

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA
Y DE MATERIALES**

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Proyecto de trabajo de titulación presentado en conformidad a los
requisitos y reglamentos requeridos para obtener el título de
Ingeniero Civil Metalúrgico

**Profesora Guía: Francisca Justel.
Encargado de la división: Jorge Concha.**

**Javier Alexis Osoro Ardiles.
2024.**

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

RESUMEN.

En el presente trabajo de investigación se ha estudiado la recuperación de cobre proveniente de las escorias producidas en la fundición de Codelco-Chuquicamata, en los equipos Horno Flash (H.F.) y Convertidor Peirce-Smith (C.P.S.), por medio de una etapa de concentración (flotación). Las escorias presentan una alta ley de cobre que va desde el 6,0% hasta los 9,5%, y actualmente se encuentran sujeta a una etapa de concentración que procesa las escorias en conjunto al mineral proveniente de la mina (M.P.M.), esto debido a problemas con la concentradora que estaba destinada a trabajar exclusivamente con escorias, por lo que el proceso no se encuentra diseñada para tal.

Para ello, se recaudó información de los parámetros con los cuales se trabaja actualmente la escoria en conjunto al M.P.M., y con la información obtenida se estableció que el parámetro de estudio que tiene mayor impacto para la recuperación de cobre proveniente de las escorias es la granulometría con la que esta ingresa a la etapa. Por lo que se diseña un plan de trabajo por medio de flotación batch para realizar la evaluación del estudio.

Los resultados de flotación batch demuestran que a una granulometría entre los 50 [μm] se tiene una recuperación aproximada del 83,68% de Cu, siendo esta la máxima recuperación de Cu, el cual se atribuye directamente a la recuperación de especies como "Calcosina" y "Bornita", de 94,1% y 88,4% respectivamente, que son las especies mineralógicas con mayor abundancia (excluyendo las gangas no metálicas) y que además presentan una mayor recuperación. De esa forma se pudo establecer un modelo fenomenológico, en función a la ley de Cu de la escoria que ingresa a la concentradora, donde se obtiene las toneladas métricas finas de cobre recuperada y el porcentaje de recuperación de este, con un margen de error menor al 5%.

ABSTRACT.

In this research work, the recovery of copper from the slag produced in the smelting stage of Codelco-Chuquicamata has been studied, for the Flash Furnace and Pierce-Smith Converter equipment, by means of a concentration stage (flotation), this mainly due to the high copper grade that these slags present, ranging from 6,0% to 9,5%, but which are currently subject to a concentration stage that processes the slags together with the ore from the mine, due to problems with the concentrator that was intended to work exclusively with slag, so the process is not designed for such.

For this, information was collected regarding the parameters with which the division currently works, mainly for the concentration stage, and information regarding the slag produced in it. In this way, it was established that the study parameter that can have the greatest impact for the recovery of copper from the slag has been P80. Therefore, a work plan is designed by means of batch flotation to carry out the evaluation of the study.

The batch flotation results show that at a granulometry between 50 [μm] there is an approximate recovery of 83.68% of Cu, this being the maximum recovery of Cu, which is directly attributed to the recovery of species such as "Calcosina" and "Bornita", of 94.1% and 88.4% respectively, which are the mineralogical species with the greatest abundance (excluding non-metallic gangues) and which also present a greater recovery. In this way, a mathematical predictive model could be established, based on the Cu grade of the slag that enters the concentrator, where the fine metric tons of copper recovered and the percentage of recovery of this are obtained, with a margin of error less than 5%.

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

ÍNDICE.

RESUMEN.	2
ABSTRACT.	3
Índice.....	4
Índice de Figuras.....	6
Capítulo 1. Introducción.	8
Capítulo 2. Antecedentes del proceso.....	11
2.1. Precedentes del proceso actual.	11
2.2. Procedimiento de investigación.....	14
Capítulo 3. Antecedentes de la literatura	16
3.1. Marco teórico.....	16
3.1.1. Descripción del proceso.	16
3.1.2. Variables del proceso.	17
3.1.3. Flotación batch y cinética de flotación.....	19
3.1.4. Etapa de fundición y conversión.	21
3.1.5. Modelo Fenomenológico.	22
3.2. Revisión de la Literatura.....	24
3.2.1. Tratamiento de escorias.....	24
3.2.2. Caracterización química y mineralógica.....	34
Capítulo 4. Hipótesis y Objetivos.....	36
4.1. Hipótesis.....	36
4.2. Objetivos	36
4.2.1. Objetivo General	36
4.2.2. Objetivos Específicos.....	36
Capítulo 5. Metodología experimental	37
5.1. Desarrollo del trabajo.....	38
5.1.1. Pruebas de análisis preliminar.	38

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

5.1.2. Pruebas de análisis secundario.	41
5.2. Procedimiento experimental.	47
5.2.1. Etapa 1: Preparación de muestras.	47
5.2.2. Etapa 2: Flotación batch.	49
Capítulo 6. Resultados y discusión.	51
6.1. Pruebas primarias.	51
6.2. Pruebas secundarias.	64
6.3. Desarrollo modelo fenomenológico.	70
6.3.1. Modelo Fenomenológico.	74
Capítulo 7. Conclusiones.	78
7.1. Recomendaciones.	80
Capítulo 8. Bibliografía.	81
Capítulo 9. Anexo.	82

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1: Esquema de proyección para implementación de proyecto etapa concentración con retroalimentación (Cytec, 2010).....	14
Figura 2: Efecto reducción de tamaño del mineral de interés (blanco) y la ganga (gris) (Yianatos, Flotacion de Minerales, 2005).	25
Figura 3: El efecto del tamaño de partícula en la recuperación de cobre en una celda Rougher (Yianatos, Flotacion de Minerales, 2005)	26
Figura 4: Respuesta de la recuperación y ley de cobre en una etapa de flotación, en base al grado de liberación con un tamaño menor a 74 [μm] (Zoran & Zoran, 2011).	27
Figura 5: Microscopio de polarización representativa de escoria que muestra partículas finas que contienen cobre (Jiaqi, Hongxu, Liangtian, Chao, & Shi, 2017)	29
Figura 6: Composición mineralógica (sin considerar ganga no metálica) de muestra donde las principales especies mineralógicas son: bornita (Bo), calcosina (Ca), calcopirita (Cp) y tennantina (Tn) (Ebisu, 2018)	29
Figura 7: Análisis de la recuperación de cobre vs el tiempo del proceso, variando la inyección de aire y los rpm con la que trabajar el equipo de flotación batch (Ebisu, 2018)	30
Figura 8: Pérdida de cobre debido al atrapamiento mecánico durante la formación del eje: a) Un estado inicial antes de que comience a subir la temperatura en el concentrado donde el mineral de interés está asociado a la ganga, b) Un estado secundario donde una vez subida la temperatura del concentrado el eje ($\text{Cu}_2\text{S} + \text{FeS}$) se incorpora a la microgrietas de la ganga y c) Un estado final donde el eje se encuentra atrapado en lo que posteriormente se deriva a la escoria (DepartamentoDeIngenieriaMetalurgica, 2003).	33
Figura 9: : Trabajo en las dependencias de Asmin Industrial Ltda.	39
Figura 10: análisis producido a la escoria que se encuentra aledaña al Sag18 que posee una ley de 8,6% Cu y que ingresa a la etapa de flotación, donde en la imagen de la izquierda se puede apreciar el porcentaje de ganga no metálica (GNM) y las asociaciones mineralógicas (AM), y en la imagen de la derecha se puede apreciar las principales AM donde destacan las especies que presentan cobre.	51

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Figura 11: Análisis producido a la escoria que se encuentra aledaña al H.F. que posee una ley de 5,3% Cu y que ingresa a la etapa de flotación, donde en la imagen de la izquierda se puede apreciar el porcentaje de ganga no metálica (GNM) y las asociaciones mineralógicas (AM), y en la imagen de la derecha se puede apreciar las principales AM donde destacan las especias que presentan cobre.	52
Figura 12: Análisis producido a la escoria que se encuentra aledaña al C.P.S. que posee una ley de 9,6% Cu y que ingresa a la etapa de flotación, donde en la imagen de la izquierda se puede apreciar el porcentaje de ganga no metálica (GNM) y las asociaciones mineralógicas (AM), y en la imagen de la derecha se puede apreciar las principales AM donde destacan las especias que presentan cobre.	52
Figura 13: Diagrama de flujo flotación batch para trabajo en laboratorio.	54
Figura 14: Partidor de rifle GILSON modelo SP-2.5.....	83
Figura 15: Divisor de muestras rotatorio RSD100 GRINDER serie N° 018.866.0005, alimentado por un “Alimentador vibratorio VF100 GRINDER serie N°017.878.0027”	83
Figura 16: Juego de tamices con mallado #8, #12, #16, #20, #30, #40, #50, #70, #100, #140, #200, #270, #400 y fondo.....	84
Figura 17: Tamizador RETSCH AS200 CONTROL serie N°1218040412, equipo de tamices, balanza y recipientes de acero para separar muestras.....	84
Figura 18: Harnero de laboratorio GILSON TS-1FX.....	85
Figura 19: Chancador de mandíbula BICO serie N°72713.....	85
Figura 20: Celda de flotación batch de programación automática EDEMET modelo CFL 3-3	86
Figura 21: Diagrama simplificado del proceso, en el que se destaca el “Almacenamiento de escorias” que se extraen de la fundición.	89
Figura 22: Circuito de la etapa de concentración simplificado, con sus respectivos flujos	90

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

El presente trabajo de investigación apunta al estudio realizado a las escorias producidas en la etapa de fundición, en particular para los equipos de horno flash y convertidor Peirce – Smith que se encuentran operando en la división Chuquicamata, para ser tratadas en la concentradora (etapa de flotación). Este proyecto de investigación busca analizar la factibilidad de extraer/recuperar cobre residual de la escoria de fundición, adaptándose a las circunstancias específicas del proceso, por medio del análisis de la misma escoria y la respuesta que se tiene en la etapa de flotación, sin afectar directamente los parámetros establecidos en la planta, y de esta forma poder establecer un modelo fenomenológico, el cual, ingresando parámetros de la alimentación se obtenga la recuperación dentro del proceso.

Entre las características principales que presenta este tipo de escoria producida en la planta, es la alta ley de cobre asociada o residual que se encuentra presente, donde según análisis de las muestras extraídas de la división podemos encontrar una ley de 9,6% y 8,6% de cobre presentes en las escorias provenientes del C.P.S. y H.F. respectivamente, además de una ley de 5.3% de cobre que se encuentra en la escoria “apilada” en la alimentación del Sag18, este último es el molino encargado de la reducción de tamaño de las escorias. Además, los resultados presentan una ley de cobre mayor que las que se encuentran actualmente en el yacimiento, donde podemos destacar que la mineralogía modal presente, excluyendo el contenido ganga no metálica, presenta una alta ley de calcosina (Cu_2S) y bornita (Cu_5FeS_4) en la escoria, siendo $50\pm 5\%$ y $27\pm 5\%$ respectivamente.

El interés de la investigación surge por parte del área “Gerencias de Recursos Mineros y Desarrollo” denominado G.R.M.D., dado que, para medir el nivel operativo de la planta, la escoria que se reprocesa en la etapa de concentración posee una ley establecida de recuperación equivalente del 89% siendo este un índice de recuperación que es usado para realizar el balance a nivel planta, el cual permanece constante), donde, por medio de los resultados de las “Pruebas de análisis preliminar.” de flotación batch se obtiene que:

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

“Resulta improbable obtener la ley establecida del 89%, por ello se analiza el efecto que este tuvo en un periodo de tiempo entre enero del 2019 a noviembre del 2021, donde considerando un F80 de 280 [µm] y 50 [µm], que poseen recuperaciones de cobre equivalentes a 61% y 83% respectivamente, se produce un déficit de “cobre recuperado de la escoria” equivalente a 14.869 [TMF] en el periodo analizado. “

La estrategia empleada para llevar a cabo la investigación, es por medio de un análisis de la recuperación de cobre, tanto de manera particular y de forma conjunta de las escorias producidas en los equipos de H.F. y C.P.S. por el método de flotación batch, el cual busca analizar la recuperación de Cu obtenida con los parámetros establecidos en planta, y un análisis mineralógico realizado a la alimentación y relave de las pruebas, donde se pretende dar entendimiento a la cinética que se encuentra involucrada en el proceso, y tener conocimiento de los elementos que pueden llegar a recuperarse en la etapa de concentración. Además, como segunda parte se plantea estudiar la recuperación que se puede obtener al trabajar con un P80 de 75 [µm] (Xiong, Bin, Shuaipeng, & Bo, 2014) (Zoran & Zoran, 2011), esta granulometría es la que presenta mayor recuperación, teoría que se respalda según los resultados obtenidos en las pruebas primarias, donde al trabajar con una granulometría de 50 [µm] se tiene una recuperación máxima promedio de 83,3% de cobre, a diferencia de las granulometrías de 150[µm] y 280[µm] donde se tienen recuperaciones del 69,09% y 66,09%, respectivamente.

Esto último deja en evidencia que el proceso actual de concentración que se lleva a cabo en la planta no puede llegar al 89% que se estima, debido a que: los reactivos o su dosificación no es la adecuada, y principalmente que la flotación de la escoria no se encuentra en sus puntos óptimos de trabajo, considerando las parametrizaciones existentes en la planta, y se estima que la recuperación máxima de cobre proveniente de la escoria será menor al 89% que se obtiene con un P80 de 50 [µm]. Además, con los antecedentes reunidos y los resultados obtenidos se estableció un modelo fenomenológico en función de la ley de Cu de la escoria que ingresa a la concentradora, y teniendo en consideración el P80 con el cual ingresa a la etapa, se calculan las

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

toneladas métricas finas de Cu que se recuperan y el porcentaje de recuperación que se presenta en esa etapa.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES DEL PROCESO

2.1. Precedentes del proceso actual.

El circuito actual del proceso se encuentra constituido principalmente por las etapas de: conminución, concentración, fundición y refinería. Para poder obtener una recuperación más efectiva dentro del circuito, se emplea la recuperación de Cu proveniente de las escorias de H.F. y C.P.S., o bien etapa de fundición dentro del circuito, por medio de la secuencia descrita a continuación:

“Las escorias son trasladadas y vaciadas en bandejas, estas quedan identificadas según su origen, las que son enfriadas al aire en un periodo entre 24 a 48 horas asistidas por un sistema de riego, para posteriormente ser retiradas y trasladadas al sector de almacenaje de escoria de la división. En este sector se procede a una separación por tamaño, para que así la escoria que se encuentra con una granulometría optima pueda pasar directamente al molino SAG18, y la que no, sea sometida a una etapa previa de reducción de tamaño. La escoria es apilada en un sector aledaño al molino SAG18, con una ley de cobre que va desde el 6,0% al 9,5% de Cu, esto último considerando que la escoria que se encuentra en este punto es una mezcla entre las escorias producida en el H.F. y C.P.S., y la escoria que se encuentra inventariada. En el molino SAG18 se le realiza la reducción de tamaño a una granulometría entre 50 y 280 [µm], y son trasladadas a la concentradora A2, donde, por medio de un proceso de flotación, se pretende recuperar el cobre de la escoria, la misma que se trabaja en conjunto con el mineral proveniente de la mina rajo abierto y subterránea de Chuquicamata, la que presenta una ley de cobre entre 0,5% y 0,8%”.

La recuperación asignada de cobre proveniente de la escoria es de un 89%, la cual, es una recuperación estudiada y acordada entre la concentradora y la fundición para establecer el balance metalúrgico de la planta según el diagrama presentado en Figura 1, esta misma se cuestiona dado que la operación actual se encuentra constituida por el diagrama que se presenta en la Figura 2 (donde la escoria es tratada en forma conjunta

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

con el mineral extraído de la mina), además se presenta que no se tiene un control preciso de la granulometría de la escoria que proviene del SAG18. Cabe considerar que la etapa de concentración en la cual se está tratando fue diseñada para el mineral proveniente de la mina, por lo que no se encuentra demostrado si parámetros como el tiempo de flotación, la dosificación de reactivos u otro sea el adecuado, ocasionando que la recuperación difiera de la deseada. Esto último tiene un efecto directo en cuanto la recuperación de cobre estimada que se presenta en el balance masa reportado mensualmente.

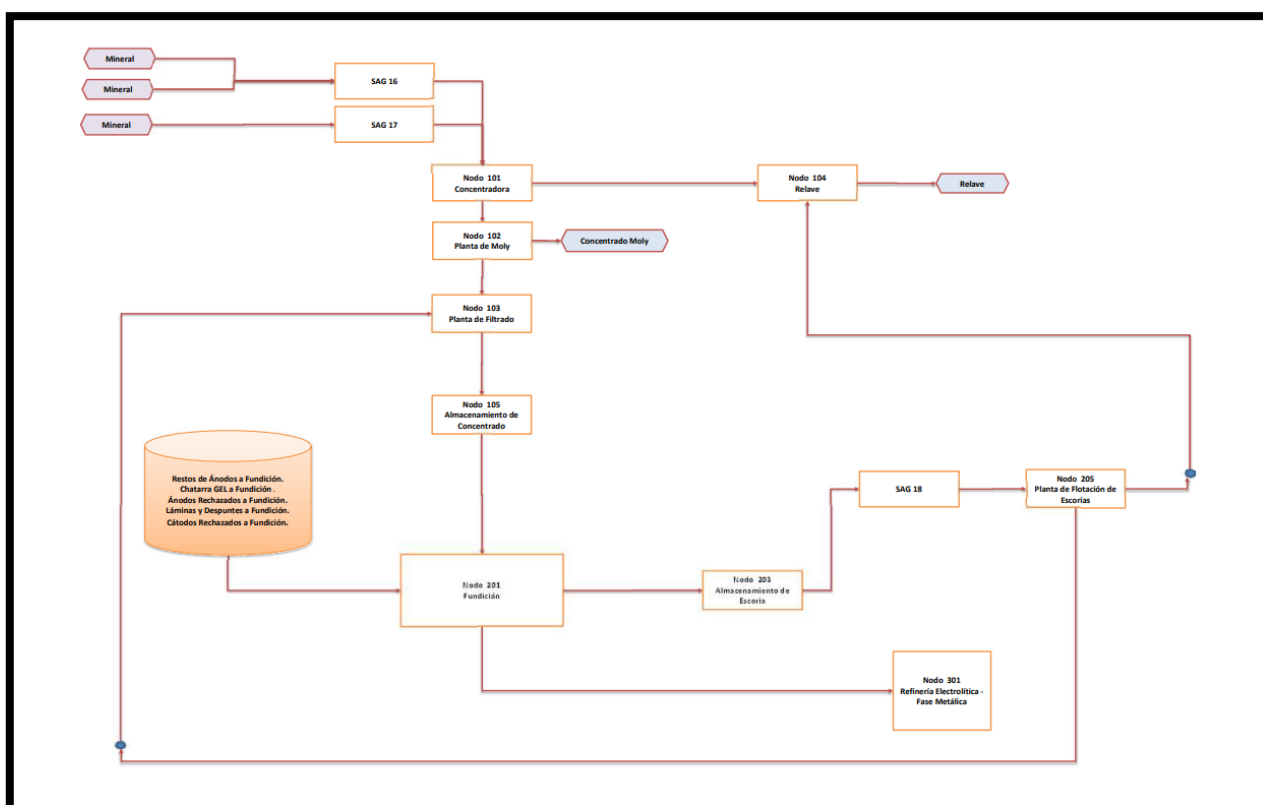


Figura 1: Diagrama flujo con la planta de flotación de escorias incorporado.

Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.

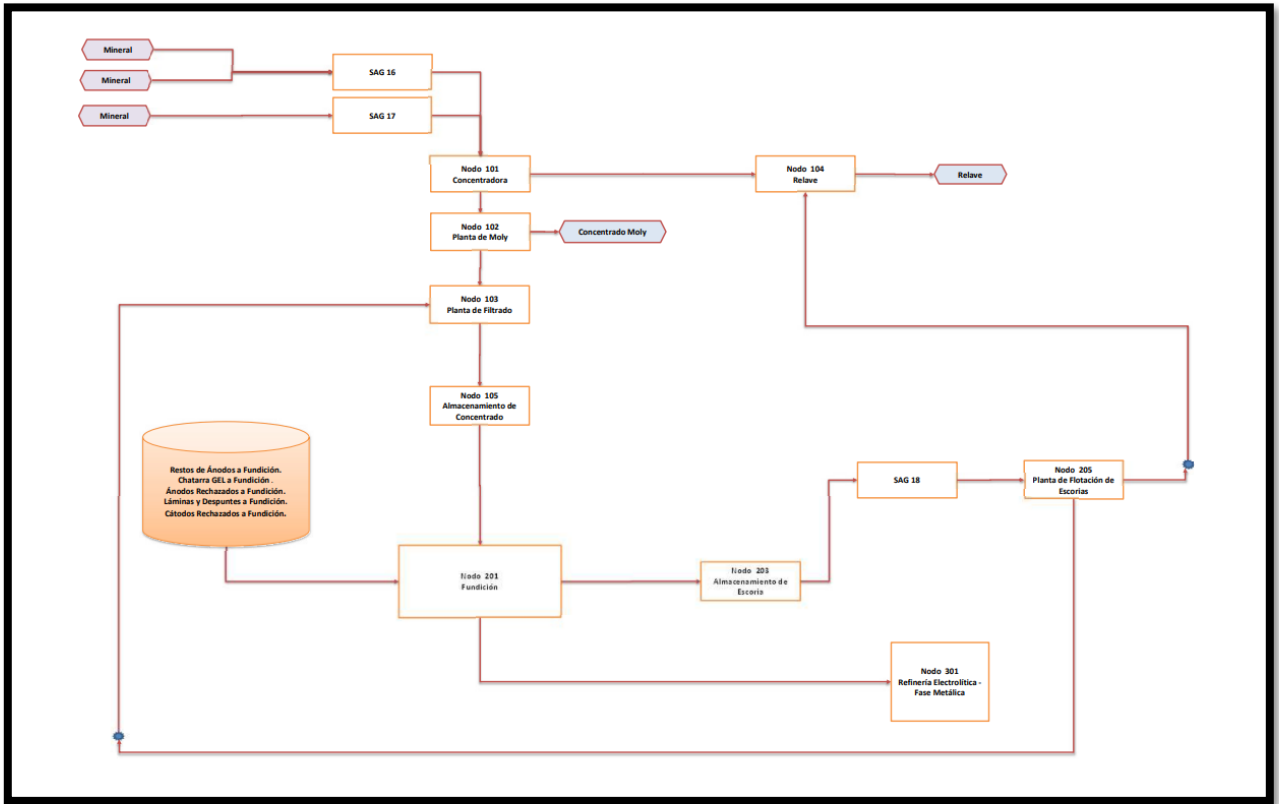


Figura 2: Diagrama flujo sin la planta de flotación de escorias incorporado

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

2.2. Procedimiento de investigación.

Hasta la actualidad, se han llevado a cabo distintas investigaciones para la recuperación de cobre en la etapa de “flotación” o “concentración” de minerales, las cuales han sido desarrolladas y probadas previamente (Cytec, 2010), según la siguiente figura:

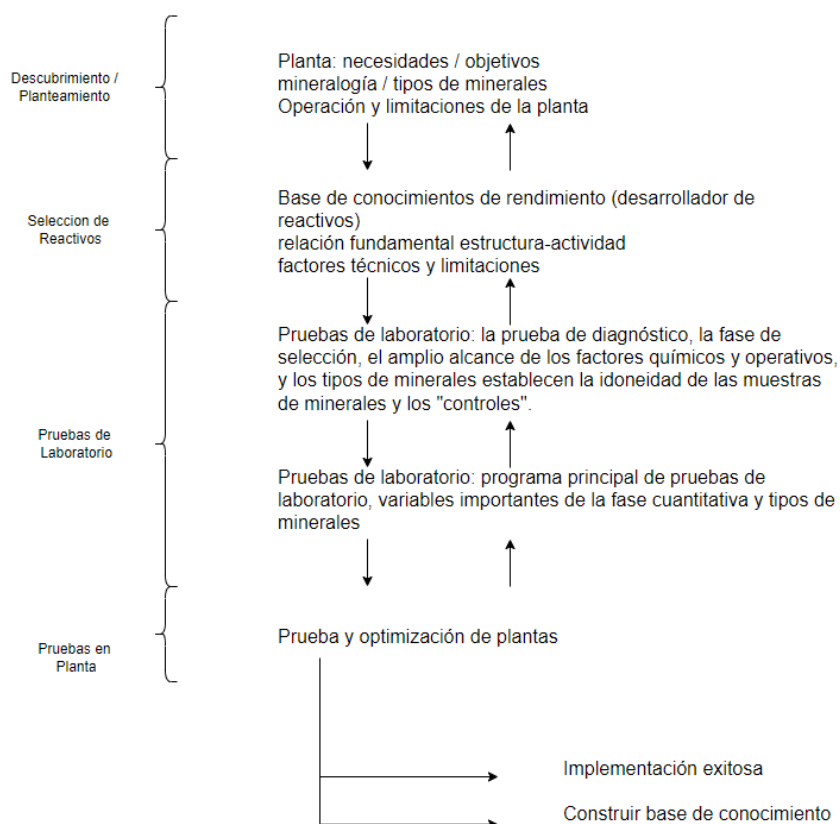


Figura 3: Esquema de proyección para implementación de proyecto etapa concentración con retroalimentación (Cytec, 2010).

