UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL

SANTIAGO – CHILE

"ESTUDIO DEL EFECTO DE REACTIVOS EN LA OPERACIÓN DE LA PLANTA DE FLOTACIÓN SELECTIVA DE MINERA CASERONES"

HÉCTOR DAVID ARÉVALO VALDIVIA

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

PROFESOR GUÍA:

DR. JUAN YIANATOS BERNARDINO

CORREFERENTE:

ING. LUIS TAPIA MEZA

2019

"Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la Institución"

"I must not fear.

Fear is the mind-killer.

Fear is the little-death that brings total obliteration.

I will face my fear.

I will permit it to pass over me and through me.

And when it has gone past I will turn the inner eye to see its path.

Where the fear has gone there will be nothing.

Only I will remain."

- Letanía contra el miedo de la hermandad Bene Gesserit -

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi polola, Cati, ya que ha sido mi pilar fundamental para el desarrollo de mi carrera, siempre apoyándome en los momentos difíciles y celebrando conmigo las victorias, siendo la única persona que sabe por todas las cosas que he pasado para llegar a este punto.

A continuación, quiero agradecer a mi familia, partiendo por mis padres, Ximena y Tito, que siempre han estado ahí, y que comenzaron lo que soy hoy en día. A mis hermanos, Miry y Jorge, que a pesar de que en muchas ocasiones no supe comunicarme con ellos, estuvieron ahí para ayudarme. Y también al resto de mi familia, como son tíos y primos que de una u otra manera aportaron en mi crecimiento. En esto no puedo dejar de lado a la familia de mi polola, que por todo lo que llevamos juntos, también han sido parte de este camino.

Luego quiero agradecer a mis amigos y compañeros del colegio y de la U, que han sido parte de mis momentos de relajo o que han estado ahí para enseñarme, para trabajar juntos en algunos de los tantos trabajos que he realizado en la U, o que simplemente nos hemos apoyado mutuamente, a los de la generación 2011 que íbamos terminando juntos, Pipe, Aguirre, Laxi, Exequiel, y los 2013 que me "uní" en los últimos años.

No puedo dejar de agradecer a la profe Carolyn, que cuando fue Jefa de carrera creyó en lo que era capaz y me dio la oportunidad de enmendar mi camino y llegar hasta aquí.

También agradecer al profesor Juan Yianatos, que, a pesar de no conocerme, aceptó ser mi profesor guía y que, aunque no lo contacté muchas veces durante el desarrollo de mi memoria, me ayudó en lo que necesitaba.

Finalmente, agradecer a la empresa Lumina Copper y el proyecto Caserones, que me permitieron realizar mi memoria. A Javi Puelma, que creyó en mí, me ayudó a entrar y estuvo siempre atenta y dándome recomendaciones sobre el funcionamiento de Caserones. Y a todas las personas que conocí, mi tutor, Luis Tapia, que me dio muchos consejos y me mostró la diferencia del mundo laboral con la universidad, a los jefes de turno, por enseñarme y creer en mis ideas, y en especial a Omar Pizarro, y las distintas conversaciones que tuvimos y a los operadores que estuvieron siempre disponibles a mostrarme la parte práctica de la planta.

Resumen Ejecutivo

La compañía minera Lumina Copper se encuentra realizando diversas actividades, en el marco del plan *Lumina 2020*, con el objetivo de disminuir los costos de sus procesos y así aumentar la rentabilidad de sus operaciones. En el caso de la planta de flotación selectiva del proyecto Caserones, los focos han estado en la estandarización de sus procesos y en la disminución del consumo de su principal reactivo, el depresante de cobre: Sulfhidrato de sodio o NaHS.

Por este motivo, el principal objetivo del presente estudio es analizar el efecto de este reactivo, y así evaluar las opciones existentes para disminuir su uso, sin impactar de forma negativa el resultado de la planta. Para lograr esto, en un periodo total de 8 meses, se observó la relación entre su dosificación y el potencial ORP, se estudiaron diversas condiciones de operación en el laboratorio y se evaluó en planta el efecto de la concentración del depresante.

Para esto, en primer lugar, se realizó el levantamiento de información del consumo, potenciales y leyes de la planta, y así conocer el punto de partida, encontrándose que la dosificación de reactivo NaHS se encontraba entre 5 y 6 kg/t, que los potenciales se encontraban generalmente bajo -600 mV y que las primeras etapas (Rougher y 1º limpieza) se realizaba la mayor concentración, generando el foco para el trabajo.

Para lograr el objetivo se plantea la realización de diversas pruebas de flotación en el laboratorio de la planta y en las instalaciones del proveedor del depresante (Fosfoquim), evaluando distintas potenciales y condiciones, destacándose la concentración del depresante y el efecto de usar un gas inerte (nitrógeno) o uno oxidante (aire). Dentro de lo realizado en Caserones se buscó también la formulación de un estándar para mejor la comparación entre las pruebas. Por los resultados obtenidos en la planta, surge un segundo camino correspondiente a la modificación de la concentración del depresante, realizándose esta modificación en planta y observando los resultados obtenidos.

Los resultados de las pruebas de Caserones se separaron en distintos análisis, en el primero se comparó los efectos de una diferencia de potencial de -400 a -550 mV, lográndose ver que el consumo aumento más del 50%, pero con mejor control de la operación, aumentando levemente la recuperación de molibdeno y disminuyendo la masa de concentrado generado. Luego se comparó una prueba a -500 mV con una situación en donde el reactivo NaHS fue adicionado en exceso, observándose que llegado a un punto el ORP se satura, y no sigue subiendo aun cuando se tiene mayor cantidad, haciéndolo resistente a la oxidación. Se tiene también, que para la prueba de -500 mV se lograron resultados similares, con menores consumos, pero se tenía un menor control del potencial. Por último, se observó que la principal variable para la magnitud del efecto de la adición del NaHS sobre el ORP es en cuanto se encontraba el potencial antes de la adición, y que para potenciales bajo -500 mV, es difícil seguir disminuyendo aun con dosis altas.

Las pruebas realizadas en Fosfoquim estudiaron 2 efectos, el gas de flotación y la operación a dos potenciales diferentes. En el primer caso no se observan diferencias importantes en el resultado metalúrgico, pero el consumo de la prueba con aire fue cerca de 10 veces la prueba

con nitrógeno para el mismo potencial (-550 mV). En el segundo, se logró una leve mejora en la recuperación al operar a un potencial más negativo, pero el consumo fue 4 veces mayor.

Por último, los resultados obtenidos al realizar el cambio de la concentración de depresante fueron una disminución del consumo real de la planta hasta 3,31 kg/t durante el mes de agosto, aun cuando se tuvo un potencial menor en 2 etapas, junto con esto, se observa un aumento en la duración de la carga de un camión, desde 1,62 hasta 2,17 días. Esto trajo consigo un ahorro para el mes de agosto de cerca de 70.000 USD en cuanto ha reactivo adquirido, y un mayor ahorro considerando que durante el mes se terminó con mayor inventario.

Se concluye, que el mejor intervalo de operación para el potencial se encuentra entre -550 y -600 mV, ya que conjuga buenos resultados con beneficios de estabilidad del potencial y de los flujos másicos generados, sin elevar en exceso el consumo de NaHS. Y también que, dado que la disminución de la concentración de reactivo llegó hasta el límite sin encontrar efectos negativos, se deben buscar formas para seguir reduciendo el valor, y maximizar los beneficios.

Abstract

The Lumina Copper mining company is carrying out various activities, within the framework of the Lumina 2020 plan, with the objective of reducing the costs of its processes and thus increasing the profitability of its operations. In the case of the selective flotation plant of the Caserones project, the foci have been in the standardization of their processes and in the reduction of the consumption of their main reagent, the copper depressant: Sodium Hydrosulphide or NaHS.

For this reason, the main objective of the present study is to analyse the effect of this reagent, and thus evaluate the existing options to reduce its use, without negatively impacting the result of the plant. To achieve this, during an 8 month period, the relationship between its dosage and the ORP was observed, various operating conditions in the laboratory were studied and the effect of the concentration of the depressant was evaluated in the plant.

For this, firstly, the survey of consumption, potentials and ore grade of the plant was carried out, so the starting point could be defined, finding that the reagent dosage was between 5 and 6 kg/t, that the potential was generally under -600 mV and that the first stages (Rougher and 1st cleaning) were the ones that carried out the highest concentration, generating the focus for the study.

In order to achieve this objective, several flotation tests are proposed within the plant's laboratory and in the facilities of the supplier of the depressant (Fosfoquim), evaluating different potentials and conditions, highlighting the concentration of the depressant and the effect of using an inert gas (nitrogen) or an oxidizer (air). Within the Caserones project, the formulation of a standard was also sought to a better comparison between tests. Due to the results obtained in the plant, a second path arises corresponding to the modification of the concentration of the depressant, modification being carried out in the plant and observing the results obtained within it.

The results of the tests in Caserones were separated in different analyses, the first one compared the effects of a potential difference of -400 to -550 mV, being able to see that the consumption increased more than 50%, but with better control of the operation, slightly increased recovery of molybdenum and decreased mass of concentrate generated. Then a test at -500 mV was compared with a situation where the reagent was added in excess, observing that when the ORP reach a certain point, it saturates, and does not continue to rise even when there is a greater amount of reagent present, making it resistant to oxidation. Also, that for the -500 mV test similar results were achieved, with lower consumption, but there was less control of the potential. Finally, it was observed that the main variable for the magnitude of the effect of the reagent addition on the ORP is which was the potential before the addition, and that for potentials below -500 mV, it is difficult to continue decreasing even with high doses.

The tests carried out in Fosfoquim studied 2 effects, the flotation gas and the operation with two different potentials. In the first case, no significant differences were observed in the metallurgical result, but the consumption of the air test was about 10 times the one from

nitrogen test, at the same potential (-550 mV). In the second, a slight improvement in recovery was achieved by operating at a more negative potential, but consumption was 4 times higher.

Finally, the results obtained when changing the concentration of depressant were a decrease in the actual consumption of the plant to 3.31 kg/t during August, even when there was a lower potential in 2 stages, together with an increase in the duration of the load of a truck, from 1.62 to 2.17 days. This brought a saving for August of about 70,000 USD in acquired reagent, and a greater saving considering that the month has finished with a greater inventory.

In conclusion, that the best operating range for the potential is between -550 and -600 mV, since it combines good results with benefits of stability of the potential and of the generated mass flows, without excessively raising the reagent consumption. And also, that, since the decrease in reagent concentration reached the limit without finding negative effects, ways should be sought to continue reducing the value, and maximize the benefits.

Nomenclatura

Aire enrarecido	: Aire con menor concentración de oxígeno
CIO	: Centro integrado de operaciones
Colector	: Reactivo que se adhiere a una partícula mineral, mejorando su flotabilidad
Circuito RCS	: Circuito de flotación con etapas *Rougher-Cleaner-Scavenger*
Depresante	: Reactivo que evita la colección de un mineral
Espumante	: Reactivo que favorece la formación y estabilidad de la espuma
ORP	: Potencial de óxido-reducción
RIC	: Rango intercuartílico, diferencia entre el valor del 1º y 3º cuartil
TMS	: Toneladas métricas secas
% Sólidos	: Proporción de la masa de pulpa que corresponde a sólido seco

Índice

Agradecimientos i
Resumen Ejecutivo ii
Abstract iv
Nomenclatura vi
Índice vii
1. Introducción 1
2. Objetivos 1
2.1. Objetivo general 1
2.2. Objetivos específicos 1
3. Antecedentes 2
3.1. Flotación de molibdeno 2
3.1.1. Sulfhidrato de sodio 3
3.1.2. Mata-espuma 4
3.1.3. Colector de molibdeno 4
3.2. Planta concentradora de minera Caserones 5
3.2.1. Superintendencia de operaciones de molibdeno 6
3.3. Proceso de flotación planta selectiva 9
4. Metodología 14
4.1. Búsqueda del potencial óptimo de operación. 14
4.1.1. Pruebas realizadas dentro de Caserones 14
4.1.2. Pruebas realizadas en Fosfoquim 15
4.2. Cambio en la concentración de depresante NaHS 16
5. Resultados 18
5.1. Búsqueda del potencial óptimo de operación 18
5.1.1. Pruebas realizadas en Caserones 18
5.1.2. Pruebas realizadas en Fosfoquim 24
5.2. Cambio en la concentración de depresante NaHS 26
5.2.1. ORP durante el cambio de dilución 28
5.2.2. Ingreso de camiones de depresante 29
5.2.3. Consumo de depresante 30
6. Conclusiones 31
7. Referencias 32
8. Anexos 34
8.1. Anexo A: Datos de planta 34

8.2. Anexo B: Análisis comparativo leyes por FRX y laboratorio químico 34
8.3. Anexo C: Procedimiento prueba flotación selectiva 40
8.4. Anexo D: Relación concentración depresante NaHS y densidad de solución 42
8.5. Anexo E: Potenciales registrados en las pruebas de flotación 42
8.6. Anexo F: Cambios en el cálculo de la concentración 46
8.7. Anexo G: Datos para el cálculo de consumo mensual 47

Índice de figuras

Figura 3-1. Estructura cristalina de la molibdenita mostrando dos capas de esta. (Ramana et al, 2008) 2
Figura 3-2. Recuperación según el pH de molibdenita para distintos tamaños de partícula. (Li et al, 2018) 2
Figura 3-3. Efecto del pH sobre el equilibro entre las distintas especies del ácido sulfhídrico (Park et al., 2014) 4
Figura 3-4: Principales áreas de la planta concentradora: (1) Chancado primario; (2) Molienda y flotación colectiva; (3) Flotación selectiva, filtros de concentrado y acopio de concentrados. 5
Figura 3-5 Plano áreas de planta molibdeno. 6
Figura 3-6. Esquema de celdas de flotación selectiva. 7
Figura 3-7. Esquema de estanques (TK) y equipos planta reactivos. 9
Figura 3-8. Diagramas de cajas y bigotes para los potenciales ORP registrados entre junio y agosto de 2019. 11
Figura 3-9. Leyes de molibdeno para el concentrado de cada etapa y la pulpa de alimentación. Se indica en cada caso el promedio del periodo. 12
Figura 3-10. Leyes de cobre para el concentrado de cada etapa y la pulpa de alimentación. Se indica en cada caso el promedio del periodo. 12
Figura 3-11. Leyes de fierro para el concentrado de cada etapa y la pulpa de alimentación. Se indica en cada caso el promedio del periodo. 13
Figura 3-12. Recuperación metalúrgica y por peso para el molibdeno de las etapas rougher y el global de la planta selectiva. 13
Figura 4-1. Sistema de control para preparar la solución de NaHS. 17
Figura 5-1. Resultados metalúrgicos de pruebas en celda de 1,5 L. 18
Figura 5-2. Resultados de prueba cinética sin uso de NaHS. Se indican los valores para las leyes parciales de Mo de cada concentrado y la recuperación acumulada hasta el momento. 19
Figura 5-3. Resultados prueba cinética con uso de NaHS y potencial objetivo de -550 mV. Se indican los valores para las leyes parciales de Mo de cada periodo y la recuperación acumulada hasta el momento. 20
Figura 5-4. Espuma estable no generada por aireación de la pulpa. 20
Figura 5-5. Leyes obtenidas para alimentación, concentrado y cola para las tres pruebas indicadas. 21
Figura 5-6. Recuperaciones metalúrgicas y en peso para las 3 pruebas indicadas. 22
Figura 5-7. Potenciales registrados para dos pruebas (SC 1 y -500 mV), con los respectivos periodos de flotación. 23
Figura 5-8. Relación de la disminución de potencial en función del ORP previo a la dosificación. 23
Figura 5-9. Resultados metalúrgicos pruebas con distinto gas de flotación. 25

Figura 5-10. Resultados metalúrgicos pruebas a distinto potencial de operación. 26
Figura 5-11. Nueva lógica de preparación de NaHS. 27
Figura 5-12. ORP medidos entre los meses de junio y agosto para las etapas de 1 a 3º limpieza. 28
Figura 5-13. Duración de la carga del camión durante el año 2019. 29
Figura 5-14.Dosificación mensual de depresante por masa de pulpa procesada. 30
Figura 8-1. Datos del contenido de sólidos en la alimentación de la planta entre febrero y junio, y datos de pH de alimentación y cola flotación primaria entre diciembre y junio. 34
Figura 8-2. Comparativa FRX-AQ para el Mo en la alimentación y concentrado primario. 35
Figura 8-3. Comparativa FRX-AQ para el Mo en la cola primaria y concentrado 1º limpieza. 35
Figura 8-4. Comparativa FRX-AQ para el Mo en los concentrados de 2º y 3º limpieza. 35
Figura 8-5. Comparativa FRX-AQ para el Mo en los concentrados de 4º limpieza y espesador de Mo (final). 36
Figura 8-6. Comparativa FRX-AQ para el Cu en la alimentación y concentrado primario 36
Figura 8-7. Comparativa FRX-AQ para el Cu en la cola primaria y concentrado 1º limpieza. 36
Figura 8-8. Comparativa FRX-AQ para el Cu en los concentrados de 2º y 3º limpieza. 37
Figura 8-9. Comparativa FRX-AQ para el Cu en los concentrados de 4º limpieza y espesador de Mo (final). 37
Figura 8-10. Comparativa FRX-AQ para el Fe en la alimentación y concentrado primario. 37
Figura 8-11. Comparativa FRX-AQ para el Fe de la cola primaria y concentrado 1º limpieza. 38
Figura 8-12. Comparativa FRX-AQ para el Fe de los concentrados de 2º y 3º limpieza. 38
Figura 8-13. Comparativa FRX-AQ para el Fe de los concentrados de 4º limpieza y espesador de Mo (final). 38
Figura 8-14. Comparativa de recuperación primaria y global calculada a partir de los datos de FRX y AQ. 39
Figura 8-15. Potencial ORP prueba con celda 1,5 L. a -400 mV. En gris se indica inicio periodo acondicionamiento y en rojo el periodo de flotación. Línea punteada indica el potencial objetivo. Las líneas horizontales indican los distintos cuartiles. 42
Figura 8-16. Potencial ORP (azul) y dosificación de NaHS (verde) prueba con celda 1,5 L. a -550 mV. En gris se indica inicio acondicionamiento y en rojo el periodo de flotación. Línea punteada indica el potencial objetivo. Se indican los distintos cuartiles durante la flotación. 43
Figura 8-17. Potencial ORP (azul) y dosificación de NaHS (verde) prueba cinética con celda 3 L. En gris se indica inicio acondicionamiento y en rojo el periodo de flotación. Línea punteada indica el potencial objetivo. Se indican los distintos cuartiles durante la flotación. 43
Figura 8-18. Potencial ORP (azul) y dosificación de NaHS (verde) prueba con celda 3 L. a -500 mV. En gris se indica inicio acondicionamiento y en rojo el periodo de flotación. Línea punteada indica el potencial objetivo. Se indican los distintos cuartiles durante la flotación. 43
Figura 8-19. Potencial ORP (azul) y dosificación de NaHS (verde) prueba SC 1. En gris se indica inicio acondicionamiento y en rojo el periodo de flotación. Se indican los distintos cuartiles durante la flotación. 44
Figura 8-20. Potencial ORP (azul) y dosificación de NaHS (verde) prueba SC 2. En gris se indica inicio acondicionamiento y en rojo el periodo de flotación. Se indican los distintos cuartiles durante la flotación. 44
Figura 8-21. Potencial ORP (azul) y pH (naranjo) prueba -550 mV y nitrógeno realizada en Fosfoquim. Línea punteada indica el potencial objetivo. 44
Figura 8-22. Potencial ORP (azul) y pH (naranjo) duplicado prueba -550 mV y nitrógeno realizada en Fosfoquim. Línea punteada indica el potencial objetivo. 45

Figura 8-23. Potencial ORP (azul) y pH (naranjo) prueba -550 mV y aire realizada en Fosfoquim. Línea punteada indica el potencial objetivo. 45
Figura 8-24. Potencial ORP (azul) y pH (naranjo) duplicado prueba -550 mV y aire realizada en Fosfoquim. Línea punteada indica el potencial objetivo. 45
Figura 8-25. Potencial ORP (azul) y pH (naranjo) prueba -600 mV y nitrógeno realizada en Fosfoquim. Línea punteada indica el potencial objetivo. 46
Figura 8-26. Potencial ORP (azul) y pH (naranjo) duplicado prueba -600 mV y nitrógeno realizada en Fosfoquim. Línea punteada indica el potencial objetivo. 46
Figura 8-27. Ajuste realizado para estimar el valor de balance del mes de agosto en función de la masa de concentrados obtenidos. 47

Índice de tablas

Tabla 3-1. Variables de planta con poca variabilidad. 10
Tabla 4-1. Plan de cambio de concentración de depresante. 17
Tabla 5-1. Resultados de dosificación de NaHS y ORP para las pruebas en celda de 1,5 L. La dosis de NaHS inicial se refiere a previo a flotación. 18
Tabla 5-2. Datos de leyes de alimentación, valores de ORP y recuperación en peso total de pruebas cinéticas. 19
Tabla 5-3. Resultados de consumo de NaHS y ORP medidos para las pruebas indicadas. Dosis inicial de NaHS se refiere a antes de comenzar flotación. 21
Tabla 5-4. Resultados de pH, ORP y dosificación de NaHS para la comparación del gas de flotación. 25
Tabla 5-5. Datos de pH, ORP y dosificación de NaHS para pruebas a distinto potencial. 26
Tabla 8-1. Datos relativos al cálculo de consumo mensual de depresante. 47
Tabla 8-2. Continuación tabla 8-1. 48
Tabla 8-3. Continuación tabla 8-1 48

1. Introducción

El proyecto Caserones, de la compañía minera Lumina Copper Chile, es una faena nueva que comenzó su construcción el año 2010, y las operaciones el año 2014, con una gran inversión de más de US$4 mil millones, y que hasta el momento sigue avanzando en alcanzar su máxima capacidad de producción y la estabilidad del proceso.

Debido a esto, se han tomado diversas medidas para mejorar la producción y disminuir los costos, con el fin de lograr los objetivos planteados y llegar a cumplir todas las metas de la faena, todo esto oficializado en el plan "Lumina 2020".

Dentro de este plan, durante el año 2018, se reestructuró la organización de la planta concentradora, separando por un lado las áreas de conminución y flotación colectiva, y por otro las áreas de flotación selectiva y filtros de concentrado. Este cambio se tradujo en un gran impulso en la producción de concentrado de molibdeno y estandarización de la operación entre los distintos turnos de trabajo.

Pese a esto, cuando ocurre un problema operacional en la planta de flotación selectiva los operadores, supervisores de terreno y sala de control deciden como modificar las variables operacionales, buscando subsanar el problema y mejorar los resultados metalúrgicos, sin que dichas modificaciones sean probadas con anterioridad a menor escala, como ocurre en la planta colectiva, lo que conlleva a una pérdida de tiempo y recursos cuando la problemática no logra ser solucionada. Por otro lado, no se tiene la certeza de que las condiciones de operación utilizadas corresponden a los valores óptimos para maximizar la producción de molibdeno asegurando la calidad del concentrado final.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Estudiar el efecto de los reactivos utilizados en el resultado metalúrgico de la planta de flotación selectiva de minera Caserones. Esto con el fin de evaluar las opciones existentes para disminuir el consumo de reactivos, con la consiguiente disminución de costos, sin repercutir en la producción de la planta.

2.2. Objetivos específicos

- Analizar la relación entre la dosificación de depresante y el ORP de la pulpa.
- Estudiar el resultado metalúrgico de la flotación selectiva bajo distintos ORP, replicando las etapas de la planta en una celda de laboratorio.
- Evaluar el efecto de la concentración del depresante.

3. Antecedentes

3.1. Flotación de molibdeno

Dentro de los yacimientos de cobre porfídicos, el molibdeno se encuentra principalmente como un sulfuro llamado Molibdenita (MoS_2). Este mineral presenta una estructura cristalina laminar con anisotropía teniendo dos tipos de enlaces: Mo-S y S-S, como se puede ver en la Figura 3-1:

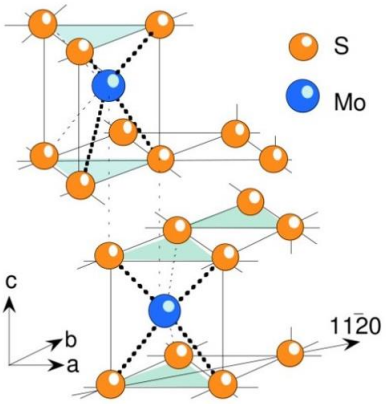


Figura 3-1. Estructura cristalina de la molibdenita mostrando dos capas de esta. (Ramana et al, 2008)

Los enlaces Mo-S son covalentes y de alta energía mientras que los S-S son tipo Van de Waals de baja energía, lo que hace que los bordes de una lámina de molibdenita sean hidrófilos y las caras sean hidrófobas. Es decir, cuando se tiene una molibdenita con predominancia de sitios cara, se observa un fenómeno de flotabilidad natural (Castro et al, 2016).

Debido a la estructura laminar, dicha predominancia se da siempre que el mineral no se encuentre sobre fracturado, y esto se puede ver en la figura 3.2, en donde la recuperación pese a existir diferencias para distintos pH, tiene grandes disminuciones al disminuir el tamaño de la partícula.

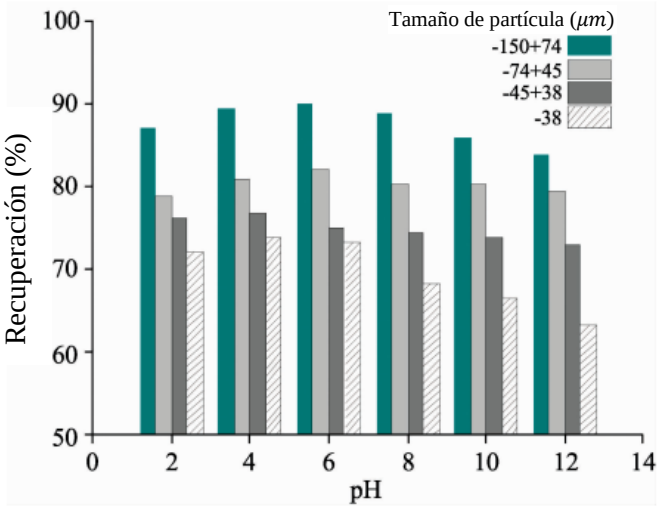


Figura 3-2. Recuperación según el pH de molibdenita para distintos tamaños de partícula. (Li et al, 2018)

Esta flotabilidad natural, permite la generación de un concentrado colectivo, en donde se centran los esfuerzos por maximizar la recuperación de cobre, intentando no impactar la flotabilidad del molibdeno, para luego, en una etapa posterior, depresar el cobre, permitiendo la separación de ambas especies mineralógicas una vez que la mayoría de la ganga es eliminada.

