sobre el total del material utilizando paleo fraccionado mediante pala JIS, para así, al finalizar obtener 2 pilas. Una segunda etapa de reducción másica (RM2) se realiza sobre una de las cargas obtenidas en RM1, utilizando para ello paleo fraccionado mediante pala JIS, generando al término N cargas de 25 kg y seleccionando una de ellas para ensayos de conminución.

### **Etapa 4: Chancado controlado 100 % -10 Mallas Tyler y Generación de Cargas**

El material remanente de la etapa anterior con granulometría -1” es sometido a preparación mecánica considerando su chancado 100 % -10 mallas Tyler (1,7 mm) para su posterior evaluación en pruebas en

MPP.

Para lograr lo anterior, cada muestra es clasificada en malla 10 Tyler para luego reducir la fracción sobre tamaño mediante su chancado en circuito cerrado utilizando chancador de rodillos y así obtener un producto 100 % -1,7 mm.

Posteriormente, las muestras con granulometría -10 mallas Tyler son sometidas a un proceso de reducción másica en dos etapas, siendo homogenizadas mediante paleo fraccionado con pala JIS, para así generar dos subpilas (o 3 subpilas dependiendo de la masa de la muestra).

Finalmente, se realiza una última etapa de reducción másica con para generar cargas de 10.3 kg a cada subpila obtenida en la primera etapa de reducción másica, siempre asegurando la calidad y homogeneidad para evitar segregaciones.

#### **Etapas 5: Obtención de muestras para control de calidad**

De cada muestra se considera el 20% de las cargas que serán destinadas a control de calidad, estas cargas pasan por una etapa de reducción másica en divisor rotatorio del cual se obtienen muestras para análisis químico y control granulométrico. Las muestras para análisis químico son pulverizadas y se manda a laboratorio químico y las muestras para caracterización granulométrica se realizan mediante Rotap en serie Tyler hasta malla 400.