Según indica la Figura 3, se puede considerar que la investigación se encuentra en la etapa de “Pruebas de laboratorio” de retroalimentación, debido a que el trabajo se encuentra vinculado a un proyecto ya implementado en planta, donde por medio de sus variables de estudio (F80, mineralogía presente, leyes de cobre, entre otros) se pueda llegar a una optimización de la planta. Recordando que el proceso actual por el que se recupera el cobre proveniente de las etapas de fundición es el mismo que se utiliza para la recuperación de cobre del M.P.M., y el diseño del proceso fue basado en este último.

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Teniendo en consideración lo anterior, se llevará a cabo la investigación para ver el “alcance de optimización” sujeto al proceso actual, por lo que, los parámetros de evaluación apuntan en la granulometría de ingreso (F80) a la etapa de concentración por parte de la escoria de cobre proveniente de fundición. De esta forma se podrá estimar una recuperación de cobre más cercana a la real, además de si el proceso actual beneficia o perjudica la recuperación de cobre proveniente de la escoria.

CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES DE LA LITERATURA

3.1. Marco teórico.

3.1.1. Descripción del proceso.

Es bien conocido que el objetivo de la concentración de minerales vía flotación es obtener una alta recuperación del mineral con una alta ley del concentrado, lo cual se hace por medio de dos etapas (Yianatos, Flotacion de Minerales, 2005):

- Etapa de colección o formación del agregado partícula – burbuja.
- Etapa de separación o transporte de burbujas.

Donde el método empleado consiste principalmente en la separación selectiva de especies minerales útiles, en base a sus propiedades físico – químicas de las superficies expuestas de las partículas de minerales, mediante una adherencia de la partícula de mineral a las burbujas de aire producidas por el equipo de flotación. Las especies minerales útiles que ingresan a la etapa de concentración como lo son la calcopirita, la calcosina, la bornita y la covelina, por medio de un flujo de alimentación serán recolectadas para ser parte del concentrado, mientras que las partículas que quedan remanentes en la celda serán extraídas por medio de un flujo diferente denominado relave/colas (Escondida, 2004) (Yianatos & Vinnette, Flotacion de minerales_ Fundamentos, Tecnología y Aplicacion, 2015).

Una particularidad de suma importancia dentro de una etapa de concentración o flotación, son las partículas de mineral con un comportamiento hidrofílico y las partículas de mineral con un comportamiento hidrofóbico. En particular los minerales hidrofílicos son los que tienen una mayor afinidad con el agua, que por lo general representa la mayoría de los minerales estériles o ganga (Yianatos, Flotacion de Minerales, 2005), mientras que los minerales hidrofóbicos son aquellos que nos son mojables o bien poco mojables por el agua, por lo que estas tienen la particularidad de ser aerofílicos, lo que les da afinidad con las burbujas de aire por ende se ve facilitando su adherencia para llevar a cabo la

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

recolección de la especie deseada, en particular para los sulfuros de cobres que se encuentran en la escoria.

3.1.2. Variables del proceso.

Diversos estudios han señalado la importancia del entendimiento de las variables del proceso de flotación, ya que, estas pueden influir de manera particular dentro del proceso, con lo cual, la recuperación del mineral de interés, para el caso de estudio el cobre proveniente de las escorias de H.F. y C.P.S., se ve afectada de manera favorable o desfavorable. A continuación, se presentan las variables de un proceso de flotación batch las cuales están sujetas al trabajo particular de escorias (Jiaqi, Hongxu, Liangtian, Chao, & Shi, 2017) (Edlund & Hussey, 1972) (Xiong, Bin, Shuaipeng, & Bo, 2014) y al “Estándar de geometalúrgia”, esta última consiste en la parametrización general para llevar a cabo pruebas de flotación batch para la División Chuquicamata, entre las que destacan:

- pH:

La flotación es sumamente sensible al pH, dado que esta determina la adsorción de los reactivos colectores que hidrofobizan a los minerales sulfurados. Cada formula de reactivo tiene un pH óptimo para un determinado tipo de mineral, donde según los estándares de geometalúrgia se debe trabajar con un pH 10, este pH de trabajo coincide con lo apuntado por distintos autores dado que se produce un aumento en la recuperación de cobre (Jiaqi, Hongxu, Liangtian, Chao, & Shi, 2017).

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Tabla 1: Efecto del pH en la recuperación de cobre (Jiaqi, Hongxu, Liangtian, Chao, & Shi, 2017)

pH evaluación	Ley de cobre en el concentrado. [%]	Ley de cobre en el relave. [%]	Cobre recuperado. [%]
4	4,49	0,60	58,27
7	6,42	0,48	69,27
10	7,44	0,43	73,01
12	5,46	0,61	55,67

- **Porcentaje de sólidos:**

El tener un control del porcentaje de sólidos dentro del proceso es de suma importancia, dado que se deben considerar las condiciones para que, al interior del equipo, específicamente en la zona de colección se pueda producir la adherencia del mineral en la burbuja. Donde los equipos por lo general operan entre un rango del 27 a 42% de sólido aproximadamente (Yianatos, Flotacion de Minerales, 2005) (Yianatos & Vinnette, Flotacion de minerales_ Fundamentos, Tecnologia y Aplicacion, 2015), cabe destacar que para el desarrollo de las pruebas en el presente trabajo se presenta un porcentaje de sólido equivalente al 38%, por lo que nos encontramos dentro del rango de trabajo.

- **Reactivos:**

Los reactivos comúnmente usados en la flotación son:

- El colector: para la captura selectiva de los minerales a flotar.
- El espumante: para reducir el tamaño de burbujas y generar una espuma estable.
- El regulador de pH: generalmente regulado con cal, este tiende a producir un aumento del pH.

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

La adición de los reactivos se regula tanto de forma manual como de forma automática a lo largo del circuito, desde la molienda húmeda a la flotación, de acuerdo con los tonelajes y flujos de alimentación (Xiong, Bin, Shuaipeng, & Bo, 2014). Entre los reactivos que se utilizan para llevar a cabo las pruebas de flotación batch, son: el Matfroth 202 (espumante), el Xantato 343 (colector) y el Diesel, los cuales son los asignados en la planta para llevar a cabo la etapa de concentración.

3.1.3. Flotación batch y cinética de flotación.

El proceso de flotación se considera bastante complejo, ya que depende de las condiciones de operación y de las características mineralógicas de los sólidos. Para conocer el comportamiento cinético de una operación, se realizan pruebas a nivel laboratorio, por lo general en celdas de flotación batch. Este tipo de celdas poseen agitación mecánica con velocidad de agitación variable y entrada de aire por un tubo concéntrico que rodea el motor. Las celdas de flotación batch se caracterizan por trabajar en estado no estacionario.

Los modelos cinéticos generalmente no consideran variables operacionales, como: el flujo de aire, reactivos, entre otros. Pero si se considera la operación de flotación que se utiliza, para el caso de operación batch, se representa con una cinética de primer orden, según la ecuación:

Ecuación 1: Ecuación de cinética de primer orden (Yianatos, Flotacion de Minerales, 2005).

$$\left(\frac{dc}{dt}\right) = -k(C)^1 \quad (1)$$

Donde se aprecia que la cinética se encuentra en función de la concentración de mineral al interior de la celda (C) y la constante cinética de flotación (k). Al resolver la Ecuación 1) considerando que para el tiempo inicial ($t = 0$) la concentración inicial equivale a la concentración inicial (C_0), la variación de a concentración al interior de la celda queda expresada de la siguiente manera:

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Ecuación 2: Ecuación variación de la concentración al interior de la celda (Yianatos, Flotacion de Minerales, 2005).

$$C(t) = C_0 * e^{-kt} \quad (2)$$

Considerando un volumen aproximadamente constante, se puede deducir que la recuperación del mineral (R) queda en función de la diferencia de la concentración inicial y la concentración que se tiene en el tiempo. Esta recuperación se puede reemplazar en la Ecuación 2) para obtener la siguiente representación de la recuperación:

Ecuación 3: Ecuación de recuperación (Yianatos, Flotacion de Minerales, 2005).

$$R = R_{\infty} (1 - e^{-kt}) \quad (3)$$

En la Ecuación 3, se considera también la recuperación máxima que se puede tener en tiempo extensos de operación (R_{∞}). Esta ecuación se asimila a la recuperación que se tiene del modelo cinético propuesto por García – Zúñiga (G-Z) en 1935 (Yianatos, Flotacion de Minerales, 2005), un modelo apto para poder desarrollar la investigación, pero que solo considera la cinética de flotación de un solo elemento. Otro tipo de modelo que se puede emplear es el propuesto por Klimpel en 1980 (Yianatos, Flotacion de Minerales, 2005), el cual, se considera un modelo de distribución de constante cinética de tipo rectangular, este modelo considera la existencia de especies con diferentes velocidades de flotación, lo que permite describir efectos del tamaño de partícula en una misma especie mineral o el efecto de diferentes asociaciones mineralógicas.

Ecuación 4: Recuperación asociado al modelo de Klimpel (Yianatos, Flotacion de Minerales, 2005).

$$R = R_{\infty} * \left(1 - \frac{1}{k\tau} * (1 - e^{-kt}) \right) \quad (4)$$

3.1.4. Etapa de fundición y conversión.

Horno Flash.

El proceso que se lleva a cabo en el horno flash se denomina fusión flash, el cual, consiste esencialmente en oxidar un flujo de concentrado seco que contiene principalmente elementos de Cu-Fe-S, en una corriente de aire enriquecida con oxígeno (Sanchez & Imris, 2002) (CODELCO, 2019). La oxidación se lleva a cabo al interior de una cámara llamada torre de reacción, en donde el concentrado seco y el aire enriquecido son inyectados por un quemador, ubicado en la parte superior de la torre. En un punto del proceso, las partículas alcanzan la temperatura a la cual la tasa de calor generada por la oxidación iguala a la disipación por convección y por radiación al ambiente. Durante esta etapa las partículas se funden, convirtiéndose en pequeñas gotas. El producto final de la torre es principalmente, una mezcla heterogénea de sulfuros de cobre fundido, sulfuros de hierro, magnetita, sílice y ganga, los que se separan en dos fases en la zona llamada settler, formando la escoria, el eje y los gases.

Los productos del proceso flash, son (Sanchez & Imris, 2002):

- Producto fundido rico en cobre, hierro y azufre, llamado eje o mata. Esta contiene entre 40 a 65% de Cu en la forma de Cu_2S , además de contener FeS e impurezas (arsénico, antimonio, plomo, zinc, entre otros).
- Producto fundido que contiene hierro oxidado y óxidos del fundente, llamada escoria. Esta contiene entre 0,5 y 4,0% de cobre.
- Flujo de gases, que contiene SO_2 (entre 10 a 80% en volumen) de la oxidación del azufre y N_2 del aire soplado, además de contener CO_2 y H_2O si suplementariamente se usa un combustible fósil en el horno.

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Convertidor Peirce – Smith.

La conversión de cobre que se lleva a cabo en el C.P.S. tiene como producto principal un cobre blíster elaborado en un ciclo discontinuo de 8 a 12 horas, ciclos los cuales se componen en una primera etapa del carguío de eje al convertidor, para luego pasar a una etapa de soplado de oxígeno a través del baño fundido, y finalmente llevar a cabo el vaciado de la escoria para luego dar paso al vaciado de cobre blíster, con lo que concluye el ciclo. El proceso de conversión del eje fundido a cobre blíster se lleva a cabo principalmente en dos etapas, las cuales son (Sanchez & Imris, 2002) (Gaete, 2014):

1. Etapa de soplado de eje a escoria, esta se basa principalmente en disminuir el contenido del hierro que se encuentra en el baño fundido, con tal que no supere el 1%, de esta forma obtener un Cu_2S líquido impuro, llamado “metal blanco”, y una escoria que contiene principalmente FeO y Fe_3O_4 , dada la oxidación que se produce del FeS . Para por la adición de fundente de sílice, que permite controlar la formación de la escoria dado que acompleja el FeO en una escoria fayalítica.
2. Etapa de soplado de cobre, esta se basa principalmente en disminuir el contenido de azufre que se encuentra en el baño fundido oxidándolo con SO_2 , donde los productos principales son el cobre blíster y la escoria, la composición de esta última estará determinada por el grado de oxidación que se haya producido al interior del reactor.

3.1.5. Modelo Fenomenológico.

Un modelo fenomenológico es un modelo matemático que intenta predecir “el comportamiento o resultado” de un proceso, basado en su tendencia pasada. Para establecer un modelo fenomenológico adecuado, se deben identificar las variables involucradas en un proceso, la incidencia que estas tienen y para este modelo en particular, además de analizar si estas variables son manipulables dentro del proceso.

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

En particular para el proceso de flotación/concentración de minerales poseen variables como el tamaño de partícula, control de pH, densidad de la pulpa o porcentaje de sólido, tipo y dosificación de reactivos, cinética asociada a la mineralogía y al tiempo de residencia. Todas estas variables de manera particular pueden ser causantes de un aumento o disminución de la recuperación de cobre en el proceso.

Para establecer y realizar el modelo que se utilizara para el estudio, se considera principalmente la variable manipulable P80 o bien denominada “tamaño de partícula” con el que se ingresa a la etapa de concentración (P80), esto debido a como se menciona con anterioridad, se trabaja con un proceso preestablecido para procesar el M.P.M., mientras que la escoria producida en la etapa de fundición fue un flujo que se vio involucrado posteriormente en el mismo proceso. Por esta razón, se considera que trabajar con el F80 y de esta forma no se vea afectado el proceso actual de la concentradora.

Otro factor que considerar para llevar a cabo el modelo es el uso de la información vinculada a la escoria de cobre producida en fundición, como las leyes de cobre, la mineralogía presente, y como estas se ven afectadas en una etapa de flotación bajo los mismos parámetros.

La forma en la que se puede entregar o visualizar la información obtenida en el modelo es muy variada, pero para la utilidad y entendimiento de los resultados, estos serán plasmados por medio de un gráfico y a su función matemática establecida.

3.2. Revisión de la Literatura

3.2.1. Tratamiento de escorias.

La escoria de cobre se obtiene como material de desecho del proceso de refinación. Esta se forma a partir de los óxidos contenidos en la carga del horno y de los óxidos de hierro que se producen por la oxidación durante el proceso pirometalúrgico.

En esta sección se analizan las variables incidentes del proceso de recuperación de cobre proveniente de escorias de fundición. Las variables incidentes son consideradas las variables del proceso de flotación con las cuales podemos estudiar y/o modificar para aumentar el rendimiento del proceso, pero sin que se vea afectado el proceso establecido en planta para la concentradora, las variables manipulables consideradas son:

- Tamaño y liberación de partícula (Valderrama, Gonzalez, Santander, & Zazzali, 2018) (Xiong, Bin, Shuaipeng, & Bo, 2014): Debido a que las escorias producidas en la fundición cuentan con un molino semiautógeno de uso exclusivo para las mismas, el control de tamaño se vuelve un parámetro práctico para su manipulación a nivel planta, y considerando la liberación que se tenga a distintos tamaños se puede optimizar el proceso.
- Tiempo de residencia y mineralogía presente (Xiong, Bin, Shuaipeng, & Bo, 2014) (Wang, Geysen, Padilla, D'Hoker, & Van Gerven, 2015): Son dos factores que se encuentran entrelazados, debido a que según la mineralogía presente y predominante que contenga la especie que se desea recuperar, el tiempo de residencia puede ser o no el indicado para el concentrado deseado.

Tamaño de partícula y liberación.

Para liberar de manera efectiva el mineral de interés de la ganga se emplea la reducción de tamaño de partícula hasta alcanzar el nivel adecuado de liberación de especies minerales. En la industria chilena se opera con un rango aproximado de 45 a 75 [μm] para llevar a cabo una liberación efectiva (CODELCO, 2019) (Escondida, 2004), pero la

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

misma puede ir variando según las condiciones de la planta, ya sea por el proceso que se lleva a cabo o bien por el tipo de mineral con la que se está operando.

El impacto de la liberación de partículas portadoras de cobre provenientes de la escoria sobre la recuperación de cobre en una etapa de flotación es de suma importancia, dado que, si no se opera en un rango “óptimo”, la recuperación de esta puede verse disminuida como se aprecia en la Figura 4:

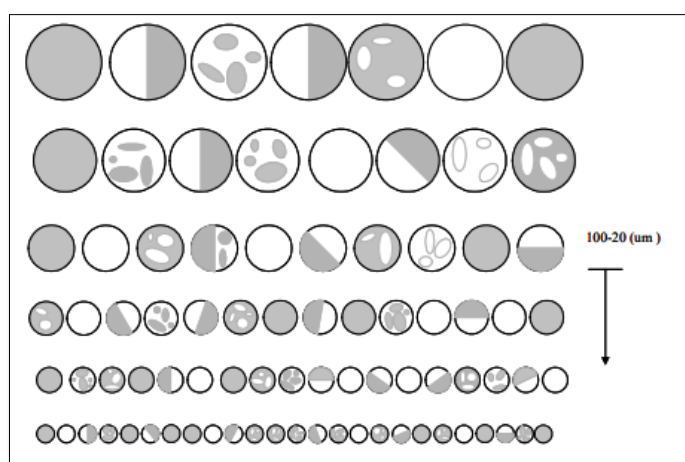


Figura 4: Efecto reducción de tamaño del mineral de interés (blanco) y la ganga (gris) (Yianatos, Flotacion de Minerales, 2005).

Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.

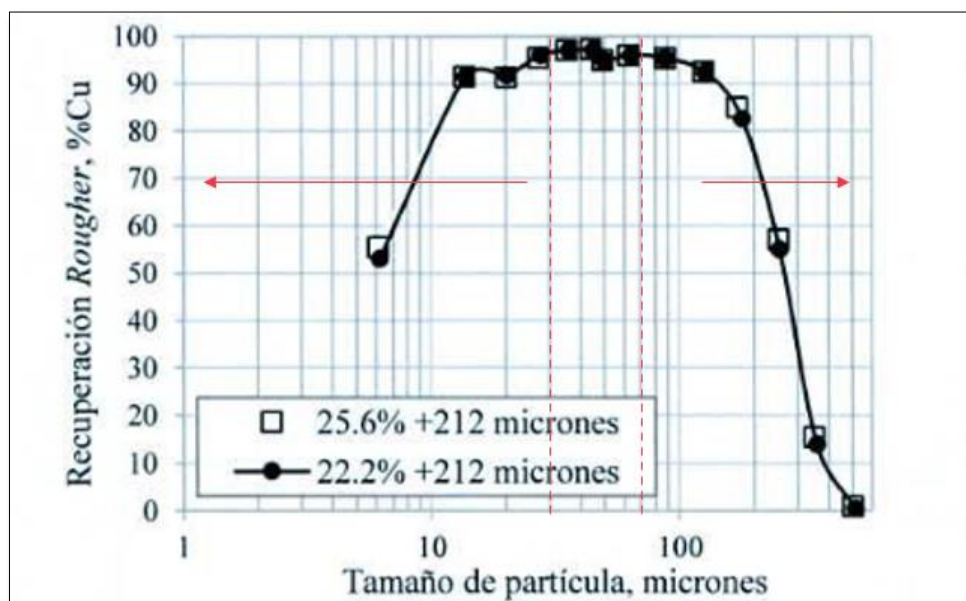


Figura 5: El efecto del tamaño de partícula en la recuperación de cobre en una celda Rougher (Yianatos, Flotacion de Minerales, 2005)

Siguiendo el caso indicado en la Figura 5, se aprecia que la recuperación se ve disminuida en 2 casos en particular:

1. Cuando esta tiene un menor tamaño de partícula, produciendo que éstas se comporten como partículas finas o ultrafinas, donde la baja recuperación se debe principalmente a factores hidrodinámicos, dado que las partículas de menor tamaño tienen una baja inercia o bien, tienden a moverse con el fluido cuando se aproxima la burbuja (Yianatos & Vinnette, Flotacion de minerales_ Fundamentos, Tecnología y Aplicacion, 2015).
2. Cuando esta tiene un mayor tamaño de partícula, produciendo que estas se comporten como partículas gruesas, las cuales presentan problemas como tener un menor grado de liberación, menor tiempo de residencia y menor eficiencia de colección (Yianatos & Vinnette, Flotacion de minerales_ Fundamentos, Tecnología y Aplicacion, 2015)

Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.

Analizando la respuesta que se tiene en la recuperación de cobre por medio de la flotación de escoria, distintos autores concuerdan que el tamaño óptimo para llevar a cabo el mismo, es con un P80 de 50 [μm] (Valderrama, Gonzalez, Santander, & Zazzali, 2018), como se puede apreciar en la Figura 6, efecto que se atribuye directamente a la liberación efectiva de las partículas que contienen cobre, ya que, a mayor porcentaje pasante, aumenta la cantidad de partículas liberadas que se encuentran en rangos menores de tamaño, estas mismas presentan una menor variabilidad con respecto a la respuesta que se tiene con un menor porcentaje pasante después de la etapa de concentración por flotación (Zoran & Zoran, 2011) (Pavez, Herrera, González, & Rivera, 2021).