Este proceso de depresión es posible porque el cobre, a diferencia del molibdeno, no presenta flotabilidad natural, por lo que necesita de cambios en la superficie del mineral para conferir esta característica a la partícula. Esto se logra con la adición de colectores, que son capaces de unirse al cobre, y entregarle la capacidad de flotar.

Uno de los principales reactivos para lograr la separación del mineral de cobre y el colector utilizado, es el sulfhidrato de sodio (NaHS) también nombrado "*NaSH*", que en medio acuoso libera el ion HS^-. Este ion genera la desorción del colector desde la superficie del mineral por su acción reductora, y, por ejemplo, para el caso del mineral calcosina y el colector xantato se tienen las siguientes reacciones:

$$Cu_2S \cdot Cu_2X_2 + HS^- \leftrightarrow Cu_2S \cdot Cu_2S + 2X^- + H^+ \quad (1)$$

$$Cu_2S \cdot X_2 + HS^- \leftrightarrow Cu_2S + 2X^- + H^+ \quad (2)$$

Es importante indicar, como se puede ver en las reacciones anteriores, que el uso de NaHS para la depresión del cobre no elimina el colector, por lo que si disminuye la concentración del ion HS^-, por su oxidación u otra reacción, el cobre se unirá nuevamente al colector, recuperando su flotabilidad.

Por otra parte, debido a la flotabilidad natural del molibdeno, y su anisotropía, puede ser necesario la utilización de otros reactivos para mejorar el proceso de flotación. Estos corresponden al reactivo mata espuma y colector de molibdeno. El rol de estos reactivos es evitar excesos de espumación que pueda acarrear problemas operacionales, y disminuir la hidrofilidad de los sitios bordes, respectivamente.

3.1.1. Sulfhidrato de sodio

El sulfhidrato de sodio o NaHS es una sal alcalina sintetizada a partir de ácido sulfhídrico e hidróxido de sodio. Es utilizado como reactivo en la minería, la industria del papel, la fabricación de colorantes, la desulfuración del rayón y el celofán y el apelambrado y blanqueado de cuero (Fosfoquim S.A., 2008).

Es un compuesto sólido incoloro que en solución y en contacto con el oxígeno del aire adquiere un tono amarillo, es usado principalmente en solución con concentraciones entre 20 y 45%, y cuenta con alta estabilidad en transporte y almacenamiento, pero en contacto con la humedad del aire, libera gas sulfhídrico que presenta una alta toxicidad en bajas concentraciones (desde 10 ppm (U.S. CSB, 2004)). Esta reacción ocurre porque la sal al contacto con el agua se hidroliza generando un equilibrio entre el H_2S, el HS^- y el S^{-2}.

Por último, el ion HS^- tiene carácter reductor, lo que permite estimar su concentración dentro de la pulpa mediante la medición del potencial redox u *ORP*. Esta relación está directamente asociada con el pH de la pulpa, ya que el equilibrio entre las 3 especies es dependiente del pH como se puede ver en la Figura 3.3:

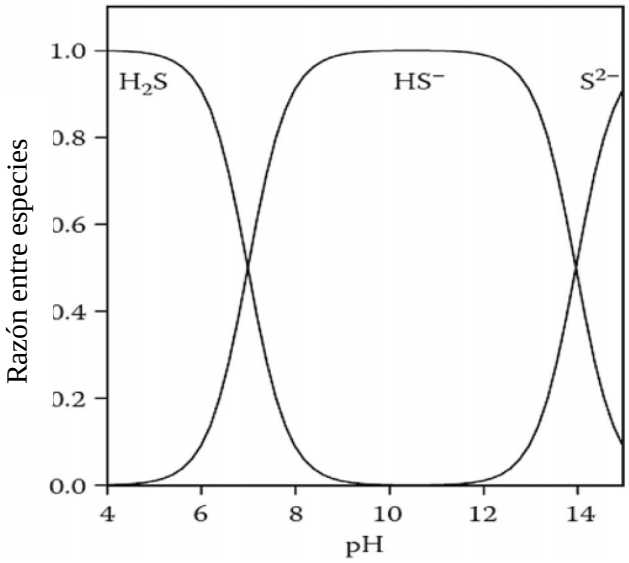


Figura 3-3. Efecto del pH sobre el equilibrio entre las distintas especies del ácido sulfhídrico (Park et al., 2014)

Esto implica que tanto el potencial, como el pH de la pulpa juegan un rol importante en la depresión del cobre en la flotación de molibdeno. Pero también la presencia de agentes oxidantes, como el oxígeno del aire, que consumen este reactivo por vías alternativas.

3.1.2. Mata-espuma

En la planta de molibdeno de Caserones, el mata espuma utilizado corresponde al reactivo P-4000, que es un reactivo orgánico líquido a base de polipropilenglicoles. Para su uso, es necesaria su dilución en algún compuesto orgánico como el kerosene o el diésel.

Como su nombre indica, se utiliza para disminuir el exceso de espumación en las celdas o cajones de traspaso, evitando de esta forma problemas operacionales como excesivo colchón de espuma o falla de lectura en sensores de nivel.

3.1.3. Colector de molibdeno

Como se indicó anteriormente, el exceso de sitios bordes puede disminuir la flotabilidad del molibdeno. Situación que puede ser evitada utilizando un colector de molibdeno.

Algunos de los reactivos utilizados son compuestos no polares como el diésel, kerosene o el MIBC. Dentro de la planta de flotación selectiva de Caserones no se adiciona colector directamente, pero se agrega diésel tanto en la flotación colectiva, como en la adición de mata espuma.

3.2. Planta concentradora de minera Caserones

La planta de producción de concentrados de cobre y molibdeno de minera Caserones está ubicada a 118 km al sureste de la ciudad de Copiapó, y aproximadamente 6 km de la frontera con Argentina, en la comuna de Tierra Amarilla. Las áreas de producción se encuentran divididas físicamente en dos sectores: la planta de molienda y flotación colectiva, y la planta de flotación selectiva y filtros de concentrado, según se puede ver en la Figura 3.4:

Figura 3-4: Principales áreas de la planta concentradora: (1) Chancado primario; (2) Molienda y flotación colectiva; (3) Flotación selectiva, filtros de concentrado y acopio de concentrados.

La flotación de sulfuros se realiza en la flotación colectiva mediante un circuito *Rougher-Cleaner-Scavenger* (RCS), donde la flotación primaria (*Rougher*) está formada por 2 líneas paralelas de 8 celdas convencionales, que alimentan la etapa de 1° limpieza (*Cleaner*), compuesta por 2 celdas convencionales, llevando el concentrado a la 2° limpieza, formada por 2 celdas columnares que producen el concentrado colectivo que alimenta la planta de flotación selectiva. El relave de la 1° limpieza es ingresado a la etapa de barrido (*Scavenger*). Los relaves de la etapa primaria y de barrido son llevados a los depósitos de relaves y el resto de las corrientes son recirculadas al circuito para evitar pérdidas.

Por otro lado, la flotación selectiva se realiza en un circuito RC en contracorriente, en donde el concentrado colectivo alimenta una etapa de flotación primaria con 7 celdas convencionales y 4 etapas de limpieza convencional totalizando 11 celdas, existiendo además una etapa de limpieza columnar, que se encuentra fuera de servicio. El relave de la etapa primaria corresponde al concentrado de cobre que produce la planta, y es llevado a los filtros de cobre para su disposición final, y el concentrado de la etapa de 4° limpieza conforma el concentrado de molibdeno, que alimenta el filtro de molibdeno.

3.2.1. Superintendencia de operaciones de molibdeno

La planta de flotación selectiva se encuentra bajo la administración de la superintendencia de operaciones de molibdeno, en conjunto con las áreas de espesamiento, filtros, envasado de molibdeno y planta de reactivos, observándose el plano del área en la Figura 3.5:

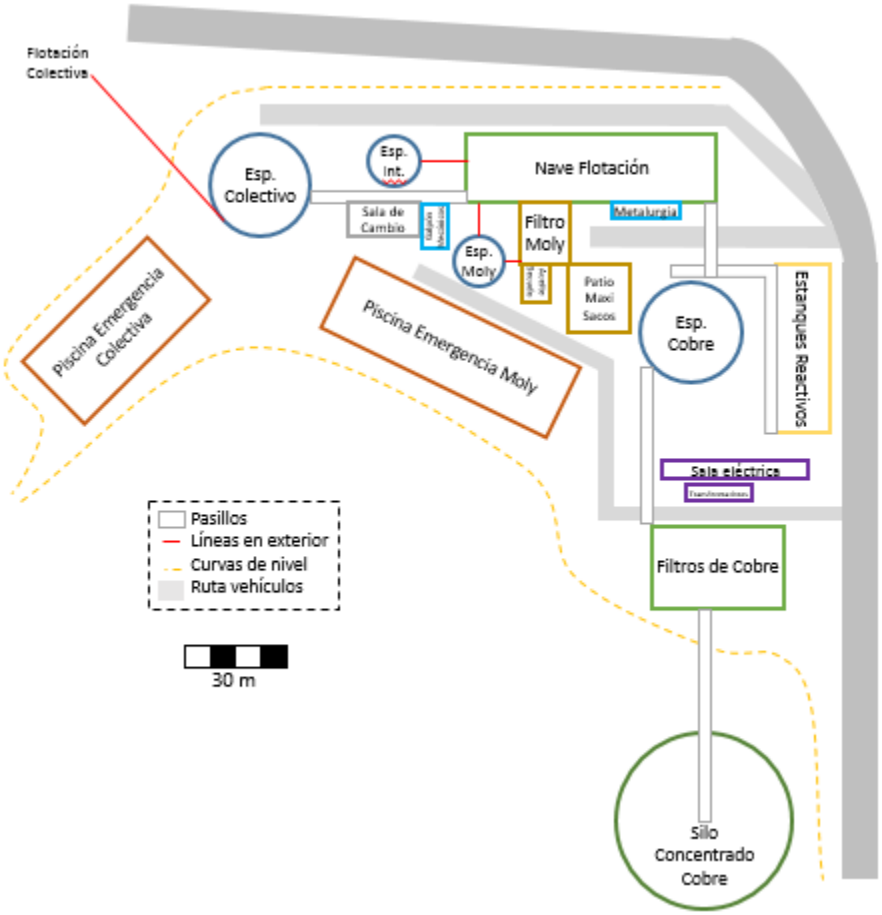


Figura 3-5 Plano áreas de planta molibdeno.

3.2.1.1. Espesadores

Dentro de la operación de la planta de flotación selectiva existen 4 espesadores, correspondientes a:

- Colectivo: Principal pulmón para la alimentación de la planta. Recibe el concentrado final proveniente de la planta de flotación colectiva. Su principal función es la recuperación de agua de proceso con la consiguiente eliminación de reactivos residuales en dicha agua. Su descarga es llevada al cajón de alimentación de la flotación en donde se realiza el ajuste del porcentaje de sólidos.
- Cobre: Espesador en donde se acumula el concentrado de cobre proveniente de la flotación y que actúa como pulmón para la operación de los filtros de cobre. Recuperar agua de la pulpa, es el primer paso de disminución de humedad para lograr los estándares del producto final.

- Intermedio: Espesador que originalmente estaría como punto intermedio entre las etapas de flotación convencional y columnar, asegurando la alimentación continúa de la columna. Actualmente, y debido a que la columna se encuentra fuera de servicio, se utiliza como punto de almacenaje de pulpa, o para evitar la contaminación del concentrado final, cuando la flotación presenta algún problema.
- Molibdeno: Espesador donde se acumula el concentrado de molibdeno proveniente de la flotación, actuando como pulmón del filtro de molibdeno. Al igual que el espesador de cobre, su función de espesamiento permite ser la primera disminución de la humedad de la pulpa para lograr el concentrado final.

Los espesadores colectivo y cobre tienen un diámetro de 30 m, y los intermedio y molibdeno, 15 m.

3.2.1.2. Flotación selectiva

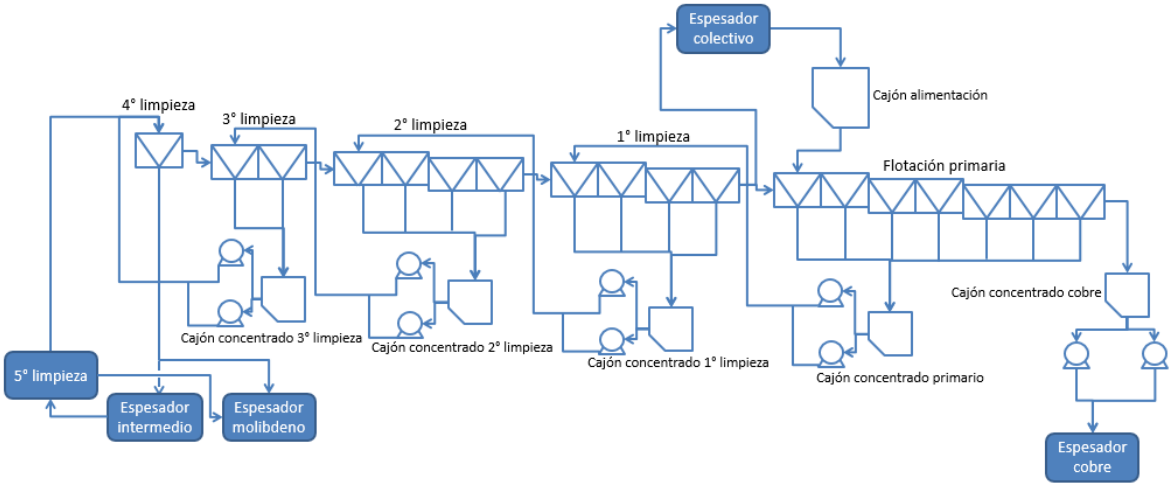


Figura 3-6. Esquema de celdas de flotación selectiva.

De acuerdo con lo indicado anteriormente, la flotación selectiva está conformada por una etapa primaria, y 5 etapas de limpieza, dispuestas de la siguiente manera:

- Etapa primaria: 7 celdas dispuestas en 3 bancos, en configuración 2-2-3 de 1000 pie^3 (28,32 m^3) cada una. La alimentación se realiza en la primera de estas, y el resto de las celdas se alimentan mediante el traspaso de los relaves correspondientes, hasta llegar a la 7° celda que descarga, por el relave, el concentrado de cobre final. Los concentrados de cada celda son acumulados en un cajón para su traspaso a la 1° limpieza.
- Etapa de 1° limpieza: 4 celdas dispuestas en 2 bancos, en configuración 2-2 del mismo tamaño que la etapa primaria. La alimentación ocurre en la primera de las celdas, alimentando el resto de igual manera que la etapa primaria, descargando el relave de 4° celda en la primera celda de la etapa primaria. Los concentrados son acumulados para su traspaso a la 2° limpieza. En caso de emergencia o para vaciar el circuito, existe una línea que lleva el relave de esta etapa devuelta al espesador colectivo para su posterior reprocesamiento.

- Etapa de 2° limpieza: Misma configuración que la etapa anterior, pero con celdas de 300 pie^3 (8,50 m^3) cada una. El relave de esta etapa alimenta la 1° limpieza y el concentrado la 3° limpieza.
- Etapa de 3° limpieza: 2 celdas dispuestas en 1 banco de 300 pie^3 cada una. Flujos de relave y concentrado son llevados a la 2° y 4° limpieza respectivamente.
- Etapa de 4° limpieza: 1 celda de 300 pie^3. Actualmente, última etapa de limpieza del proceso de flotación. En operación normal descarga el concentrado en el espesador de molibdeno, pero existe línea para su traspaso al espesador intermedio en caso de obtener un concentrado de mala calidad.
- Etapa de 5° limpieza: 1 celda columnar de 8 m de altura y 1,3 m de diámetro. En el diseño de la planta, la 4° limpieza descargaba en el espesador intermedio, y luego de este, se alimentaba esta etapa, obteniéndose el concentrado final de molibdeno. En la actualidad, por los buenos resultados obtenidos en la 4° limpieza, no es utilizada regularmente.

En la última celda de cada banco se encuentran sensores de niveles de pulpa y espuma para controlar la carga, la profundidad de espuma y los traspasos de relaves y existen sensores de ORP en la última celda de la 1° y 4° limpieza, en la segunda celda de la 2° limpieza, y en las últimas celdas del primer y último banco de la flotación primaria para controlar la adición de depresante. Por último, el gas utilizado para flotar es aire enrarecido, que corresponde a aire con menor contenido de oxigeno y que se obtiene mediante la recirculación de este y un sistema que impide el ingreso de aire fresco a las celdas.

3.2.1.3. Filtros de cobre

El concentrado de cobre, contenido en el espesador del mismo nombre, es llevado al área de filtros de cobre para alcanzar la humedad final de transporte. Para esto, la planta cuenta con 2 filtros de placas horizontales, de 12 placas y 72 m^2 de área filtrante cada uno.

Los filtros llevan el concentrado de cobre desde una humedad aproximada de 35% a 9% (base húmeda) y que luego, por correas transportadoras son llevadas al silo de acopio final, desde donde se cargan los camiones que lo llevan a puerto.

3.2.1.4. Envasado de molibdeno

Esta área incluye el filtro de molibdeno, la secadora, el silo de acopio y la ensacadora. En esta etapa, el concentrado final de molibdeno, proveniente del espesador del mismo nombre es llevado desde cerca de 60% humedad a 5% humedad (base húmeda) para luego ser ensacado y cargado en los camiones que los llevan a destino para el procesamiento final.

Esta área comienza con el filtro de molibdeno, que es un filtro de placas horizontales, con 6 placas y 9,5 m^2 de área filtrante. A diferencia de los filtros de cobre, este cuenta con un sistema de retro lavado para mejorar la limpieza de las telas. Después del proceso de filtrado, el concentrado alcanza una humedad de 9% (base húmeda).

Posteriormente, mediante tornillos, el concentrado es transportado a la secadora, de discos y calentada por aceite, en donde se logra una humedad final de 5%. Luego, el concentrado descargado se almacena en el silo, para el ensacado final, en donde se cargan 1,6 t por saco.

3.2.1.5. Planta de reactivos

En esta área es donde se encuentran las bombas y estanques para el almacenaje y preparación de reactivos, ubicándose físicamente tanto en el galpón de reactivos como dentro de la nave de flotación, como se puede ver en el esquema de la Figura 3-7. Dentro de la planta de molibdeno, se utilizan 3 reactivos: NaHS, P-4000 y diésel.

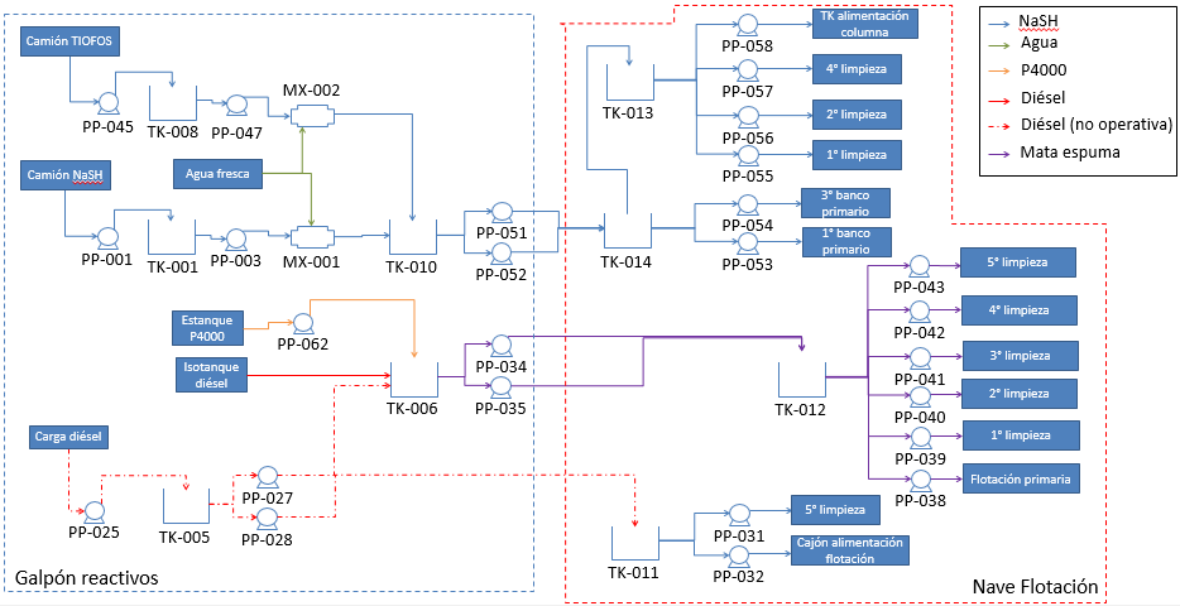


Figura 3-7. Esquema de estanques (TK) y equipos planta reactivos.

El sulfhidrato es transportado hasta las instalaciones por camiones con una concentración de 43%, y almacenado en un estanque con capacidad de 210 m^3, que luego es trasvasijado a otro estanque, con capacidad de 50 m^3, disminuyendo la concentración. Finalmente, se trasvasija a los estanques de uso diario, 2 estanques con capacidad de 10 m^3 cada uno, desde los cuales se adiciona el reactivo a las celdas de flotación. En la Figura 3.7 se puede ver la existencia de una línea para la utilización del reactivo TIOFOS, pero este no logro un buen rendimiento de la planta, por lo que se descartó su uso.

El P-4000, con función de mata espuma, es llevado en isotanques de 1 m^3, y que luego se trasvasija al estanque de preparación y almacenamiento, mezclándolo con diésel en una relación 1:9. Luego de esto se trasvasija al estanque de uso diario, desde el cual se adiciona la mezcla a la flotación.

Para el caso del diésel, dentro de la planta de flotación selectiva, solo se adiciona en la mezcla mata espuma. Para esto, se usa un estanque de 1 m^3, que se llena cada vez que se realiza la preparación, mediante un camión aljibe petrolero. Pese a esto, existen las líneas, y los estanques de almacenamiento y uso diario para su adición como colector de molibdeno.

3.3. Proceso de flotación planta selectiva

De acuerdo con lo indicado anteriormente, la planta selectiva de minera Caserones corresponde a un circuito de flotación RC, con 7 celdas de flotación primaria convencional,

11 celdas de limpieza convencional y 1 celda de flotación columnar (esta última no utilizada normalmente).

Para el control del proceso de flotación se tienen distintas variables medidas y manipuladas tanto en terreno, como mediante sensores y el sistema de control. Las variables son:

- Variables de terreno:
  - Leyes Mo, Cu y Fe de alimentación, concentrados y cola primaria. (muestras tomadas por operador, resultados entregados por el área de metalurgia)
  - Porcentaje de sólidos en alimentación
  - Flujo de aire enrarecido a cada celda
  - Velocidad de rebose de concentrado
  - Calidad de espuma obtenida
- Variables sistema de control
  - Medidas
    - ORP en celdas
    - pH de alimentación y cola flotación primaria
    - Nivel de pulpa en celda
    - Profundidad de espuma
    - Nivel en cajones de concentrados
  - Manipuladas
    - Flujo volumétrico y másico alimentación
    - Adición de agua en cajón de alimentación
    - Estado de operación bombas de pulpa y reactivos
    - Apertura dardos de traspaso de colas

Debido a las distintas relaciones existentes entre estas variables, el operador de terreno y el supervisor CIO, mantienen una continua comunicación para modificar variables y mantener o mejorar los resultados obtenidos y lograr los parámetros de operación definidos.

Algunas de estas variables se mantienen en un rango relativamente constante, como las observadas en la Tabla 3.1. De estas es importante indicar que no se realiza un control sobre el pH en la planta selectiva y solo son el resultado de lo realizado en la flotación colectiva y la adición de NaSH en las celdas. El detalle de lo indicado en la Tabla 3.1 se encuentra en el Anexo A.

Tabla 3-1. Variables de planta con poca variabilidad.

Variable	Media	Rango intercuartílico
% de sólidos	48,8%	48-50%
pH de alimentación	8,25	8,01-8,45
pH de cola rougher	12,12	11,97-12,54

En otros casos, se modifican de acuerdo con la operación y los resultados obtenidos, como son el nivel de espuma o pulpa con variaciones de 10 mm por cambio, adecuándose el aire desde terreno y el flujo de traspaso de colas; el ORP, con intervalos de operación de -550 a -650 mV, teniéndose los valores observados en la Figura 3-8 para los meses de junio

a agosto de 2019, en donde se puede ver que en la mayoría de las etapas se opera generalmente a potenciales menores a -600 mV y que existe una mayor variabilidad en la 3ª limpieza, ya que no cuenta con adición directa de reactivo (el lazo de control de esta etapa se encuentra relacionado con la bomba que impulsa a la etapa de 4ª limpieza).

Es importante indicar que en el periodo mostrado en la Figura 3.8 existieron detenciones, mantención de sensores u otras situaciones ajenas al funcionamiento normal de la planta generando datos anómalos que fueron excluidos del análisis presentado.