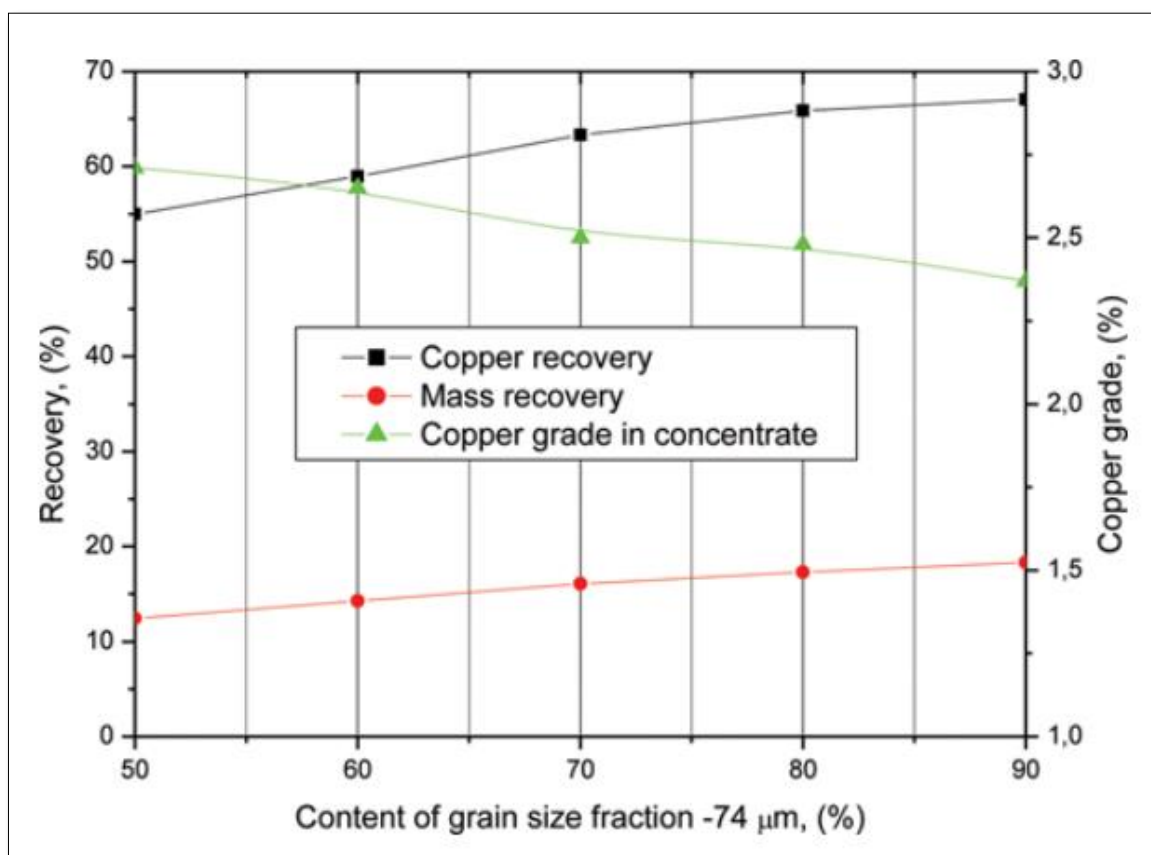


Figura 6: Respuesta de la recuperación y ley de cobre en una etapa de flotación, en base al grado de liberación con un tamaño menor a 74 [μm] (Zoran & Zoran, 2011).

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Mineralogía y tiempo de residencia.

Un punto importante cuando se trabaja con una pulpa que contiene mineral de interés para su concentración (flotación), son: la mineralogía y asociaciones mineralógicas que esta pueda poseer, uno de los motivos principales por el cual se hace esta consideración, se debe principalmente a que la respuesta que se tenga en la etapa de concentración para la recuperación de cobre en el proceso, depende de si el diseño de la concentradora (con sus respectivos parámetros) es la adecuada para la mineralogía que se encuentra presente en la escoria. Dentro de las especies sulfuradas de cobre que destacan debido a la ley que pueden llegar a presentar, son: la Calcosina (Cu_2S), la Bornita (Cu_5FeS_4), la Covelina (CuS) y la Calcopirita (CuFeS_2) (Hernandez, 2013).

En la Figura 7 se observa una distribución de especies de cobre que se encuentran asociadas a las escorias de un convertidor teniente mediante una microscopía de polarización y que además se complementa con la información entregada en la Figura 8 que muestra las proporciones en las que se encuentran estas especies (sin considerar la ganga no metálica) (Perez-Segura, Coronado-Lopez, Robles-Vega, & Brown-Bojórquez, 2016), donde se aprecia un claro predominio de las especies de cobre sulfurado, las cuales se le atribuye directamente la efectividad en el proceso de flotación, (Jiaqi, Hongxu, Liangtian, Chao, & Shi, 2017).

Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.

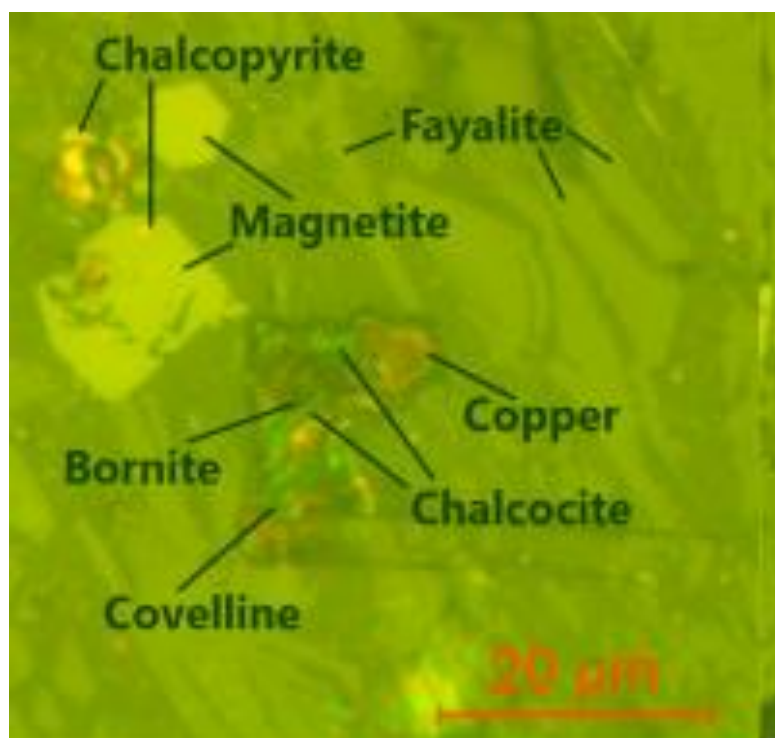


Figura 7: Microscopio de polarización representativa de escoria que muestra partículas finas que contienen cobre (Jiaqi, Hongxu, Liangtian, Chao, & Shi, 2017)

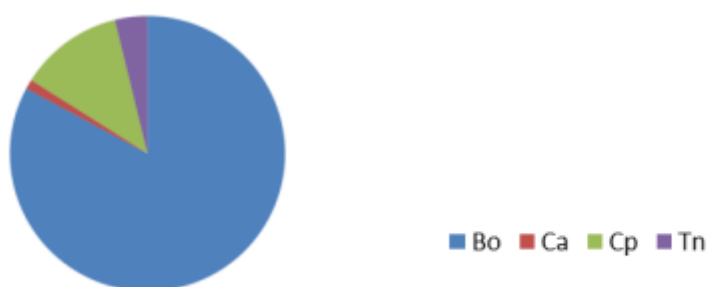


Figura 8: Composición mineralógica (sin considerar ganga no metálica) de muestra donde las principales especies mineralógicas son: bornita (Bo), calcosina (Ca), calcopirita (Cp) y tennantina (Tn) (Ebisu, 2018)

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

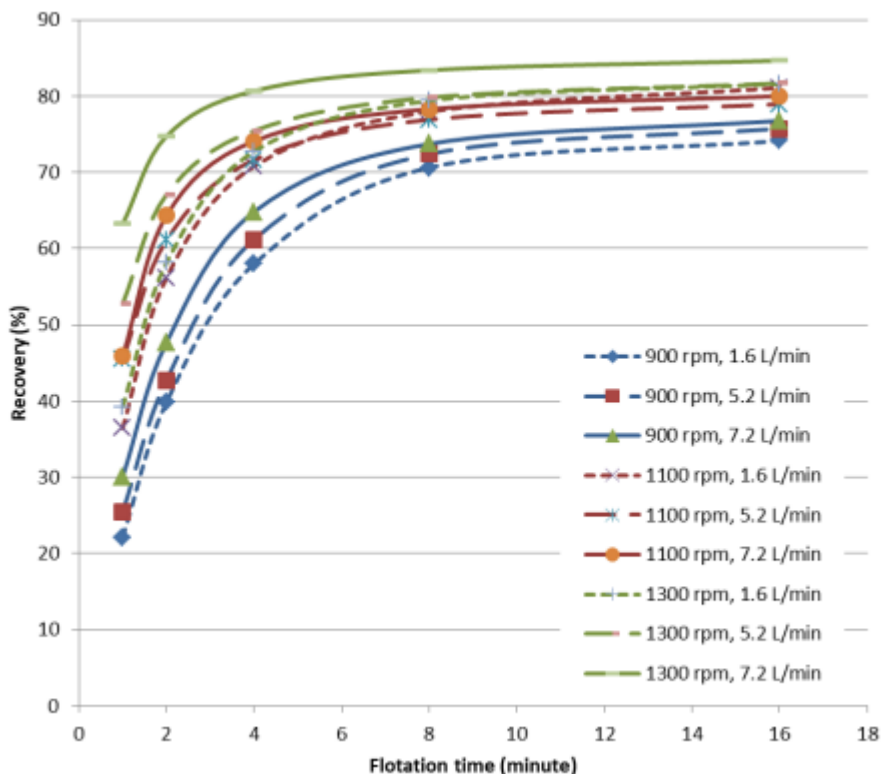


Figura 9: Análisis de la recuperación de cobre vs el tiempo del proceso, variando la inyección de aire y los rpm con la que trabajar el equipo de flotación batch (Ebisu, 2018)

También es de suma importancia considerar el tema del tiempo de residencia que se tiene dentro del equipo, ya que, según el tipo de mineral y las condiciones de trabajo con las cuales se estén operando, pueden afectar directamente en la cinética de flotación que esta puede tener, y por ende tanto la ley como la recuperación de cobre para el proceso se pueden ver afectado tanto de manera positiva como negativa. En la Figura 9 se puede evidenciar que la respuesta a la recuperación irá aumentando a medida que aumente la velocidad de agitación y el flujo de aire, también se puede destacar que se establece el R_{∞} en periodos cortos de flotación, donde se puede establecer que aproximadamente a partir de los 8 minutos, la respuesta de las recuperaciones de cobre se vuelve menores y comienzan a tener una tendencia a la recuperación máxima.

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Considerando estos dos puntos anteriores se puede dar a entender que para minerales sulfurados de cobre, provenientes de la escorias de fundición, se espera que se tenga una buena respuesta en la etapa de flotación para tiempos de flotación acotados, pero otro punto que destaca es el hecho que los minerales presentes en la escorias se encuentran asociados tantos unos con otro, como se pueden asociar a otras especies como el cobre metálico, la cuprita, etc., donde si se tiene un tamaño adecuado de partícula y una buena estabilidad de la burbuja en el proceso, la recuperación tiende a aumentar (Ebisu, 2018) (Hernandez, 2013).

Perdida de cobre en la escoria.

Las pérdidas de cobre que se producen en el equipo de Horno Flash y Convertidor Peirce-Smith ocurren principalmente por 2 mecanismos (Heikki Jalkanen, 2003):

1. El primero es la disolución química sulfídica (Cu_2S) y oxidica (Cu_2O) del cobre, esto es debido a la disolución mutua entre la escoria y el eje que tienen una tendencia a formar un oxisulfuro homogéneo fundido, producto de los cambios en la composición eje – escoria ante el aumento de la presión parcial de oxígeno, y dependiendo además del contenido de sílice en la escoria.
2. El segundo es el atrapamiento mecánico de inclusiones de eje o cobre, esto debido a su flotación o no sedimentación en la fase escoria, por lo que depende de las propiedades físicas tales como la densidad, tensión superficial y viscosidad de las fases presentes.

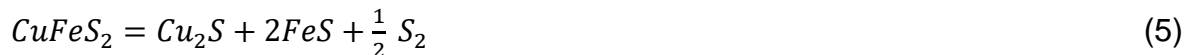
Es el caso que se da en las escorias fayalíticas, que debido al contenido de magnetita que posee esta adquiere una alta viscosidad, esto aumenta la cantidad de cobre atrapado en la misma, debido a que el tiempo de sedimentación es mayor, y a que la magnetita sólida tiende al atrapamiento de partículas de cobre.

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Existen tres mecanismos de atrapamiento de eje o metal en la escoria (DepartamentoDeIngenieriaMetalurgica, 2003):

- a. Formación de eje: En el concentrado, al pasar a una etapa en la cual opera con alta temperatura, como es el caso del H.F. y C.P.S, comienzan a ocurrir reacciones de descomposición gas – sólido, entre las que destacan la descomposición de los sulfuros superiores simples o dobles. Entre los elementos con valor económico que podemos encontrar en el concentrado tenemos la calcopirita ($CuFeS_2$), la cual se encontrará unida a partículas de ganga, cuando comienza a elevarse la temperatura del concentrado, ocurre la siguiente reacción:

*Ecuación 5: Reacción de descomposición de la calcopirita a 1000°C
(DepartamentoDeIngenieriaMetalurgica, 2003).*



Cuando ocurre la reacción de descomposición de la calcopirita a 1000°C, se obtiene principalmente el Cu_2S y el FeS , los cuales formaran parte del eje, pero debido a la porosidad que posee la ganga asociada, la que fue en algún momento calcopirita, el eje se incorpora a la microgrieta como se puede apreciar en la Figura 10 (DepartamentoDeIngenieriaMetalurgica, 2003). Donde posterior a la fusión de sulfuros y la formación de escorias, el eje atrapado forma una fina emulsión dentro de la roca.

Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.

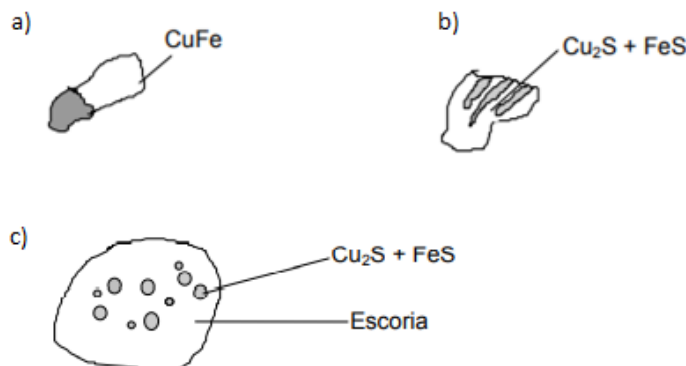


Figura 10: Pérdida de cobre debido al atrapamiento mecánico durante la formación del eje: a) Un estado inicial antes de que comience a subir la temperatura en el concentrado donde el mineral de interés está asociado a la ganga, b) Un estado secundario donde una vez subida la temperatura del concentrado el eje ($Cu_2S + FeS$) se incorpora a la microgrietas de la ganga y c) Un estado final donde el eje se encuentra atrapado en lo que posteriormente se deriva a la escoria (DepartamentoDeIngenieriaMetalurgica, 2003).

- b. Agitación: La agitación que se produce debido a la inyección de aire con concentrado, donde el aumento de pérdidas se encontrara directamente asociado al proceso. Esto debido a que la “violenta agitación” producida en el eje y la escoria, provoca un excesivo arrastre de eje, ya que en el interior del reactor se produce una fina emulsión o dispersión de gotas de eje dentro de las escorias, donde debido a su tamaño requieren grandes tiempos para coalescer y sedimentar, lo que en procesos a nivel industrial se ve difícil de alcanzar.
- c. Burbujas de SO_2 : Durante el transporte de eje a la escoria, se producen ascenso de burbujas de SO_2 a través de la interfase eje – escoria, debido a la siguiente reacción:

Ecuación 6: Reacción entre la escoria de conversión ($3Fe_3O_4$) y el eje (FeS), la cual produce las burbujas de SO_2 y el FeO que se va a la escoria (DepartamentoDeIngenieriaMetalurgica, 2003)].



**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Las burbujas de SO_2 transportan una película de eje a través de la interfase eje – escoria, esta película de eje transportada se desprende dentro de la escoria, posteriormente esta película coalescerá para formar una gota, dando lugar a una dispersión de estas que se encuentran atrapadas en la escoria.

Un punto para destacar es que la ley de cobre teórica que posee la escoria producto de la etapa de fundición varía entre un 0.5% a un 2.0%, pero debido a las malas prácticas operacionales en la realización de los embanques, tiempos de soplado, variación constante en las leyes (Cu, Fe, entre otros) en la alimentación, calidad y cantidad de carga fría, genera que la escoria tenga leyes más altas, como es el caso de la escoria estudiada. (Perez-Segura, Coronado-Lopez, Robles-Vega, & Brown-Bojórquez, 2016)

3.2.2. Caracterización química y mineralógica.

La caracterización de un sólido proveniente de un yacimiento mediante distintos métodos tiene como finalidad el conocer cómo se encuentra constituido el mismo, de manera cuantitativa y cualitativa, con el objetivo de entender cualquier transformación o efecto que pueda ocurrir debido a las condiciones del proceso al cual es sometido (Alicante, 2018).

Espectroscopia de fluorescencia de rayos X.

La fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica analítica que se puede utilizar para determinar la composición química de una amplia variedad de tipos de muestras, entre los que se encuentran sólidos, líquidos, pulpas y polvos sueltos. Es una técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria, equivalente a la fluorescencia de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de rayos X. Estos rayos incidentes expulsan electrones de capas interiores del átomo. Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

transición se disipa en forma de fotones, radiación X fluorescente o secundaria, con una longitud de onda característica que depende del gradiente energético entre los orbitales electrónicos implicados, y una intensidad directamente relacionada con la concentración del elemento de la muestra.

La FRX tiene como finalidad principal el análisis químico de los elementos comprendidos entre el Flúor (F) y el Uranio (U) de muestras sólidas y líquidas, con el único requisito de que la muestra tenga un tamaño inferior al porta muestras del equipo (Panalytical, s.f.)

Análisis microscopía QEMSCAN

El QEMSCAN posee un sistema integrado que compara la intensidad de señal de los electrones retrodispersados y las señales de rayos X de dispersión de energía emitidas por sus tres detectores para cada punto de medición. Es un sistema de análisis completamente automatizado y no destructivo.

El principal método de análisis es el “análisis mineralógico de partículas” (P.M.A.), consiste en un análisis bidimensional partícula a partícula, que permite asociaciones minerales con representación visual. Se analiza en una medición estándar un mínimo de 1500 partículas. La información que entrega este tipo de análisis mineralógico, estimación del tamaño promedio de partículas y granos, comportamiento elemental, asociaciones minerales, liberación y oclusión, reconciliación elemental y mineral (Ltda., s.f.).

CAPÍTULO 4. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

4.1. Hipótesis

“Es posible complementar la producción de cobre (i.e., recuperación de cobre) por medio del retratamiento de las escorias de fundición de horno flash y convertidor Peirce-Smith en División Chuquicamata, a través del control granulométrico de las escorias a tratar por flotación.”

4.2. Objetivos

4.2.1. Objetivo General

- Estudiar la recuperación de cobre proveniente de la escoria de fundición a diferente granulometría, para determinar un punto óptimo de recuperación con el cual se pueda trabajar, generando un modelo fenomenológico para su recuperación.

4.2.2. Objetivos Específicos

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

- Analizar la caracterización mineralógica que presenta la escoria proveniente de fundición y el impacto que puede tener en la etapa de flotación.
- Analizar la influencia de la granulometría en la escoria proveniente de fundición.
- Analizar soluciones que tengan cierta viabilidad en el proyecto.
- Generar un modelo fenomenológico que se ajuste a la recuperación de cobre.

CAPÍTULO 5. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

La metodología experimental que se implementa en el desarrollo y análisis del trabajo será para muestras extraídas de las siguientes zonas:

- Zona aledaña al “molino semiautógeno 18” (SAG 18), el cual consta de escorias conjuntas producidas en el horno flash (H.F.) y en el convertidor Peirce-smith (C.P.S.), siendo considerado un punto de acopio para las mismas, por lo que se desconoce las proporciones de cada una, y se considera una escoria mixta.
- Escoria producida en el H.F.
- Escoria producida en el C.P.S.

Los ensayos serán realizados en una celda de flotación batch según los estándares o parámetros, calculados y estandarizados por el área de geometalúrgia de la división Chuquicamata, utilizando los parámetros reportados en la Tabla 2 y la dosificación de reactivos de la Tabla 3.

Tabla 2: Parámetros de geometalúrgia para trabajo en flotación batch.

Volumen de pulpa flotación	2700 [c.c.]
Velocidad de Agitación	1000 RPM

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Flujo de aire	inicio 3 [L/min] con tope de 8 [L/min]
	El aire comienza con 3 [L/min], y se debe ir subiendo 1 [L/min] cada minuto hasta alcanzar un máximo de 8 [L/min]
% Sólido en flotación Rougher	38%
Tiempo de Flotación	2-4-7,5-12 min (cinética)
pH de flotación Rougher	10,0
Tiempo Acondicionamiento	1 min
Frecuencia de paleteo	1 cada 5 segundos

Tabla 3: Dosificación de reactivos para pruebas de flotación batch

COLECTORES	(Acondicionamiento)
Xantato 343	35 [gpt]
Diesel	6 [gpt]
ESPUMANTES	(Acondicionamiento)
Matfroth 202	20 [gpt]
REACTIVO MODIFICADOR DE pH	solo utilizar cal (no lechada de cal)

5.1. Desarrollo del trabajo

5.1.1. Pruebas de análisis preliminar.

Las pruebas de análisis preliminar han sido llevadas a cabo para tener un entendimiento de la situación actual, o bien de la recuperación de cobre a la que se puede optar, estas fueron derivadas hacia "Asmin Industrial Ltda.", donde se llevaron a cabo un total de 47 pruebas, estas pruebas además de abarcar los parámetros mencionados en Tabla 2 y Tabla 3, también abarca condiciones de P80 siendo 280[μ m], 150[μ m] y 50[μ m]. Estas pruebas consisten principalmente en medir la recuperación de cobre proveniente de las

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

escorias producidas en los equipos de H.F. y C.P.S, además de la que se encuentra en el SAG18, con la particularidad en que cada una de las pruebas se realiza con una granulometría diferente (condición P80 mencionado), de esta forma clarificar la incidencia que tiene la granulometría en la recuperación de cobre, complementado con las especies mineralógicas que se recupera en cada una de ella.

Las pruebas son mediante muestras extraídas en los meses de Mayo a Julio del 2021, las cuales fueron transportadas y entregadas, en conjunto a la información correspondiente de los parámetros utilizados y agua de proceso, de esta forma las muestras fueron sometidas a la etapa de conminución, llevada a cabo por un molino de bolas, para posteriormente realizar su flotación batch estas son llevadas a un horno de secado de muestras, para finalmente ser retiradas.



Figura 11 : Trabajo en las dependencias de Asmin Industrial Ltda.

Para métodos prácticos de la investigación, se optó por tomar la información relacionada con el “Test-001” realizado en las instalaciones de Asmin Industrial Ltda., y aplicar los

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

modelos cinéticos de G-Z (Ecuación 3) y Klimpel (Ecuación 4), de esta forma analizar cual modelo se ajusta de manera más eficiente a los datos obtenidos de la recuperación experimental, donde se optó por el modelo de Klimpel, en base a los resultados que se presentan en la Tabla 4 y Gráfico 1.

Tabla 4: Datos obtenidos de la recuperación de cobre de la prueba T-001 (realizada Asmin industrial Ltda.), ajustada con el modelo de Klimpel y G-Z.

Tiempo Flotación. [min]	Rec. Cu [%]				
	Real	Ajustada Klimpel	Error	Ajustada G-Z	Error
0,0	0	0,0		0,0	
2,0	49,42	49,5	-0,3	48,7	1,5
4,0	60,13	59,9	0,4	61,5	-2,3
7,5	65,16	65,1	0,1	65,6	-0,7
12,0	67,22	67,4	-0,2	66,0	1,7

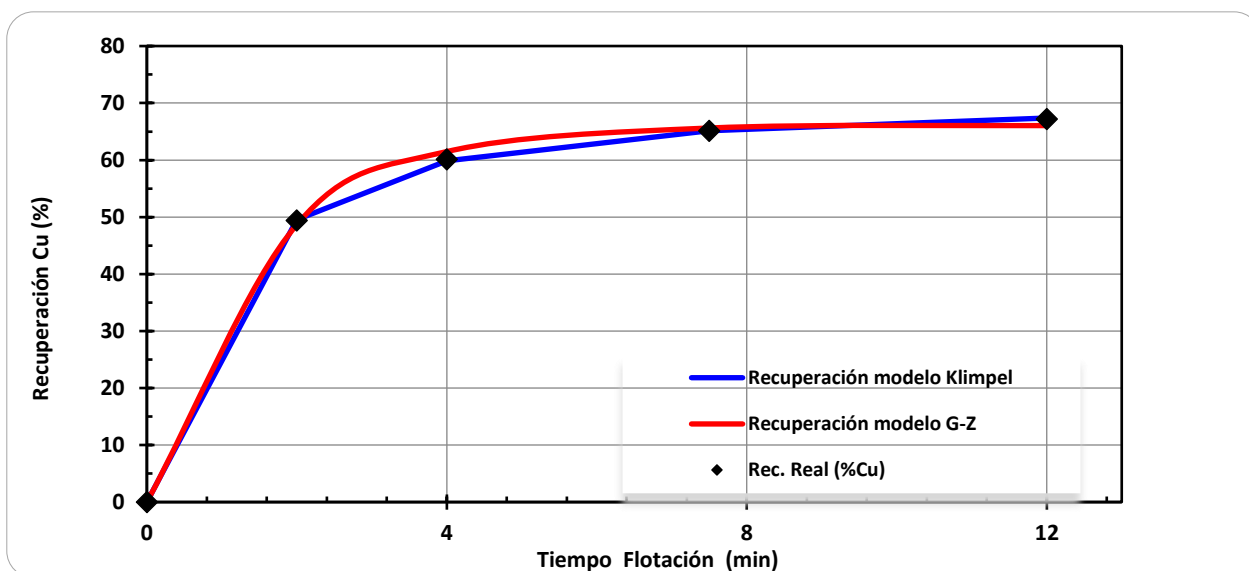


Gráfico 1: Recuperación de cobre vs tiempo de una flotación batch, ajustado según modelo cinético de Klimpel (azul) y el modelo cinético G-Z (rojo).

5.1.2. Pruebas de análisis secundario.

Considerando la información obtenida en las “Pruebas de análisis preliminar” se desarrollan pruebas a nivel laboratorio, en celda de flotación batch en las instalaciones de la “Universidad Técnica Federico Santa María”, las cuales constan de un total de 14 pruebas, con una granulometría promedio de 75 [μm].

Implementos necesarios para trabajo en laboratorio.

- E.P.P.
 - Bata de laboratorio.
 - Lentes de seguridad.
 - Protección auditiva.
 - Zapatos de seguridad.
 - Guantes de trabajo en laboratorio.

- Implementación de laboratorio.
 - Medidor pH.
 - Molino de bolas.
 - Juego de bolas para molino (diámetro bolas).
 - Un mínimo 10 bandejas de recepción de muestra.
 - Pipeta y/o micropipeta.
 - Cronometro.
 - Separador de rifle.
 - Bascula o pesa.

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

- Baldes de 5 [L]
- Recursos consumibles.
 - Mineral y escoria de trabajo.
 - Agua de proceso.
 - Reactivos.
 - Bolsa para muestras.
- Equipo necesario para trabajo en laboratorio.
 - Equipo de flotación batch.
 - Molino de bolas.
 - Equipo de secado de muestras.

Planificación pruebas de laboratorio.

Se han llevado a cabo un total de 14 pruebas de laboratorio, descritas en la Tabla 5, donde a la única prueba a la cual no se le realiza un duplicado es la “2.1”, debido a que la investigación se centra directamente en la recuperación de cobre proveniente de la escoria, y que el ensayo producido en la prueba “1.1” con su respectivo duplicado se debe a que se relaciona con el análisis de incidencia que este proporciona al ser recuperado en conjunto a la escoria. Por otra parte, se estima la proporción de 25% para la escoria y 75% del mineral proveniente de mina para el estudio debido a que los flujos producidos que se reportan en los balances de masa se encuentran en ese orden de magnitud.

Tabla 5: Identificación de “Pruebas análisis secundario” con su respectiva descripción.

ID Prueba	Descripción

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

1.1	Prueba de ensayo para medir la recuperación que se tiene producto del mineral proveniente de la mina con una granulometría de estudio de 75 micrones
1.2	Duplicado prueba 1.1
2.1	Prueba de ensayo para medir la recuperación de cobre, con mineral proveniente o extraído de la mina con una granulometría de estudio de 150 micrones
3.1	Prueba de ensayo para medir la recuperación de cobre, el cual consta de un 75% de mineral proveniente de mina y de un 25% de escoria del SAG 18 con una granulometría de estudio de 75 micrones
3.2	Duplicado prueba 3.1
4.1	Prueba de ensayo para medir la recuperación de cobre, con mineral proveniente o extraído de la zona aledaña al Sag18 con una granulometría de estudio de 75 micrones.
4.2	Duplicado prueba 4.1, que debido a problemas con la celda se consideró como prueba errónea
4.3	Duplicado prueba 4.1
5.1	Prueba de ensayo para medir la recuperación de cobre, con mineral proveniente del producto de la escoria del Horno Flash con una granulometría de estudio de 75 micrones
5.2	Duplicado prueba 5.1
6.1	Prueba de ensayo para medir la recuperación de cobre, el cual consta de un 75% de escoria producida del H.F. y de un 25% de escoria producida en el C.P.S. con una granulometría de estudio de 75 micrones
6.2	Duplicado prueba 6.1
7.1	Prueba de ensayo para medir la recuperación de cobre, con mineral proveniente del producto de la escoria del C.P.S. con una granulometría de estudio de 75 micrones
7.2	Duplicado prueba 7.1

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Las pruebas 1, 2, 3 y 4 pruebas fueron planificadas a fin de evaluar un posible aumento de la recuperación de cobre proveniente de la escoria, asistido por el mineral proveniente de mina, dado que esta última presenta una cinética de flotación más lenta, por lo que puede llegar a producir una recuperación de cobre por arrastre a tiempos mayores de operación. También se evaluará la recuperación efectiva a un P80 de 75 micrones, granulometría a la cual la literatura apunta que la recuperación será mayor en condiciones propicia. Este último se le suma que se le aplicará un acondicionamiento de 5 minutos, para las pruebas 5, 6 y 7, para esta forma evaluar su incidencia dentro del proceso, la asignación del “acondicionamiento de 5 minutos” que se establece para estas pruebas es debido a que se desea analizar el impacto que tienen los reactivos utilizados en la escoria de fundición utilizando la granulometría adecuada para las pruebas 5 y 7, además de la incidencia que tienen en un “flujo” que se encuentra conformado por las escorias de los equipos de fundición, en razón a las cantidades reportadas mensualmente.

Es de suma importancia considerar que debido a que se trabaja con el estándar de geometalúrgia, los resultados obtenidos serán mayores a lo que se obtienen realmente en la planta dada la siguiente ecuación:

Ecuación 7: Formula de la recuperación real de cobre, para el estándar de geometalúrgia de la división Chuquicamata.

$$Rec\ real = Rec\ E.B.*\ Fact\ Planta * F.E. \quad (7)$$

- Rec. real: Es la recuperación real asignada en la planta.
- Rec. E.B.: Es la recuperación obtenida a nivel laboratorio, en particular para el equipo de flotación batch.
- Factor planta: Es un valor fijo de acoplamiento de pruebas a nivel planta 97%.
- F.E.: Es el factor de desempeño del proceso que ira variando según tipo de muestra analizada.

Procedimiento para trabajo en laboratorio.

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Se realizan los ajustes teóricos según el número de la muestra que se desee emplear, para determinar parámetros como: mineral seco, volumen de agua de proceso, cantidad de reactivos, entre otros. Lo cual también se encontrará sujeto a los equipos que tenga a disposición la universidad.

1. Con los resultados de las pruebas realizadas en ASMIN, se procede a trabajar con la granulometría de estudio por medio del molino de bolas del laboratorio, de acuerdo con los parámetros establecidos, según un tiempo determinado de molienda (Tabla 7), como se presenta a continuación:

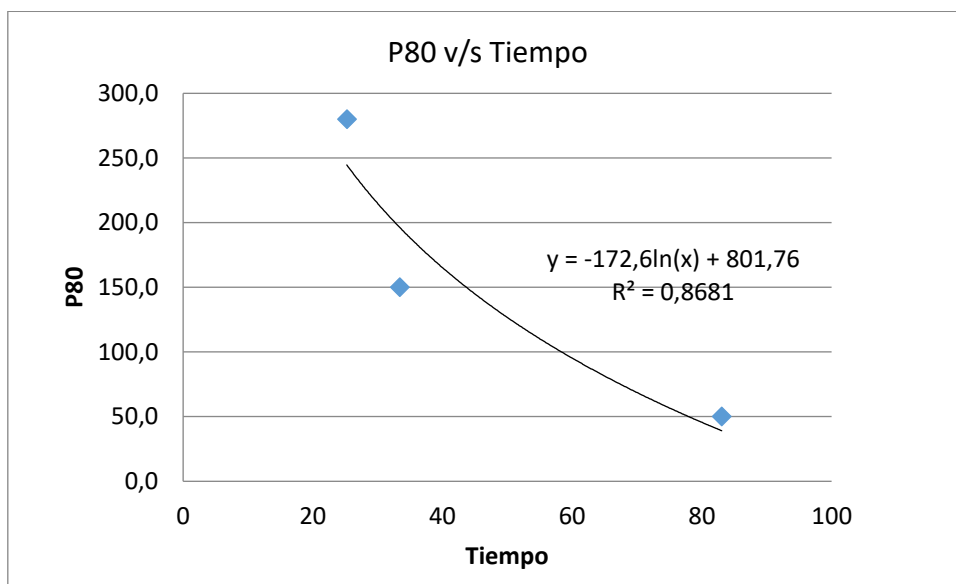


Gráfico 2: Curva cinética de molienda demostrativa para establecer el tiempo de P80 deseado.

Tabla 6: Datos correspondientes a los ingresados en la curva de cinética de molienda.

Tiempo	p80
25,24	280,0
33,41	150,0
83,05	50,0

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Tabla 7: Tiempo necesario de molienda para obtener el P80 deseado.

P80	74
Tiempo	67,8

2. Cuando las muestras se encuentren con las condiciones de la pulpa deseada, son trasladadas al equipo de flotación batch, donde según los parámetros mencionados en la sección anterior, se esperan recuperar 5 muestras, los cuales constan de 4 concentrado (tiempo de 2, 4, 7.5 y 12 [min] y 1 muestra de relave a la cual se le filtra el agua remante.
3. Las muestras en las bandejas pasan al horno para ser secadas, estas son retiradas en un periodo entre 24 a 48 hrs. En este paso se considera tomar el peso antes y después de que la muestra es colocada en el horno, con la bandeja tarada.
4. Las muestras retiradas del horno son preparadas para su envío, se realiza una limpieza de la bandeja para ser usada nuevamente y no haya contaminación cruzada.
5. Las muestras preparadas se les realiza: análisis químico y análisis microscópico a la alimentación y relave, este último para determinar en específico cuales fueron los elementos que no fueron recuperados.
6. Con los resultados de las pruebas, se establece la cinética de flotación de cada prueba, compararlas y optar por la relación teórica experimental óptima para la recuperación.

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

5.2. Procedimiento experimental.

5.2.1. Etapa 1: Preparación de muestras.

La etapa de preparación de las muestras se considera una parte importante del procedimiento experimental, esto debido a la importancia de tener una muestra homogénea dentro del proceso, para que el mineral y la escoria se encuentren aptas para pasar por una etapa de molienda, los pasos a seguir son:

- **Escoria:**

La escoria presentaba una granulometría superior a 2000 μm (Malla #10) se procede a realizar una reducción de tamaño por medio de un “Chancador de mandíbula BICO serie N°72713”, la escoria procede a pasar dos veces consecutivas por este equipo para posteriormente pasar por un harneado, ocupando el equipo “Harnero de laboratorio GILSON TS-1FX”. Se procede a realizar un tamizado en seco utilizando el equipo “Tamizador RETSCH AS200 CONTROL serie N°1218040412”, cuyos resultados se reflejan a continuación:

Tabla 8: F80 de la escoria que ingresa a la molienda húmeda.

	1er P80 [μm]	2do P80 [μm]	P80 Promedio [μm]
H.F. Alim	1718,9	1710,8	1714,8
CPS Alim	1721,9	1726,6	1724,3
S18 Alim.	1555	1556,5	1555,8

Una vez alcanzadas las condiciones de trabajo adecuadas, se procede a separar las muestras en proporción adecuadas a la cual se realizan las pruebas, para tal, se procede a homogenizar la muestra previamente por medio del método de roleo

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

y cuarteo, este consiste principalmente en depositar sobre una manta las muestras o submuestras, se mezclan y se van cuarteando en forma de “X” dando como resultados 4 muestras visualmente equitativas, de las cuales se seleccionan 2 que se encuentren cruzadas para ser llevadas a un partidador de rifle, ocupando el equipo “Partidor de rifle GILSON modelo SP-2.5”, obteniendo 2 bandejas con muestras, una de estas bandejas es trasladada al equipo “Divisor de muestras rotatorio RSD100 GRINDER serie N°018.866.0005” el cual es alimentado por medio de un “Alimentador vibratorio VF100 GRINDER serie N°017.878.0027”, de esta forma se separó de manera equivalente y homogénea la muestra para las distintas pruebas.

- **Mineral Mina:**

Este mineral visualmente presenta una granulometría menor que la que posee la escoria, por lo que es llevada directamente al equipo tamizador, el cual refleja los siguientes resultados:

Tabla 9: F80 del mineral mina que ingresa a molienda húmeda, considerando que M.M.1 es una muestra aleatoria extraída del mineral proveniente de la mina para su análisis y M.M.2 corresponde al duplicado de este.

	1er P80 [µm]	2do P80 [µm]	P80 Promedio [µm]
M.M. 1	2102,1	2017,5	2059,8
M.M. 2	2066,8	2106,4	2086,6

La muestra “inicial” del M.P.M. se encuentra por sobre los 2000 [µm], pero al ser una desviación menor al 5%, se trabaja con esta debido a que aún se le debe realizar las pruebas de “cinética de molienda” con el molino de bolas, con lo cual se podrá trabajar de manera adecuada en la flotación batch, el método para separar las muestras de manera equivalente y homogénea desde este punto es idéntica a la explicada para la escoria, comenzando desde la etapa de roleo y cuarteo.

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

5.2.2. Etapa 2: Flotación batch.

En este punto las muestras son subdivididas para realizar las pruebas de flotación batch (por duplicado) descrito en la siguiente tabla:

Tabla 10: Cantidad de mineral por prueba y granulometría en flotación batch.

Nº de prueba	Mineral de prueba	Granulometría.
1	Min. Mina: 1270 [g]	75 [µm]
2	Min. Mina: 1270 [g]	150 [µm]
3	Min. Mina: 967 [g] Esc. Sag18: 323 [g]	75 [µm]
4	Esc. SAG 18: 1270[g] (5min acondicionamiento)	75 [µm]
5	Esc. H.F.: 1289 [g] (5min acondicionamiento)	75 [µm]
6	Esc. H.F.: 974 [g] Esc. C.P.S.: 324 [g]	75 [µm]
7	Esc. C.P.S.: 1363 [g] (5min acondicionamiento)	75 [µm]

Para poder realizar las pruebas de flotación batch con el equipo de la universidad desde este punto, se debe destacar 3 puntos de suma importancia, las cuales se describirán a continuación con el mayor detalle posible:

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

- **Molienda Húmeda:** Etapa de reducción de tamaño, para la escoria y el M.P.M., donde se considera el tiempo empleado para calcular la cinética de molienda, y se considera que el tiempo será mayor para obtener una granulometría menor. Además, se debe considerar los tiempos utilizados para limpiar el equipo, el molino y el juego de bolas, esto para evitar/minimizar el error producido por la contaminación cruzada, y el uso adecuado de los implementos de la universidad.

- **Flotación Batch:**

La flotación batch se realiza en una celda automática “Edemet modelo CFL 3-3, la cual proporcionaba las siguientes características que favorecen a las pruebas y la réplica de estas:

- Puede entregar un paleteo automático, donde su mínimo es cada 7 segundos.
- Posee un sistema de autoabastecimiento de agua.
- Un control preciso de la inyección de aire.

El tiempo sujeto a cada una de estas pruebas es de 13 min.

- **Secado Muestras:**

Las muestras serán dejadas en un horno a una temperatura entre 90°C y 95°C, por lo que, se estima que se encuentren con una baja humedad en un tiempo aproximadamente de 24hrs.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSION.

6.1. Pruebas primarias.

El desarrollo y entrega de datos realizados en las pruebas primarias nos permiten realizar un análisis que abarca desde el flujo de entrada al proceso hasta las recuperaciones que se aprecien en la flotación batch. Para tener una mayor comprensión del problema y sus posibles soluciones, en primera instancia se analiza la ley de cobre presente en el “flujo de entrada”, siendo este último el tipo de escoria con la cual se trabaja, considerando sus principales especies mineralógicas en la que se presenta el cobre, las cuales se presenta a continuación:

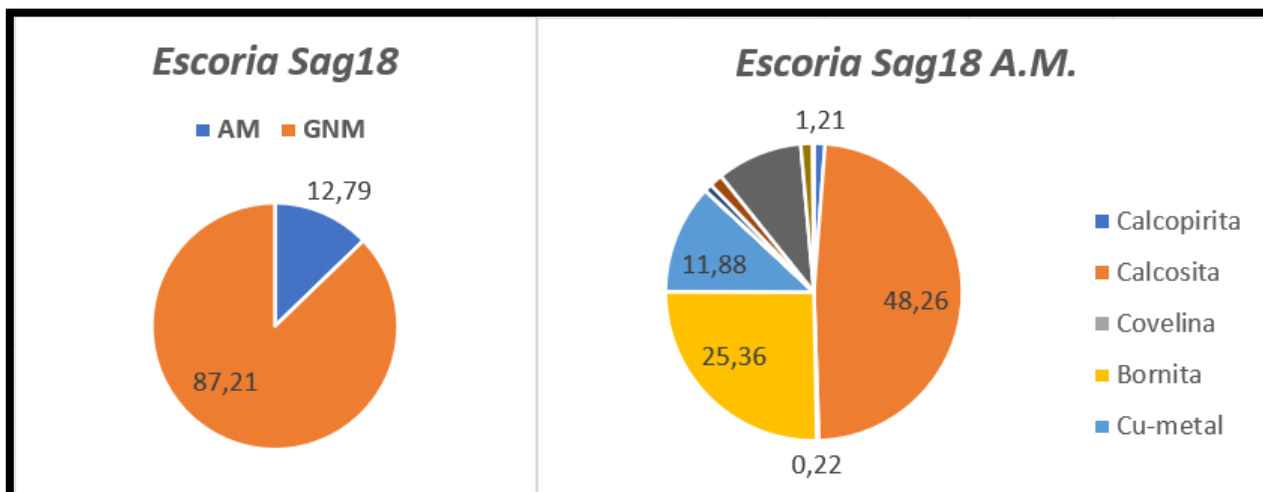


Figura 12: Análisis producido a la escoria que se encuentra aledaña al Sag18 que posee una ley de 8,6% Cu y que ingresa a la etapa de flotación, donde en la imagen de la izquierda se puede apreciar el porcentaje de ganga no metálica (GNM) y las asociaciones mineralógicas (AM), y en la imagen de la derecha se puede apreciar las principales AM donde destacan las especies que presentan cobre.

Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.

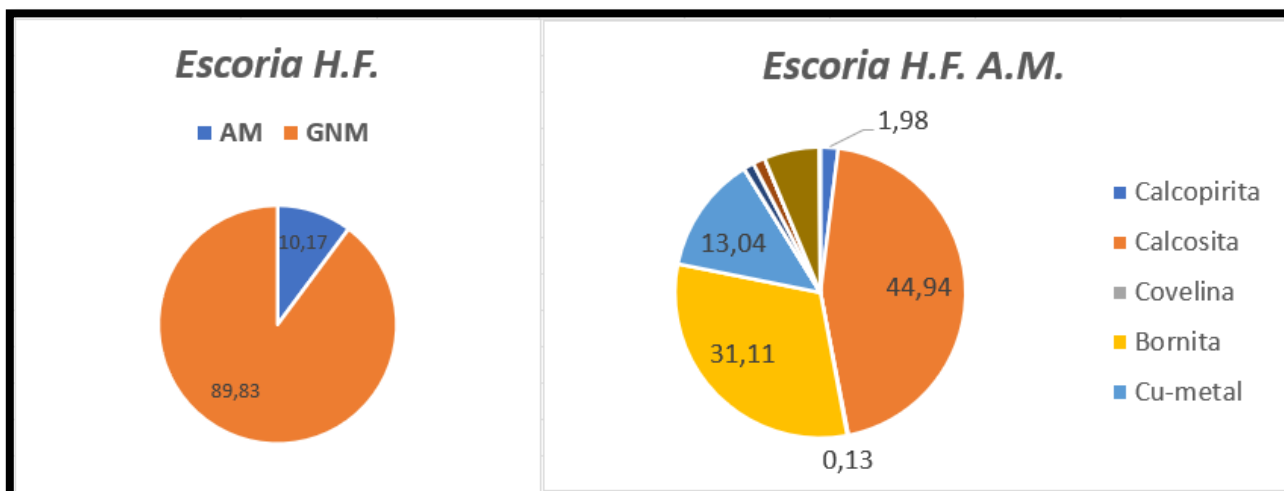


Figura 13: Análisis producido a la escoria que se encuentra aledaña al H.F. que posee una ley de 5,3% Cu y que ingresa a la etapa de flotación, donde en la imagen de la izquierda se puede apreciar el porcentaje de ganga no metálica (GNM) y las asociaciones mineralógicas (AM), y en la imagen de la derecha se puede apreciar las principales AM donde destacan las especies que presentan cobre.