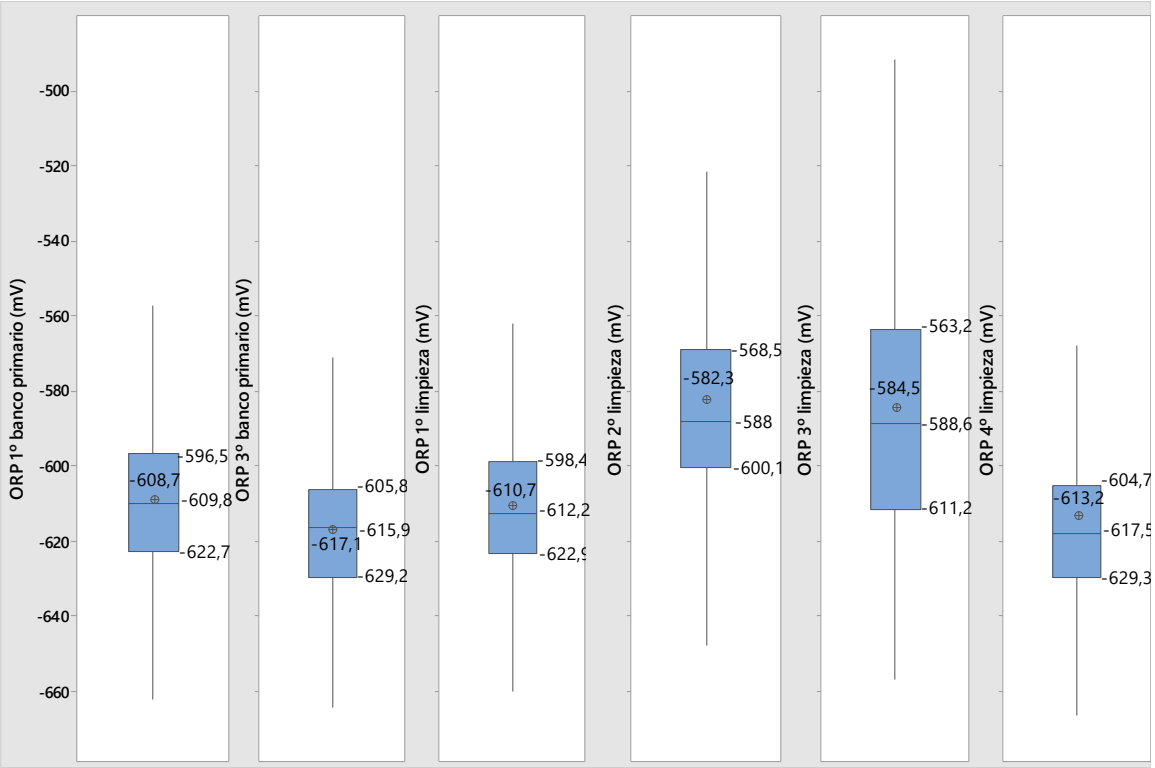


Figura 3-8. Diagramas de cajas y bigotes para los potenciales ORP registrados entre junio y agosto de 2019.

Por último, como se indicó anteriormente, las leyes de alimentación y concentrados no se encuentran en línea, por lo que existe un plan de muestreo para conocer los resultados de la planta y sus distintas etapas, llevando cada dos horas una muestra de cada punto para su análisis mediante fluorescencia de rayos X (FRX), para luego formar un compósito por turno que es analizado en el laboratorio químico.

El diseño de la planta considera una cierta depresión de cobre y concentración de molibdeno por etapa, pero ya que la celda columna (5º limpieza) se encuentra fuera de servicio, los valores obtenidos en la planta se alejan de dichos valores. En las Figuras 9 a 11 se pueden observar las leyes de cada concentrado junto con la alimentación para las 3 principales especies durante el periodo diciembre 2018 a agosto 2019, y en la Figura 12 se observa la recuperación metalúrgica y por peso, calculadas a partir del balance de masa, para la etapa primaria (*rougher*) y el global de la planta selectiva:

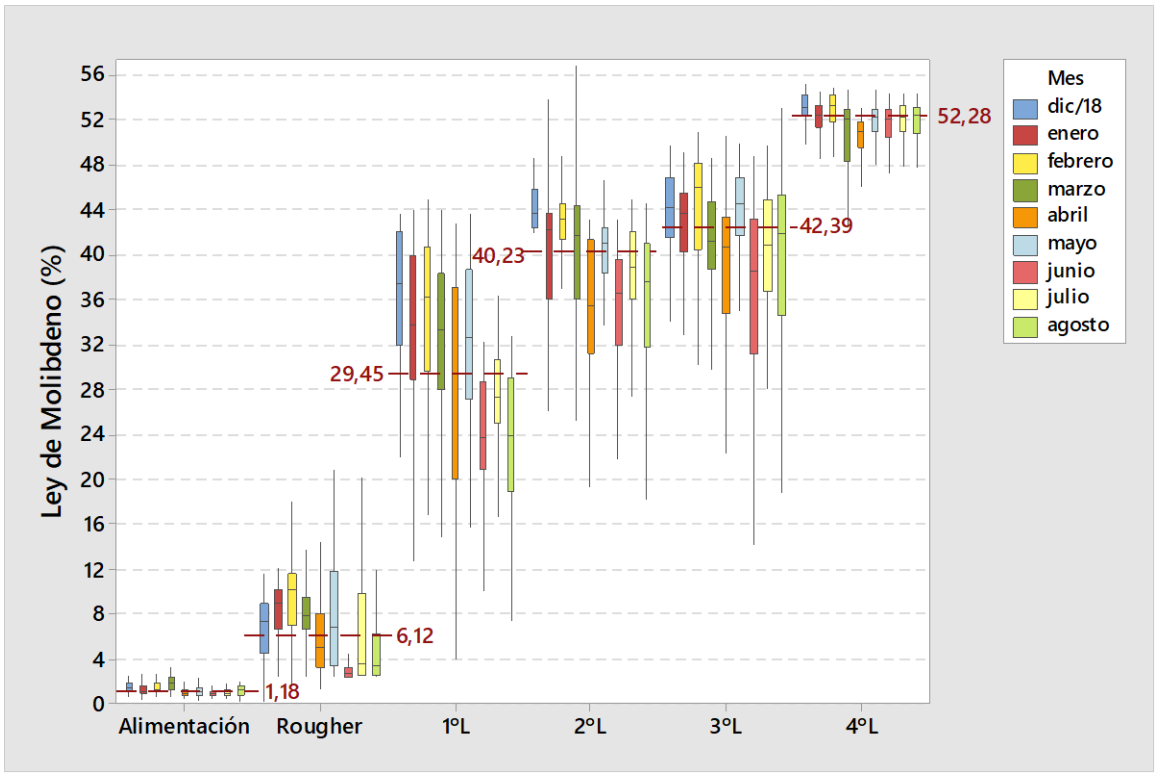


Figura 3-9. Leyes de molibdeno para el concentrado de cada etapa y la pulpa de alimentación. Se indica en cada caso el promedio del periodo.

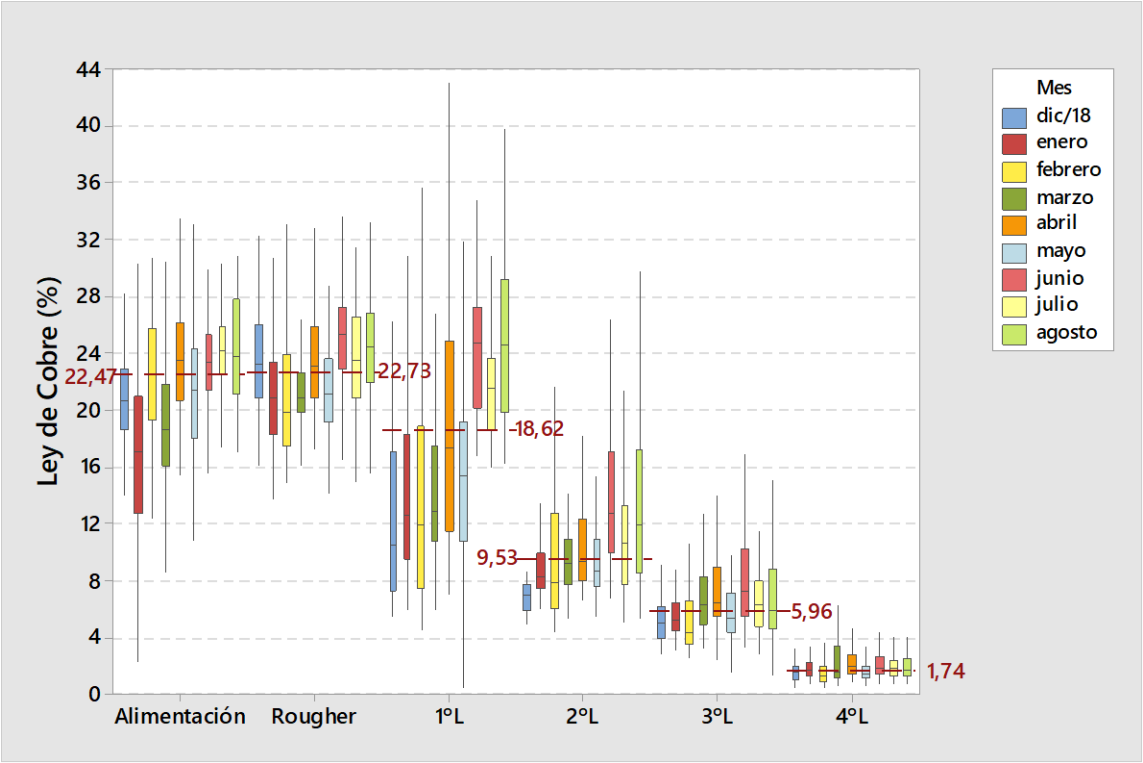


Figura 3-10. Leyes de cobre para el concentrado de cada etapa y la pulpa de alimentación. Se indica en cada caso el promedio del periodo.

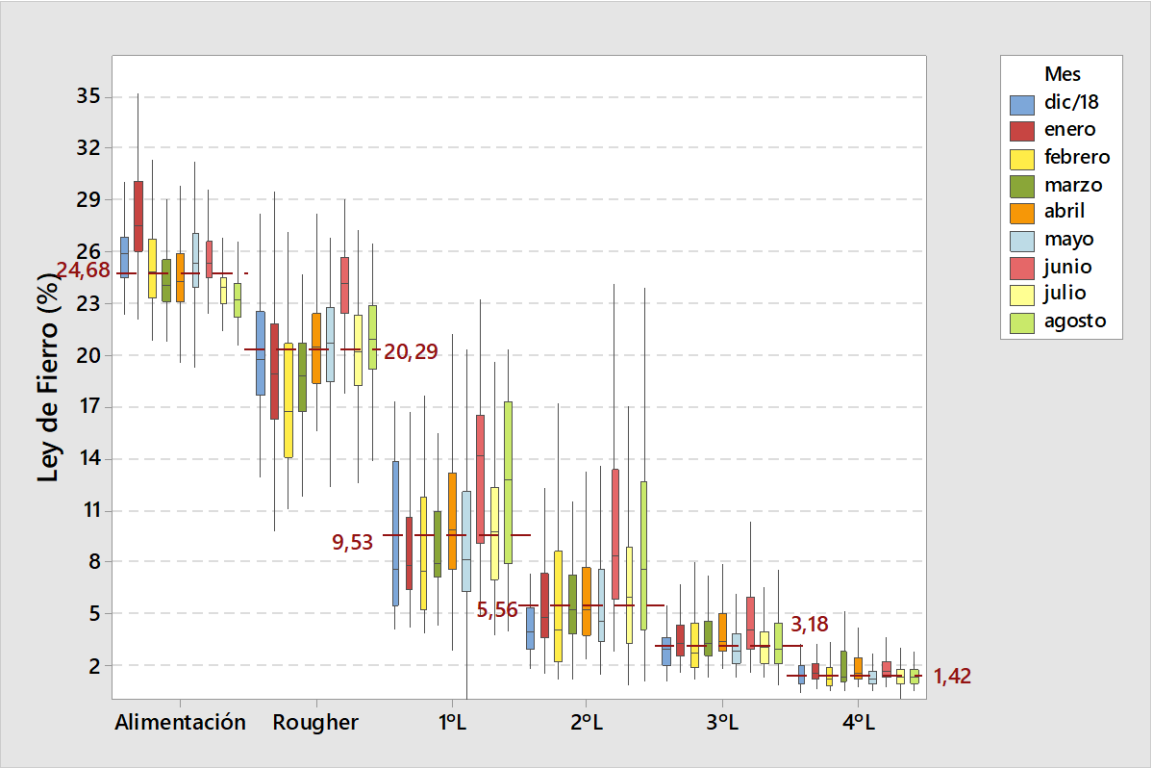


Figura 3-11. Leyes de fierro para el concentrado de cada etapa y la pulpa de alimentación. Se indica en cada caso el promedio del periodo.

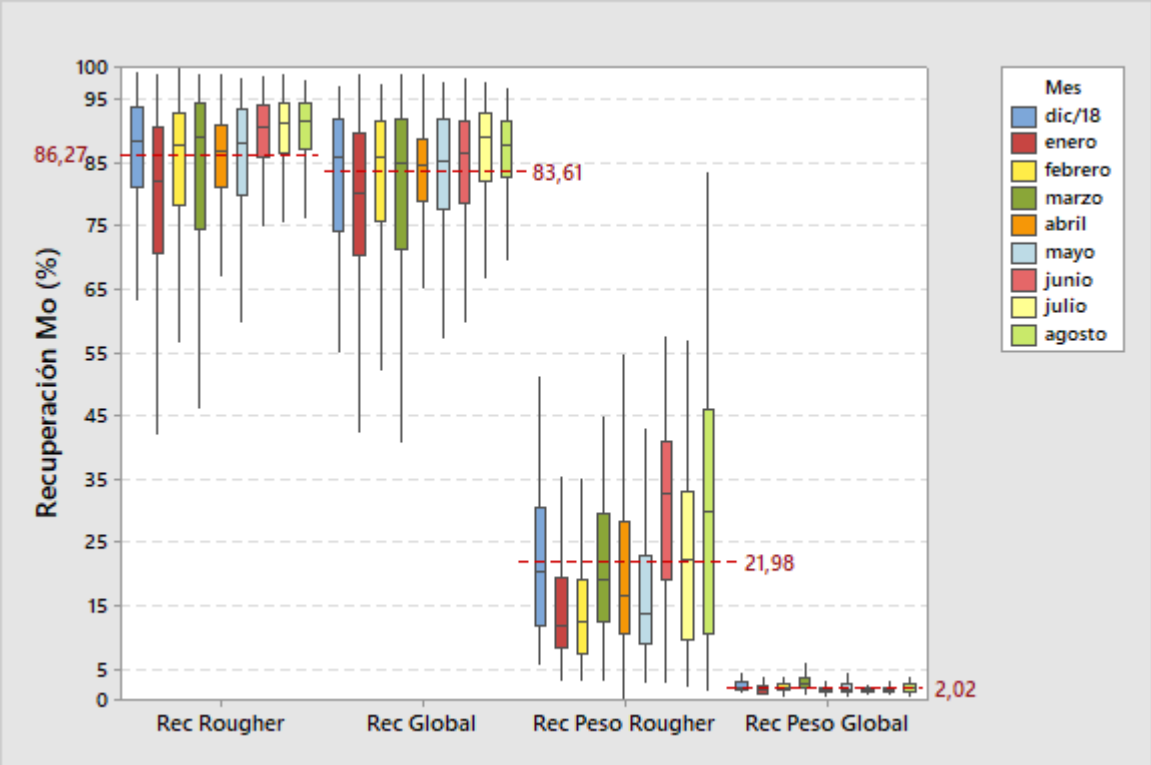


Figura 3-12. Recuperación metalúrgica y por peso para el molibdeno de las etapas rougher y el global de la planta selectiva.

De estos valores se puede observar que las etapas *rougher* y 1º limpieza son las etapas principales para el resultado de la planta. Esto porque en estas dos etapas se realiza la mayor separación entre ambos concentrados, logrando un piso importante para evitar la etapa eliminada, junto con disminuir la cantidad de pulpa en las etapas posteriores, que cuentan con celdas más pequeñas y menor cantidad de celdas por etapa.

Es importante indicar, que en el periodo junio-agosto 2019 existen diferencias a lo obtenido anteriormente como son: una disminución en el intervalo de leyes de Mo en el concentrado de la 1º limpieza, aumento de las leyes de Cu en los concentrados *rougher* y 1º limpieza, y una menor variabilidad en las recuperaciones de la etapa *rougher*.

4. Metodología

Para lograr los objetivos planteados anteriormente, se siguieron dos caminos. El primero, fue confeccionado a partir de la información de la planta y la relación entre el consumo de reactivo NaHS y el potencial ORP, al respecto, se trata de buscar el potencial óptimo, idealmente menor, para cada etapa. El segundo, surgió durante la realización del primero, e implicó la modificación de una variable dentro de la planta: la concentración del depresante que se adicionaba a la flotación.

4.1. Búsqueda del potencial óptimo de operación.

Para la realización de este camino se realizaron diversas pruebas de flotación en el laboratorio del área de metalurgia de la planta selectiva, como en las instalaciones de la empresa Fosfoquim, proveedor del reactivo depresante.

4.1.1. Pruebas realizadas dentro de Caserones

Las pruebas realizadas en el laboratorio de metalurgia de la planta selectiva fueron llevadas a cabo en una celda Metso Denver D-12 auto aspirante con distintas condiciones, ya que la empresa no cuenta con un estándar de flotación en laboratorio para la planta selectiva. Las diferentes condiciones evaluadas fueron:

- Tamaño de celda: 1,5 y 3 L.
- Concentración de depresante NaHS: 43 y 20,5% p/p
- % sólidos según muestra de planta. Se midieron valores entre 45% y 58%.
- Punto de muestreo: Descarga espesador colectivo y cajón de alimentación (DI)
- Agitación: 1000-1300 rpm
- Nivel de carga inicial: 0,7 a 3,7 cm del labio.
- Tiempo de flotación: 3 a 10 min para pruebas de flotación, 30 min para pruebas cinéticas. En este último caso, se muestrea a los tiempos: 1, 3, 7, 13, 20 y 30 min.
- Apertura de válvula auto aspirante: 50 o 100%
- ORP promedio objetivo: desde -400 mV

Para la realización de estas pruebas, el procedimiento general a seguir fue:

1. Tomar muestra de pulpa:

   a. Abrir válvula de venteo.
   b. Esperar estabilización de flujo de pulpa.
   c. Llenar recipiente, tomando el total del flujo a intervalos discontinuos.
   d. Cerrar válvula.
2. Cargar pulpa en celda hasta nivel requerido, agitando muestra continuamente de forma manual para mantener homogeneidad, tomando muestra para conocer la ley de alimentación.
3. Revisar que la válvula de aire se encuentre cerrada.
4. Iniciar agitación en celda a valor requerido.
5. Medir valor de ORP de la pulpa.
6. Agregar reactivo depresante (NaHS), en cantidad suficiente para alcanzar el ORP buscado, registrando el volumen utilizado.
7. Acondicionar pulpa por 2 min y revisar estabilidad del ORP buscado.
8. Comenzar flotación, abriendo válvula auto aspirante, iniciando contador de tiempo.
9. Paletear espuma cada 10 s.
10. Agregar más NaHS si potencial aumenta.
11. Al alcanzar tiempo de flotación, registrar cantidad total de reactivo utilizado.
12. Filtrar y secar concentrado, muestra del remanente dentro de la celda (Cola) y muestra de alimentación para conocer leyes mediante FRX.

En el caso de las pruebas cinéticas se tomaron concentrados separados para los periodos de 1, 3, 7, 13, 20 y 30 min, contabilizando, además, las masas de cada concentrado y realizando el filtrado del total de pulpa remanente dentro de la celda.

Como se indica en el punto 12, solo se realizó análisis de leyes por FRX en función de los tiempos de entrega de resultados para muestras especiales del laboratorio químico. Debido a esto, para asegurar la confiabilidad de los valores obtenidos se realizó un análisis comparativo entre ambas medidas para las muestras de planta, detallado en el Anexo B.

Por otra parte, como se indicó anteriormente, al no existir un estándar para esta prueba en el laboratorio, el trabajo realizado sirvió para generar el procedimiento de la prueba de flotación de la planta selectiva en conjunto con el área de metalurgia, que se encuentra en el Anexo C

4.1.2. Pruebas realizadas en Fosfoquim

Las pruebas realizadas en el laboratorio de la empresa Fosfoquim en Santiago, fueron realizados en una celda de fabricación interna, con sistema para regular el flujo de gas utilizado, además de la posibilidad de emplear nitrógeno o aire comprimido como gas de flotación.

Para la ejecución de estas pruebas se tomó una muestra de la descarga del espesador colectivo, durante el día 01 de abril de 2019, junto con muestras de agua fresca utilizada en el proceso para la adecuación del contenido de sólidos. Estas fueron envasadas húmedas y enviadas a Santiago. El traslado demoró aproximadamente un mes por lo que las pruebas se realizaron entre los días 29 de abril y 03 de mayo.

A diferencia de las pruebas en Caserones, estas fueron realizadas por personal de Fosfoquim con supervisión del memorista y se tuvo una menor variabilidad en las condiciones de las pruebas realizadas, teniéndose los siguientes valores (En blanco los correspondientes al estándar de Fosfoquim):

- Tamaño de celda: 1,8 L
- Concentración de depresante NaHS: 32% p/p
- ORP objetivo: -550 o -600 mV
  - % sólidos: 50%
  - Agitación: 1000 rpm
  - Tiempo flotación: 8 min para pruebas de flotación, 20 min para cinéticas con tiempos de 0,5, 2, 4, 10 y 20 min.
  - Flujo de gas: 1,5 L/min para nitrógeno, 2 L/min para aire
  - Intervalo de paleteo: 10 s.

Las pruebas fueron realizadas en duplicado, comparando el efecto del gas utilizado a -550 mV, y las diferencias en el resultado y consumo de depresante NaHS al cambiar de -550 a -600 mV.

El procedimiento para llevar a cabo las pruebas es el mismo que el anterior, con la diferencia que se realiza la adecuación del % de sólidos, estimándose el nivel actual por la densidad de la pulpa, lo que permite conocer la masa de pulpa necesaria (2,05 kg), para luego rellenar con agua hasta la capacidad de la celda.

4.2. Cambio en la concentración de depresante NaHS

El diseño de la planta de flotación selectiva consideraba utilizar el depresante NaHS a una concentración en peso de 10%, pero por razones que no pudieron ser determinadas, se utilizaba una dilución de 32,8% (calculado a partir de proceso de mezclado y contrastado mediante la densidad de solución (Anexo D)).

Además, se pudo observar que la operación de las bombas de dosificación de reactivo era muy intermitente y propensa a sobrepasar el potencial objetivo, situación que pudiera estar relacionada a que la dosis impulsada, aún cuando las bombas cuentan con un sistema de regulación del volumen impulsado, fuera mayor a la necesaria.

Junto con esto, se observaron dos hechos relacionados durante la realización del trabajo en planta. En primer lugar, a mediados de mayo de 2019 ocurrió una falla en la comunicación con la válvula de adición de agua al estanque de preparación de NaHS, disminuyendo la concentración del reactivo en el estanque. La solución resultante fue utilizada en la planta sin observarse perjuicios en los resultados de esta.

En segundo lugar, las pruebas de flotación realizadas en el laboratorio fueron, en su mayoría, realizadas con una muestra de NaHS tomada del estanque de preparación el día posterior a la falla indicada anteriormente, en donde se midió una concentración de 20,5%, en donde no se observaron problemas para alcanzar los potenciales o de depresión del cobre. Esto entrega

indicios de que es posible disminuir la concentración de los valores actuales y mejorar el proceso de dosificación.

Para realizar la dilución del reactivo, el sistema de control cuenta con una variable llamada "razón de agua" que cuantifica la cantidad agua que se necesita adicionar por unidad de reactivo trasvasijado desde el estanque de almacenamiento (TK-01) al de preparación y distribución (TK-10) como se puede ver en la Figura 4.1.

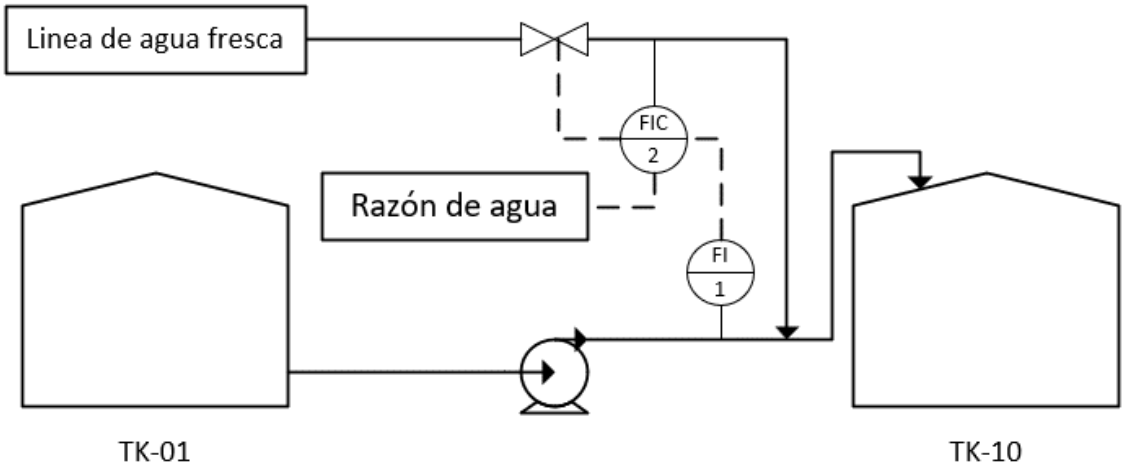


Figura 4-1. Sistema de control para preparar la solución de NaHS.

Esta razón de agua se encontraba en un valor de 0,4 y se propone un aumento de 0,2 semanal en un periodo de 5 semanas alcanzando una concentración final de 20,5%, mostrado en la Tabla 4.1:

Tabla 4-1. Plan de cambio de concentración de depresante.

	Razón de agua	Concentración obtenida
Semana 0	0,4	32,8%
Semana 1	0,6	29,3%
Semana 2	0,8	26,5%
Semana 3	1,0	24,1%
Semana 4	1,2	22,2%
Semana 5	1,4	20,5%

Para monitorear los efectos del plan, se revisó el funcionamiento de las bombas, los resultados metalúrgicos, el consumo de reactivo NaHS y el funcionamiento de estanques y líneas por donde se transporta el reactivo.

Este plan, consideraba las semanas según el turno 7x7 de la minera, por lo tanto, se inició el primer día del grupo 2-1 (día-noche), comenzando durante la madrugada del 18 de julio de 2019.

5. Resultados

5.1. Búsqueda del potencial óptimo de operación

5.1.1. Pruebas realizadas en Caserones

En primer lugar, es importante indicar que como existe una gran variabilidad entre una prueba y otra, considerando las condiciones mostradas en la sección 4.1.1, junto con que la mayoría de las flotaciones fueron realizadas con muestras tomadas en días distintos, no se logró tener un resultado absoluto para un potencial óptimo, pero se pudo observar algunas tendencias y situaciones que permiten indicar la dirección a seguir.

Con la celda de 1,5 L se realizaron 2 pruebas, con la misma muestra, tomada el 22 de mayo, a -400 y -550 mV, y una agitación de 1300 rpm. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.1 y Figura 5.1:

Tabla 5-1. Resultados de dosificación de NaHS y ORP para las pruebas en celda de 1,5 L. La dosis de NaHS inicial se refiere a previo a flotación.