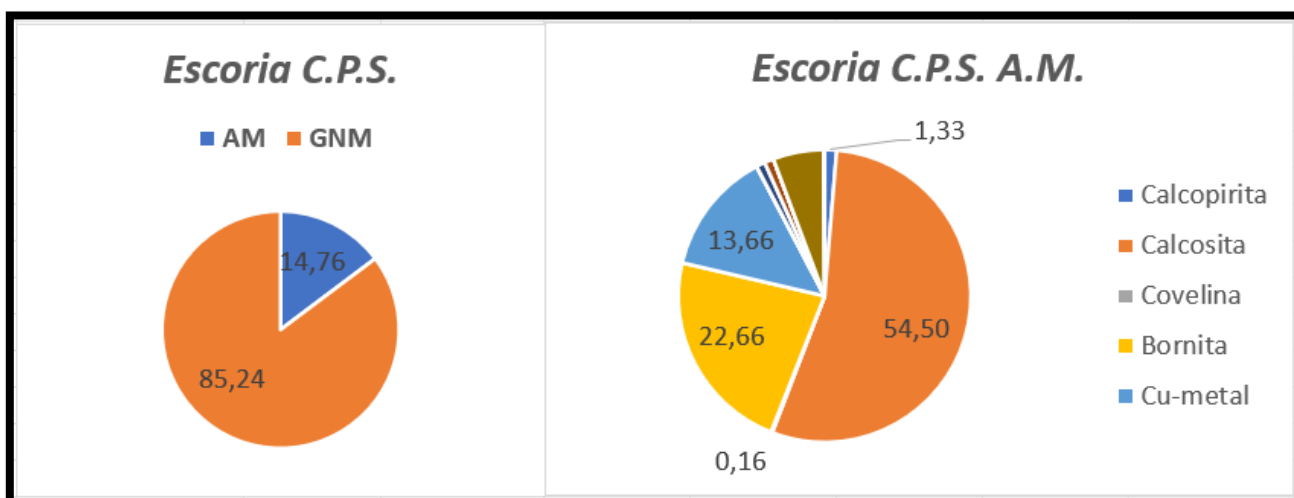


Figura 14: Análisis producido a la escoria que se encuentra aledaña al C.P.S. que posee una ley de 9,6% Cu y que ingresa a la etapa de flotación, donde en la imagen de la izquierda se puede apreciar el porcentaje de ganga no metálica (GNM) y las asociaciones mineralógicas (AM), y en la imagen de la derecha se puede apreciar las principales AM donde destacan las especies que presentan cobre.

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

La información plasmada en las figuras anteriores se puede resumir en 2 gráficos circulares, el de la izquierda representa la ley de las asociaciones mineralógicas (A.M.) con el color azul y la ley de la ganga no metálica (G.N.M.) de color naranja, por otra parte el de la derecha representa la ley de las especies presentes dentro de su correspondiente asociación mineralógica (calcosita, bornita, etc.), para los diferentes tipos de escorias, esta información se puede resumir en la Tabla 11, en la cual se aprecia que tanto la calcosita como la bornita corresponden a las especies que se encuentran con mayor abundancia dentro de las escorias. Por lo que se considera que la etapa de concentración debe estar diseñada para tales asociaciones o analizar la adaptación del proceso actual, por lo que se propone realizar un acondicionamiento de 5 minutos dentro de las pruebas secundarias que afecte directamente a las escorias, para medir la incidencia de los reactivos en las mismas.

Tabla 11: Resumen de la mineralogía modal presente en las escorias, excluyendo ganga no metálica.

Origen de la escoria	Mineralogía modal [%]			
	Calcopirita	Calcosita	Covelina	Bornita
SAG18	1,21	48,26	0,22	25,36
HF	1,98	44,94	0,13	31,11
CPS	1,33	54,50	0,16	22,66

Una vez simulada la etapa de concentración a nivel laboratorio de la Minera Chuquicamata según se muestra la Figura 15, considerando una etapa de molienda húmeda y una celda de flotación Rougher (flotación batch), se obtienen los 4 concentrados y un remanente dentro de la celda que se considera como el relave dentro del proceso.

Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.

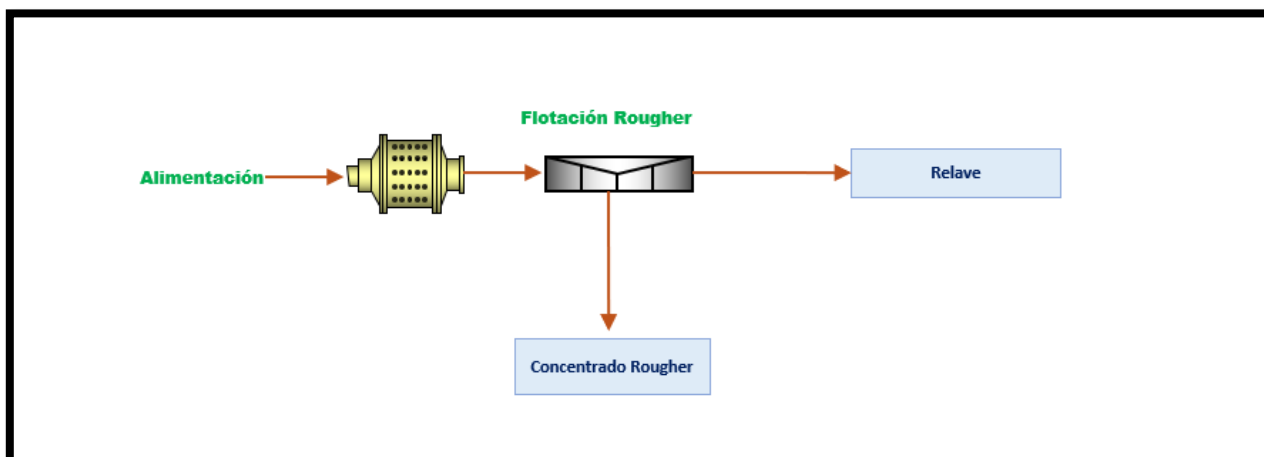


Figura 15: Diagrama de flujo flotación batch para trabajo en laboratorio.

Los resultados de las pruebas de flotación batch realizadas en ASMIN Industrial Ltda. para las muestras de escorias, después de ser clasificada según el origen de la escoria y la granulometría a la cual fue llevada a cabo, se encuentran resumida por medio del grafico de recuperación/ley vs tiempo, tabla resumen del grafico anterior y grafico de barras de recuperación de las principales especies mineralógicas, para cada una de las escorias.

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

- Escoria extraída de la zona aledaña al SAG 18:

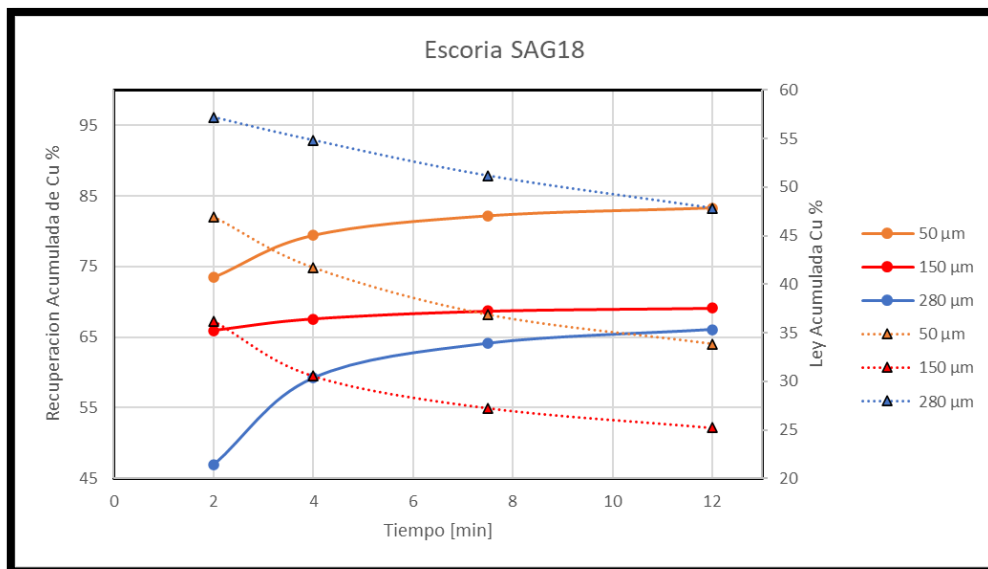


Gráfico 3: Representación gráfica en el que se sobreponen el porcentaje recuperación acumulada de cobre representado por la línea continua en conjunto con el eje Y izquierdo, y la ley de cobre acumulada representado por la línea punteada/segmentada en conjunto con el eje Y derecho, ambos en función del tiempo [min] representado por el eje X. Los colores representas las distintas granulometrías/P80 del proceso siendo: 280[μm] color azul, 150[μm] color rojo y 50[μm] color naranja.

Tabla 12: Recuperación máxima de cobre con su correspondiente ley para las distintas granulometrías.

Granulometría P80 [μm]	Recuperación máxima de Cu%.	Ley Cu [%]
50	83,30	33,82
150	69,09	25,20
280	66,09	47,82

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

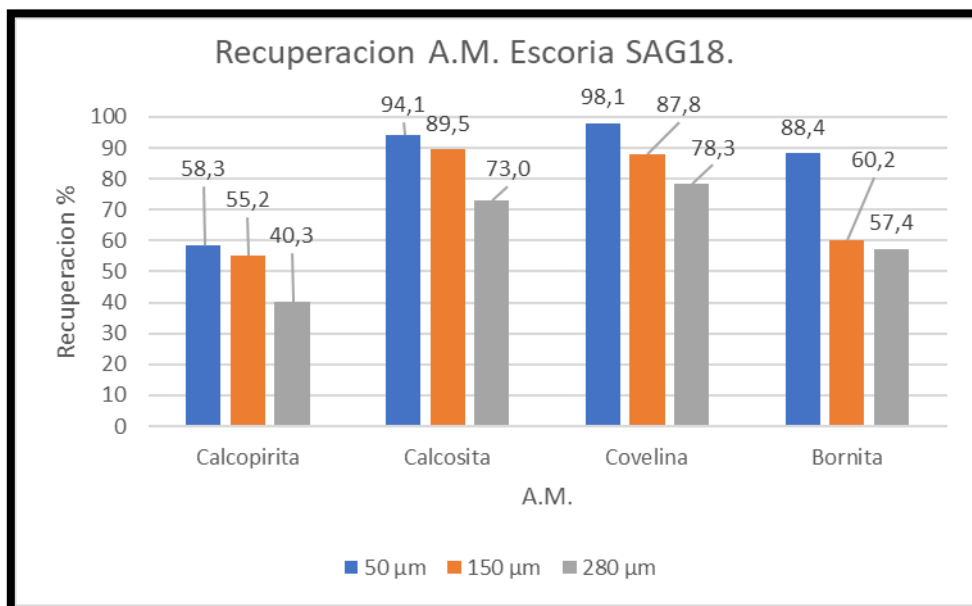


Gráfico 4: Recuperación de las distintas asociaciones mineralógicas (calcopirita, calcosita, covelina, bornita), que se presentan a diferentes granulometrías: 280[µm] color gris, 150[µm] color naranja y 50[µm] color azul.

Con la información entregada para la recuperación de cobre provenientes de la zona aledaña al SAG18, se puede evidenciar que la recuperación es inversamente proporcional al P80 o granulometría con el que se trabaja (que a una menor granulometría se tiene una mayor recuperación), lo que se aprecia cuando esta presenta una granulometría de 50 [µm] a diferencia de una granulometría de 280 [µm], presentando una recuperación de 83,30% y 66,09% respectivamente (Tabla 12), este resultado de recuperación se puede ver reflejado en el Gráfico 3 dado que en el tiempo de trabajo equivalente a 12 minutos la tendencia de recuperación es aproximadamente 83%, el mismo comportamiento se puede apreciar en los casos con distinto P80 correspondientes a 280[µm] y 150[µm], donde sus recuperaciones a pesar de ser menores de 69,09% y 66,09% respectivamente, el tiempo de trabajo con el cual operan resulta ser el eficiente para el proceso, ya que según las curvas de recuperación se puede llegar a la recuperación máxima con un tiempo de 12 minutos.

Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.

- Escorias producidas en el Horno Flash:

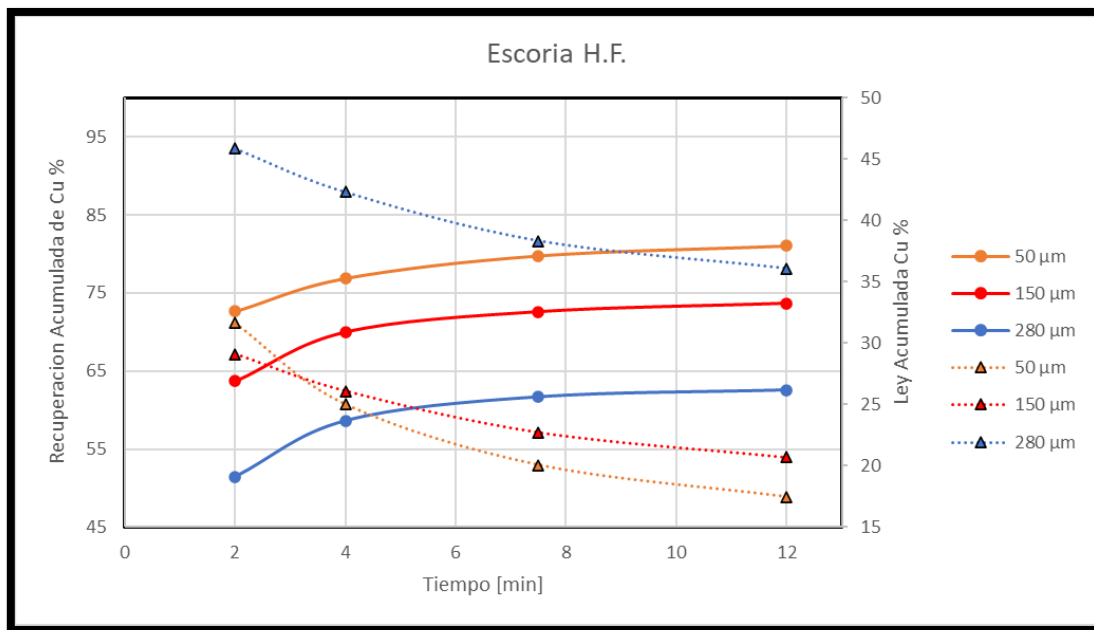


Gráfico 5: Representación gráfica en el que se sobreponen el porcentaje recuperación acumulada de cobre representado por la línea continua en conjunto con el eje Y izquierdo, y la ley de cobre acumulada representado por la línea punteada/segmentada en conjunto con el eje Y derecho, ambos en función del tiempo [min] representado por el eje X. Los colores representan las distintas granulometrías/P80 del proceso siendo: 280[μm] color azul, 150[μm] color rojo y 50[μm] color naranja.

Tabla 13: Representa la recuperación máxima de cobre con su correspondiente ley para las distintas granulometrías

Granulometría P80 [μm]	Recuperación máxima de Cu%.	Ley Cu [%]
50	81,05	17,45
150	73,65	20,70
280	62,57	36,08

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

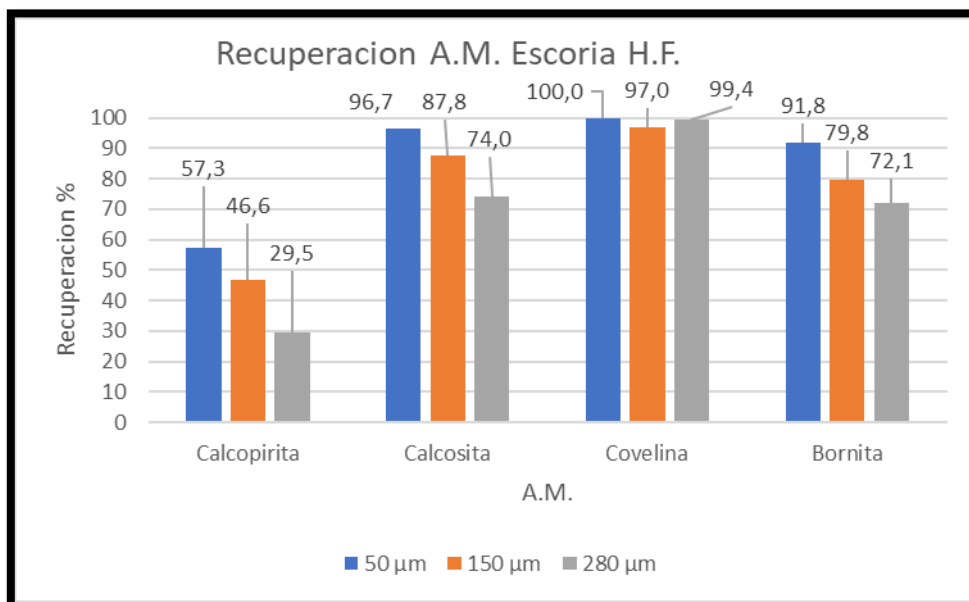


Gráfico 6: Recuperación de las distintas asociaciones mineralógicas (calcopirita, calcosita, covelina, bornita), que se presentan a diferentes granulometrías: 280[μm] color gris, 150[μm] color naranja y 50[μm] color azul.

Para el caso de la recuperación de cobre presente en la escoria producida en el horno flash se puede apreciar que la recuperación máxima llega a los 81,05% a los 50[μm], mientras que para las granulometrías de 280[μm] y 150[μm], la recuperación llega a los 62,57% y 73,65% respectivamente.

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

- Escoria producida en el convertidor Peirce-Smith:

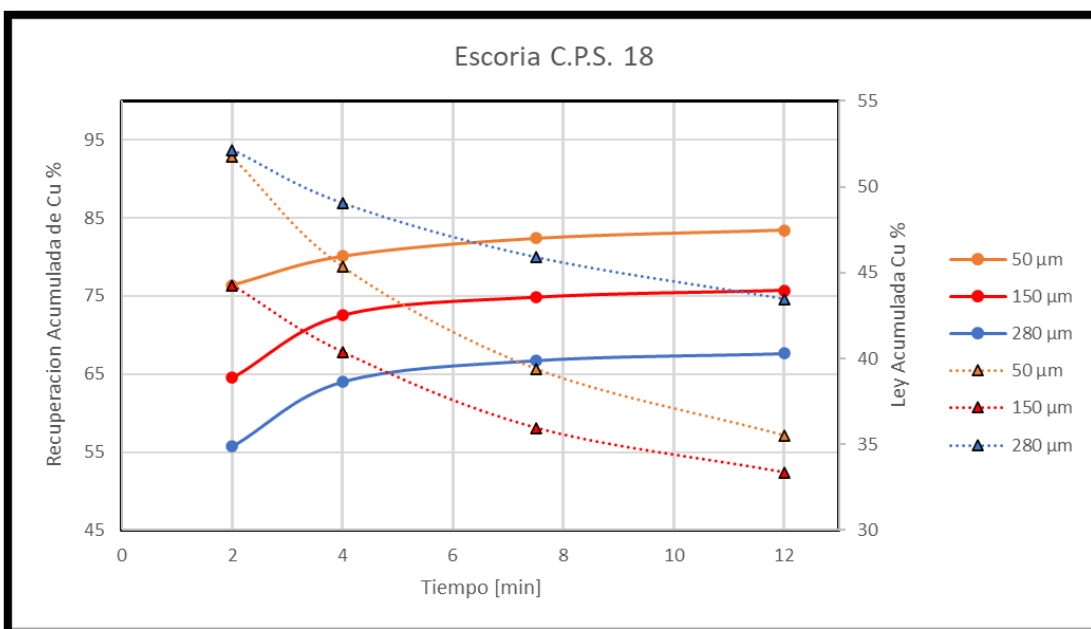


Gráfico 7: Representación gráfica en el que se sobreponen el porcentaje recuperación acumulada de cobre representado por la línea continua en conjunto con el eje Y izquierdo, y la ley de cobre acumulado representado por la línea punteada/segmentada en conjunto con el eje Y derecho, ambos en función del tiempo en [min] representado por el eje X. Los colores representan las distintas granulometrías/P80 del proceso siendo: 280[µm] color azul, 150[µm] color rojo y 50[µm] color naranja.

Tabla 14: Recuperación máxima de cobre con su correspondiente ley para las distintas granulometrías

Granulometría P80 [µm]	Recuperación máxima de Cu%.	Ley Cu [%]
50	83,43	35,52
150	75,69	33,37
280	67,66	43,47

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

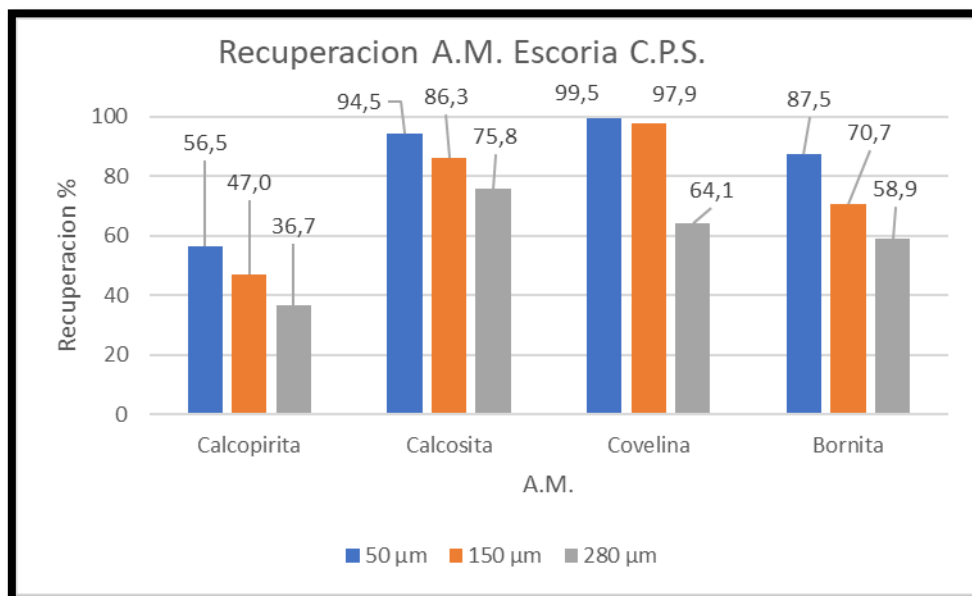


Gráfico 8: Representación con grafica de tabla para la recuperación de las distintas asociaciones mineralógicas (calcopirita, calcosita, covelina, bornita), que se presentan a diferentes granulometrías: 280[μm] color gris, 150[μm] color naranja y 50[μm] color azul.

Ahora si analizamos el caso de la recuperación de cobre provenientes de las escorias producidas por el C.P.S. tiene su máxima recuperación acumulada de 83,43% para el P80 de los 50[μm], mientras que para el P80 de 280[μm] y 150[μm] tienen una recuperación de 67,66% y 65,79% respectivamente. Para este tipo de escoria la recuperación fue mayor para las especies de calcosita y covelina, teniendo resultados de recuperación de bornita en un punto intermedio y una baja recuperación para la especie de calcopirita

Si consideramos las recuperaciones provenientes de las asociaciones mineralógicas presentes, resumida en la Tabla 15 en conjunto con la información entregada por la Tabla 11, se da a conocer que la tanto la calcosita como la bornita son especies que se encuentran en abundancia de las escorias y que además presentan una mayor recuperación para P80 que se encuentren entre 50[μm] y 150[μm].

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Tabla 15: Resumen de recuperaciones de las asociaciones mineralógicas presentes en la escoria para el P80 de 50 [μm] y 150 [μm].

Origen de escoria	P80 [μm]	% Recuperación acumulada promedio.			
		Calcopirita	Calcosita	Covelina	Bornita
SAG18	50	58,29	94,13	98,08	88,37
	150	55,20	89,54	87,82	60,21
H.F.	50	57,35	96,68	100,00	91,80
	150	46,62	87,75	96,96	79,80
C.P.S.	50	56,48	94,53	99,50	87,51
	150	46,96	86,32	97,88	70,70

Otra información que nos entregan los ensayos de pruebas preliminares son la recuperación de cobre acumulada y ley de cobre acumulada, la cuales se resumen a continuación:

Tabla 16: Resumen del %recuperación de Cu acumulada promedio para los concentrados y relave extraídos del proceso de flotación batch, para las escorias de distinto origen según las granulometrías de estudio.

ID muestra	Condición P80 [μm]	%Recuperación de Cu acumulado promedio				
		2 [min]	4 [min]	7,5 [min]	12 [min]	Relave
H.F.	50 μm	74,16	78,74	80,99	82,19	17,81
	150 μm	63,16	70,67	73,46	74,64	25,36
	280 μm	58,84	63,98	66,07	66,87	33,13
C.P.S.	50 μm	78,91	81,86	84,22	85,10	14,90
	150 μm	64,14	72,12	74,16	74,87	25,13
	280 μm	62,42	66,73	68,03	68,73	31,27
ESCORIA SAG 18	50 μm	73,35	79,74	82,60	83,68	16,32
	150 μm	60,80	68,91	72,43	73,43	26,57
	280 μm	50,54	60,65	64,63	66,07	33,93

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Tabla 17: Resumen de la ley de Cu acumulada promedio para los concentrados y relave extraídos del proceso de flotación batch, para las escorias de distinto origen según las granulometrías de estudio.

ID muestra	Condición P80 [μm]	Ley Acumulada Cu, %				
		2 min	4 min	7,5 min	12 min	Relave
H.F.	50	44,32	39,60	33,65	30,17	2,07
	150	41,05	38,44	34,46	31,76	2,54
	280	42,45	39,17	35,44	33,44	2,32
C.P.S.	50	48,97	42,09	34,87	30,41	1,11
	150	44,54	38,61	33,11	30,52	1,70
	280	42,47	37,02	33,13	31,08	1,79
ESCORIA SAG 18	50	47,28	42,00	36,82	33,60	1,68
	150	43,43	39,36	34,68	31,51	1,91
	280	43,41	41,03	38,10	35,61	2,39

Se puede apreciar que ninguna de las 3 escorias analizadas a la granulometría de 50 [μm] y 280 [μm] puede llegar a la recuperación asignada del 89%, estos resultados sin considerar el ajuste relacionado al uso del estándar de geometalúrgia, motivo por el cual se aprecia que existirán repercusiones en las toneladas métricas finas recuperadas dentro del proceso en el transcurso o periodo de estudio, repercusiones que aprecian en el Gráfico 9 que se presenta a continuación:

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

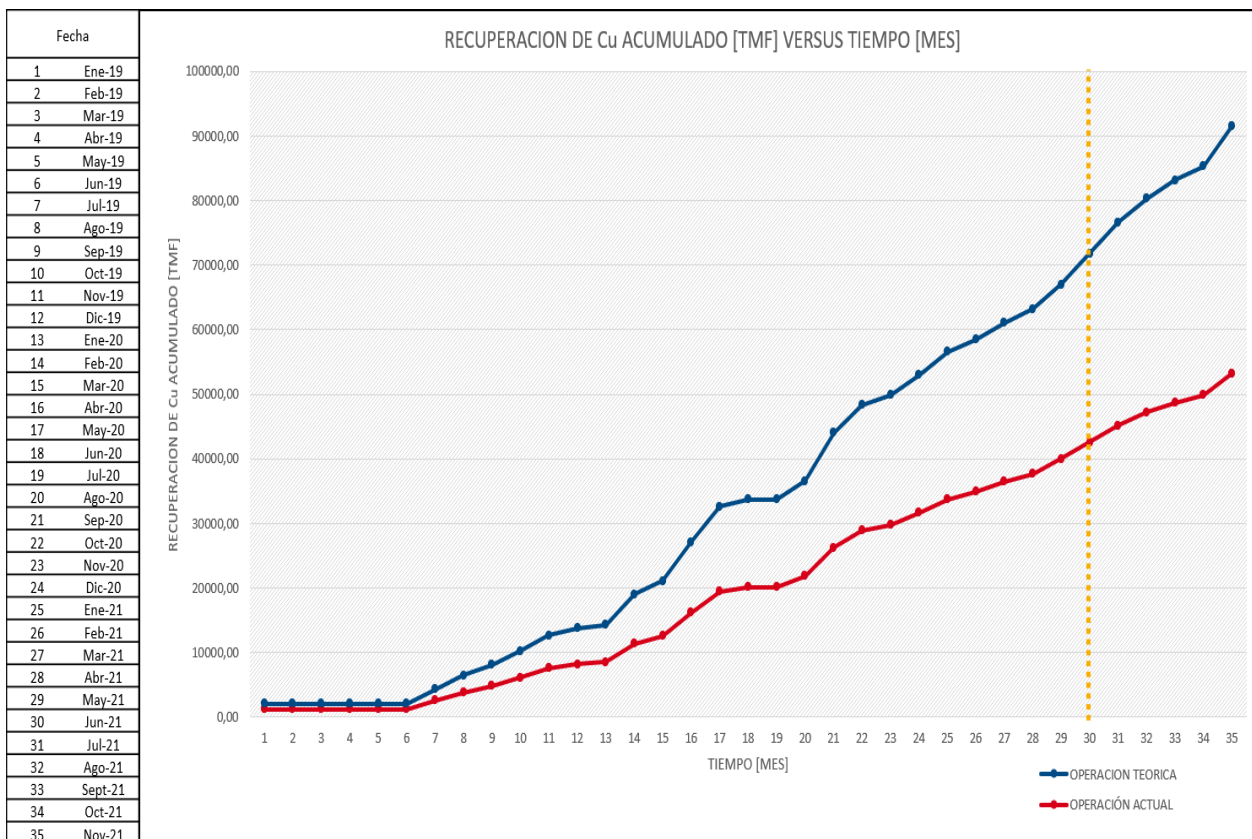


Gráfico 9: Presentación gráfica de la recuperación en de cobre proveniente de la escoria en TMF en un tiempo que abarca desde Enero del 2019 a Noviembre del 2021

Tabla 18: Diferencias en T.M.F. (toneladas metricas finas) recuperadas para los diferentes casos.

Caso	Leyenda	Granulometría [μ m]	R.E.R. %	Recuperación Cu [TMF]
1	Operación Teórica		89,06	53.188,81
2	Operación Actual.	280	60,13	38.319,07
		50	76,37	

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

La información entregada por el Gráfico 9 se puede plasmar de manera más simple en la Tabla 18, donde por medio de un análisis preliminar se demuestra que entre la operación teórica (equivale a la recuperación de cobre que se reportó por la división hasta la fecha) versus la operación actual (equivale a la recuperación de cobre que se estima hasta la fecha), existe un déficit de 14.869 [TMF]. Un punto que cabe destacar es que en el caso de la “operación actual” se consideró que: desde Enero del 2019 hasta Junio del 2021 la planta opero con un P80 de 280 [µm] y que posterior esa fecha hasta Noviembre 2021 comenzó a operar con un P80 de 50 [µm] obteniendo la recuperación actual de 38.319 [TMF], esta última siendo tan solo un supuesto dentro de la planta.

6.2. Pruebas secundarias.

El desarrollo de las Pruebas secundarias nos permiten realizar un análisis más exacto a la incidencia que conlleva el proceso al trabajar la escoria producida en conjunto con el mineral proveniente de la mina, ya que se desconoce el impacto que se produce al combinar ambos flujos, relacionadas con los Test 1, 2, 3 y 4, por otra parte, también permite analizar la incidencia que se tiene al trabajar proporcionalmente la escoria producida en el H.F. y el C.P.S. en una proporción 1:3 respectivamente, relacionadas con los Test 5, 6 y 7, esta proporción se encuentra basada en los flujos producidos en la división que se presentan en los reportes de balance de masa reportados mensualmente, los resultados de las pruebas se muestran a continuación:

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Tabla 19: Resumen de los resultados vinculados a las pruebas realizadas al "M.M." para una granulometría de trabajo de 75 [µm], tabla que entrega la recuperación en peso y %CuT (cobre total) que se obtienen de los distintos concentrado y relave, concluyendo con la recuperación máxima a la que se puede llegar según el modelo de Klimpel.

ID Test	Flujo	Tiempo (min)	Peso (g)		Rec. CuT (%)	Rec. máxima
			Parcial	Acum.	Acum.	
1.1	Conc 1	2	207,00	207,00	35,59	91,16
	Conc 2	4	32,40	239,40	54,35	
	Conc 3	7,5	35,00	274,40	75,71	
	Conc 4	12	159,80	434,20	85,92	
	Relave	-	832,80	1267,00	-	
1.2	Conc 1	2	226,00	226,00	46,33	90,67
	Conc 2	4	33,20	259,20	70,80	
	Conc 3	7,5	50,10	309,30	85,26	
	Conc 4	12	96,80	406,10	89,09	
	Relave	-	852,20	1258,30	-	

Tabla 20: Resumen de los resultados vinculados a las pruebas realizadas al "M.M." para una granulometría de trabajo de 150 [µm], tabla que entrega la recuperación en peso y %CuT (cobre total) que se obtienen de los distintos concentrado y relave, concluyendo con la recuperación máxima a la que se puede llegar según el modelo de Klimpel.

ID Test	Flujo	Tiempo (min)	Peso (g)		Rec. CuT (%)	Rec. máxima
			Parcial	Acum.	Acum.	
2.1	Conc 1	2	112,00	112,00	28,94	97,88
	Conc 2	4	52,80	164,80	61,14	
	Conc 3	7,5	140,30	305,10	82,90	
	Conc 4	12	203,80	508,90	88,52	
	Relave	-	758,00	1266,90	-	

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Tabla 21: Resumen de los resultados vinculados a las pruebas realizadas con una muestra que presenta “un 75% M.M. y un 25% de Escoria proveniente del SAG18” para una granulometría de trabajo de 75 [µm], tabla que entrega la recuperación en peso y %CuT (cobre total) que se obtienen de los distintos concentrado y relave, concluyendo con la recuperación máxima a la que se puede llegar según el modelo de Klimpel.

ID Test	Flujo	Tiempo (min)	Peso (g)		Rec. CuT (%)	Rec. máxima
			Parcial	Acum.	Acum.	
3.1	Conc 1	2	258,10	258,10	35,84	65,04
	Conc 2	4	157,00	415,10	44,85	
	Conc 3	7,5	89,70	504,80	52,25	
	Conc 4	12	50,90	555,70	61,47	
	Relave	-	726,90	1282,60	-	
3.2	Conc 1	2	298,20	298,20	40,40	65,02
	Conc 2	4	24,20	322,40	47,22	
	Conc 3	7,5	17,30	339,70	52,70	
	Conc 4	12	146,90	486,60	64,36	
	Relave	-	801,90	1288,50	-	

Tabla 22: Resumen de los resultados vinculados a las pruebas realizadas a una escoria proveniente de la zona aledaña al “SAG18” para una granulometría de trabajo de 75 [µm], tabla que entrega la recuperación en peso y %CuT (cobre total) que se obtienen de los distintos concentrado y relave, concluyendo con la recuperación máxima a la que se puede llegar según el modelo de Klimpel.

ID Test	Flujo	Tiempo (min)	Peso (g)		Rec. CuT (%)	Rec. máxima
			Parcial	Acum.	Acum.	
4.1	Conc 1	2	96,50	96,50	18,32	70,88
	Conc 2	4	30,70	127,20	29,45	
	Conc 3	7,5	84,90	212,10	41,67	
	Conc 4	12	164,90	377,00	52,20	
	Relave	-	914,20	1291,20	-	
4.2	Conc 1	2	218,70	218,70	25,18	76,22
	Conc 2	4	64,30	283,00	36,36	
	Conc 3	7,5	199,00	482,00	55,26	
	Conc 4	12	75,50	557,50	59,67	
	Relave	-	731,50	1289,00	-	
4.3	Conc 1	2	131,80	131,80	16,28	67,98
	Conc 2	4	35,70	167,50	24,84	
	Conc 3	7,5	114,00	281,50	38,78	
	Conc 4	12	126,30	407,80	47,41	
	Relave	-	832,80	1240,60	-	

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Tabla 23: Resumen de los resultados vinculados a las pruebas realizadas a una escoria proveniente de la zona aledaña al "H.F." para una granulometría de trabajo de 75 [µm], tabla que entrega la recuperación en peso y %CuT (cobre total) que se obtienen de los distintos concentrado y relave, concluyendo con la recuperación máxima a la que se puede llegar según el modelo de Klimpel.

ID Test	Flujo	Tiempo (min)	Peso (g)		Rec. CuT (%)	Rec. máxima
			Parcial	Acum.	Acum.	
5.1	Conc 1	2	207,00	207,00	22,03	39,33
	Conc 2	4	32,40	239,40	24,86	
	Conc 3	7,5	35,00	274,40	27,39	
	Conc 4	12	159,80	434,20	39,47	
	Relave		832,80	1267,00		
5.2	Conc 1	2	112,30	112,30	10,80	25,45
	Conc 2	4	7,90	120,20	11,77	
	Conc 3	7,5	30,60	150,80	14,57	
	Conc 4	12	99,50	250,30	22,27	
	Relave	-	1010,00	1260,30	-	

Tabla 24: Resumen de los resultados vinculados a las pruebas realizadas con una muestra que presenta "un 75% de escoria proveniente del H.F. y un 25% de escoria proveniente del C.P.S." para una granulometría de trabajo de 75 [µm], tabla que entrega la recuperación en peso y %CuT (cobre total) que se obtienen de los distintos concentrado y relave, concluyendo con la recuperación máxima a la que se puede llegar según el modelo de Klimpel.

ID Test	Flujo	Tiempo (min)	Peso (g)		Rec. CuT (%)	Rec. máxima
			Parcial	Acum.	Acum.	
6.1	Conc 1	2	116,50	116,50	11,09	64,88
	Conc 2	4	16,60	133,10	13,00	
	Conc 3	7,5	32,40	165,50	15,68	
	Conc 4	12	192,20	357,70	30,30	
	Relave	-	900,40	1258,10	-	
6.2	Conc 1	2	90,70	90,70	10,95	61,70
	Conc 2	4	22,10	112,80	13,17	
	Conc 3	7,5	33,50	146,30	16,00	
	Conc 4	12	190,90	337,20	30,24	
	Relave	-	930,40	1267,60	-	

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Tabla 25: Resumen de los resultados vinculados a las pruebas realizadas a una escoria proveniente de la zona aledaña al "C.P.S." para una granulometría de trabajo de 75 [µm], tabla que entrega la recuperación en peso y %CuT (cobre total) que se obtienen de los distintos concentrado y relave, concluyendo con la recuperación máxima a la que se puede llegar según el modelo de Klimpel.

ID Test	Flujo	Tiempo (min)	Peso (g)		Rec. CuT (%)	Rec. máxima
			Parcial	Acum.	Acum.	
7.1	Conc 1	2	127,40	127,40	11,32	69,28
	Conc 2	4	18,60	146,00	12,88	
	Conc 3	7,5	58,60	204,60	17,55	
	Conc 4	12	175,80	380,40	31,47	
	Relave	-	889,20	1269,60	-	
7.2	Conc 1	2	128,10	128,10	11,38	65,11
	Conc 2	4	14,20	142,30	12,57	
	Conc 3	7,5	64,80	207,10	17,73	
	Conc 4	12	167,50	374,60	30,99	
	Relave	-	895,60	1270,20	-	

Para realizar un análisis pertinente de la situación presentada, también se considera la recuperación producida de las asociaciones mineralógicas presentan la mayor cantidad de cobre dentro de las muestras, para lo cual se presenta la siguiente tabla resumen:

Tabla 26: Resumen de las recuperaciones producidas globalmente en cada prueba para la bornita, calcopirita y la calcosina/calcosita.

Grupo mineral	Resumen recuperación A.M. según Test						
	1	2	3	4	5	6	7
Bornita	86,43	98,57	54,76	87,30	14,30	8,17	39,89
Calcopirita	91,16	88,87	92,52	45,20	20,89	0,00	27,46
Calcosina	52,20	23,31	65,13	80,36	19,09	41,66	46,73

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Se pueden establecer los siguientes puntos:

- La respuesta del mineral proveniente de la mina presenta una mayor recuperación máxima cuando se encuentra a una granulometría de 150 [μm], pero para el tiempo contemplado de las pruebas, estas tienden a una recuperación aproximadamente similar, esto se atribuye a la recuperación de bornita y calcopirita que constituyen el más del 90% de la ocurrencia del cobre dentro de las muestras.
- La respuesta del Test 3.1 y Test 3.2, que presenta una mineralogía mixta entre mineral mina y escoria extraída de la zona aledaña al SAG18, se aprecia una disminución de la recuperación de cobre, está llegando a un máximo del 65% aproximadamente, a diferencia de los Test 4 (escoria SAG18) y Test 1 (mineral mina) que presentan una recuperación máxima de cobre de 70% y 91% respectivamente, esto se atribuye a:
 - En el Test 3 el cobre se encuentra en mayor proporción en forma de calcosina, disminuyendo su ocurrencia en la bornita y calcopirita.
 - La recuperación de calcosina en el Test 3, no es significativamente mayor como se puede apreciar en la Tabla 26, comparadas con el Test 1 y Test 4, donde a pesar de no presentar una mayor recuperación de esta especie, las especies de bornita y calcopirita son bastante altas y a la vez son las especies donde se encuentra con mayor ocurrencia el cobre.
- En relación a los resultados obtenidos en los Test 5, 6 y 7, se puede apreciar que al ser sometidos a un tiempo de acondicionamiento de 5 minutos con los reactivos utilizados en la etapa de concentración, este tuvo un efecto negativo para el mismo, donde si comparamos con los resultados obtenidos en el Gráfico 3, Gráfico 5 y Gráfico 7 en comparación con la información aportada por la Tabla 23, Tabla 24 y Tabla 25, se puede evidenciar que los reactivos utilizados no son los adecuados para tratar el cobre presente en las escorias, información que se puede corroborar dado que en las pruebas que contemplan la información entregada por los gráficos ya mencionados contemplan una gran recuperación a tiempo menores (2 y 4 minutos), mientras que al contraste de la información entregada por las

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

tablas, que en los primeros tiempos la recuperación es bastante baja, a pesar de estar trabajando a una “granulometría adecuada”, lo que también se ve reflejado que el proceso deja de ser “selectivo” y comienza un proceso de flotación “sin discriminación” de especies.

6.3. Desarrollo modelo fenomenológico.

En la confección del modelo fenomenológico se utilizó la base de datos conformada por los resultados obtenidos por las pruebas primarias, esto debido que el desarrollo de las pruebas secundarias en un principio se realizó para dar entendimiento del efecto que se presenta en la flotación de escoria en conjunto al mineral que proviene de la mina, obteniendo como resultados una baja o despreciable incidencia. La base de datos se encuentra conformada principalmente por la ley de cobre y las asociaciones mineralógicas sulfuradas de cobre presentes en la alimentación y en el concentrado de las pruebas, además de considerar la granulometría con las cuales fueron desarrolladas las pruebas de flotación con sus respectivas recuperaciones. Un resumen de los datos relacionados con el flujo de alimentación, recuperación de Cu y el flujo de concentrado vinculado con la escoria se presenta en las siguientes tablas:

Tabla 27: Datos de escorias promedio procesada en tonelada métrica seca (T.M.S.), ley de cobre y tonelada métrica fina (T.M.F.) procesada en la concentradora.

Alimentación		
Escoria promedio	26292,63	TMS
Ley CU	7,93	%
Cu Escoria	2084,69	TMF

Tabla 28: Datos correspondientes al porcentaje de asociación mineralógica (A.M.) y sulfuros de cobre principales (bornita y calcosina), según su origen.

Alimentación.			
ID	A.M. [%]	calcosina [%]	bornita [%]
SAG18	12,79	4,15	2,18
H.F.	10,17	2,38	1,65
C.P.S.	14,76	5,23	2,18

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Tabla 29: Toneladas métricas finas obtenidas para la alimentación de la concentradora.

Alimentación.			
ID	A.M. [TMF]	calcosina [TMF]	bornita [TMF]
SAG18	3362,83	1091,24	573,43
H.F.	2673,96	626,24	433,52
C.P.S.	3880,79	1375,63	571,96

Tabla 30: Recuperación de cobre, calcosina y bornita obtenidas a distintas granulometrías de P80 según su respectivo origen.

Recuperación.				
ID	P80 [μ m]	% Cu	% calcosina	% bornita
H.F.	75	82,19	96,68	91,80
	150	74,64	87,75	79,80
	280	66,87	74,03	72,13
C.P.S.	50	85,10	94,53	87,51
	150	74,87	86,32	70,70
	280	68,73	75,76	58,87
ESCORIA SAG 18	50	83,68	94,13	88,37
	150	73,43	89,54	60,21
	280	66,07	73,04	57,40

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Tabla 31: Toneladas métrica finas obtenidas en el concentrado de cobre, calcosina y bornita.

Concentrado				
ID	P80 [μm]	Cu [TMF]	calcosina [TMF]	bornita [TMF]
H.F.	75	1713,36	483,14	251,91
	150	1555,99	438,54	218,98
	280	1393,96	369,95	197,93
C.P.S.	75	1774,10	1037,66	316,83
	150	1560,74	947,60	255,96
	280	1432,86	831,66	213,15
SAG 18	75	1744,38	819,71	320,75
	150	1530,75	779,76	218,54
	280	1377,44	636,02	208,36

En la Tabla 27 se aprecia la alimentación promedio estimada que se procesa en la concentradora durante el periodo de estudio (enero del 2019 a noviembre del 2021), en la cual podemos establecer como un flujo de entrada Escoria promedio con su correspondiente ley de cobre, por lo que se estableció una base de tonelada métrica fina de cobre que ingresa a la concentradora, y con la información presentes en la Tabla 28 se estima las asociaciones mineralógicas (calcosina y bornita) presentes en la escoria. Una vez realizada la reconciliación de datos con respecto a las recuperaciones que presentaron las distintas escorias a diferente granulometría con la cual se realiza la flotación (P80 del proceso), se obtiene la información de la Tabla 30 y de esta forma tener una estimación de recuperación de cobre, calcosina y bornita en T.M.F. presentes en la Tabla 31, con la información obtenida en esta tabla podemos establecer la recuperación de cobre que proviene de la calcosina y la bornita, como la recuperación de cobre que proviene de otras especies, presentes en la Tabla 32.

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Tabla 32: Recuperación de cobre por medio de la bonita en conjunto de la calcosina

ID	Granulometría P80 [μm]	%Rec. Cu bornita + calcosina	%Rec. Cu bornita + calcosina promedio	%Rec. Cu otros.
H.F.	75	42,90	41,97	58,03
	150	42,26		
	280	40,74		
C.P.S.	75	76,35	75,46	24,54
	150	77,11		
	280	72,92		
SAG 18	75	65,38	63,97	36,03
	150	65,22		
	280	61,30		

El planteamiento del modelo fenomenológico se basa en las siguientes variables:

- El origen de la escoria: Vinculada principalmente a la mineralogía presente en la misma, y parámetros cinéticos observados.
- El tamaño granulométrico: El F80 proveniente de la etapa de conminución o P80 que ingresa a la etapa de concentración, como principal variable manipulable dentro del proceso.
- La ley de Cu: Considerando la ley de cobre con la que se ingresa al proceso.

Considerando que el P80 es una variable controlable dentro del proceso, y además que el origen de la escoria posee una relación con la ley de cobre que esta presenta, se realizan dos modelos predictivos.

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

6.3.1. Modelo Fenomenológico.

El primer modelo fenomenológico planteado, se elabora considerando la siguiente información obtenida de los datos:

- La recuperación de calcosina y bornita presentan una tendencia según el origen de esta, las que presentan una baja desviación estándar a diferentes granulometrías, la cual se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 33: Información obtenida de la recuperación de la calcosina y bornita, para los distintos orígenes de las escorias a diferentes granulometrías de estudio.