	Dosis NaHS inicial (kg/t)	Dosis NaHS (kg/t)	ORP promedio (mV)	Rango intercuartílico (RIC) (mV)
Prueba -400 mV	0,256	2,137	-348,4	235,6
Prueba -550 mV	0,683	3,452	-507,5	100,3

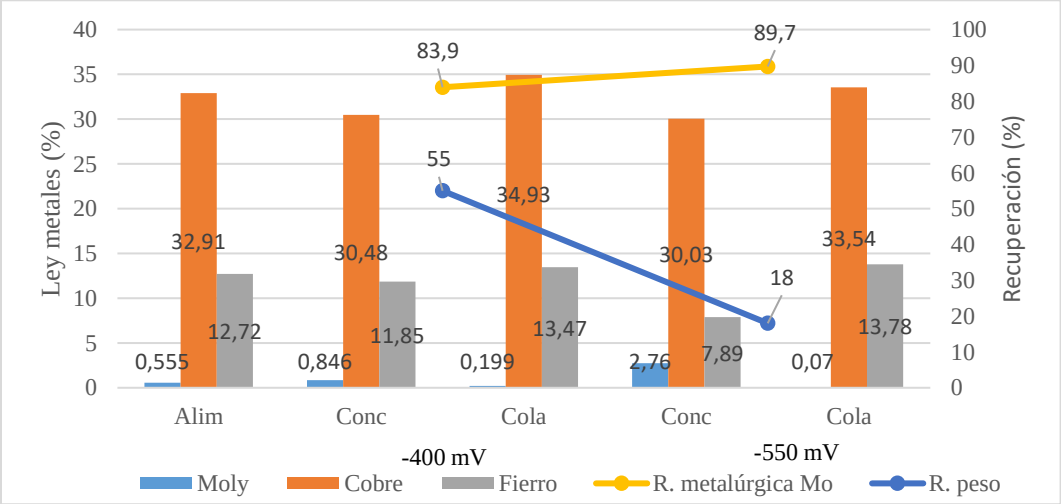


Figura 5-1. Resultados metalúrgicos de pruebas en celda de 1,5 L.

De estos resultados, se pueden destacar principalmente tres situaciones, las diferencias en el consumo de NaHS, la variabilidad del ORP medido, y la recuperación en peso.

Esto, porque en términos metalúrgicos, se observa un aumento de casi 6 puntos en la recuperación, con una mejor ley de molibdeno al trabajar a -550 mV (0,85 vs 2,76), observándose una depresión de cobre similar pero mejor separación de fierro.

En termino de consumo, se necesitó más de 2,5 veces la cantidad de reactivo para alcanzar los 150 puntos menos de potencial, y pese a que se obtuvo un mayor control de éste durante la flotación a -550 mV, el consumo fue de 61,5% más alto. Por otro lado, revisando los potenciales medidos, en ninguno de los casos se logró un potencial promedio cercano al

objetivo (cerca de 50 mV de diferencia en ambas pruebas), pero el RIC de la prueba de -400 mV es 134,9% mayor, indicando que un potencial más positivo es más inestable y propenso a la oxidación.

Por último, la recuperación en peso en la prueba de -400 mV es casi 40 puntos más alta, alcanzando un 55%. Esto indica que más de la mitad de la masa cargada en la celda salió por el concentrado. Esto se da porqué al tener una baja depresión de cobre por potenciales muy positivos (25% del ORP medido se encuentra entre -145,1 y -238,5 mV, valores medidos se encuentran en anexo E), el cobre flota libremente, y se genera una gran cantidad de espuma, arrastrando el molibdeno, propiciando la alta recuperación obtenida.

Esta diferencia también indica una problemática que se podría generar al operar la planta a potenciales tan positivos. Esto porque la generación excesiva de concentrado sobrecargaría las etapas posteriores y como se indicó anteriormente, la capacidad de las etapas va disminuyendo, ya sea por menor número de celdas en la etapa, o menor tamaño de éstas, aumentando aún más el efecto negativo del aumento de masa de concentrado.

Posteriormente, se realizó el cambio de celda (3 L), y algunas pruebas para encontrar el volumen útil y las condiciones de agitación y aireación para operarla. Se define así, una agitación de 1250 rpm, un volumen de 2912 mL (0,9 cm del labio) y utilizar la válvula auto aspirante completamente abierta

Se procede a realizar pruebas cinéticas para encontrar el tiempo de flotación, en dos casos: operando sin NaHS y a un potencial objetivo de -550 mV. Obteniéndose los resultados observados en la Tabla 5.2 y Figuras 5.2 y 5.3, junto con ajuste de modelo cinético (Garcia-Zuñiga, 1935) para encontrar las recuperaciones máximas:

Tabla 5-2. Datos de leyes de alimentación, valores de ORP y recuperación en peso total de pruebas cinéticas.

	Mo alim. (%)	Cu alim. (%)	Fe alim. (%)	ORP promedio (mV)	RIC (mV)	R. peso (%)
Sin NaHS	1,12	27,41	21,76			11,9
Con NaHS	0,72	19,74	24,96	-567,5	25,5	3,7

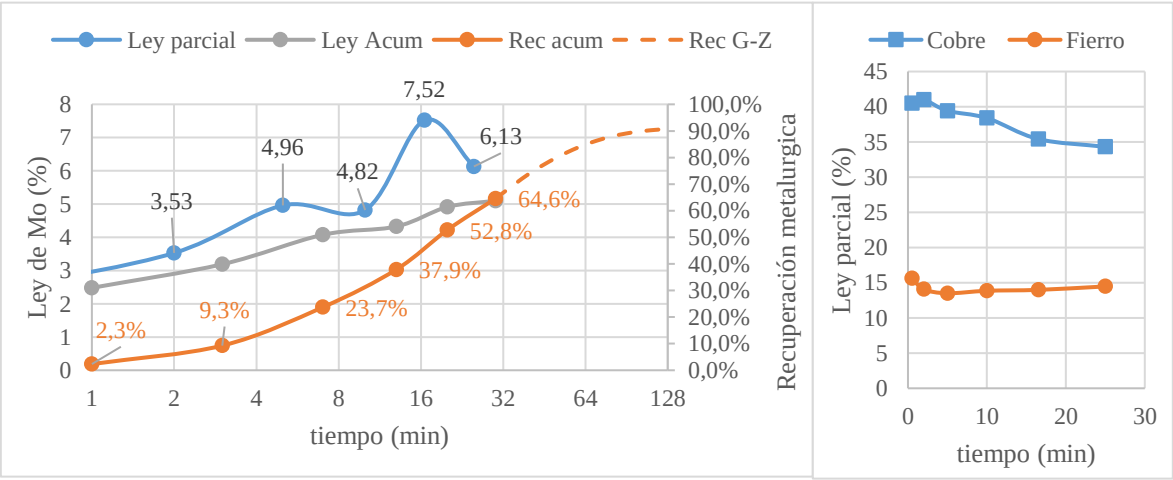


Figura 5-2. Resultados de prueba cinética sin uso de NaHS. Se indican los valores para las leyes parciales de Mo de cada concentrado y la recuperación acumulada hasta el momento.

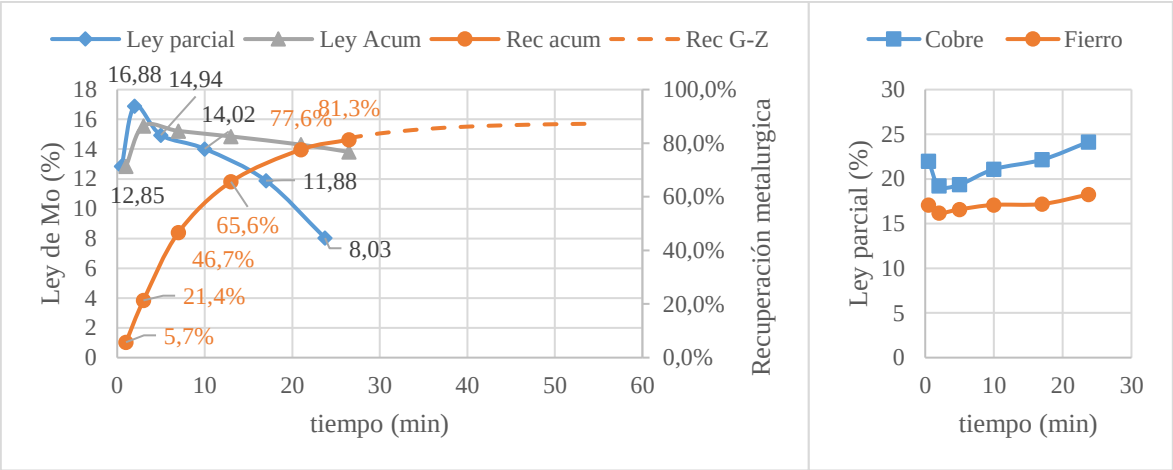


Figura 5-3. Resultados prueba cinética con uso de NaHS y potencial objetivo de -550 mV. Se indican los valores para las leyes parciales de Mo de cada periodo y la recuperación acumulada hasta el momento.

De estas pruebas se puede ver que, al flotar sin NaHS, se concentra el cobre de gran manera (Ley de alimentación de 27,4% y leyes parciales de concentrado entre 35 y 40%) y que a medida que este se va agotando dentro de la celda, se obtienen mejores concentrados de molibdeno, pero dentro de los 30 minutos de flotación, para las condiciones establecidas, no se logra agotar la celda.

Para el caso con NaHS, se obtiene el comportamiento esperado para una prueba cinética desde el segundo concentrado hacia adelante, flotando mayoritariamente molibdeno, lo que genera un aumento de la ley de cobre en el tiempo. Se observa también, que al igual que el caso sin NaHS, no se logra agotar la celda dentro de los 30 minutos, pero que la curva de recuperación se acerca al límite.

El primer punto es un valor anómalo para las distintas leyes, pero que se puede relacionar, de acuerdo con lo observado en la experimentación, a una espuma muy estable que se generaba antes de comenzar la prueba (Figura 5-4).

Figura 5-4. Espuma estable no generada por aireación de la pulpa.

Esta espuma, no se mezclaba con el resto de la pulpa, y por lo tanto no tenía el efecto del depresante u otra condición y es desplazada al comenzar la flotación, afectando el resultado en el primer periodo. Pese a esto, esta condición no afectaría la flotación dentro de la planta ya que el reactivo es adicionado en los cajones de traspaso y estos conectan con la celda en un punto intermedio de éstas, propiciando la mezcla y eliminando la posibilidad de que alguna porción de la pulpa no tenga contacto con el reactivo.

Por último, y pese a que ambas cinéticas fueron realizadas con muestras distintas, con diferencias importantes en las leyes de alimentación, se observa una mayor recuperación de molibdeno al utilizar NaHS (81,3 vs 64,6%), mayor ley de concentrado (13,8 vs 5,1%) pero una menor recuperación en peso (3,7 vs 11,9%) mostrando el efecto que tiene el reactivo y que es posible depresar el cobre y separar ambos minerales con un potencial de -550 mV.

La idea de realizar las pruebas cinéticas era obtener un tiempo óptimo de flotación para adecuar la celda de laboratorio a la etapa primaria de la planta, sin embargo, los resultados obtenidos no permiten su definición.

En base a la disponibilidad y coordinación del tiempo con los operadores del área de metalurgia, se decide utilizar un tiempo de 10 min para las pruebas futuras.

A continuación, se realizaron pruebas con las condiciones indicadas anteriormente (agitación, nivel de pulpa, aire, tiempo) para 2 condiciones: -500 mV y sobreconsumo de reactivo (SC), llamadas así porque se adiciona una gran cantidad de NaHS previo a la flotación, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 5.3 y Figuras 5.5 y 5.6:

Tabla 5-3. Resultados de consumo de NaHS y ORP medidos para las pruebas indicadas. Dosis inicial de NaHS se refiere a antes de comenzar flotación.

	Dosis NaHS inicial (kg/t)	Dosis NaHS (kg/t)	ORP promedio (mV)	RIC (mV)
Prueba -500 mV	0,349	1,063	-514,1	95,1
Prueba SC 1	2,221	2,221	-580,1	4,4
Prueba SC 2	1,063	1,489	-553,9	4,2

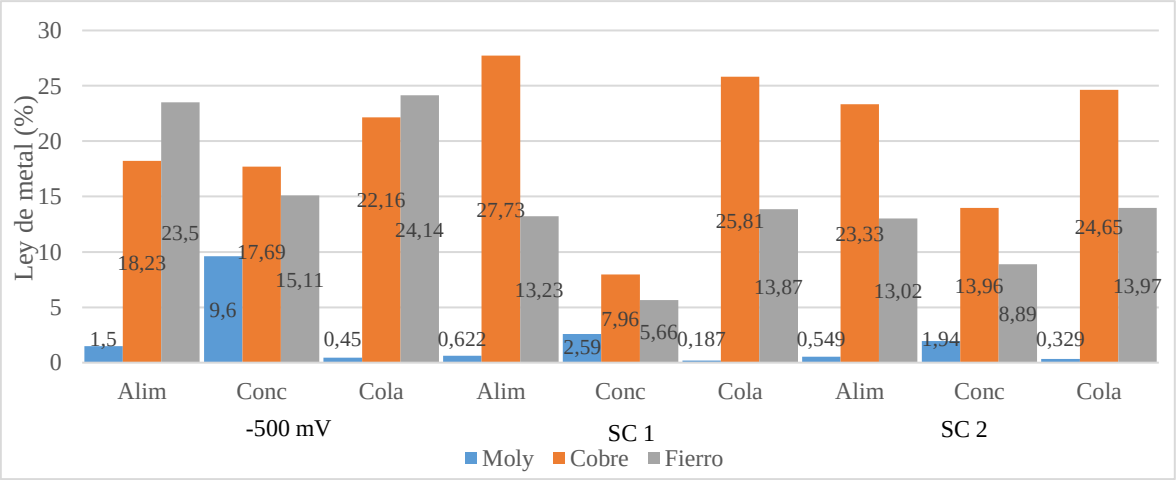


Figura 5-5. Leyes obtenidas para alimentación, concentrado y cola para las tres pruebas indicadas.

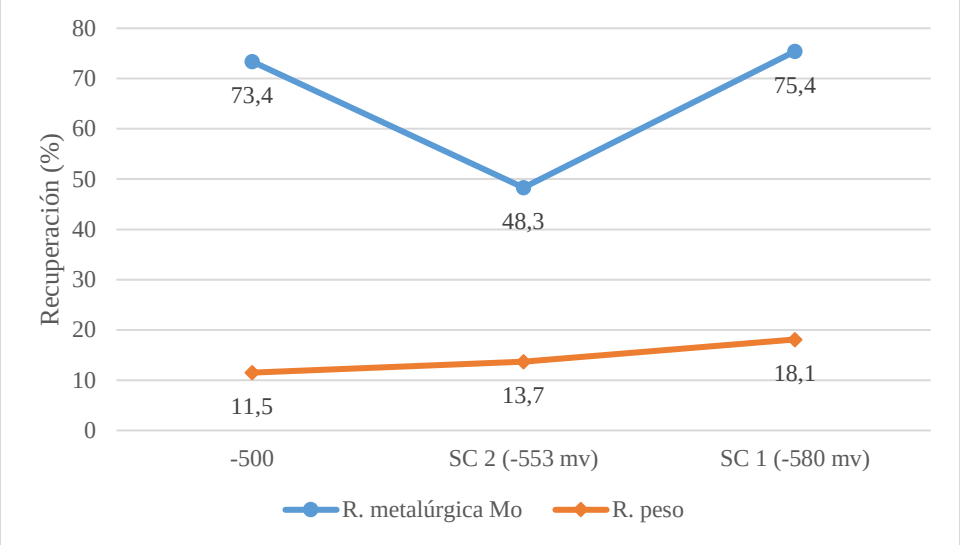


Figura 5-6. Recuperaciones metalúrgicas y en peso para las 3 pruebas indicadas.

En primer lugar, de la Tabla 5-3, se puede observar un comportamiento similar a los indicados anteriormente, en donde potenciales más electropositivos son más inestables, generando una mayor variabilidad. Pese a esto, para el mismo tiempo de flotación, se utiliza una menor cantidad de reactivo, relacionado a la diferencia del potencial utilizado.

Luego, al revisar los resultados metalúrgicos de cada prueba, se observa que para la prueba de -500 mV, se logra un aumento considerable de la ley de molibdeno, pero no tan buena recuperación, y baja depresión de cobre (menor al 3%). Por otro lado, las pruebas de sobreconsumo no logran concentrar de gran manera el molibdeno, pero depresan en gran cantidad el cobre, con disminución de la ley de cobre en el concentrado de 71,3 y 40,2% respectivamente. En este caso, la recuperación de la primera prueba fue levemente mejor que la prueba de -500 mV, pero no se repite el comportamiento en la segunda prueba.

Esto es importante, porque a pesar de tener algunas diferencias en las leyes de alimentación, las muestras tomada para las pruebas de sobreconsumo fueron obtenidas en el mismo momento, pero las pruebas fueron realizadas en días distintos y en el segundo caso, con la mitad de la dosis inicial, generando grandes diferencias tanto en el potencial logrado como en las recuperaciones y en la depresión del cobre.

Por otro lado, las pruebas de sobreconsumo de NaHS tienen una diferencia importante con respecto a las pruebas realizadas anteriormente, que es la necesidad de adicionar más reactivo durante el tiempo de flotación. Como las pruebas fueron realizadas con aire, la pulpa se oxidaba al flotar y, por lo tanto, se necesitaba adicionar más reactivo para mantener el potencial. Esta situación no ocurre de igual manera al agregar un exceso de NaHS, en donde, no se alcanzó un potencial muy bajo (-580,1 o -553,9 mV) pero este no se ve afectado por el oxígeno y se mantiene estable durante el tiempo, como se puede ver en la siguiente figura:

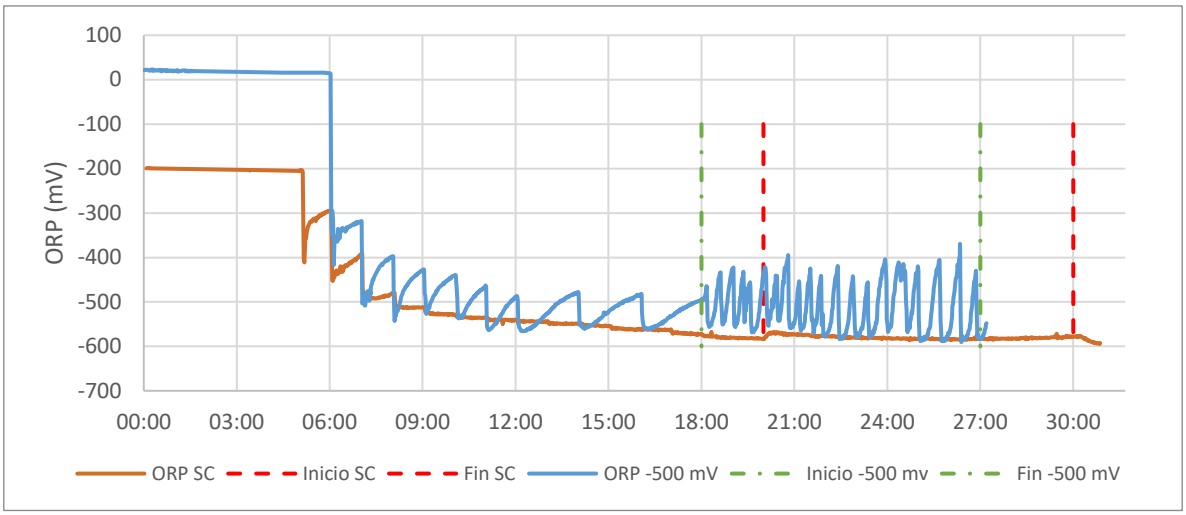


Figura 5-7. Potenciales registrados para dos pruebas (SC 1 y -500 mV), con los respectivos periodos de flotación.

Esto indica que, en la prueba de sobreconsumo, el potencial se saturó y aun cuando la concentración de NaHS era mayor, esta no impacto en el valor de ORP.

Por otro lado, en cada prueba durante el periodo anterior a la flotación, se adicionaba el reactivo con pequeñas dosis cada 1 min, observando el valor alcanzado y su estabilidad para decidir el comienzo de la flotación, situación que se logra ver claramente en la curva de ORP de la prueba de -500 mV (Figura 5.7). Esta situación fue analizada, comparando el valor previo a la dosis, con la reducción de potencial lograda, asociado a la dosis de NaHS utilizado, como se puede ver en las superficies de contorno de la Figura 5.8:

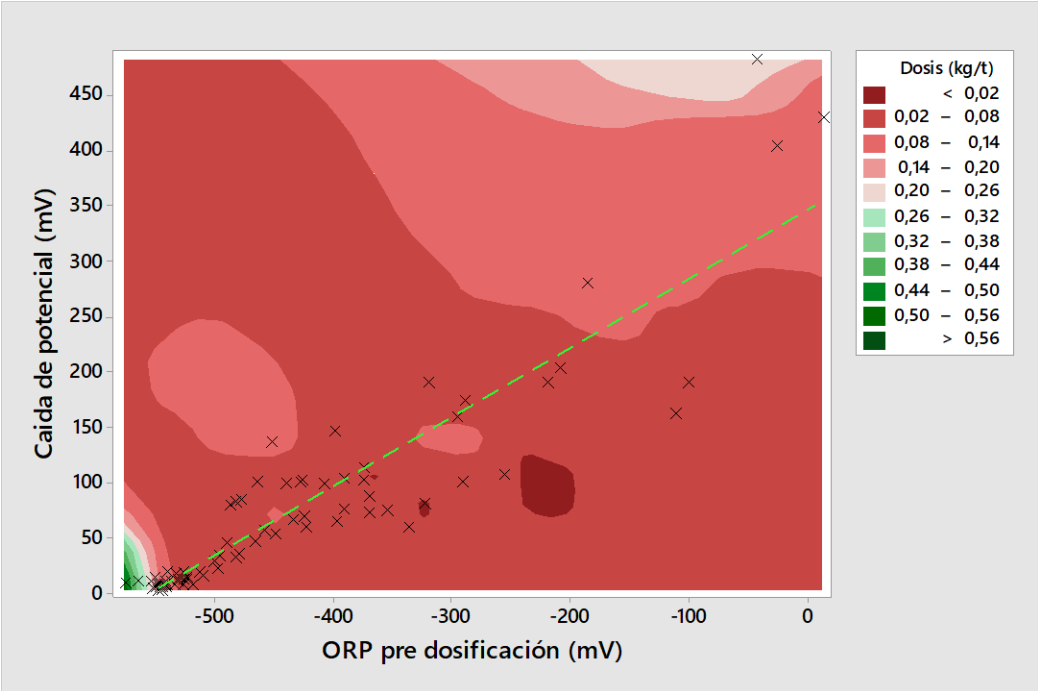


Figura 5-8. Relación de la disminución de potencial en función del ORP previo a la dosificación.

Se indica en la Figura 5.8 el ajuste lineal realizado a la relación "caída de potencial-ORP pre dosificación" con ecuación:

$$Caida = 349{,}3 + 0{,}6348 \cdot ORP \mid R^2 = 0{,}842 \quad (3)$$

De la ecuación y los mostrado en la Figura 5.8, se logra ver que el valor de la dosis no tiene un efecto significativo en la magnitud de la disminución de potencial, pero sí que es más fácil disminuirlo a medida que el potencial es más positivo. Esto también reafirma la saturación del potencial indicada anteriormente, en donde a valores menores a -500 mV, la adición de reactivo tendrá principalmente un efecto de mantener el potencial y no seguir disminuyendo.

Por último, en todas las pruebas realizadas, el consumo de NaHS se mantuvo siempre bajo los 3,5 kg/t utilizando aire como gas de flotación, lo que entrega indicios que, aún cuando las condiciones en el laboratorio sean más controladas que en planta, es posible disminuir el consumo a valores bajo los 5-6 kg/t observados en la planta.

5.1.2. Pruebas realizadas en Fosfoquim

Cronológicamente, las pruebas realizadas en Fosfoquim son anteriores a las mostradas en la sección anterior, y dieron pie para algunas de las condiciones utilizadas, pero en términos de resultados complementan la información obtenida.

En primer lugar, este conjunto de pruebas cuenta con condiciones más controladas que las logradas en Caserones, considerando que:

- Se usó la misma muestra homogeneizada de la cual se fueron tomando las distintas submuestras para cada prueba
- Esto permitió también la realización de duplicados para cada prueba.
- Se tenían flujómetros para regular la cantidad de gas utilizada en las flotaciones, además de acceso a nitrógeno molecular (N_2), que elimina la oxidación generada por el aire
- El sensor de ORP utilizado permite el registro interno para análisis posteriores.

En segundo lugar, debido al tiempo acotado para la realización de pruebas, se tuvo un enfoque más específico en las variables a analizar, como el efecto del gas de flotación y la diferencia obtenida entre dos potenciales (-550 y -600 mV). La importancia del primer objetivo es que en la planta se utiliza aire enrarecido. Cualquier falla en el sistema de sello o hermetismo de las celdas implica una concentración normal de oxígeno, elevando el consumo de NaHS.

5.1.2.1. Efecto del gas de flotación

Para este caso, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.4 y Figura 5.9. El pH de la prueba con Aire muestra dos valores, ya que se observaron dos estabilizaciones del pH: uno (10,84) después de alcanzar el ORP objetivo antes de la flotación, y otro (12,43) después de adicionar más NaHS durante la flotación para evitar la oxidación de la pulpa.

Tabla 5-4. Resultados de pH, ORP y dosificación de NaHS para la comparación del gas de flotación.