ID	Gran. P80 [μm]	Rec. calcosina + bonita	Desv. Estándar	Promedio
H.F.	75	42,90	1,11	41,97
	150	42,26		
	280	40,74		
C.P.S.	75	76,35	2,23	75,46
	150	77,11		
	280	72,92		
SAG 18	75	65,38	2,31	63,97
	150	65,22		
	280	61,30		

- La ley de cobre de la escoria que ingresan a la etapa de concentración (alimentación), presenta un predominio según el origen de esta, la cual se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 34: Información recaudada de la ley de cobre presente en la escoria según su origen.

ID	Promedio	Desv. Estándar	Lim. Superior	Lim. Inferior
H.F.	5,30	1,62	6,92	3,68
SAG 18	8,60	1,53	10,13	7,07
C.P.S.	9,60	0,58	10,18	9,02

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

De esta forma se genera Gráfico 10, en el cual se presenta en el eje “X” la ley de cobre que posee la escoria que ingresa a la etapa de flotación, por otra parte, en el eje “Y” se considera la recuperación de cobre según su origen.

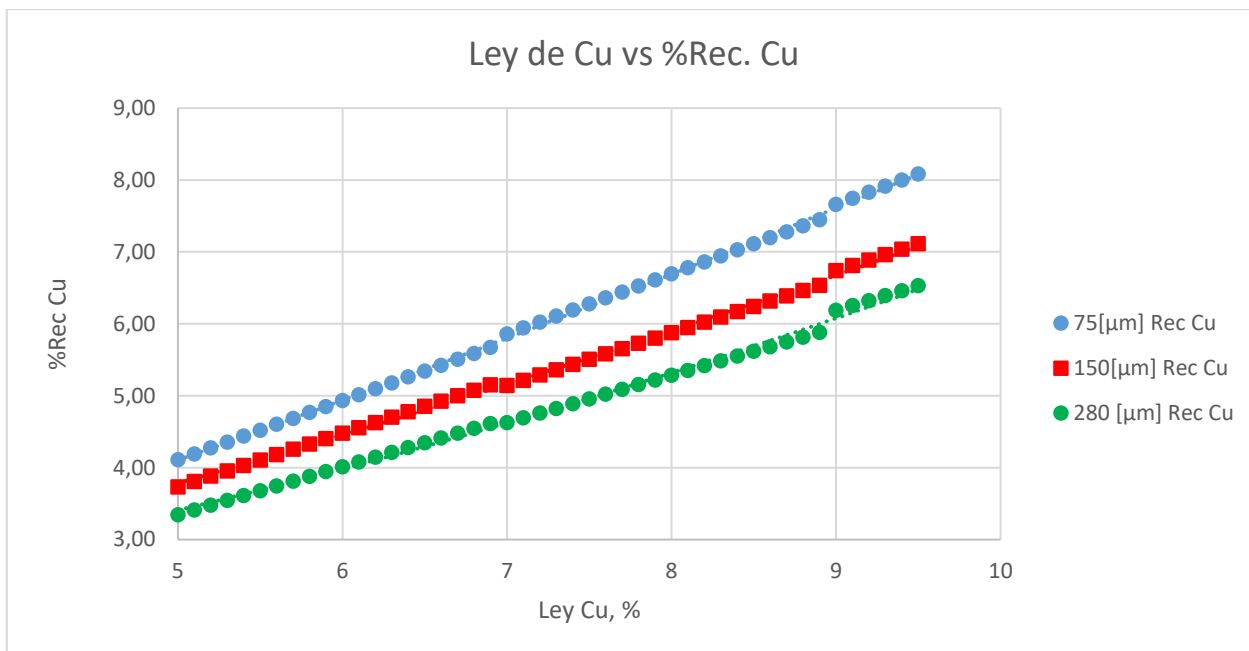


Gráfico 10: Representación gráfica de la recuperación de cobre (eje Y) en base a la ley de cobre (eje X) de la escoria que ingresa a la etapa de flotación, a diferente P80.

Donde según las líneas de tendencia, realizamos una proyección de Polinomio de grado 2, esto en base a la tendencia que se observa dentro del gráfico y que se representan en las siguientes ecuaciones:

Ecuación 8: Ecuación que representa la recuperación de cobre en base a la ley de Cu que presenta la escoria en la alimentación a un P80 de 75 [μm].

$$F(x) = 0,014x^2 + 0,6802x + 0,3521 \quad (8)$$

Ecuación 9: Ecuación que representa la recuperación de cobre en base a la ley de Cu que presenta la escoria en la alimentación a un P80 de 150 [μm].

$$G(x) = 0,0174x^2 + 0,4794x + 0,9494 \quad (9)$$

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Ecuación 10: Ecuación que representa la recuperación de cobre en base a la ley de Cu que presenta la escoria en la alimentación a un P80 de 280 [μm].

$$H(x) = 0,0304x^2 + 0,2418x + 1,4879 \quad (10)$$

- “F(x)” = Es la recuperación de cobre en base a la ley con la que ingresa a la etapa de flotación, con un P80 de 75 [μm].
- “G(x)” = Es la recuperación de cobre en base a la ley con la que ingresa a la etapa de flotación, con un P80 de 150 [μm]
- “H(x)” = Es la recuperación de cobre en base a la ley con la que ingresa a la etapa de flotación, con un P80 de 280 [μm]
- “X” = Es la ley de cobre de la escoria que ingresa a la etapa de flotación.

De esta forma se plantea un modelo fenomenológico, considerando el flujo de alimentación (F80, Ley de cobre, masa) y la información recaudada con respecto a los parámetros cinéticos presentes en el origen de las distintas escorias que se procesan, de esta forma se obtiene el cobre fino que ingresa a la alimentación, además del cobre fino que se encuentra en el concentrado en conjunto con la recuperación de cobre.

Tabla 35: Obtención del %Rec. Cu y toneladas métricas finas de cobre recuperadas en el concentrado (color naranja) mediante el uso del modelo fenomenológico, ingresando la ley de Cu y las toneladas procesas de escoria que ingresa a la concentradora (color verde).

Condición P80 [μm]	Alimentación			Concentrado		
	Ley Cu [%]	Masa [ton]	Cu Fino [ton]	Rec. Cu con respecto a la Ley de Cu [%]	Masa Cu Fino [Ton]	Rec. Cu [%]
75	8,75	16129,00	1411,29	7,38	1189,63	84,29
150	7,50	15000,00	1125,00	5,53	828,89	73,68
280	8,75	16129,00	1411,29	5,88	948,57	67,21

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Además de presentar una tabla condicional elaborada en Excel, donde ingresando los datos de P80, ley de cobre y la masa en toneladas, entrega los resultados presentes en la tabla anterior:

Tabla 36: Obtención del %Rec. Cu y toneladas métricas finas de cobre recuperadas en el concentrado (color naranja) mediante el uso del modelo fenomenológico, ingresando la ley de Cu, la masa en toneladas que se procesan y el F80 de la escoria que ingresa a la concentradora (color verde).

Condición P80 [μm]	Alimentación			Concentrado		
	Ley Cu [%]	Masa [ton]	Cu Fino [ton]	Rec. Cu con respecto a la Ley de Cu [%]	Masa Cu Fino [Ton]	Cu Rec. [%]
150	7,50	15000,00	1125	5,53	828,885	73,68

En la Tabla 48

se mide el índice de error que presenta la recuperación de cobre, en base a la recuperación teórica y la recuperación experimental, obteniendo errores promedios menores al 5%. Además de la Tabla 46 que mide el impacto que se tiene al calcular las TMF recuperadas en el periodo de estudio, donde además de poder representar con mayor exactitud la recuperación de cobre, se estima el déficit de cobre recuperado que fue reportado, resumido en la siguiente tabla:

Tabla 37: Comparación de recuperación de cobre y toneladas métricas finas recuperadas, en base a la recuperación teórica del 89% y el modelo fenomenológico a diferente P80.

Alimentación		Rec. Teo. Planta		75 [μm]		150 [μm]		280 [μm]	
TMS promedio	TMF promedio	Rec. Promedio	TMF Rec.	Rec. Promedio	TMF Rec.	Rec. Promedio	TMF Rec.	Rec. Promedio	TMF Rec.
736193,68	58268,81	89,00	51859,24	83,70	48861,48	74,12	43187,20	67,00	39082,33
Diferencia de Cu recuperada [TMF]					2997,76		8672,04		12776,91

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.

La definición de una granulometría de trabajo para la etapa de concentración es de suma importancia para una respuesta positiva de la misma, donde los resultados entregados en la Tabla 16 demuestran que una granulometría de 50 [μm] se tiene una recuperación aproximada del 83,68% para la escoria que se encuentra aledaña al SAG18, siendo una buena recuperación, pero considerando que los valores obtenidos son en base a pruebas de concentración en celdas de flotación batch, estas se verán disminuidas al ser implementadas en la planta, por lo que, llegar a una recuperación del 89% de Cu resulta una aproximación difícil de alcanzar para la planta.

Las recuperaciones alcanzadas son atribuidas principalmente a la respuesta de recuperación para la calcosina y la bornita, esto debido a que esta son las especies mineralógicas asociadas al cobre que además de presentarse con mayor abundancia excluyendo las gangas no metálicas, como apunta la Figura 14, son las que presentan una mayor recuperación cuando se trabaja a una granulometría menor, como se puede apreciar en la Tabla 15.

Según las respuestas entregadas para las “pruebas secundarias” apuntando a los resultados obtenidos en el Test 3, queda demostrado que el trabajo conjunto de ambos flujos, flujo de escoria y flujo de mineral mina, se ve afectada de manera negativa para la recuperación de cobre llegando a 65%. Esta recuperación se considera “negativa” dado que al realizar pruebas de manera independiente para el flujo de escoria y el flujo de mineral mina con un P80 de 50[μm], estas llegan a una recuperación del 70% y 90% respectivamente.

Se puede concluir que la incidencia del trabajo conjunto de ambos flujos resulta ser negativo para el proceso, pero que este efecto se puede ver disminuido, esto último debido a que para realizar las pruebas se utilizó 75% de mineral proveniente de la mina y un 25% de escoria (SAG18) y así contemplar su incidencia, pero en la práctica el flujo de escoria que ingresa a la etapa de concentración equivale a 1% aproximado y el 99% corresponde al mineral proveniente de la mina.

Según los resultados entregados en particular por las pruebas secundarias, apuntando al Test 5, Test 6 y Test 7, se puede concluir que los reactivos utilizados para esta etapa

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

no son los adecuados para llevar a cabo la flotación de escorias, esto debido a que en las pruebas mencionadas, a pesar de llevarse a cabo a una granulometría “óptima” que apunta la literatura sus recuperaciones máximas son bajas, o bien otra forma de evaluarlo sería viendo los gráficos que se encuentran vinculados a las “pruebas primarias”, dado que estas al no ser sometidas al acondicionamiento de 5 min, presentaron una recuperación mayor a tiempos menores, la cual, va disminuyendo de en gran magnitud a medida que avanza el proceso. Esto se puede deber a que los reactivos no son adecuados para los mismo, o bien la dosificación diseñada no es la óptima.

El modelo fenomenológico establecido con la base de datos obtenidas y resultados de las pruebas obtenidas, posee un margen del error menor al 1%, por ende, se considera viable para su implementación.

7.1. Recomendaciones.

Las recomendaciones finales de este trabajo, para contemplar un mejor desarrollo de este, son:

1. Llevar a cabo una investigación para el uso adecuados de reactivos, considerando el tipo de reactivo y la dosificación de los mismo, para contemplar parámetros de optimización máxima para la recuperación de cobre provenientes de la escoria.
2. Llevar a cabo un control más minucioso con respecto al P80 con el cual los flujos ingresan a la etapa de concentración.
3. Poder realizar el análisis en lo posible con una planta piloto de flotación, que contemple el circuito con el cual se encuentra sujeto la planta para poder estimar de mejor medida la recuperación máxima que se puede llegar en la misma. Se recomienda que las pruebas la realicen gente con conocimiento en el tema y que se pueda tener un mejor control sobre el mismo.

CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA

- Alicante, U. d. (2018). *Servicios Tecnicos de Investigacion*. Obtenido de <https://sstti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/espectroscopia-de-fluorescencia-de-rayos-x.html>
- CODELCO. (2019). *Fundicion "recien salido del horno"*. CODELCO EDUCA. Todos los derechos reservados.
- Cytec. (2010). *Mining Chemicals Handbook*.
- DepartamentoDeIngenieriaMetalurgica, U. (2003). *Introduccion a la metalurgia*.
- Ebisu, Y. (2018). *COMPORTAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS FINAS OCLUIDAS DE SULFUROS DE COBRE EN EL*.
- Edlund, V., & Hussey, S. (1972). *Recovery of copper from converter slags by flotation*. Bureau of mines report of investigations.
- Enrique Castillo, A. C. (2002). *Formulación y resolución de modelos de programación matemática en ingeniería y ciencia*.
- Escondida, M. (2004). Fundamentos teoricos de flotacion. En *Teoria Flotacion DOC* (págs. 29-69).
- Gaete, N. (2014). *Optimizacion tiempos de soplado convertidores peirce smith, codelco chile- division chuquicamata*.
- Gómez, L. C. (2015). *Modelización matemática - Principios y aplicaciones*. Mexico: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Heikki Jalkanen, J. V. (2003). Copper in solidified copper smelter slags. *Scandinavian Journal of Metallurgy*.
- Hernandez, J. (2013). *Estudio de recuperacion de Cu y Mo por tratamiento pirometalurgico de escorias*.
- Jiaqi, F., Hongxu, L., Liangtian, W., Chao, L., & Shi, S. (2017). The Recovery of Copper from Smelting Slag by Flotation Process. *School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology*.
- Ltda., G. (s.f.). *Microscopía QEMSCAN*. Obtenido de http://www.w8ns.com/w8/indice/view.asp?id_articulo=1074&id_web=339

- Panalytical, M. (s.f.). *Fluorescencia de rayos X*. Obtenido de <https://www.malvernpanalytical.com/es/products/technology/xray-analysis/x-ray-fluorescence>
- Pavez, O., Herrera, P., González, M., & Rivera, O. (2021). *Copper recovery through smelter slag flotation in atacama, chile*.
- Perez-Segura, E., Coronado-Lopez, H., Robles-Vega, A., & Brown-Bojórquez, F. (2016). Mineralogía y posibilidades de recuperación de cobre de la escoria de la planta fundidora del complejo minero-metalúrgico de la Caridad, Sonora. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, 4(20).
- Sanchez, M., & Imris, I. (2002). *Pirometalurgia del cobre y comportamiento de sistemas fundidos*. Concepción: Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Metalúrgica.
- Valderrama, L., Gonzalez, M., Santander, M., & Zazzali, B. (2018). RECUPERACIÓN DE COBRE CONTENIDO EN ESCORIA DE COBRE MEDIANTE FLOTACIÓN. *HOLOS*.
- Wang, X., Geysen, D., Padilla, S., D'Hoker, N., & Van Gerven, T. (2015). Characterisation of copper slag in view of metal recovery. En *Mineral processing and extractive metallurgy* (págs. 83-87).
- Xiong, T., Bin, H., Shuaipeng, R., & Bo, Y. (2014). Recovery of Copper from Copper Smelter Slag by Flotation. En *Applied Mechanics and Materials* (págs. 406-409).
- Yianatos, J. (2005). *Flotación de Minerales*.
- Yianatos, J., & Vinnette, L. (2015). *Flotación de minerales_ Fundamentos, Tecnología y Aplicación*.
- Zoran, M. S., & Zoran, S. M. (2011). The effect of Copper bearing particles liberation on copper recovery from smelter slag by flotation. *Department of Mineral and Recycling Technologies, University of Belgrade Technical Faculty in Bor, Serbia*.

CAPÍTULO 9. ANEXO.

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**



Figura 16: Partidor de rifle GILSON modelo SP-2.5



Figura 17: Divisor de muestras rotatorio RSD100 GRINDER serie N° 018.866.0005, alimentado por un "Alimentador vibratorio VF100 GRINDER serie N°017.878.0027"

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**



Figura 18: Juego de tamices con mallado #8, #12, #16, #20, #30, #40, #50, #70, #100, #140, #200, #270, #400 y fondo.



Figura 19: Tamizador RETSCH AS200 CONTROL serie N°1218040412, equipo de tamices, balanza y recipientes de acero para separar muestras

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**



Figura 20: Harnero de laboratorio GILSON TS-1FX



Figura 21: Chancador de mandíbula BICO serie N°72713

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**



Figura 22: Celda de flotación batch de programación automática EDEMET modelo CFL 3-3

Tabla 38: Representación de los tamices ocupados, con su respectiva tara.

Tamiz	
Nº	Tara
#	[g]
20	272,4
30	254,3
40	224,9
50	219,9
70	206,6
100	216,1
140	204,3
200	194,8
270	209,1
400	310,1
Fondo	356,7

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Tabla 39: Resumen de las pruebas de para determinar el P80 para el mineral proveniente de mina (M1, M2 y M3) además de una prueba (M4) para evaluar la molienda de la escoria proveniente de HF.

TAMIZ	M1		M2		M3		M4	
Nº #	[g]		[g]		[g]		[g]	
20	0,8	0,9	0,6	0,7	0,8	0,7	0,3	0,3
30	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,3	0,3	0,4
40	0,6	0,6	0,5	0,7	0,7	0,9	0,7	0,8
50	0,5	0,5	0,6	0,6	1,4	0,9	2,1	2,0
70	3,3	5,4	7,5	7,7	15,1	13,0	22,5	24,0
100	9,6	23,4	9,0	9,4	11,6	14,3	15,8	14,2
140	53,3	45,6	28,3	34,4	22,1	26,9	16,7	16,5
200	53,5	57,6	48,5	49,6	34,5	31,0	22,4	17,4
270	51,6	63,1	60,8	61,2	55,4	54,5	58,9	56,3
400	53,6	45,3	55,1	53,1	66,4	59,3	148,2	115,2
Fondo	82,0	78,5	99,8	95,5	103,6	98,2	117,7	102,8
P80	111,0	117,3	95,6	100,1	96,1	102,7	74,9	84,1

Tabla 40: Resumen para evaluar la molienda de la escoria proveniente del SAG18 (M6 y M7) y evaluar la molienda de la escoria producida en el C.P.S. (M5)

TAMIZ	M5		M6		M7	
Nº #	[g]		[g]		[g]	
20	0,0	0,0	0,4	0,7	0,0	0,0
30	0,4	0,5	0,2	0,2	0,0	0,0
40	0,7	0,6	0,7	0,6	74,0	71,5
50	0,9	1,1	0,7	1,8	36,8	35,8
70	1,4	1,4	1,5	2,4	61,1	67,2
100	1,8	1,9	3,1	4,9	68,0	62,4
140	8,0	9,2	7,4	13,8	60,0	55,3
200	38,5	38,9	35,2	39,9	48,2	45,1
270	55,0	59,8	53,2	62,3	46,6	47,1
400	69,3	67,8	70,4	69,8	37,4	36,3
Fondo	164,2	157,0	160,3	145,2	45,2	40,1
P80	68,5	69,6	67,5	73,5	348,3	349,0

Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.

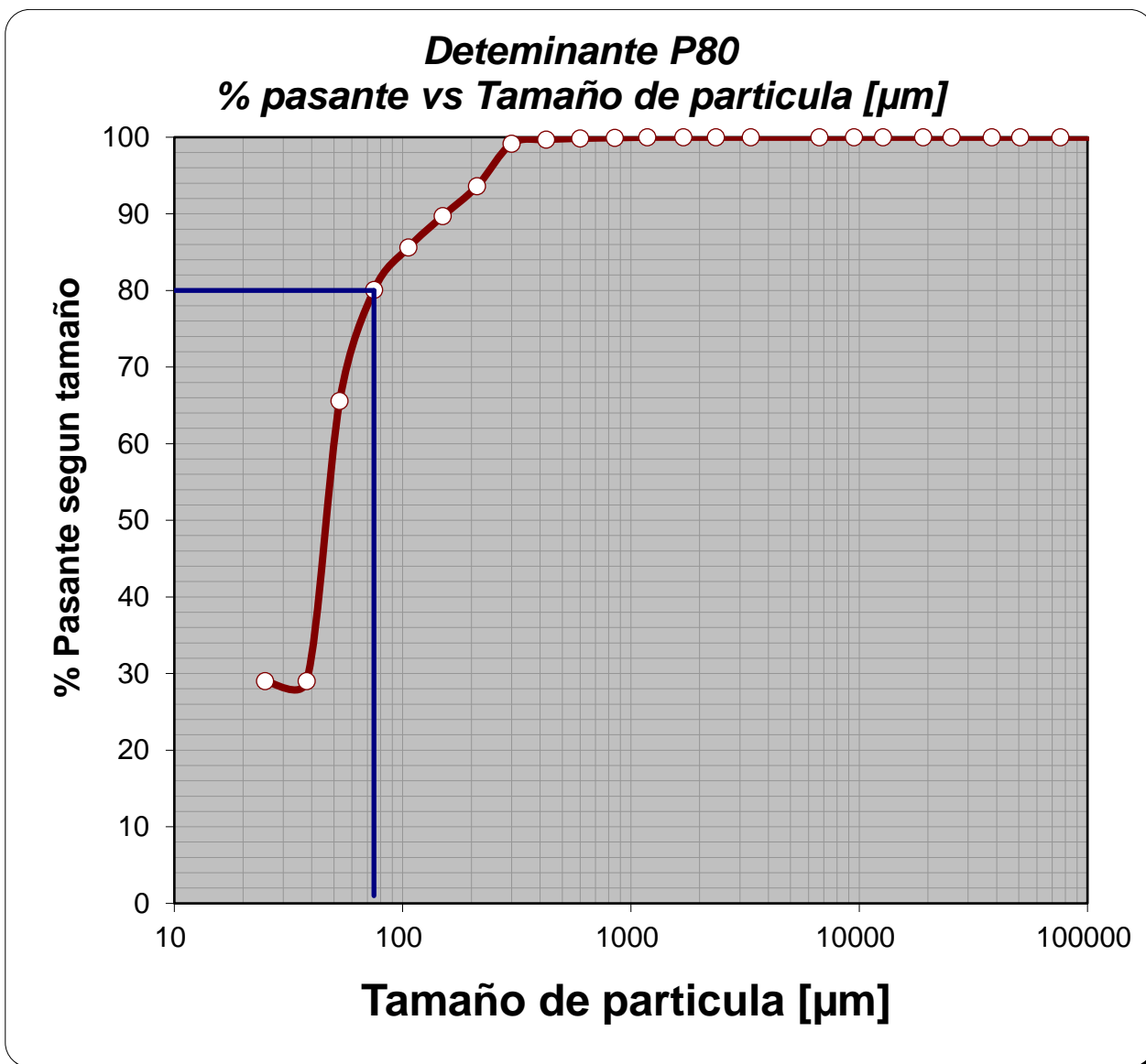


Gráfico 11: Porcentaje pasante según tamaño vs tamaño de partícula [μm], usado para determinar el P80 de la primera prueba M4 dando como resultado un P80 de 75 micrones, marcado con la línea de azul.

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Tabla 41: Principales ocurrencias del cobre con su respectiva especie mineralógica, para la alimentación de cada prueba.