Condición	pH inicial	pH flotación	ORP promedio (mV)	RIC (mV)	Dosis inicial (kg/t)	Dosis total (kg/t)
Nitrógeno	9,5	11,13	-553,2	11,52	0,666	0,666
Aire	9,14	10,84/12,43	-539,6	18,32	0,666	6,128

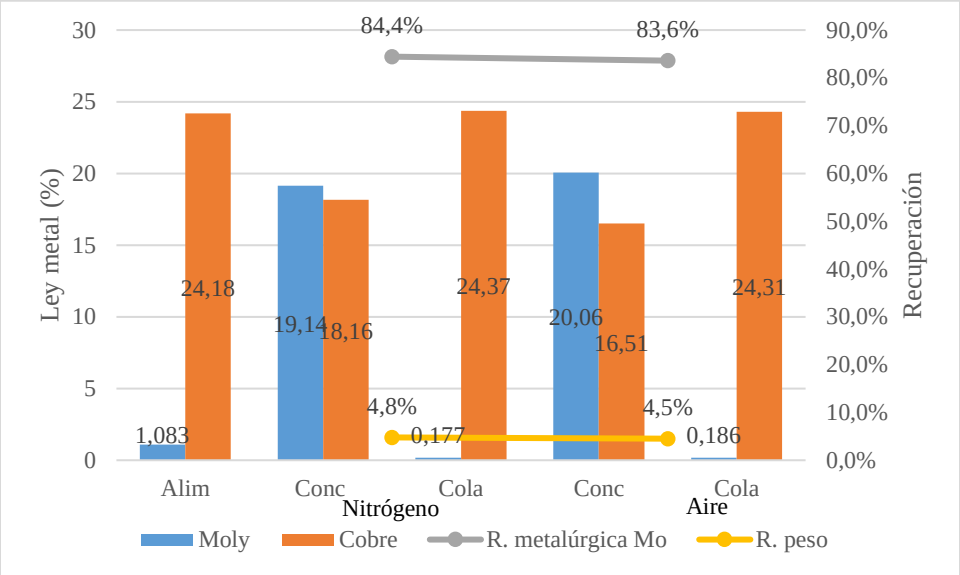


Figura 5-9. Resultados metalúrgicos pruebas con distinto gas de flotación.

Se observa que en la prueba con aire se logró un concentrado más limpio, pero con recuperaciones metalúrgicas y en peso levemente menores. De todas maneras, las diferencias no son considerables para evidenciar un efecto del gas de flotación sobre estas variables.

Por otro lado, en la prueba con aire se observa que el potencial promedio fue menor al objetivo, pero debido a que existe una relación inversamente proporcional entre el pH y el potencial de una pulpa (Göktepe, 2002) y en esta prueba se tiene un aumento del pH por la adición de NaHS durante la flotación, ambas pruebas podrían tener la misma concentración de NaHS en pulpa con distinto potencial.

Por último, dado que en ambos casos se adiciona reactivo hasta llegar a -550 mV, se utiliza la misma cantidad de depresante inicialmente, durante la flotación, para el caso con aire, es necesario adicionar más reactivo para contrarrestar la oxidación generada por el oxígeno, mientras que, en el caso con nitrógeno, no se necesitó. Esta necesidad aumenta el consumo de reactivo un poco menos de 10 veces, mostrando que, en términos de consumo, el gas de flotación tiene un efecto considerable.

5.1.2.2. Diferencia de potencial de operación

Para las pruebas realizadas a -550 y -600 mV, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.5 y en la Figura 5.10. En este caso, al ser ambos casos con un gas inerte (N_2), se reporta un solo valor de dosificación ya que no se observa oxidación durante la flotación.

Tabla 5-5. Datos de pH, ORP y dosificación de NaHS para pruebas a distinto potencial.

Condición	pH inicial	pH flotación	ORP promedio (mV)	RIC (mV)	Dosis NaHS (kg/t)
-550	9,5	11,13	-553,2	11,52	0,666
-600	9,24	11,51	-601,6	4,48	3,2

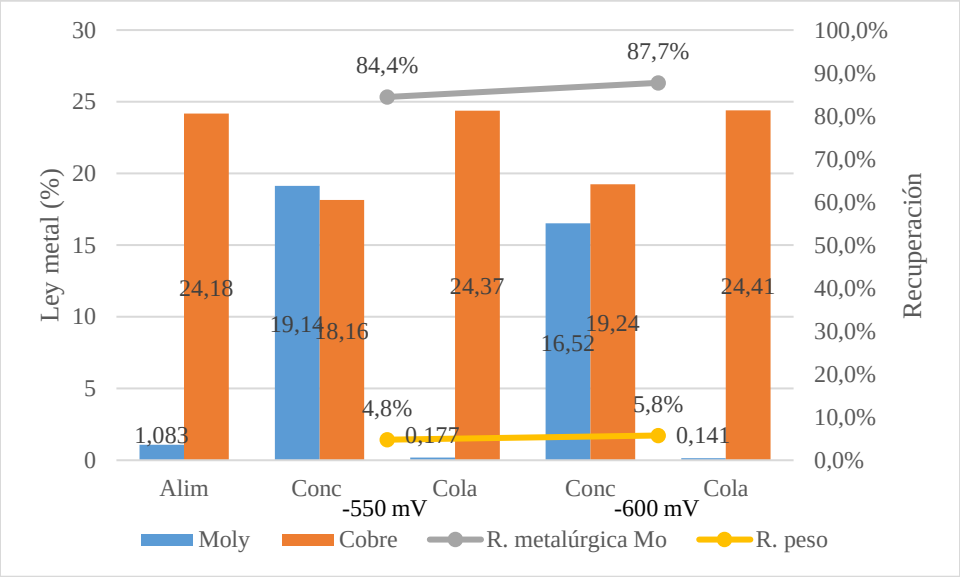


Figura 5-10. Resultados metalúrgicos pruebas a distinto potencial de operación.

En este caso, con respecto al ORP, se observa el mismo comportamiento indicado anteriormente, en donde un potencial más negativo, es más estable y con menor variabilidad, además que, como se necesita llegar a un potencial mayor, se obtiene un mayor aumento del pH y una mayor dosificación, en este caso, alrededor de 5 veces lo utilizado para flotar a -550 mV.

Esto contrasta con el resultado metalúrgico, en donde dicho aumento considerable en el consumo de NaHS, genera un aumento de solo 3 puntos en la recuperación de molibdeno y 1 punto en la recuperación de masa, obteniéndose un concentrado de menor ley. Es decir, se recuperó un poco más de molibdeno, pero se necesita aumentar considerablemente el uso de NaHS.

Finalmente, independiente de los resultados obtenidos, en cada caso se lograron leyes de molibdeno más altas que las obtenidos en planta y, por lo tanto, mucho mayores que el diseño de la planta, con consumos menores que los obtenidos en planta, a excepción del caso en que se utilizó aire. Esto podría dar un indició que el sistema que restringe la concentración de oxígeno dentro de las celdas no está funcionando de forma correcta y su corrección permitiría disminuir el consumo.

5.2. Cambio en la concentración de depresante NaHS

De acuerdo con lo indicado en la sección 4.2, este cambio comenzó su proceso durante la madrugada del 18 de julio de 2019, ya que, una vez obtenida la aprobación del plan por el Superintendente del área y los jefes de turno, se decidió detener el sistema de llenado del estanque de distribución hasta un nivel mínimo permisible (cercano al 50%) para así acortar el tiempo necesario para lograr la nueva concentración dentro del estanque.

Durante la primera semana, en donde se bajó la concentración de 32,8 a cerca de 29%, no se observaron cambios en el funcionamiento de las bombas ni en el resultado de la planta, por lo que, al inicio del nuevo turno, durante la mañana del 24 de julio de 2019, se realiza el cambio al nuevo valor de dilución. Durante ese día se decide volver a la razón anterior ya que se encuentra que la válvula de agua está saturada, sin alcanzar el valor requerido.

Esto motiva un cambio en la lógica de preparación de NaHS, junto con cambios en el cálculo de la concentración para que éste se adecuara de mejor manera a la planta (Ver Anexo F). La situación presente hasta el momento solo permitía regular el flujo de agua y la concentración se obtenía a partir de la razón de agua, por lo que un cambio en este valor, la modificaba instantáneamente.

Luego de estos cambios, se tuvo la lógica observada en la Figura 5.11:

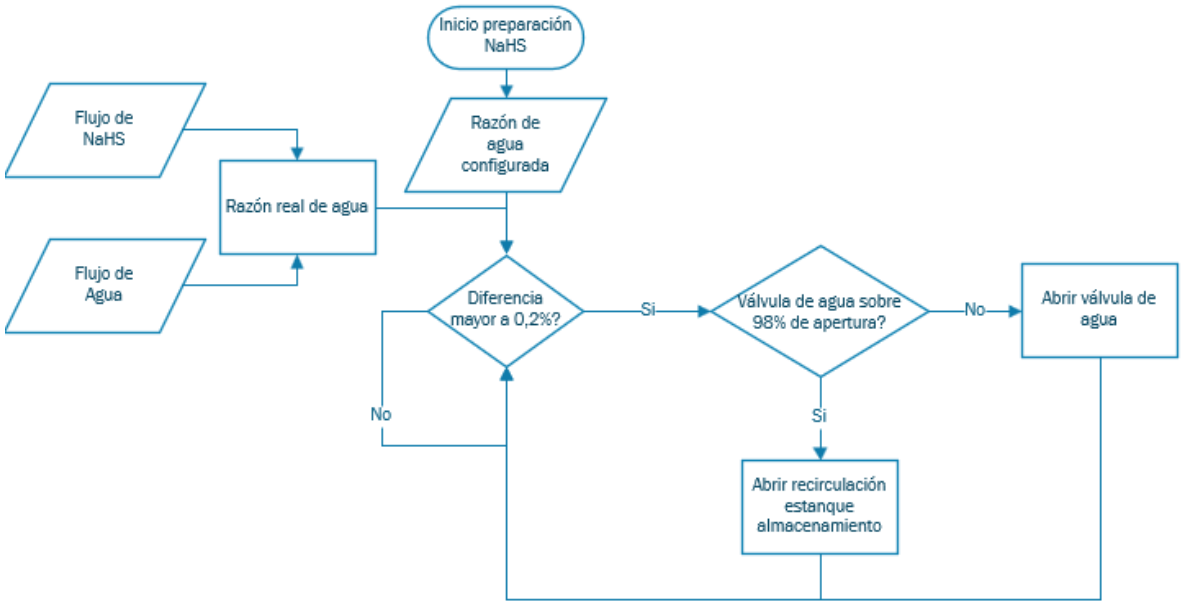


Figura 5-11. Nueva lógica de preparación de NaHS.

Posteriormente, el plan reinicia el proceso durante el día 6 de agosto de 2019 para alcanzar la concentración de 26,5%, para la cual no se observan efectos negativos, volviendo a realizar un cambio de dilución durante el día 20 de agosto de 2019, para alcanzar una razón de agua de 1, correspondiente a una concentración de cerca de 24%. De acuerdo con la nueva lógica de trasvasije, este valor se acerca al nuevo valor límite, y se observa que, para alcanzar esta dilución, la válvula de agua supera el 90% de apertura.

Los resultados de este plan se analizaron desde 3 perspectivas, en primer lugar, que sucedió con el ORP, luego, cómo estaba funcionando el ingreso de camiones de reactivo, y, por último, que es el que toma una mayor importancia para este trabajo, cómo se afectó el consumo de reactivo NaHS.

5.2.1. ORP durante el cambio de dilución

El análisis de los ORP alcanzados durante el plan juega un rol importante ya que, al aumentar la dilución del reactivo, se genera una disminución en la cantidad de depresante que las bombas pueden adicionar en su funcionamiento, lo que hace posible que los potenciales configurados no sean alcanzados.

En la Figura 3.8, se observan los potenciales alcanzados en cada etapa para el periodo entre los meses junio y agosto, pero al separar por mes cada etapa, se observan cambios en algunas etapas, indicadas en la Figura 5.12.

De estos datos, se puede ver que en la primera limpieza se fueron alcanzando valores cada vez más negativos, situación similar a la observada en la 3º limpieza, donde existe una diferencia entre junio y los meses siguientes. Para la etapa de 2º limpieza se tiene un comportamiento contrario, en donde los potenciales son cada vez más positivos, pero también se ve un aumento considerable en la variabilidad.

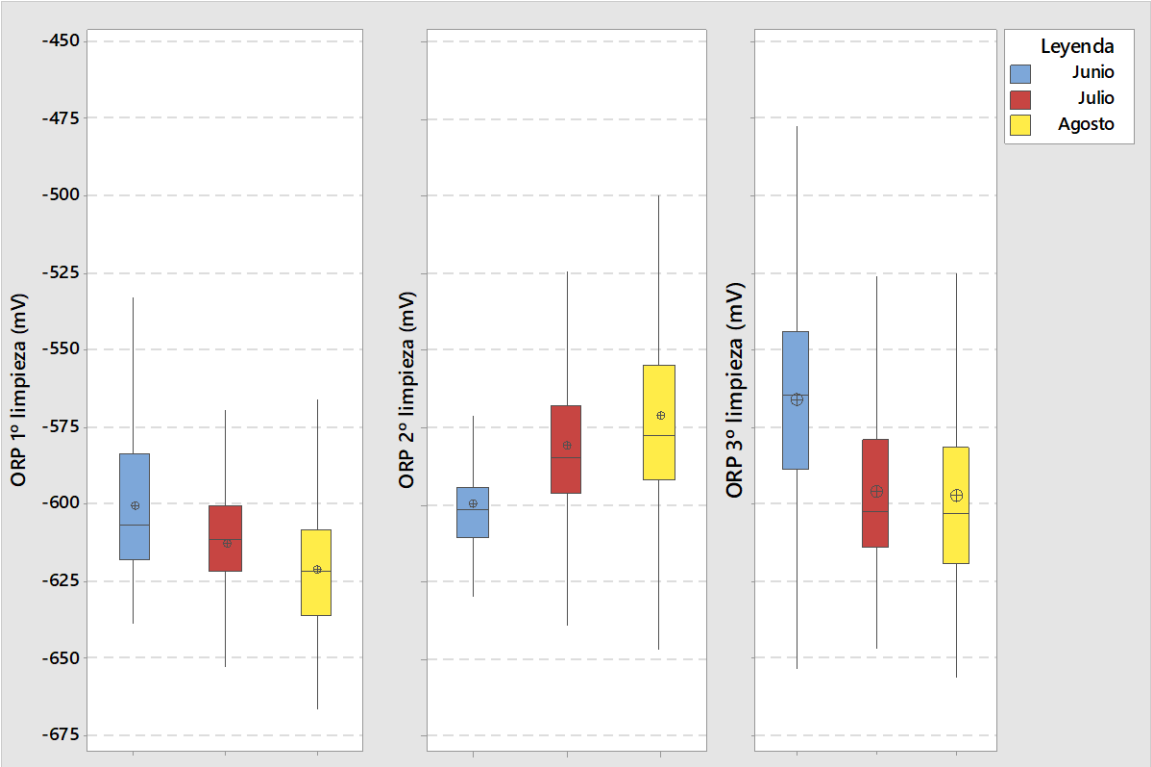


Figura 5-12. ORP medidos entre los meses de junio y agosto para las etapas de 1 a 3º limpieza.

A pesar de que estas situaciones ocurren en el mismo periodo que el cambio de dilución, tienen una tendencia previa, e incluso, para la 3º limpieza, no se ve un efecto en los meses en que si se estuvo realizando el cambio. Por otro lado, la bomba que impulsaba a la 2º limpieza llevaba un tiempo funcionando continuamente a máxima capacidad, por lo que la mayor variabilidad y tendencia a aumentar el ORP, podría estar relacionada a una pérdida de eficiencia de la bomba. Situación similar se observa para la 3º limpieza, en donde la bomba que estaba asociada a dicha etapa fue cambiada por baja eficiencia, utilizándose una con regulación desde terreno, mostrando el cambio generado entre junio y julio.

Por último, y como se indicó anteriormente, solo se observan cambios en los potenciales medidos en estas 3 etapas, observándose que en 5 de 6 puntos de medición el ORP, se mantuvo o fue más negativo. Esto, de acuerdo con los resultados obtenidos en las distintas pruebas realizadas, implicaría un aumento del consumo de reactivo y se observa la situación contraria.

5.2.2. Ingreso de camiones de depresante

Cada camión de reactivo que ingresa a la planta sube el nivel del estanque de almacenamiento alrededor de 10%. y el plan de abastecimiento indica que se debería estar recibiendo un camión cada 2 días. Este plan, por lo general, no se ve afectado por el consumo real de reactivo, ya que el nivel del estanque se mantiene siempre con suficiente carga por la posibilidad de problemas de transporte, o con espacio suficiente para recibir un camión.

Debido a esto, se observan periodos en que el estanque de almacenamiento tiende al vaciado o al llenado, en relación con aumentos o disminuciones del consumo de reactivo, implicando que la carga de un camión promedio tiene distintas duraciones.

Se observa en la Figura 5.13 la duración durante el año 2019 de la carga promedio de un camión y los momentos en que se realizaron cambios en la razón de adición de agua, y por lo tanto la dilución. Junto con esto, las líneas punteadas indican el rango en el que se encuentran el 50% de los datos centrales previo al cambio de concentración.

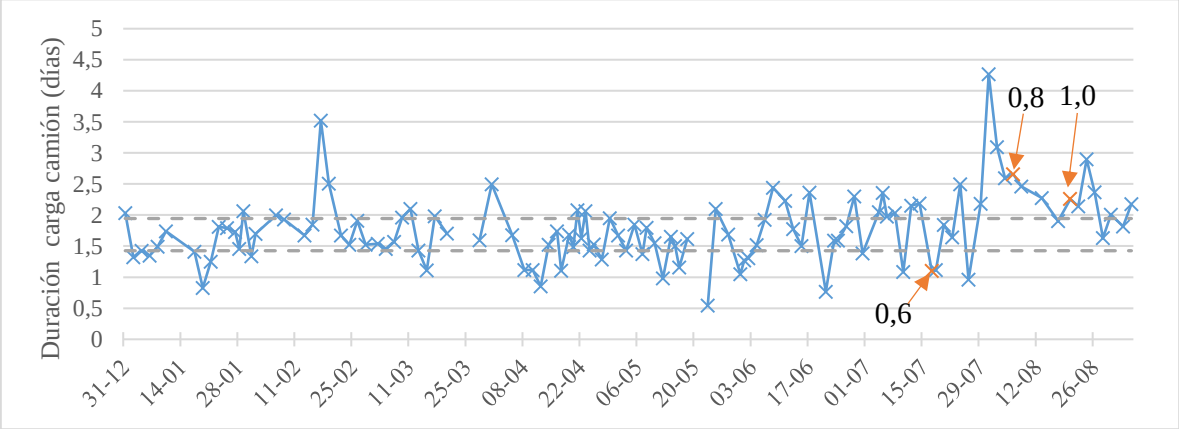


Figura 5-13. Duración de la carga del camión durante el año 2019.

Se tiene entonces, que previo al cambio, los camiones duraban mayoritariamente entre 1,4 y 1,9 días (promedio de 1,62 días). Luego del cambio, los primeros días no se observa algún efecto, pero luego, desde fines de julio, se observa un cambio importante en la duración de los camiones, en donde la mayoría supera los 1,9 días, alcanzando un promedio de 2,18 días, siendo este valor significativamente diferente al valor previo.

Es importante indicar que, al existir una mayor dilución, el estanque de preparación de NaHS recibe más agua y se necesitan menos trasvasijes y debido al cambio en la lógica, se retira menos del estanque de almacenamiento, lo que podría explicar este cambio.

5.2.3. Consumo de depresante

A diferencia del valor anterior, el consumo o dosificación de depresante considera el tratamiento de la planta, por lo que permite descartar las situaciones en donde se utilizó menos reactivo porque la planta funcionó a menor capacidad.

En este caso, se analizó el valor de consumo calculado mensualmente, según el método de finanzas, y ya que éste solo considera el ingreso de camiones y no el estado del estanque, se realizó una corrección al valor de acuerdo con el inventario de reactivo.

Los datos se presentan en la Figura 5.14, y los valores en negrita corresponden al valor mensual corregido por el estado del estanque. Junto con esto, el valor de balance de Agosto no se encontraba disponible al terminar el trabajo en planta, por lo que fue estimado de acuerdo con la masa de concentrado reportada al momento (Ver Anexo G)

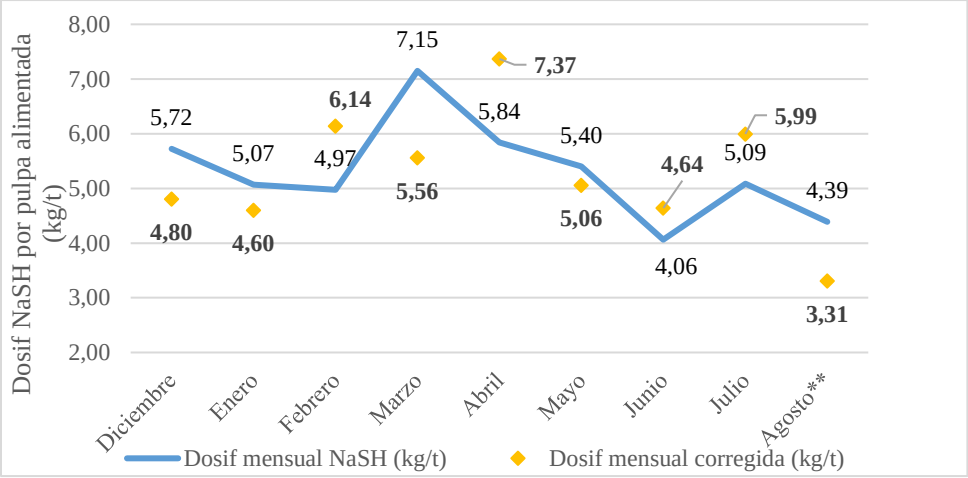


Figura 5-14.Dosificación mensual de depresante por masa de pulpa procesada.

En este caso, el valor mensual varía permanentemente mes a mes, y, en los meses anteriores al cambio se observa una tendencia a la baja, revertida en julio, pero que vuelve a agosto. Pese a esto, al revisar los valores corregidos, se puede ver que la tendencia a la baja no es tan concreta, y que aún cuando junio tiene un valor bajo, no es el menor de los meses registrados hasta el momento.

Durante julio, que es donde comienza el plan de cambio de dilución, se tiene un mayor consumo que junio, aumentado con el valor corregido, pero que es similar a lo ocurrido en meses anteriores, y que se condice con lo indicado en el punto anterior, donde recién a fines de julio se comienza a observar un cambio. En cambio, en el mes de agosto se observa una baja considerable en el consumo real, alcanzando un valor de 3,31 kg/t, siendo este valor casi 40% menor al promedio del valor corregido en los meses anteriores al cambio. En este caso, el valor de dosificación mensual no es tan bajo (4,39) porque en los últimos días del mes, por el plan normal de ingreso de reactivo, llegaron camiones que no eran realmente necesarios, alcanzando cerca del 90% de la capacidad del estanque de almacenamiento.

Por otro lado, es importante indicar que, durante el tiempo de realización de la memoria, solo se alcanzó a registrar 1 mes en donde el cambio de dilución pudiera tener un impacto más

significativo, y debido a la gran cantidad de variables implicadas en el proceso, se necesita una mayor cantidad de tiempo para distinguir el efecto de este cambio en contraste con las otras variables. De todas maneras, no se realizaron cambios importantes en el resto del funcionamiento de la planta, por lo que este valor, que es 28% menor al consumo más bajo registrado hasta el momento (4,6 en enero), se vio influenciado por el cambio de dilución, y considerando también lo indicado en el punto 5.2.1, que con respecto a junio se operó con potenciales más negativos, lo que aumenta el consumo.

En términos económicos, en el periodo diciembre-junio, se gastó en promedio 280.123 USD mensuales para la compra de NaHS y durante el mes de agosto 213.699 USD, significando una disminución de cerca de 70.000 USD, y solo se había gastado una cantidad similar en el mes de febrero (200.991 USD) debido al bajo tratamiento del mes (más de 10 mil toneladas secas menos que en un mes normal, valor cercano a las 37 mil TMS). En este análisis también es necesario indicar, que el valor gastado corresponde a los camiones ingresados y por tanto el consumo sin corregir, lo que indica que, al considerar la acumulación, el valor de agosto sería aún menor.

Finalmente, de acuerdo con lo expuesto en esta sección, el aumentar la dilución del reactivo ha tenido, de forma preliminar, un efecto positivo en la disminución de su consumo, generando también, la necesidad de analizar el periodo de abastecimiento de camiones de depresante, controlando de mejor manera el inventario bajo la perspectiva de menores dosificaciones.

6. Conclusiones

En primer lugar, es necesario realizar el alcance que las conclusiones a las que se pudo llegar no entregan una certeza completa, principalmente porque no se tiene la suficiente cantidad de datos que permitan descartar efectos de variables ajenas a las de interés de este trabajo, pero sí los suficientes para indicar los caminos a seguir y cuales no lograrían la disminución del consumo de depresante.

Se tiene entonces, que al analizar la relación entre la dosificación de reactivo y su efecto en el potencial ORP de la pulpa, se determinó que este no se ve muy afectado por la magnitud de la dosis, pero sí por el potencial que se tenía antes de la adición, por lo que, debido a la operación continua dentro de la planta, no se necesitan grandes dosis de reactivo para mantener el potencial dentro de las celdas. Esto también tiene un efecto en la cantidad de reactivo necesario para llegar a un potencial específico, observándose que la dosificación requerida crece rápidamente, con consumos menores a 1 kg/t de reactivo para alcanzar -550 mV, y sobrepasando los 3 kg/t para llegar a -600 mV.

En términos de los resultados metalúrgicos, se concluye que, dada la gran cantidad de variables relacionadas en la flotación, siendo muchas de éstas ajenas a la planta de flotación selectiva, no se logra establecer un potencial óptimo de operación que pueda ser utilizado en todos los escenarios, pero se logran encontrar algunas tendencias que permiten acotar los límites de operación. Se tiene entonces que, potenciales mayores a -500 mV tienen baja estabilidad y baja capacidad de depresar el cobre por lo que no es recomendable su uso; en

el intervalo de -500 a -550 mV, se mejora la estabilidad y se pueden obtener concentrados de buena calidad, pero existe el riesgo de aumentar el flujo de concentrado, impactando de forma negativa en el control de las etapas posteriores de la planta. El intervalo de potenciales menores a -600 mV logra buenos resultados, pero de acuerdo con lo indicado anteriormente, aumenta excesivamente la cantidad de reactivo necesario. Se tiene entonces que el intervalo óptimo se encuentra entre -550 y -600 mV, en donde los distintos efectos negativos se minimizan, y se pueden obtener resultados adecuados en cada etapa. En los términos de este trabajo, dentro de este intervalo, se debe apuntar a los valores más altos ya que se tienen consumos más bajos.

Con respecto a la concentración del reactivo, se concluye que una mayor dilución puede traer consigo un efecto positivo importante, tanto con respecto al consumo, como con la operación de la planta, pero hasta donde se alcanzó a realizar, solo se observó el efecto en el consumo y sería necesario un intervalo de tiempo mayor para conocer su magnitud real. Según lo obtenido hasta el momento, sería recomendable realizar los cambios necesarios que permitan lograr una mayor dilución, ya sea en el sistema de control como en las líneas de trasvasije, y así poder ver si los efectos positivos observados se mantienen.

Además de estos 3 puntos, que fueron el eje central del trabajo realizado, se concluye también que el control de la atmosfera inerte de flotación tiene una gran importancia tanto para las pruebas de laboratorio, como en la planta, por lo que contar con sistemas que permitan realizarlo permitiría mejoras sustanciales en el proceso, especialmente con respecto a la reducción del consumo de NaHS.

En resumen, se concluye que el potencial de operación debe estar entre -550 y -600 mV, buscando en lo posible acercarse a -550 mV ya que se tiene un menor consumo, y que se debe buscar la forma de seguir aumentando la dilución, hasta lograr el valor en donde los beneficios se maximicen.

7. Referencias

Castro, S., Lopez-Valdivieso, A., & Laskowski, J. S. (2016). Review of the flotation of molybdenite. Part I: Surface properties and floatability. *International Journal of Mineral Processing*, *148*, 48–58. https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.01.003

Fosfoquim S.A. (2008). *HDS Sulfhidrato de sodio*.

Garcia-Zuñiga, H. (1935). La eficiencia de la flotación es una función exponencial del tiempo. *Boletín Minero, Sociedad Nacional de Minería*, *47*, 83–86.

Göktepe, F. (2002). Effect of pH on Pulp Potential and Sulphide Mineral Flotation. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, *26*, 309–318.

Li, H., He, T., Wang, Y., Jin, J., & Yuan, H. (2018). XRD and SEM Analyses of Molybdenite with Different Particle Sizes and Its Floatability Difference. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, *38*(11), 3588–3592. https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2018)11-3588-05

Park, K., Lee, H., Phelan, S., Liyanaarachchi, S., Marleni, N., Navaratna, D., … Shu, L.

(2014). Mitigation strategies of hydrogen sulphide emission in sewer networks - A review. *International Biodeterioration and Biodegradation*, *95*(PA), 251–261. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.02.013

Ramana, C. V., Becker, U., Shutthanandan, V., & Julien, C. M. (2008). Oxidation and metal-insertion in molybdenite surfaces: Evaluation of charge-transfer mechanisms and dynamics. *Geochemical Transactions*, *9*, 1–8. https://doi.org/10.1186/1467-4866-9-8

U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board. (2004). NaHS Safety Bulletin. *CSB Safety Bulletin*, (Noviembre), 1–3.

8. Anexos

8.1. Anexo A: Datos de planta

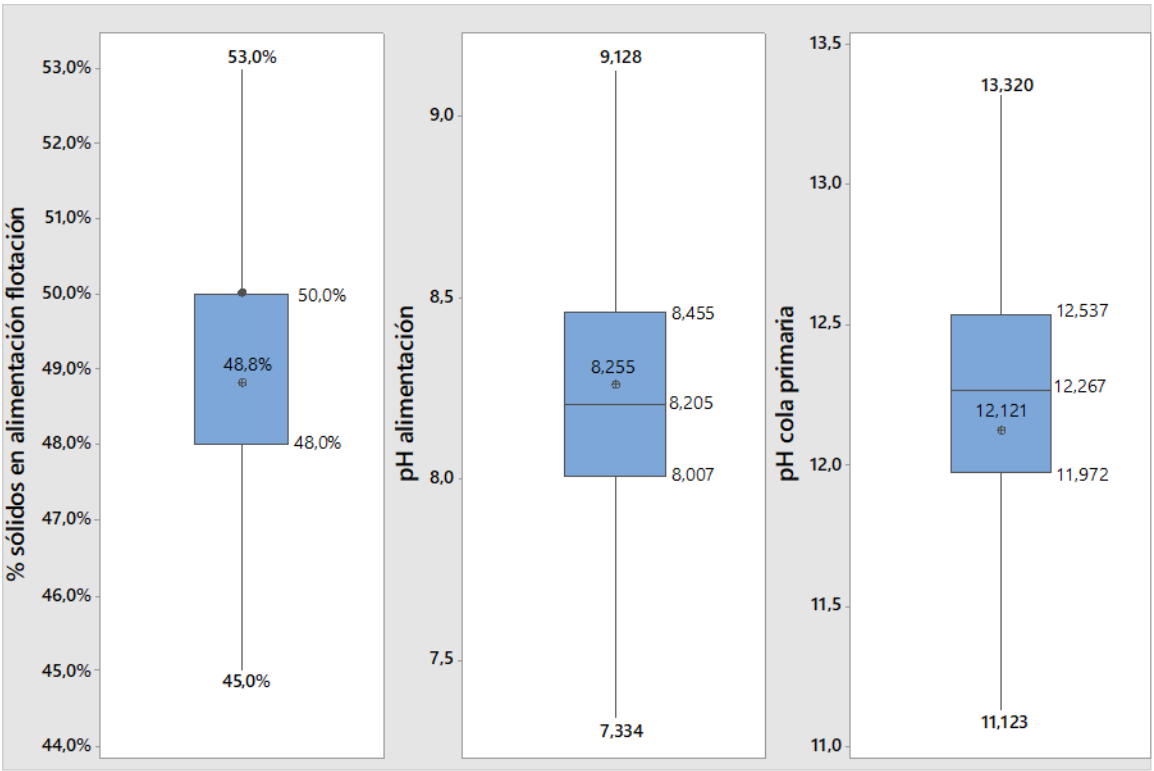


Figura 8-1. Datos del contenido de sólidos en la alimentación de la planta entre febrero y junio, y datos de pH de alimentación y cola flotación primaria entre diciembre y junio.

8.2. Anexo B: Análisis comparativo leyes por FRX y laboratorio químico

Como se indicó en el punto 4.1.1, el análisis de las muestras obtenidas fue realizado por fluorescencia de rayos X (FRX), ya que al ser muestras especiales y fuera de lo necesario para la producción de la planta, hubieran quedado relegados en el laboratorio químico y con largos tiempos de espera.

Sin embargo, a raíz de comentarios realizados por personal de la planta y del área de metalurgia, surgió la inquietud sobre la exactitud del valor proporcionado por el FRX, y que este solo debía ser utilizado como referencia y no como un valor que permitiera mayores análisis.

Para realizar esta comparación, se tomaron los datos medidos de diciembre 2018 hasta mayo 2019, comparando el promedio de las mediciones del FRX realizadas en un turno, con el valor del compósito entregado por el laboratorio químico (AQ), separando los análisis por cada etapa, los 3 elementos medidos y finalmente las recuperaciones de molibdeno de acuerdo con cada fuente y comparando las diferencias obtenidas.

Los análisis se presentan en las Figuras 8.2 a 14 y separando los datos por mes (Dic: ●, Ene: ■, Feb: ♦, Mar: ▲, Abr: ►, May: ◄) junto con curva FRX=AQ (diagonal)

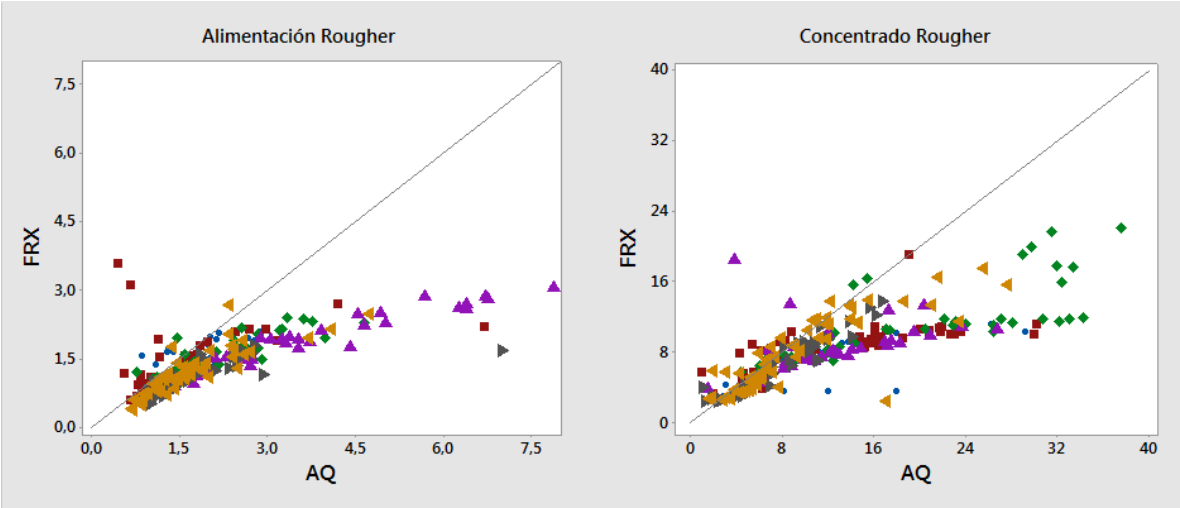


Figura 8-2. Comparativa FRX-AQ para el Mo en la alimentación y concentrado primario.

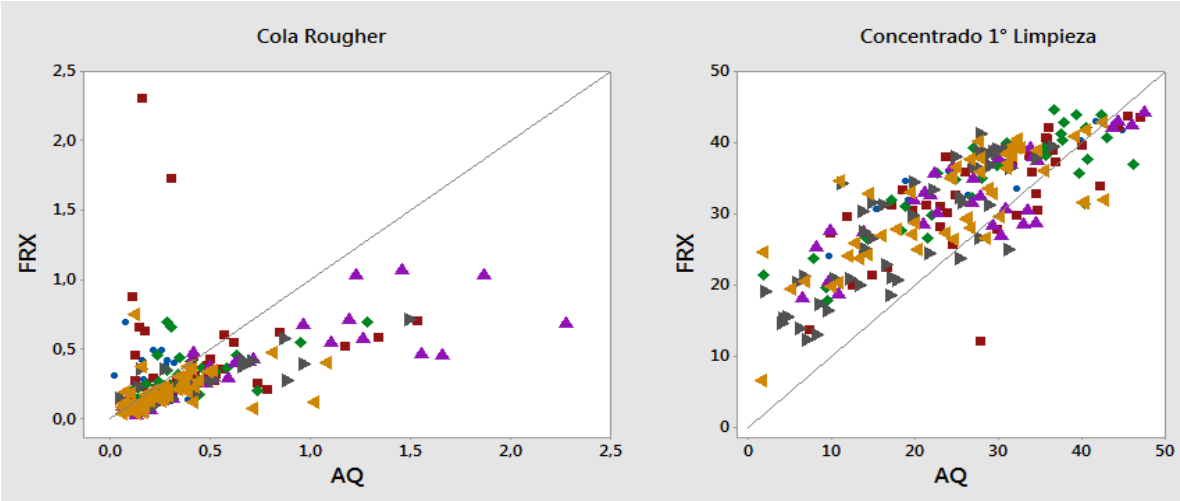


Figura 8-3. Comparativa FRX-AQ para el Mo en la cola primaria y concentrado 1º limpieza.

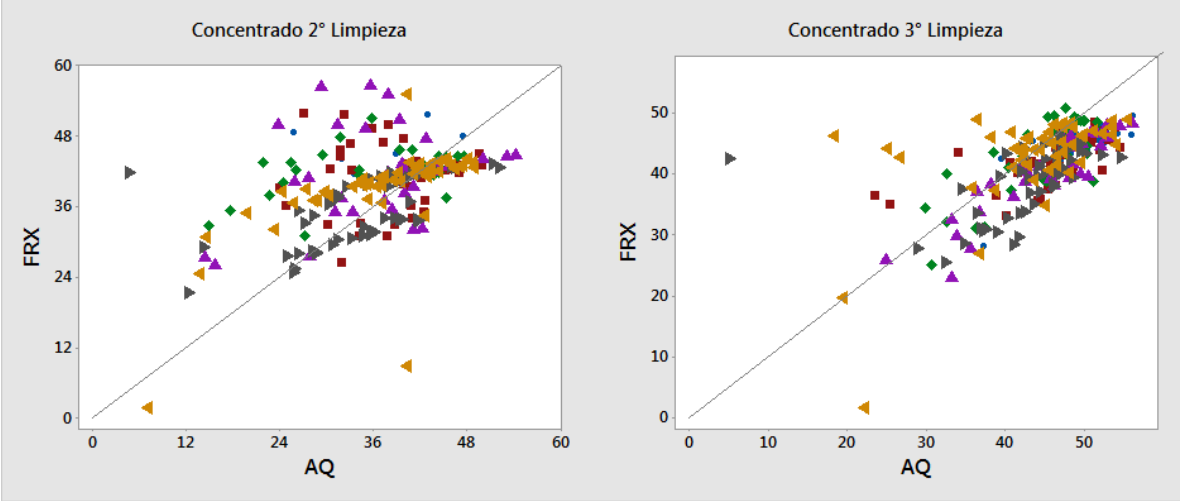


Figura 8-4. Comparativa FRX-AQ para el Mo en los concentrados de 2º y 3º limpieza.

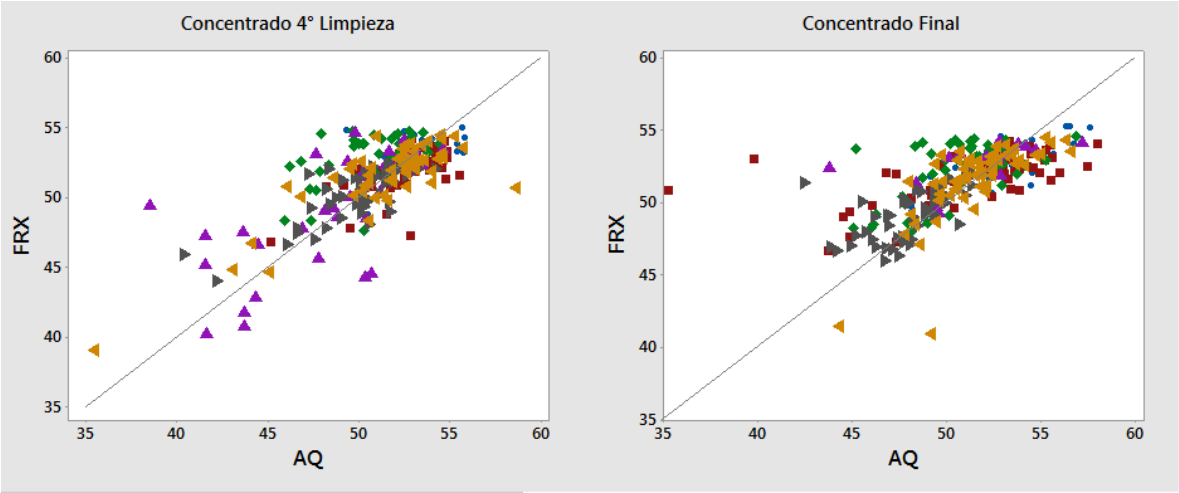


Figura 8-5. Comparativa FRX-AQ para el Mo en los concentrados de 4º limpieza y espesador de Mo (final).

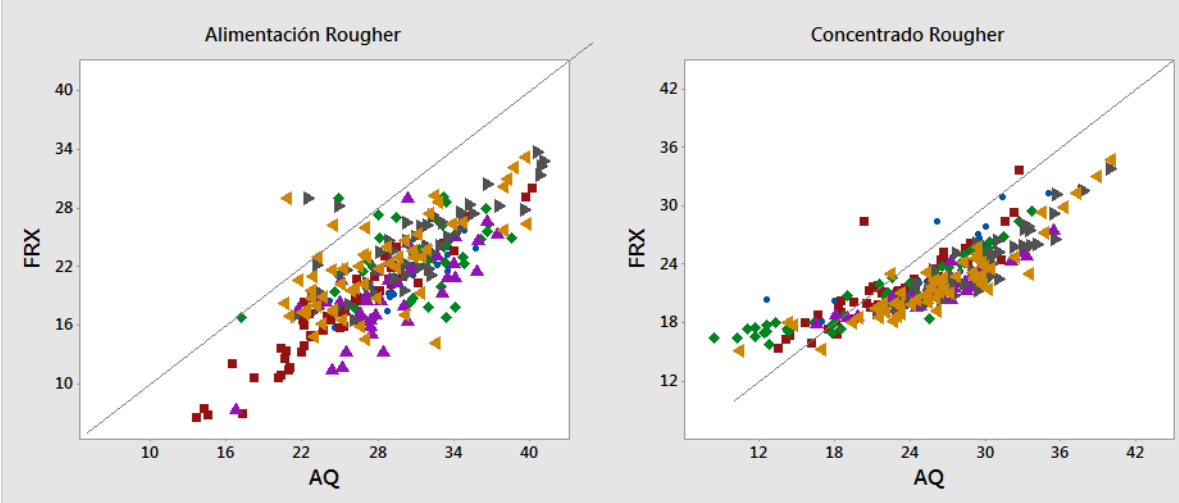


Figura 8-6. Comparativa FRX-AQ para el Cu en la alimentación y concentrado primario

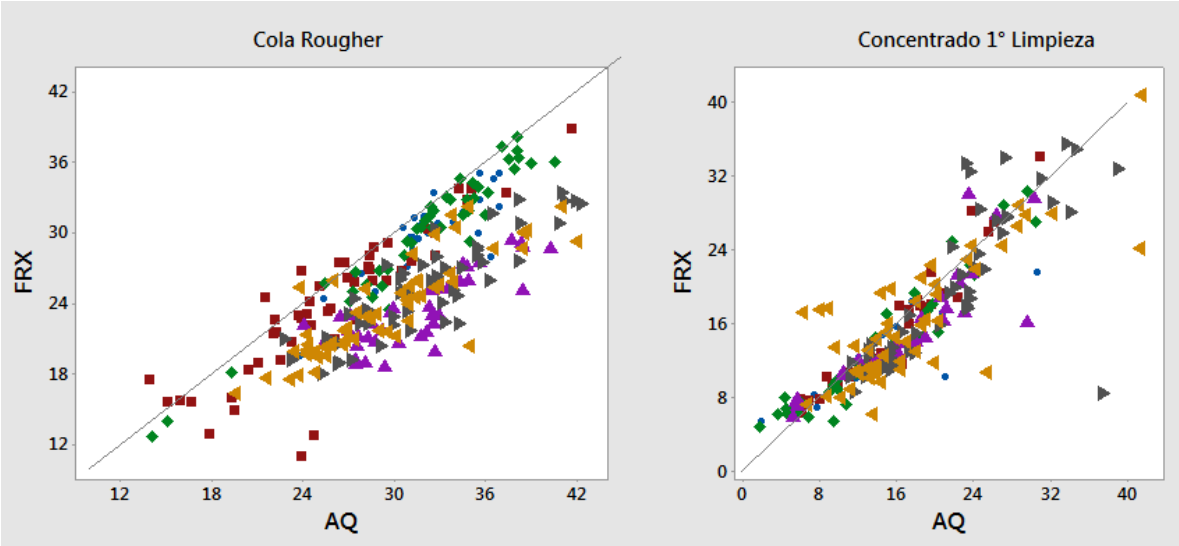


Figura 8-7. Comparativa FRX-AQ para el Cu en la cola primaria y concentrado 1º limpieza.

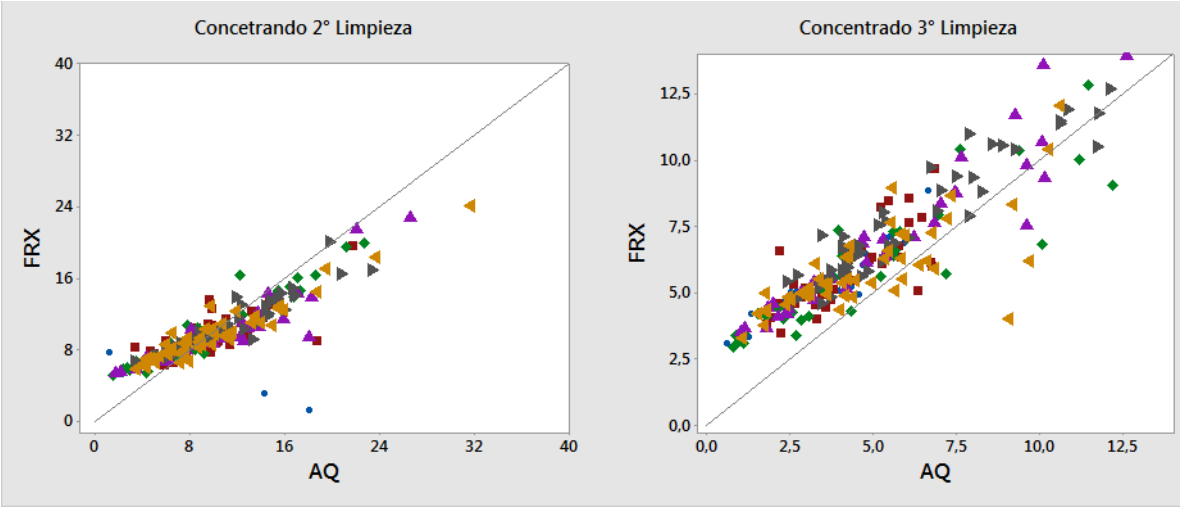


Figura 8-8. Comparativa FRX-AQ para el Cu en los concentrados de 2º y 3º limpieza.

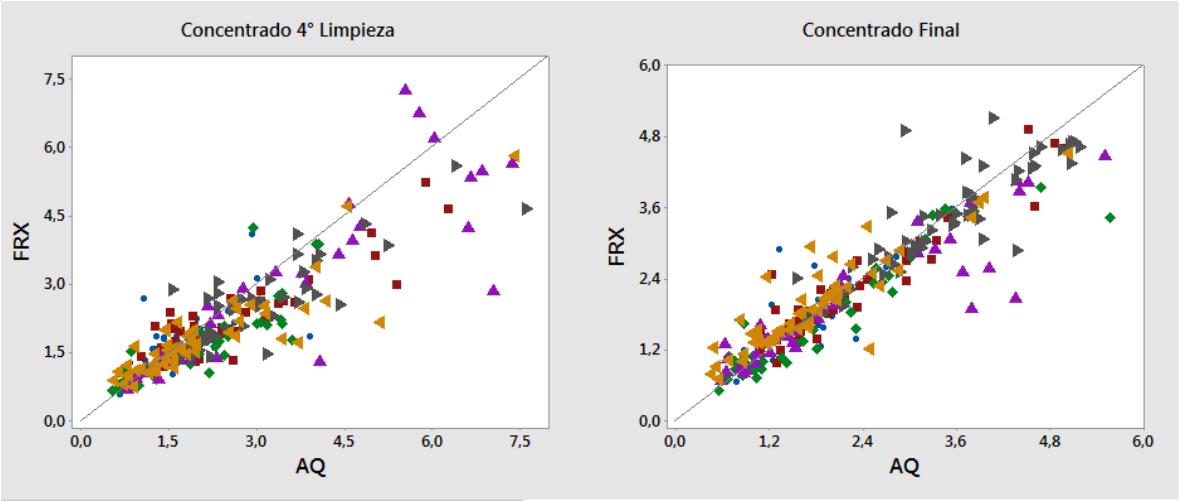


Figura 8-9. Comparativa FRX-AQ para el Cu en los concentrados de 4º limpieza y espesador de Mo (final).

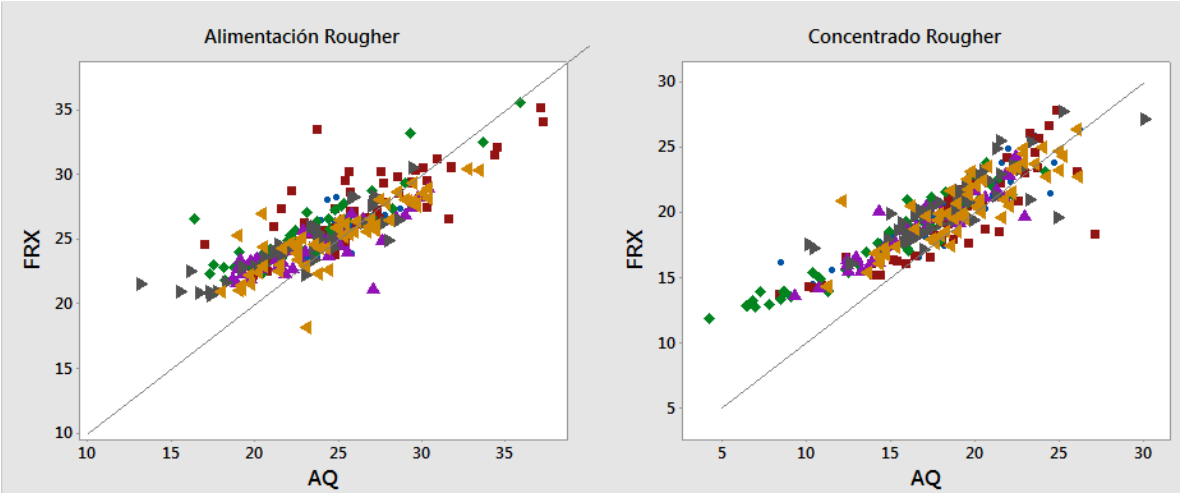


Figura 8-10. Comparativa FRX-AQ para el Fe en la alimentación y concentrado primario.

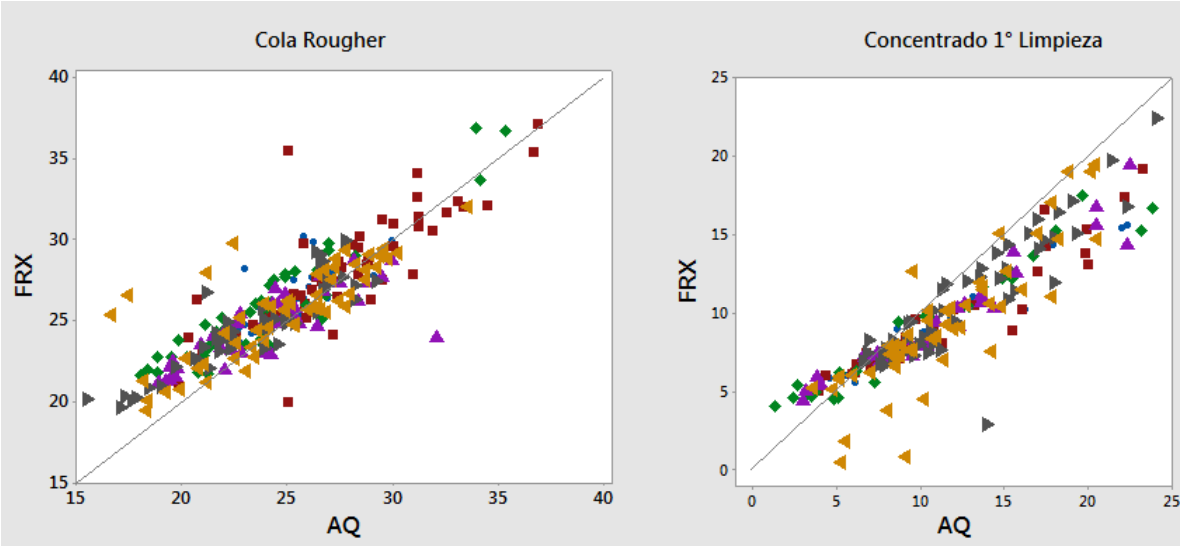


Figura 8-11. Comparativa FRX-AQ para el Fe de la cola primaria y concentrado 1º limpieza.