Grupo Mineral	1.1	1.2	2.1	3.1	3.2	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	S 6.1	6.2	7.1	7.2
Bornita	20,6	23,2	19,4	59,9	59,6	78,9	76,4	77,9	47,0	52,7	37,1	39,5	35,2	34,5
Calcosina	0,5	2,8	1,6	22,7	19,4	15,9	18,7	17,1	47,9	42,9	52,5	50,1	61,5	61,0
Calcopirita	73,3	70,0	78,6	15,4	14,8	0,6	1,1	1,0	1,3	1,3	0,5	0,9	0,7	0,7
Cobre nativo	0,0	0,0	0,0	0,5	4,0	3,0	2,6	2,4	2,6	1,6	6,9	5,4	1,4	1,7
Cuprita	3,2	3,9	1,1	1,2	1,3	1,3	1,0	1,4	1,1	1,4	2,9	3,8	1,0	2,0
Enargita	2,5	0,1	0,4	0,3	0,9	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1
Wad Cu	0	0	0	0,017	0	0,008	0	0	0	0	0	0	0,007	0,001
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabla 42: Principal aporte elemental que se presenta en las alimentaciones de las pruebas secundarias realizadas.

Elemento	1.1	1.2	2.1	3.1	3.2	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	6.1	6.2	7.1	7.2
O	48,9	49,1	49,0	44,1	44,3	31,8	31,9	32,1	33,0	32,8	32,5	32,3	30,8	30,9
Fe	1,0	0,9	0,6	12,6	12,6	44,0	43,5	43,2	44,7	44,6	43,5	43,9	42,4	42,3
Si	33,2	33,1	33,2	27,1	27,3	12,0	12,2	12,4	12,3	12,4	12,4	12,1	11,8	11,8
Al	7,3	7,3	7,6	5,8	5,6	1,6	1,5	1,5	1,6	1,7	1,6	1,6	1,2	1,3
Cu	0,3	0,3	0,3	1,7	1,7	4,8	4,9	4,8	2,9	3,0	4,3	4,4	7,9	7,8
K	4,4	4,1	4,0	3,5	3,3	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,2	1,3	1,0	1,0
S	0,9	0,9	0,8	1,3	1,3	1,8	1,8	1,8	1,0	1,1	1,2	1,3	2,4	2,4
Na	1,9	2,0	2,2	1,4	1,4	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

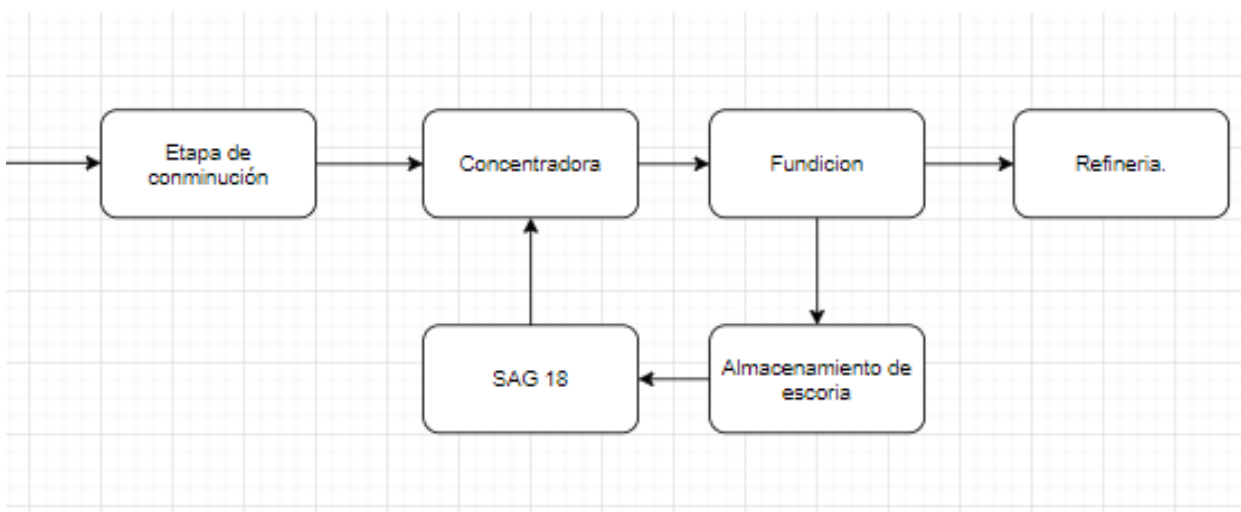


Figura 23: Diagrama simplificado del proceso, en el que se destaca el “Almacenamiento de escorias” que se extraen de la fundición.

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

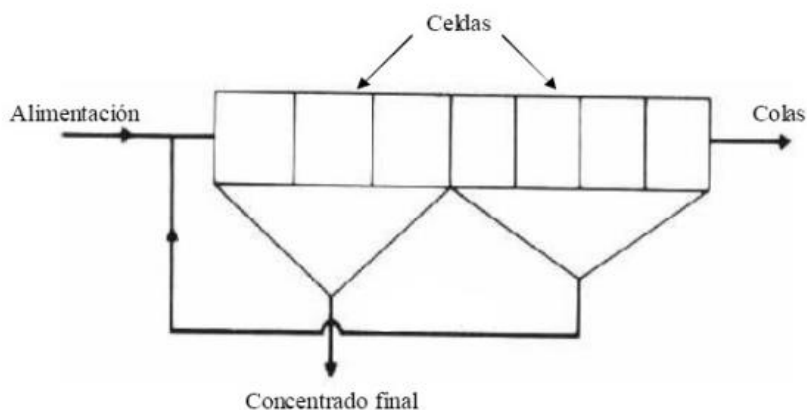


Figura 24: Circuito de la etapa de concentración simplificado, con sus respectivos flujos

Tabla 43: Resumen de flujos de entrada que tiene la etapa de concentración (S.D.A.= Sin Datos Adquiridos).

Fecha	Ingreso Concentradora				
	Mineral Mina [TMF]	Escoria [TMF]	Flujo total	% M.M	% Escoria
ene-19	4347597,4	16129,1	4363726,4	99,6	0,4
feb-19	3194988,2	S.D.A.	3194988,2	S.D.A.	S.D.A.
mar-19	5146759,4	S.D.A.	5146759,4	S.D.A.	S.D.A.
abr-19	5173158,4	S.D.A.	5173158,4	S.D.A.	S.D.A.
may-19	5284170,6	S.D.A.	5284170,6	S.D.A.	S.D.A.
jun-19	3972675,4	S.D.A.	3972675,4	S.D.A.	S.D.A.
jul-19	5066222,0	19932,0	5086154,1	99,6	0,4
ago-19	5086279,8	24017,0	5110296,8	99,5	0,5
sept-19	5034833,0	17877,2	5052710,2	99,6	0,4
oct-19	4976463,6	22442,4	4998906,0	99,6	0,4
nov-19	5063409,9	19951,8	5083361,7	99,6	0,4
dic-19	5476287,8	9092,7	5485380,5	99,8	0,2
ene-20	4046431,7	5203,2	4051634,9	99,9	0,1
feb-20	4944658,0	40432,1	4985090,1	99,2	0,8
mar-20	5420654,4	18085,7	5438740,1	99,7	0,3
abr-20	5155210,5	58248,0	5213458,5	98,9	1,1
may-20	5619433,2	52191,8	5671625,0	99,1	0,9

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

jun-20	5193768,2	9820,8	5203589,0	99,8	0,2
jul-20	5307456,6	S.D.A.	5307456,6	S.D.A.	S.D.A.
ago-20	4935874,2	23847,1	4959721,3	99,5	0,5
sept-20	5176102,8	53041,8	5229144,6	99,0	1,0
oct-20	5266424,0	37118,7	5303542,7	99,3	0,7
nov-20	4620982,9	21875,0	4642857,8	99,5	0,5
dic-20	5236469,8	22714,5	5259184,3	99,6	0,4
ene-21	5214307,8	19885,9	5234193,8	99,6	0,4
feb-21	4640440,1	16338,9	4656778,9	99,6	0,4
mar-21	5029900,7	24078,0	5053978,7	99,5	0,5
abr-21	5205894,3	14555,9	5220450,2	99,7	0,3
may-21	5703234,8	32422,3	5735657,1	99,4	0,6
jun-21	4927507,3	30062,9	4957570,2	99,4	0,6
jul-21	5168366,7	29425,7	5197792,4	99,4	0,6
ago-21	5610092,6	31327,6	5641420,2	99,4	0,6
sept-21	5066065,8	23054,4	5089120,2	99,5	0,5
oct-21	4957138,5	15704,6	4972843,1	99,7	0,3
nov-21	5291341,4	49759,3	5341100,7	99,1	0,9

Tabla 44: Porcentaje de cobre presente en la bornita y calcosina.

Minerales	Formula Química	%Cu
bornita	Cu_5FeS_4	0,64
calcosina	Cu_2S	0,80

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Tabla 45: Índice de error que se presentan el modelo fenomenológico para diferentes P80, en función de la ley de cobre de la escoria que ingresa a la concentradora.

P80	75 [µm]			150 [µm]			280 [µm]		
	Ley Cu	Rec. Cu	Rec. Teo.	%Error	Rec. Cu	Rec. Teo.	%Error	Rec. Cu	Rec. Teo.
5,0	4,11	4,10	0,15	3,73	3,78	-1,37	3,34	3,41	-1,90
5,1	4,19	4,19	0,15	3,81	3,85	-1,10	3,41	3,46	-1,51
5,2	4,27	4,27	0,14	3,88	3,91	-0,85	3,48	3,52	-1,16
5,3	4,36	4,35	0,13	3,96	3,98	-0,63	3,54	3,57	-0,83
5,4	4,44	4,43	0,11	4,03	4,05	-0,41	3,61	3,63	-0,53
5,5	4,52	4,52	0,08	4,11	4,11	-0,22	3,68	3,69	-0,26
5,6	4,60	4,60	0,05	4,18	4,18	-0,04	3,74	3,75	-0,02
5,7	4,68	4,68	0,01	4,25	4,25	0,13	3,81	3,80	0,20
5,8	4,77	4,77	-0,03	4,33	4,32	0,28	3,88	3,86	0,39
5,9	4,85	4,85	-0,07	4,40	4,39	0,42	3,95	3,92	0,57
6,0	4,93	4,94	-0,12	4,48	4,45	0,54	4,01	3,98	0,72
6,1	5,01	5,02	-0,18	4,55	4,52	0,66	4,08	4,04	0,85
6,2	5,10	5,11	-0,23	4,63	4,59	0,76	4,15	4,11	0,97
6,3	5,18	5,19	-0,29	4,70	4,66	0,85	4,21	4,17	1,06
6,4	5,26	5,28	-0,36	4,78	4,73	0,94	4,28	4,23	1,14
6,5	5,34	5,36	-0,42	4,85	4,80	1,01	4,35	4,29	1,20
6,6	5,42	5,45	-0,50	4,93	4,87	1,07	4,41	4,36	1,25
6,7	5,51	5,54	-0,57	5,00	4,94	1,13	4,48	4,42	1,28
6,8	5,59	5,62	-0,65	5,08	5,02	1,17	4,55	4,49	1,30
6,9	5,67	5,71	-0,72	5,15	5,09	1,21	4,61	4,55	1,30
7,0	5,86	5,80	0,99	5,14	5,16	-0,39	4,63	4,62	0,11
7,1	5,94	5,89	0,90	5,21	5,23	-0,36	4,69	4,69	0,09
7,2	6,02	5,98	0,82	5,29	5,31	-0,35	4,76	4,75	0,05
7,3	6,11	6,06	0,73	5,36	5,38	-0,34	4,82	4,82	0,01
7,4	6,19	6,15	0,64	5,43	5,45	-0,34	4,89	4,89	-0,05
7,5	6,28	6,24	0,55	5,51	5,53	-0,34	4,96	4,96	-0,12
7,6	6,36	6,33	0,46	5,58	5,60	-0,35	5,02	5,03	-0,20
7,7	6,44	6,42	0,36	5,65	5,67	-0,37	5,09	5,10	-0,28
7,8	6,53	6,51	0,26	5,73	5,75	-0,39	5,15	5,17	-0,38
7,9	6,61	6,60	0,17	5,80	5,82	-0,42	5,22	5,25	-0,49
8,0	6,69	6,69	0,07	5,87	5,90	-0,45	5,29	5,32	-0,61
8,1	6,78	6,78	-0,04	5,95	5,98	-0,49	5,35	5,39	-0,73
8,2	6,86	6,87	-0,14	6,02	6,05	-0,53	5,42	5,46	-0,86
8,3	6,95	6,96	-0,25	6,09	6,13	-0,58	5,48	5,54	-1,00
8,4	7,03	7,05	-0,35	6,17	6,21	-0,63	5,55	5,61	-1,15

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

8,5	7,11	7,15	-0,46	6,24	6,28	-0,68	5,62	5,69	-1,31
8,6	7,20	7,24	-0,57	6,31	6,36	-0,74	5,68	5,77	-1,47
8,7	7,28	7,33	-0,68	6,39	6,44	-0,81	5,75	5,84	-1,64
8,8	7,36	7,42	-0,80	6,46	6,52	-0,88	5,81	5,92	-1,81
8,9	7,45	7,51	-0,91	6,54	6,60	-0,95	5,88	6,00	-2,00
9,0	7,66	7,61	0,67	6,74	6,68	0,92	6,19	6,08	1,77
9,1	7,74	7,70	0,55	6,81	6,76	0,84	6,25	6,16	1,58
9,2	7,83	7,79	0,44	6,89	6,84	0,76	6,32	6,24	1,39
9,3	7,91	7,89	0,32	6,96	6,92	0,68	6,39	6,32	1,19
9,4	8,00	7,98	0,21	7,04	7,00	0,59	6,46	6,40	0,99
9,5	8,08	8,08	0,09	7,11	7,08	0,50	6,53	6,48	0,78
Error total:		0,0154	Error total:		0,0117	Error total:		0,00233	

Tabla 46: Toneladas métricas finas recuperadas en cada mes del periodo de estudio, con su correspondiente Rec. de Cu.

Fecha	Escoria Alimentación			75 [µm]		150 [µm]		280 [µm]	
	TMS	%Cu	TMF	Rec. Cu %	Rec. T.M.F.	Rec. Cu %	Rec. T.M.F.	Rec. Cu %	Rec. T.M.F.
ene-19	16129,06	8,75	1411,02	84,29	1189,39	74,04	1044,79	67,21	948,37
feb-19	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.
mar-19	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.
abr-19	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.
may-19	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.
jun-19	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.
jul-19	19932,02	7,47	1488,68	83,19	1238,44	73,68	1096,82	66,14	984,57
ago-19	24016,97	5,95	1428,79	82,27	1175,42	74,28	1061,30	66,44	949,22
sept-19	17877,20	6,16	1102,12	82,36	907,73	74,10	816,64	66,25	730,10
oct-19	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.
nov-19	19951,81	8,00	1596,31	83,62	1334,87	73,76	1177,40	66,47	1061,14
dic-19	9092,74	8,01	728,50	83,63	609,26	73,76	537,35	66,48	484,33
ene-20	5203,16	7,00	364,18	82,85	301,72	73,71	268,45	66,00	240,37
feb-20	40432,14	7,88	3184,57	83,52	2659,66	73,73	2347,94	66,38	2113,92
mar-20	18085,66	7,47	1351,21	83,19	1124,10	73,68	995,53	66,14	893,67
abr-20	58247,96	6,92	4030,76	82,80	3337,31	73,73	2971,90	66,00	2660,13
may-20	52191,75	7,11	3711,44	82,93	3077,79	73,69	2735,12	66,02	2450,23
jun-20	9820,78	7,52	738,57	83,23	614,71	73,68	544,18	66,16	488,65
jul-20	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.	S.D.A.
ago-20	23847,08	8,10	1932,02	83,71	1617,26	73,79	1425,55	66,56	1285,90
sept-20	53041,84	9,40	4986,89	84,93	4235,24	74,43	3711,60	68,06	3393,84

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

oct-20	37118,68	7,83	2905,31	83,48	2425,25	73,72	2141,76	66,35	1927,53
nov-20	21874,95	4,61	1007,50	82,11	827,29	76,60	771,72	69,40	699,22
dic-20	22714,52	9,23	2096,83	84,76	1777,23	74,32	1558,30	67,82	1422,06
ene-21	19885,90	12,01	2387,76	87,76	2095,56	76,77	1833,07	72,66	1734,88
feb-21	16338,85	7,85	1282,39	83,49	1070,72	73,72	945,42	66,36	851,00
mar-21	24077,98	7,27	1750,47	83,04	1453,61	73,68	1289,73	66,06	1156,35
abr-21	14555,87	9,61	1399,52	85,14	1191,59	74,57	1043,68	68,36	956,77
may-21	32422,26	7,95	2577,19	83,58	2153,96	73,74	1900,54	66,43	1712,12
jun-21	30062,90	9,57	2877,01	85,10	2448,25	74,54	2144,59	68,30	1964,94
jul-21	29425,69	9,86	2902,49	85,40	2478,70	74,76	2169,85	68,74	1995,28
ago-21	31327,58	7,26	2273,91	83,03	1888,09	73,68	1675,41	66,06	1502,05
sept-21	23054,42	7,28	1678,87	83,05	1394,30	73,68	1236,96	66,06	1109,11
oct-21	15704,63	8,38	1315,93	83,95	1104,76	73,88	972,21	66,81	879,21
nov-21	49759,26	7,55	3758,58	83,26	3129,26	73,68	2769,40	66,18	2487,39
Total			58268,81		48861,48		43187,20		39082,33



Figura 25: Ubicación geográfica División Chuquicamata, Región de Antofagasta.

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Tabla 47: Datos obtenidos de la recuperación de cobre de la prueba T-001 (realizada Asmin industrial Ltda.), ajustada con el modelo de Klimpel y G-Z.

Tiempo Flotación. [min]	Rec. Cu [%]				
	Real	Ajustada Klimpel	Error	Ajustada G-Z	Error
0,0	0	0,0		0,0	
2,0	49,42	49,5	-0,3	48,7	1,5
4,0	60,13	59,9	0,4	61,5	-2,3
7,5	65,16	65,1	0,1	65,6	-0,7
12,0	67,22	67,4	-0,2	66,0	1,7

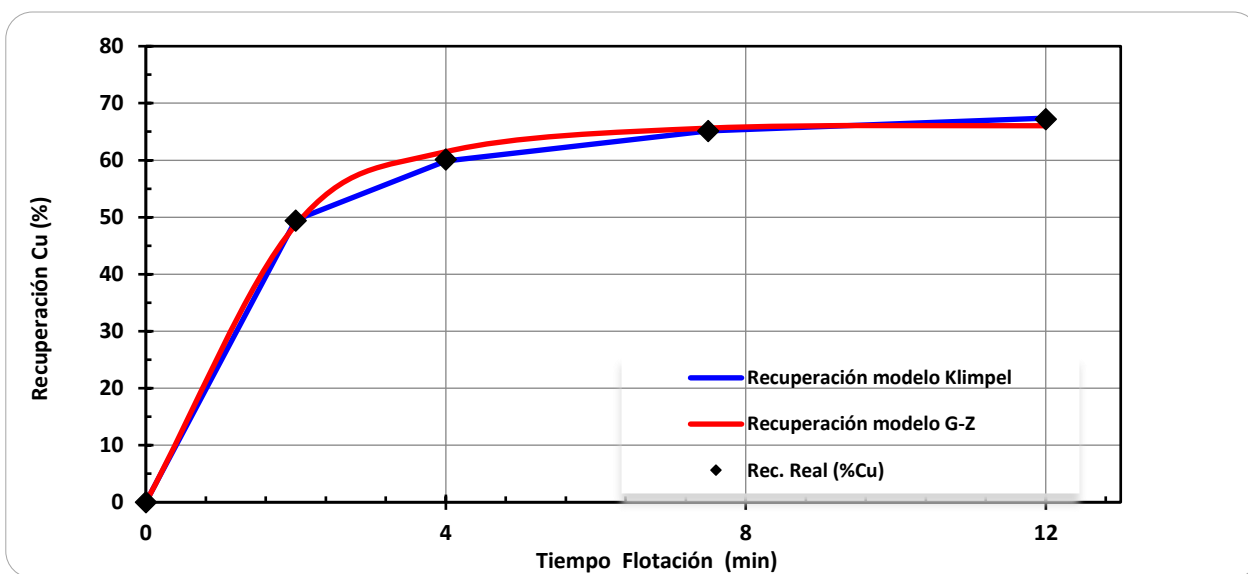


Gráfico 12 Recuperación de cobre vs tiempo de una flotación batch, ajustado según modelo cinético de Klimpel (azul) y el modelo cinético G-Z (rojo).

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

Tabla 48: Pruebas del modelo fenomenológico, comparando las recuperaciones obtenidas en las pruebas realizadas en Asmin Industrial Ltda. considerando el % de error que se tiene.

TEST	Condición P80 (µm)	Alimentación			Recuperación de Cu Experimental [%]					Recuperación de Cu Teórica			Error [%]
		Masa [g]	Cu [%]	Cu Fino [g]	2 [min]	4 [min]	7,5 [min]	12 [min]	Relave	Rec. Cu R.A. [%]	Masa Cu Fino [g]	Cu Rec. [%]	
T-001	280	1339,20	8,42	112,75	49,42	60,13	65,16	67,22	32,78	5,63	75,38	66,85	0,54
T-002	50	1340,20	8,42	112,84	74,03	78,21	80,54	81,82	18,18	7,07	94,77	83,99	2,65
T-003	280	1332,60	7,94	105,83	48,90	59,72	63,48	64,30	35,70	5,28	70,30	66,43	3,32
T-004	280	1336,70	5,02	67,16	56,57	62,22	65,10	65,84	34,16	3,42	45,72	68,07	3,39
T-005	50	1342,50	5,40	72,44	77,11	81,65	84,34	85,74	14,26	4,43	59,47	82,10	4,25
T-006	150	1338,30	5,42	72,51	57,71	70,32	72,93	74,02	25,98	4,06	54,32	74,92	1,21
T-007	150	1330,80	6,23	82,88	68,27	70,21	72,43	73,28	26,72	4,61	61,37	74,05	1,06
T-008	280	1334,60	6,27	83,74	63,36	65,69	67,17	67,95	32,05	4,15	55,41	66,17	2,62
T-009	50	1345,40	4,78	64,26	79,15	81,03	82,97	83,76	16,24	3,92	52,74	82,08	2,00
T-010	150	1350,00	6,70	90,39	69,66	72,29	73,25	73,87	26,13	4,94	66,71	73,80	0,09
T-011	280	1345,00	6,10	82,00	64,92	66,70	67,64	68,06	31,94	4,04	54,37	66,30	2,59
T-012	50	1352,40	4,84	65,50	76,15	78,29	80,45	81,36	18,64	3,97	53,76	82,07	0,87
T-013	280	1346,80	5,76	77,54	61,62	63,02	64,28	64,66	35,34	3,84	51,69	66,66	3,08
T-014	50	1345,00	3,62	48,64	72,91	76,70	79,19	80,21	19,79	2,99	40,28	82,82	3,26
T-015	50	1343,00	3,62	48,55	69,77	75,03	78,30	79,93	20,07	2,99	40,21	82,82	3,61
T-016	50	1346,20	4,55	61,20	79,30	81,97	84,75	85,62	14,38	3,73	50,26	82,13	4,08

**Caracterización de la flotabilidad de escorias de la
División Chuquicamata.**

T-017	150	1349,10	4,61	62,19	56,33	73,79	77,73	78,68	21,32	3,53	47,63	76,59	2,66
T-018	50	1342,50	8,29	111,32	73,69	81,33	83,46	84,66	15,34	6,95	93,37	83,88	0,93
T-019	280	1338,10	8,13	108,85	42,90	61,23	66,84	68,92	31,08	5,42	72,48	66,59	3,39