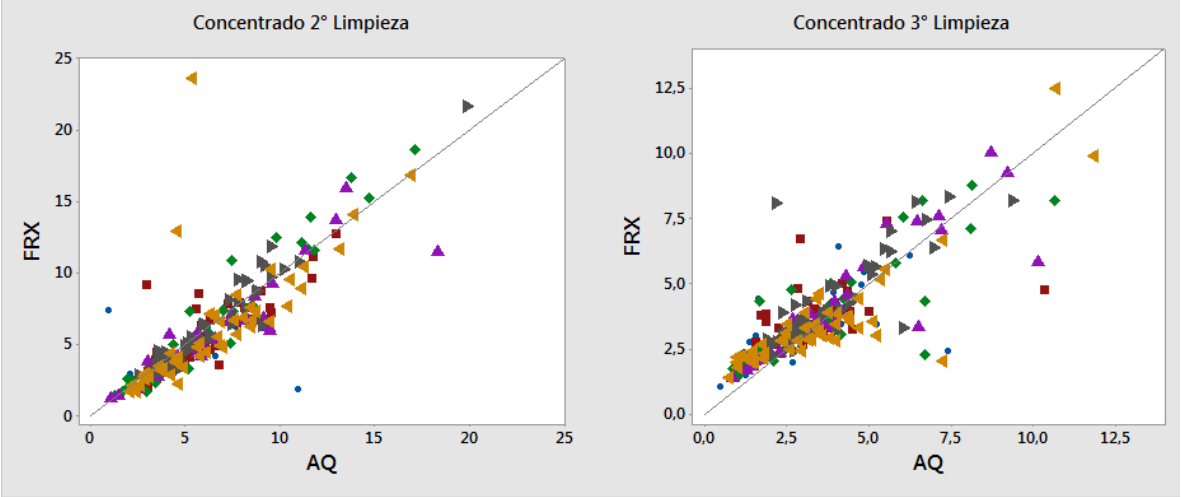


Figura 8-12. Comparativa FRX-AQ para el Fe de los concentrados de 2º y 3º limpieza.

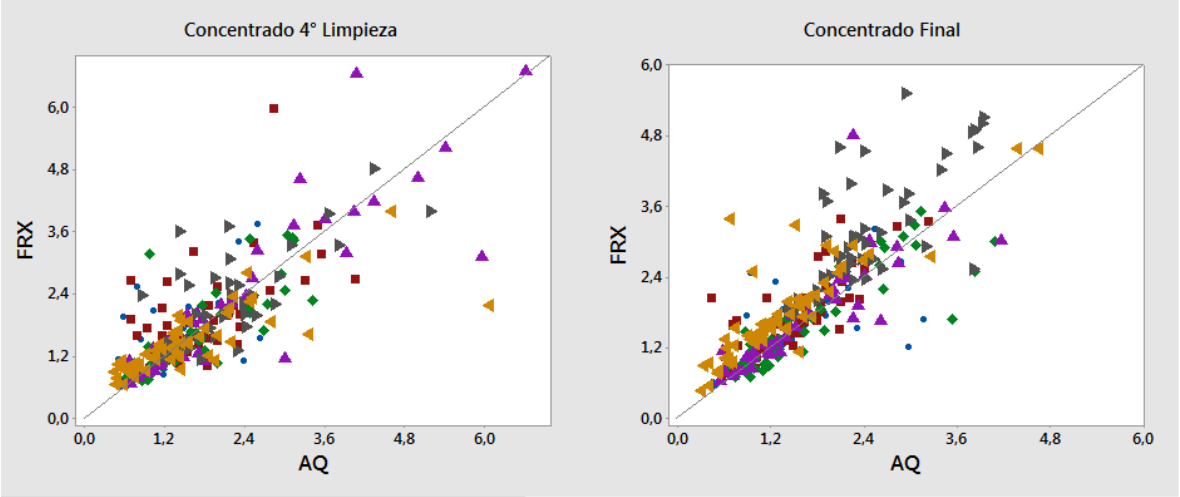


Figura 8-13. Comparativa FRX-AQ para el Fe de los concentrados de 4º limpieza y espesador de Mo (final).

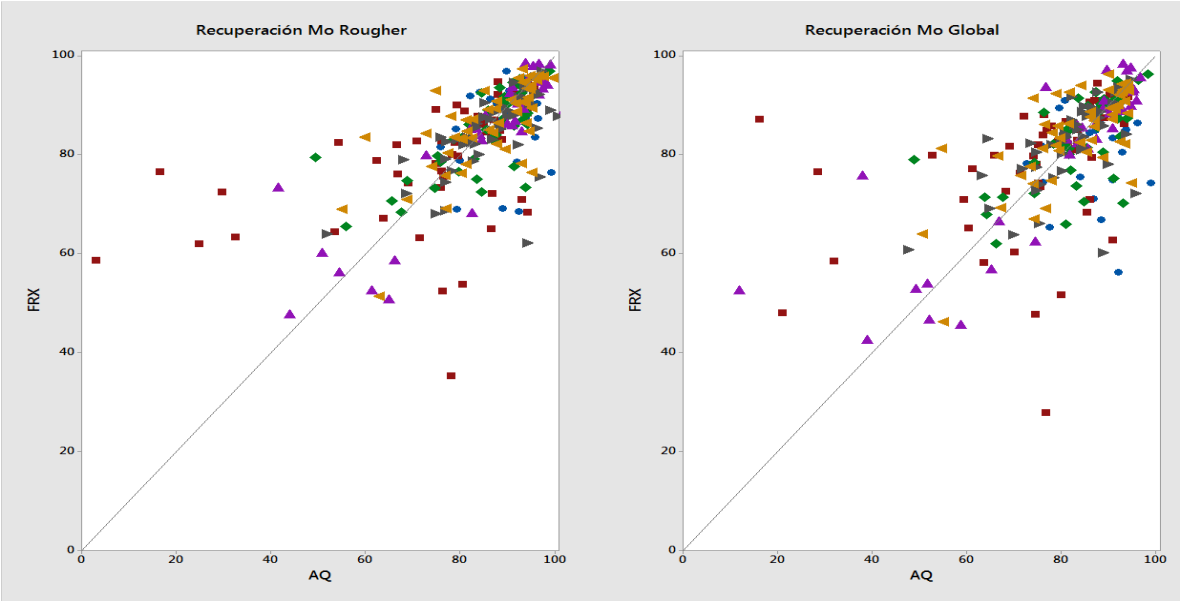


Figura 8-14. Comparativa de recuperación primaria y global calculada a partir de los datos de FRX y AQ.

Los resultados obtenidos muestran que, para el caso del molibdeno, solo hay diferencias importantes en la alimentación y concentrado de la etapa primaria (Figura 8.2) cuando los valores son altos (sobre 3 y 16% respectivamente) pero son pocos los datos en esos tramos.

Para el caso del cobre, también se encuentran las principales diferencias en la etapa primaria (Figuras 8.6 y 8.7), en este caso, se observa que el FRX entrega valores más bajos que el químico de manera sistemática (la mayoría de los datos están bajo la curva), pero no se aleja de la pendiente unitaria.

Para el caso de fierro, no se observan diferencias importantes en ninguna etapa, solo hay zonas con mayor dispersión de los datos, pero igualmente espaciados a cada lado de la curva.

Por último, para las recuperaciones calculadas a partir de los datos de FRX y AQ, se observan mayores dispersiones cunado los valores son bajo 80% y estos corresponden a una fracción menor de los datos.

8.3. Anexo C: Procedimiento prueba flotación selectiva

CASERONES	SISTEMA DE GESTIÓN SSO - MLCC "PROCEDIMIENTO FLOTACION SELECTIVA LABORATORIO"				LUMIN. COPPER CHILE
	Código: PO-GCRM-040	Versión: 01	Fecha: 09/04/2019	Página: 1 de 6	

TABLA DE CONTENIDOS

1. Objetivo
2. Alcance
3. Definiciones
4. Responsabilidades
5. Equipos Materiales
6. Descripción de la actividad
7. Referencias

ELABORADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Santiago Santos Jorge Narvaez	Claudio Garcia – Gary Galvez	Pablo Parada P.

HISTORIAL DE ACTUALIZACIONES

Fecha	Origen	Realizada por	Versión:
09-04-2019	Modificación	Gary Galvez	01

© 2019 Ninguna parte de este documento o la información contenida en éste puede ser reproducida o transmitida en forma alguna o por cualquier medio sin la autorización de MLCC.
Una vez impreso este documento queda como Copia NO CONTROLADA

CASERONES	SISTEMA DE GESTIÓN SSO - MLCC "PROCEDIMIENTO FLOTACION SELECTIVA LABORATORIO"				LUMIN. COPPER CHILE
	Código: PO-GCRM-040	Versión: 01	Fecha: 09/04/2019	Página: 2 de 6	

1. OBJETIVO

Contar con un Procedimiento que asegure la realización de un test de flotación con pulpa de la etapa selectiva para determinar comportamiento del mineral evaluando distintas variables como pH, solidos, potencial redox tipos de agua, etc.

2. ALCANCE

Este procedimiento es aplicable a todo el personal de MLCC y empresas colaboradoras que tengan que realizar el test de flotación con pulpa de la etapa selectiva.

3. DEFINICIONES

3.1 NaSH: Sulfhidrato de Sodio. Solución altamente alcalina con olor a huevo podrido por la presencia de sulfuro de hidrogeno (H_2S). Principal reactivo de la flotación selectiva, actúa depresando el cobre, rompiendo el enlace de la partícula con el colector. El H_2S es un gas altamente tóxico y su volatilización desde la solución de NaSH se ve acrecentada al disminuir el pH.

3.2 Diésel: Hidrocarburo que logra un efecto de colector no polar de molibdeno.

3.3 Mata-espuma: Mezcla de diésel y P-4000 (reactivo orgánico a base de polipropilenglicoles). Reactivo utilizado para evitar la excesiva formación de espuma.

3.4 Espumantes: MIBC o metil isobutil carbinol, es un compuesto orgánico inflamable utilizado generalmente en la flotación de cobre como espumante pero puede actuar como colector de molibdeno.

3.5 pH: Es una unidad de medida de alcalinidad o acidez de una solución, más específicamente el pH mide la cantidad de iones de hidrógeno que contiene una solución determinada, el significado de su sigla es: potencial de hidrogeniones.

3.6 ORP: Potencial de óxido-reducción. Medición de la capacidad de una sustancia para transferir electrones desde un electrodo de referencia, con unidades de potencial eléctrico (V o mV), generado por el movimiento de electrones. Debido a la capacidad reductora del NaSH se puede utilizar esta medida para estimar la concentración del reactivo en una pulpa.

4. RESPONSABILIDADES

4.1 Asesor de Prevención de Riesgos

- Capacita y asesora en su área de desempeño, la aplicación del presente procedimiento.
- Revisa la documentación generada en los ámbitos de seguridad y salud ocupacional.

Envía la lista maestra de documentos a los Gerentes y Superintendentes de su área a cargo.

4.2 Superintendentes

© 2019 Ninguna parte de este documento o la información contenida en éste puede ser reproducida o transmitida en forma alguna o por cualquier medio sin la autorización de MLCC.
Una vez impreso este documento queda como Copia NO CONTROLADA

CASERONES	SISTEMA DE GESTIÓN SSO - MLCC "PROCEDIMIENTO FLOTACION SELECTIVA LABORATORIO"				LUMIN. COPPER CHILE
	Código: PO-GCRM-040	Versión: 01	Fecha: 09/04/2019	Página: 3 de 6	

- Mantiene control sobre documentos utilizados en el área, verificando que estos se encuentren en su última revisión, evitando que se utilicen documentos de revisiones anteriores.
- Aprueba los documentos generados en su superintendencia, tales como, procedimientos, instructivos y registros.

4.3 Supervisor Metalurgista

- Efectuar actividades de verificación y control para evaluar el desempeño de los trabajadores en el desarrollo de esta actividad, detectando desviaciones que, eventualmente, podrían afectar la representatividad de la muestra, contribuyendo al mejoramiento del procedimiento.
- Cumplir fielmente las normativas señaladas en este procedimiento y velar porque ellas se realicen en forma segura y eficiente.
- Planificar actividades de control en la operación.

4.4 Técnico Metalurgista – Operador Muestrero

- Solicitar autorización para ingreso al dueño del área.
- Utilizar todos los elementos de protección personal.
- Conocer, respetar y cumplir con las indicaciones señaladas en este procedimiento.

5 EQUIPOS Y MATERIALES

5.1 Equipos

- Celda Flotación de laboratorio
- PH meter y ORP
- Balanza digital
- Timer controlador de tiempo
- Extractor de gases

5.2 materiales / Herramientas

- Probetas 1 lt
- Baldes
- Matraz
- Vaso Precipitado
- Piseta
- Reactivos
- Micro pipetas
- Reactivos de flotación

© 2019 Ninguna parte de este documento o la información contenida en éste puede ser reproducida o transmitida en forma alguna o por cualquier medio sin la autorización de MLCC.
Una vez impreso este documento queda como Copia NO CONTROLADA

CASERONES	SISTEMA DE GESTIÓN SSO - MLCC "PROCEDIMIENTO FLOTACION SELECTIVA LABORATORIO"				LUMIN. COPPER CHILE
	Código: PO-GCRM-040	Versión: 01	Fecha: 09/04/2019	Página: 4 de 6	

5.3 Elementos de Protección Personal

- Guantes quirúrgicos
- Zapatos de seguridad
- Lentes de seguridad
- Casco
- Protector auditivo
- Sensor personal de gas H_2S calibrado
- Mascara con filtro para gas H_2S (Full-face)
- Buzo desechable over-all

6.0 Descripción de la Actividad

6.1 Descripción General del Procedimiento

- La solución de NaSH es un producto estable normalmente, pero con disminuciones de pH pueden existir emanaciones considerables de gas sulfhídrico, que es altamente tóxico. Al realizar manipulación del reactivo mantener en todo momento los EPP con el sensor de gases activo y en buen estado. En caso de detección de gas retirarse inmediatamente del área. Además monitorear y controlar el pH de la pulpa ya que a pH menores a 8 pueden producirse emanaciones peligrosas de gas.
- Conocer y mantener en el laboratorio la HDS de cada sustancia peligrosa que utilice.

6.2 Toma de muestras de pulpa en planta selectiva.

- Proceder de acuerdo a Procedimiento "Muestreo de Pulpa en Planta Concentradora – PO – GRDM – 003".

6.3 Preparación de la muestra para el test estándar de Laboratorio

- Como primera medida de seguridad, poner en funcionamiento extractor de gases.
- Corroborar que sensor de gases se encuentre en buen estado, calibrado y encendido.
- Agitar la pulpa para mantenerla homogénea y en suspensión.
- Utilizar probeta de 1 lt para determinar el % de sólidos de la pulpa. Registrar el valor obtenido.
- Trasvasijar la pulpa en celda de flotación de 1800 ml de volumen.
- Posicionar celda en equipo de flotación

© 2019 Ninguna parte de este documento o la información contenida en éste puede ser reproducida o transmitida en forma alguna o por cualquier medio sin la autorización de MLCC.
Una vez impreso este documento queda como Copia NO CONTROLADA

- Asegurar que válvula de ingreso de aire se encuentre cerrada.
- Bajar lentamente sistema estator-rotor hasta el final del recorrido.

6.4 Flotación Laboratorio

- Al iniciar las pruebas hacer uso inmediato del protector del tipo polvo-gases que indique H_2S.
- Todo personal que labore en el sector debe ser advertido y exigir el uso de sensor de gases y protector.
- Encender el extracto de gases
- Poner en funcionamiento celda de flotación a baja velocidad para evitar derrames de pulpa. (1200 rpm.).
- Realizar la medición de pH para corroborar que este sobre 8 como medida protectora.
- Adicionar el o los reactivos que se requieren a la celda de flotación.
- En caso que sensor alarme gas sulfhídrico, salir inmediatamente del área y dar aviso a Brigada de Emergencia.
- Comunicar a todo el personal sala contigua que haga abandono del área para trasladarse al PEE hasta que la brigada levante la emergencia.
- Realizar medición de pH y ORP de la pulpa.
- Acondicionar durante un tiempo de 2 minutos
- Ajustar velocidad de agitación a 1300 rpm
- Los tiempos de flotación para pruebas de cinéticas son los siguientes: 1, 3, 10, 12 minutos.
- El tiempo de flotación para prueba estándar es de 2 minutos.
- Iniciar la prueba abriendo parcialmente la válvula de aire lo suficiente como para que llegue la espuma al labio de la celda.
- Paletear cada 10 segundos y colectar el concentrado en diferentes bandejas cerámicas para los test de cinética. Para test standard colectar en una sola bandeja.
- A medida que avanza el tiempo, rellenar la celda con agua fresca de acuerdo a necesidades para mantener nivel de pulpa.
- Finalizada la flotación registrar nuevamente el valor del pH final de la pulpa.
- Levantar sistema mecánico accionando manivela de levante estator-rotor
- Lavar sistema estator-rotor adicionando agua por válvula de ingreso aire.
- Retirar celda del equipo y proceder a filtrar por separado los productos.
- Llevar los productos a secado en la estufa a 90ºC.
- Una vez seca y fría las muestras, pesar cada uno de los productos y registrar sus pesos.

© 2019 Ninguna parte de este documento o la información contenida en éste puede ser reproducida o transmitida en forma alguna o por cualquier medio sin la autorización de MLCC.
Una vez impreso este documento queda como Copia NO CONTROLADA

CASERONES | SISTEMA DE GESTIÓN SSO - MLCC
"PROCEDIMIENTO FLOTACION SELECTIVA LABORATORIO"
Código: PO-GCRM-040 | Versión: 01 | Fecha: 09/04/2019 | Página: 6 de 6 | LUMINA COPPER CHILE

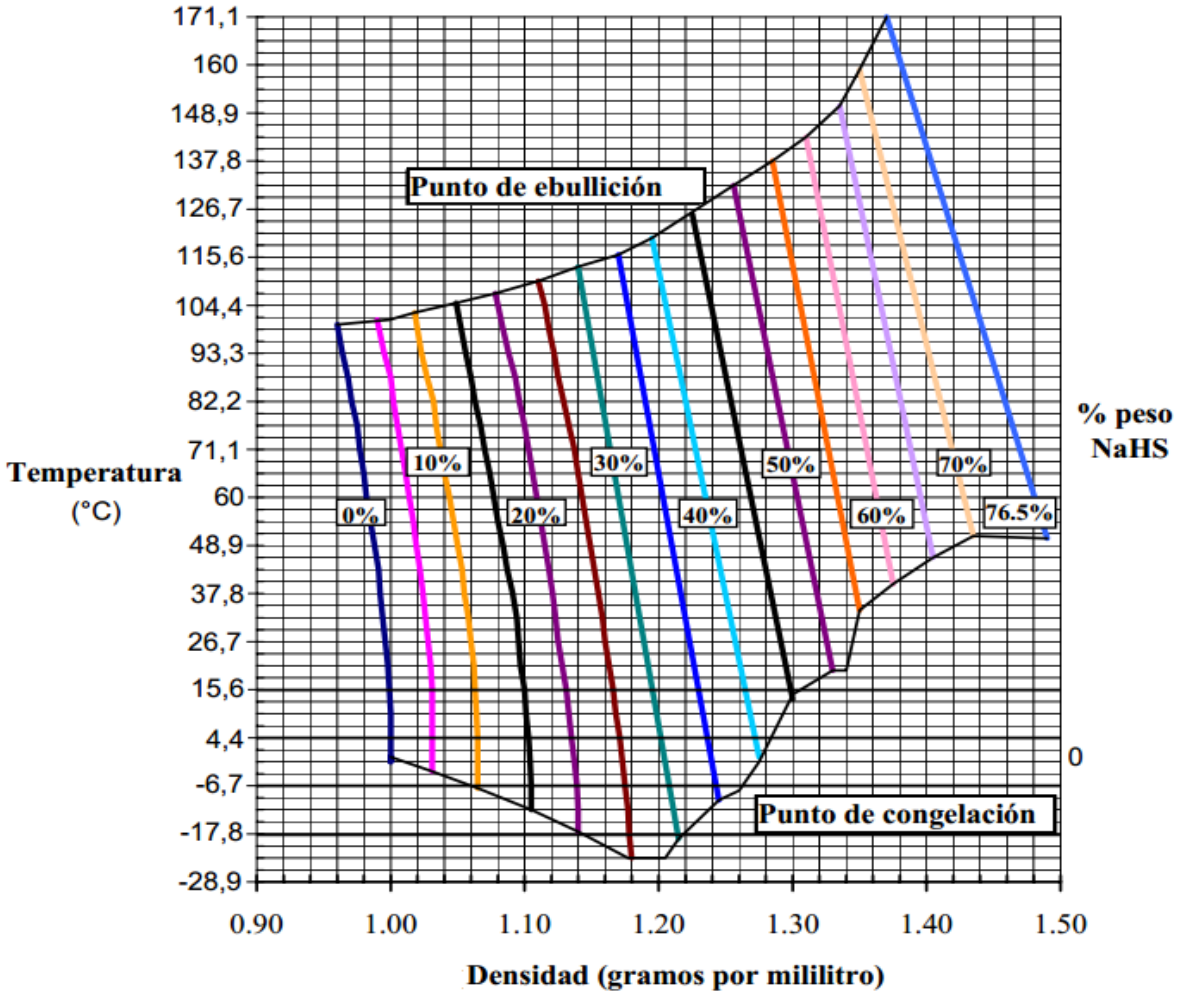
- Enviar muestras a laboratorio químico analizar por CuT, Mo y FeT la cabeza y los productos.
- Una vez que lleguen los resultados de análisis químicos ingresar los datos en planilla que se indica en 7.0 Referencias.
- Analizar los resultados
- Enviar informe con resultados obtenidos.

7.0 Referencias

- Ver procedimiento: "Muestreo de Pulpa en Planta Concentradora – PO – GRDM – 003".
- Ingreso de datos: \\nmmoppc.cl\lumina\Gcia_Metalurgia_Sulfuros\Flotación Colectiva\Cinéticas\Flotaciones Diarias 2017\Diciembre 2017.

© 2019 Ninguna parte de este documento o la información contenida en éste puede ser reproducida o transmitida en forma alguna o por cualquier medio sin la autorización de MLCC.
Una vez impreso este documento queda como Copia NO CONTROLADA

8.4. Anexo D: Relación concentración depresante NaHS y densidad de solución



8.5. Anexo E: Potenciales registrados en las pruebas de flotación

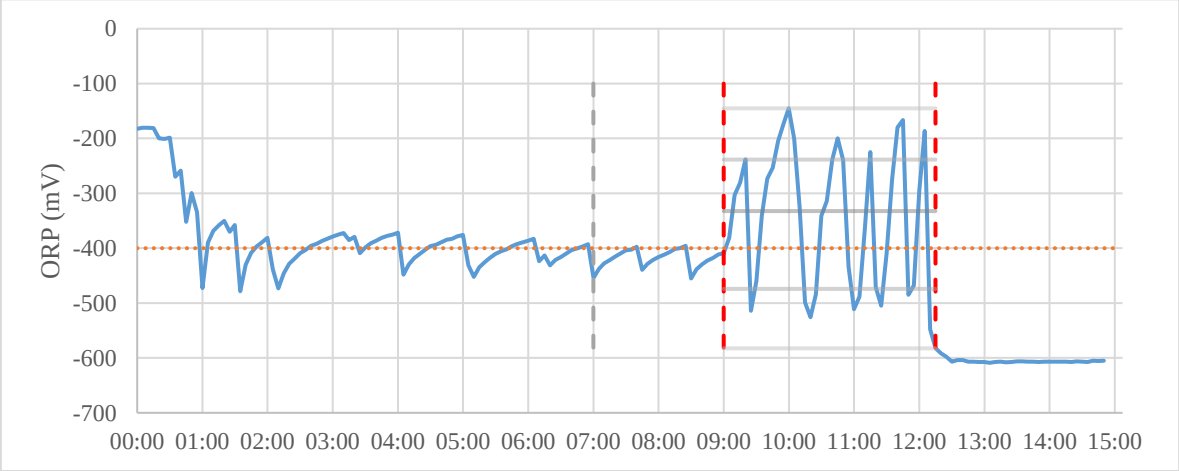


Figura 8-15. Potencial ORP prueba con celda 1,5 L. a -400 mV. En gris se indica inicio periodo acondicionamiento y en rojo el periodo de flotación. Línea punteada indica el potencial objetivo. Las líneas horizontales indican los distintos cuartiles.

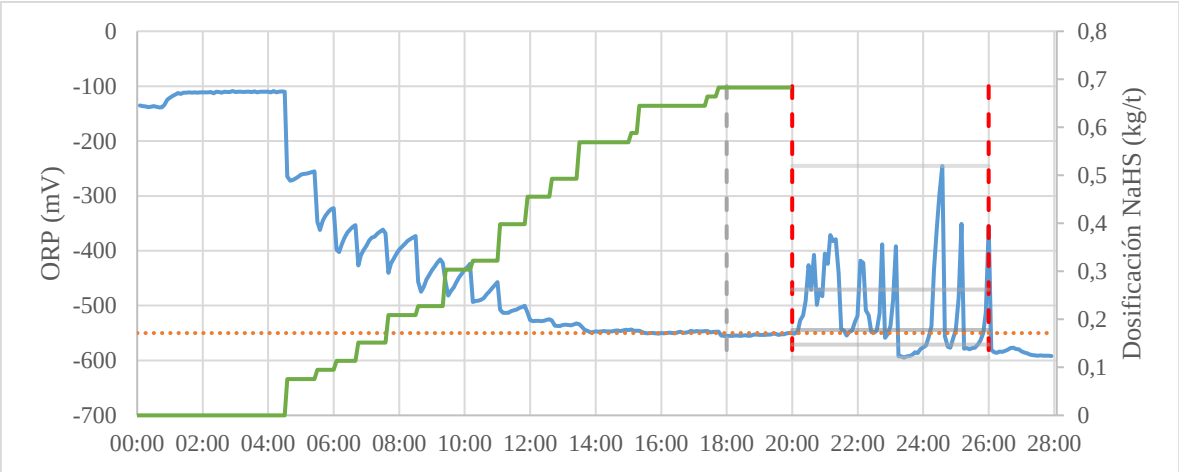


Figura 8-16. Potencial ORP (azul) y dosificación de NaHS (verde) prueba con celda 1,5 L. a -550 mV. En gris se indica inicio acondicionamiento y en rojo el periodo de flotación. Línea punteada indica el potencial objetivo. Se indican los distintos cuartiles durante la flotación.

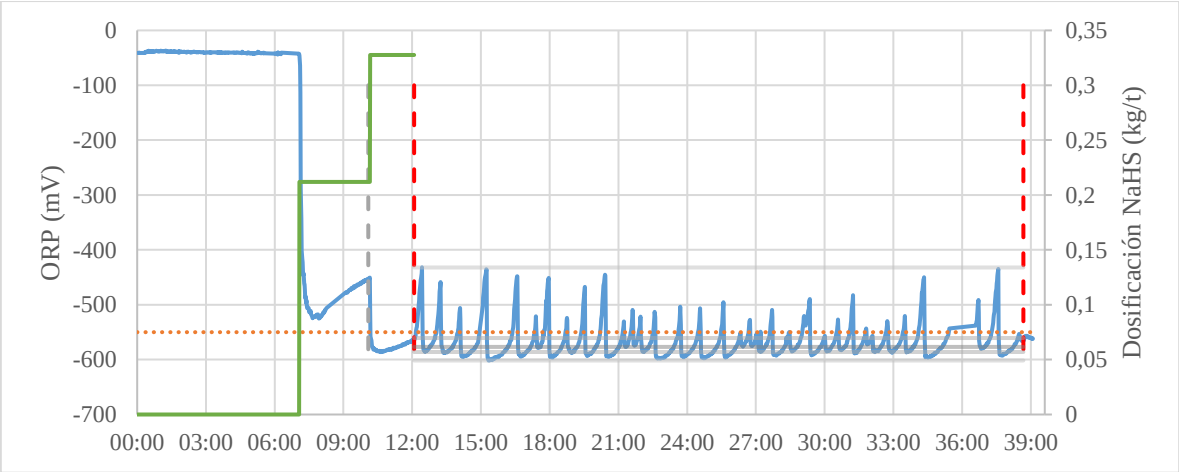


Figura 8-17. Potencial ORP (azul) y dosificación de NaHS (verde) prueba cinética con celda 3 L. En gris se indica inicio acondicionamiento y en rojo el periodo de flotación. Línea punteada indica el potencial objetivo. Se indican los distintos cuartiles durante la flotación.

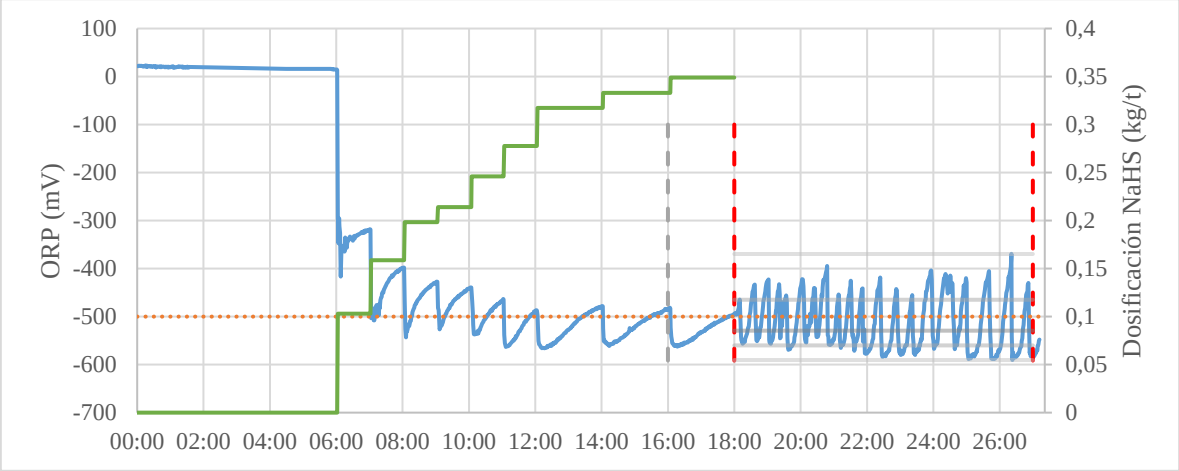


Figura 8-18. Potencial ORP (azul) y dosificación de NaHS (verde) prueba con celda 3 L. a -500 mV. En gris se indica inicio acondicionamiento y en rojo el periodo de flotación. Línea punteada indica el potencial objetivo. Se indican los distintos cuartiles durante la flotación.

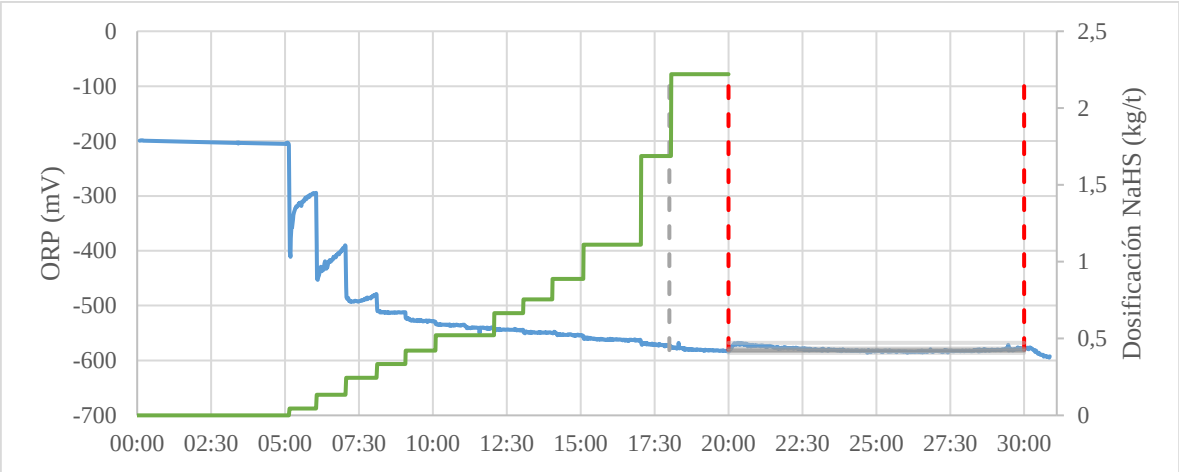


Figura 8-19. Potencial ORP (azul) y dosificación de NaHS (verde) prueba SC 1. En gris se indica inicio acondicionamiento y en rojo el periodo de flotación. Se indican los distintos cuartiles durante la flotación.

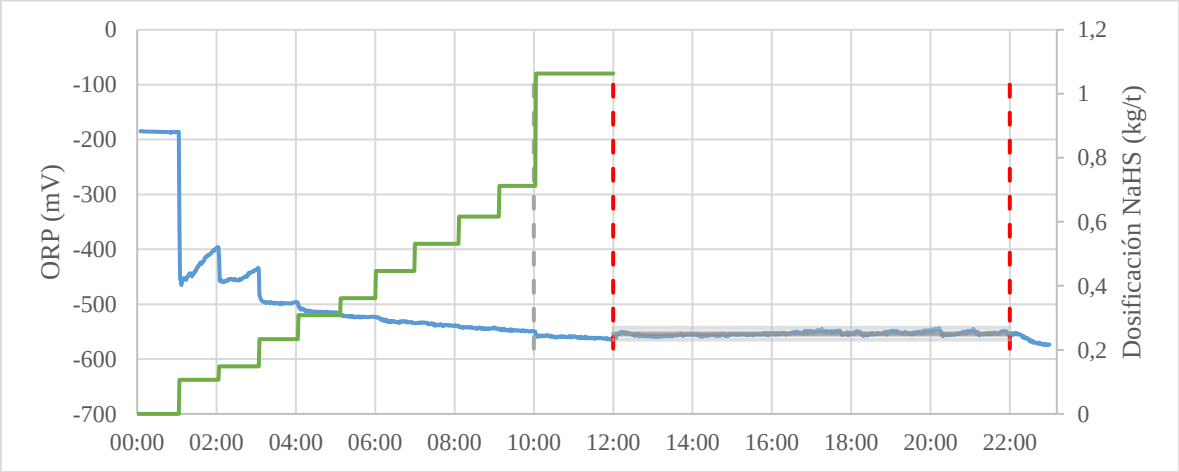


Figura 8-20. Potencial ORP (azul) y dosificación de NaHS (verde) prueba SC 2. En gris se indica inicio acondicionamiento y en rojo el periodo de flotación. Se indican los distintos cuartiles durante la flotación.

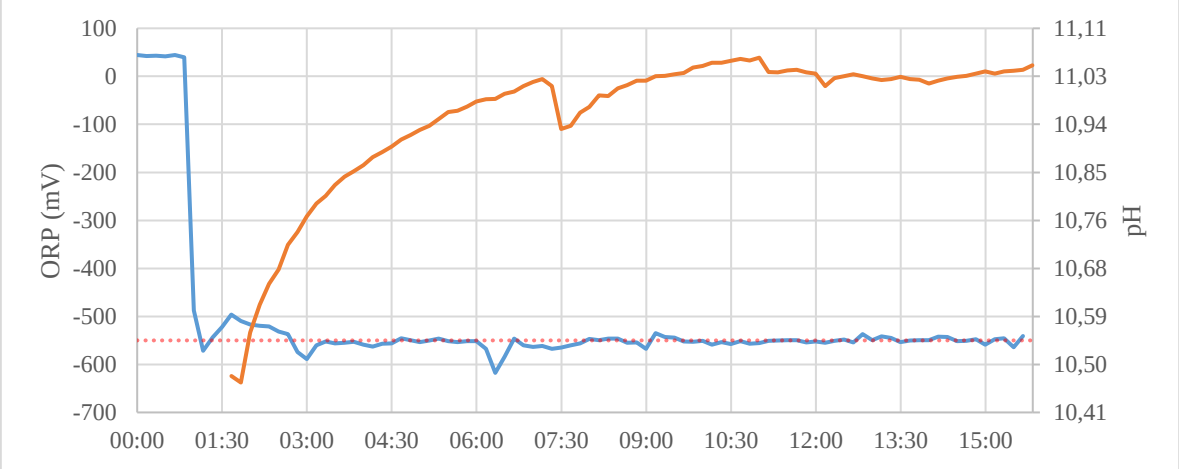


Figura 8-21. Potencial ORP (azul) y pH (naranjo) prueba -550 mV y nitrógeno realizada en Fosfoquim. Línea punteada indica el potencial objetivo.

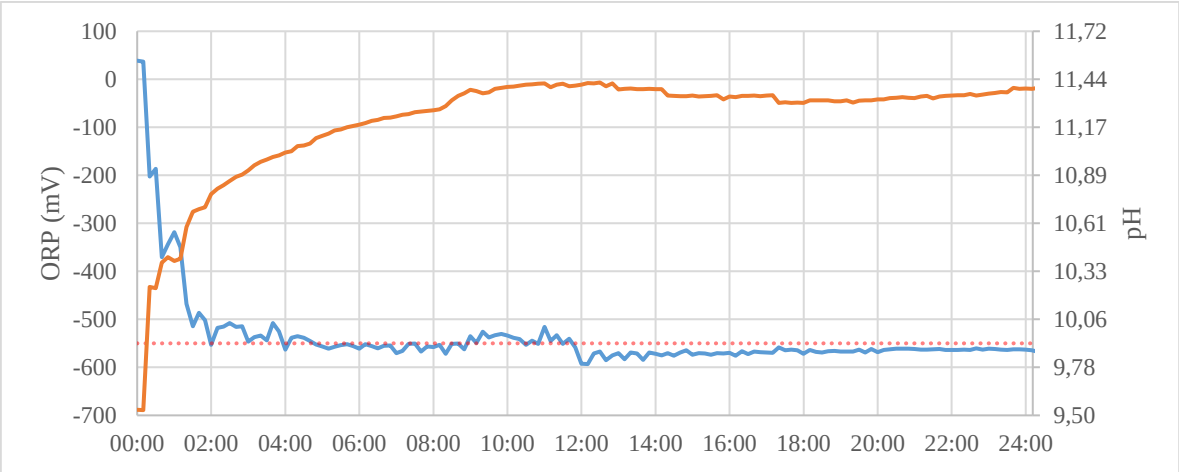


Figura 8-22. Potencial ORP (azul) y pH (naranjo) duplicado prueba -550 mV y nitrógeno realizada en Fosfoquim. Línea punteada indica el potencial objetivo.

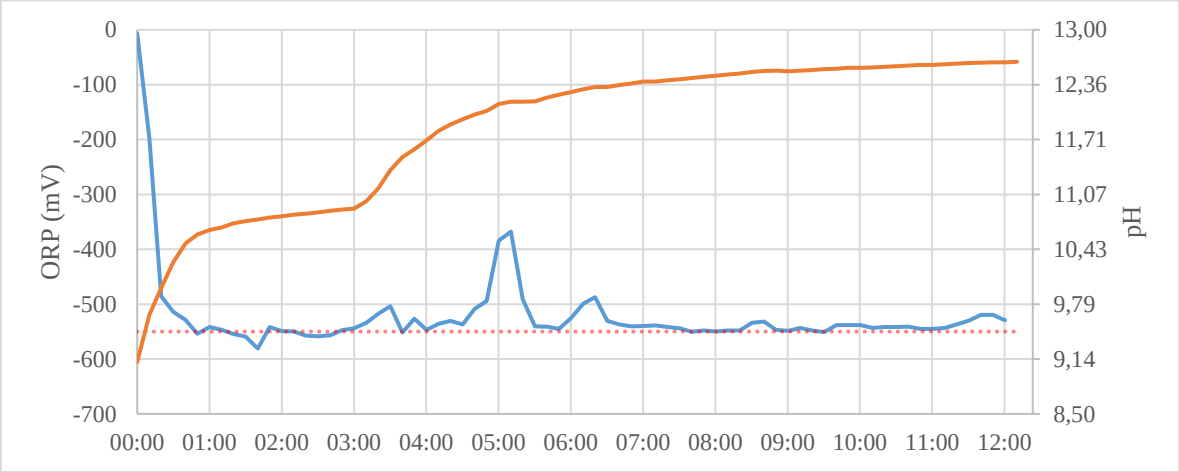


Figura 8-23. Potencial ORP (azul) y pH (naranjo) prueba -550 mV y aire realizada en Fosfoquim. Línea punteada indica el potencial objetivo.

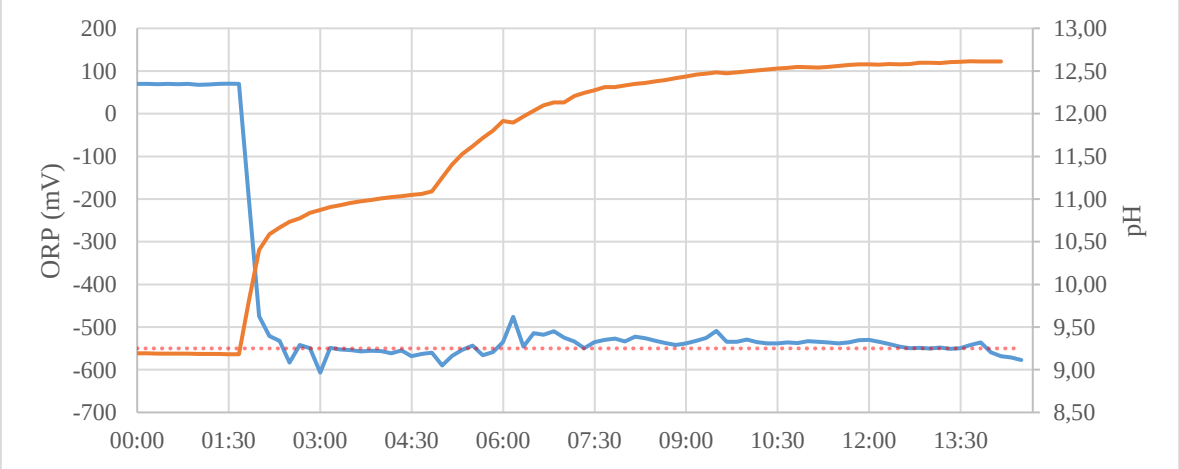


Figura 8-24. Potencial ORP (azul) y pH (naranjo) duplicado prueba -550 mV y aire realizada en Fosfoquim. Línea punteada indica el potencial objetivo.

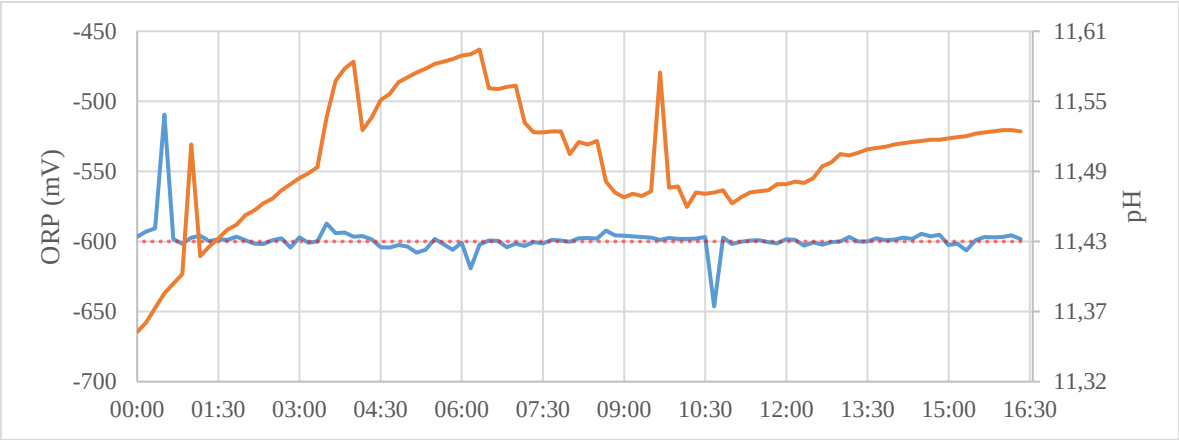


Figura 8-25. Potencial ORP (azul) y pH (naranjo) prueba -600 mV y nitrógeno realizada en Fosfoquim. Línea punteada indica el potencial objetivo.

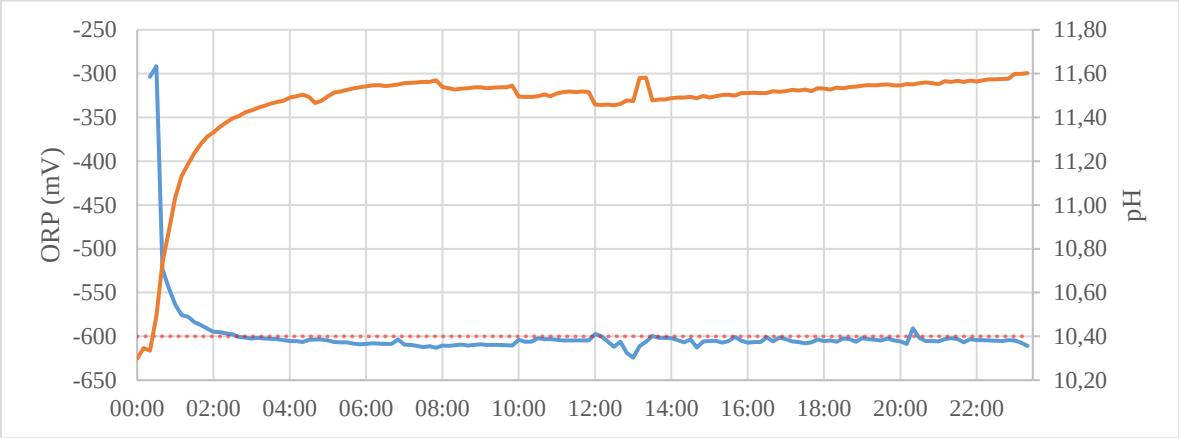


Figura 8-26. Potencial ORP (azul) y pH (naranjo) duplicado prueba -600 mV y nitrógeno realizada en Fosfoquim. Línea punteada indica el potencial objetivo.

8.6. Anexo F: Cambios en el cálculo de la concentración

La concentración del reactivo se calculaba a partir del flujo de reactivo trasvasijado, la razón de agua y valores del NaHS, según la siguiente ecuación:

$$Concentración\ diluida = \frac{Flujo^{*}\ NaHS \cdot Densidad\ NaHS \cdot Concentración\ NaHS}{(Densidad\ NaHS + Razón\ de\ agua) \cdot Flujo^{*}\ NaHS} \quad (4)$$

En este caso, la densidad y la concentración son valores fijos y el flujo era una variable que calculaba el flujo promedio que pasó la última vez que la válvula estuvo abierta. Según se puede ver, el flujo finalmente no afecta en el resultado de la ecuación y solo se ve afectado por el valor de razón de agua.

Se crean entonces variables que cuantifican la masa en el estanque de distribución y la masa de NaHS y agua trasvasijada, cambiándose el cálculo de la concentración diluida a la siguiente ecuación:

$$Concentración\ diluida = \frac{Masa\ TK \cdot Conc\ NaHS + NaHS\ trasvasijado}{Masa\ TK + \frac{NaHS\ trasvasijado}{Conc\ NaHS} + Agua\ trasvasijada} \quad (5)$$

Lo que permite que la concentración se adecué de mejor manera al valor real dentro del estanque, y que, al cambiar el valor de la razón de agua, la concentración se vaya modificando paulatinamente.

8.7. Anexo G: Datos para el cálculo de consumo mensual

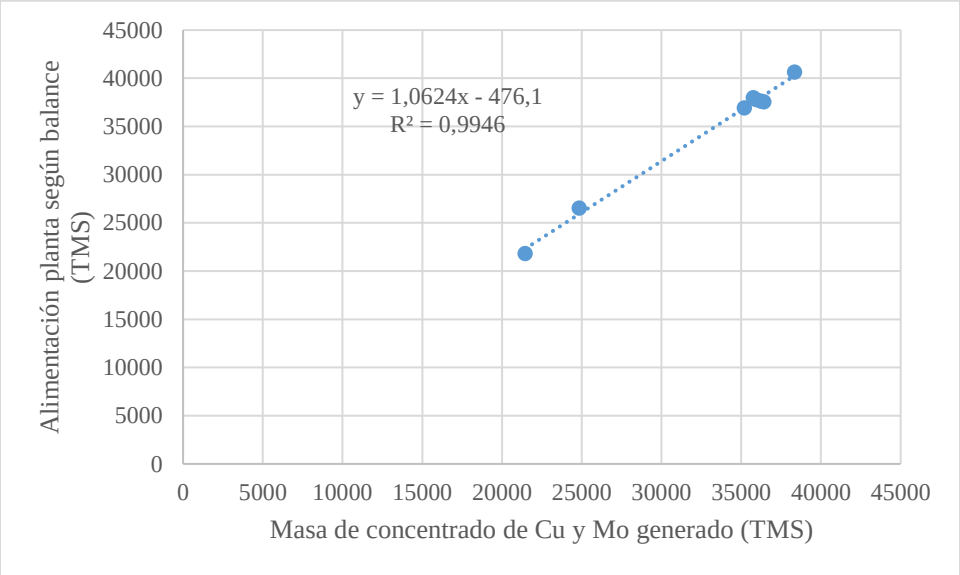


Figura 8-27. Ajuste realizado para estimar el valor de balance del mes de agosto en función de la masa de concentrados obtenidos.

Tabla 8-1. Datos relativos al cálculo de consumo mensual de depresante.

Mes	Alimentación flotación (TMS)	Días mes (d)	Solución NaSH ingresada (kg)	Nº de camiones	NaSH puro ingresado (kg)	Dosificación mensual NaSH (kg/t)
Diciembre	40637,54	31	553500	20	232470	5,72
Enero	37549,98	31	442510	16	190279,3	5,07
Febrero	26553,20	28	307020	11	132018,6	4,97
Marzo	21833,47	31	362990	13	156085,7	7,15
Abril	36917,41	30	501180	18	215507,4	5,84
Mayo	37614,24	31	472440	17	203149,2	5,40
Junio	37993,10	30	358970	13	154357,1	4,06
Julio	37795,46	31	447220	16	192304,6	5,09
Agosto**	32670,00	31	333500	12	143405	4,39

**Alimentación estimada según lo indicado en la Figura 8.14

Tabla 8-2. Continuación tabla 8-1.

Mes	Dosificación mensual solución NaSH (kg/t)	Moly fino producido (t)	Dosificación mensual por moly producido (kg/t)	Nivel inicial TK-01 (%)	Nivel final TK-01 (%)	Acumulación TK-01 (kg)
Diciembre	13,62	286	812,83	60,13	73,65	37326,44
Enero	11,78	210	906,09	73,65	80	17531,28
Febrero	11,56	272	485,36	80	68,79	-30948,92
Marzo	16,63	176	886,85	68,79	81,37	34731,26
Abril	13,58	221	975,15	90,08	69,63	-56459,01
Mayo	12,56	295	688,64	69,63	74,29	12865,48
Junio	9,45	247	624,93	74,29	66,33	-21976,22
Julio	11,83	248	775,42	76,41	64	-34261,92
Agosto**	10,21	304	471,73	72,91	85,72	35366,25

Tabla 8-3. Continuación tabla 8-1

Mes	Dosificación mensual corregida (kg/t)	Precio NaSH (USD/kg)	Gasto Nash (kUSD)	Precio moly (USD/lb)	Ingreso moly (USD)	Relación NaHS Moly (%)	Gasto NaSH/moly fino producido (USD/t)
Diciembre	4,80	0,652	361,12	12,163	7668961,24	4,71%	1262,68
Enero	4,60	0,652	288,71	12,163	5631055,46	5,13%	1374,82
Febrero	6,14	0,655	200,99	11,79	7069887,65	2,84%	738,94
Marzo	5,56	0,655	237,63	11,81	4582393,38	5,19%	1350,18
Abril	7,37	0,655	328,12	11,81	5754028,05	5,70%	1484,72
Mayo	5,06	0,655	309,28	12,2	7934355,40	3,90%	1048,42
Junio	4,64	0,655	235,00	12,3	6697795,26	3,51%	951,42
Julio	5,99	0,655	292,77	12	6560889,60	4,46%	1180,53
Agosto**	3,31	0,641	213,69	12	8042380,80	2,66%	702,96