

## Curvas grado-recuperación y recuperación económica de minerales.

Sadam Torres<sup>1</sup>, Daniel Saucedo<sup>1</sup>, Saúl Ortiz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Planta de flotación fierro, Minera Fresnillo. Avenida Miguel Hidalgo SN, Col. Centro, C.P. 99000. Fresnillo, Zacatecas.

<sup>2</sup> Gerencia de servicios técnicos, Fresnillo plc. Calzado Saltillo 400, Col. Campestre la Rosita, C.P. 27250, Torreón, Coahuila.

[sadam\\_torres@fresnilloplc.com](mailto:sadam_torres@fresnilloplc.com), [daniel\\_saucedo@fresnilloplc.com](mailto:daniel_saucedo@fresnilloplc.com)

### RESUMEN

Las curvas grado-recuperación proporcionan información importante sobre el desempeño de un circuito de flotación, y nos representan los dos objetivos principales del beneficio de minerales, obtener el mayor grado posible sin sacrificar demasiada recuperación; si estos parámetros metalúrgicos los complementamos con estudios económicos, que evalúen la sensibilidad del concentrado a los costos operativos e influencia del precio de los metales, se puede maximizar la recuperación económica e incrementar la utilidad del negocio.

El presente trabajo tiene como finalidad presentar las acciones metalúrgicas que se realizaron en la planta de flotación de piritas de Minera Fresnillo para disminuir los costos operativos, aumentar la recuperación y otorgar mayor valor al concentrado con el objetivo de revertir la situación de los resultados económicos desfavorables que se presentaban en ese momento.

**PALABRAS CLAVE:** *Curvas grado-recuperación; parámetros metalúrgicos; sensibilidad económica.*

## ANTECEDENTES

### Diagrama de flujo de diseño de la planta

La planta de flotación de piritas de Minera Fresnillo, localizada en el distrito minero de Fresnillo, Zacatecas inició operaciones en mayo de 2023. En el diseño original de la planta se tiene una capacidad de 14 mil toneladas, de las cuales 9 mil corresponden a jales frescos y 5 mil a jales reminados, la mezcla de ambos compone la alimentación general.

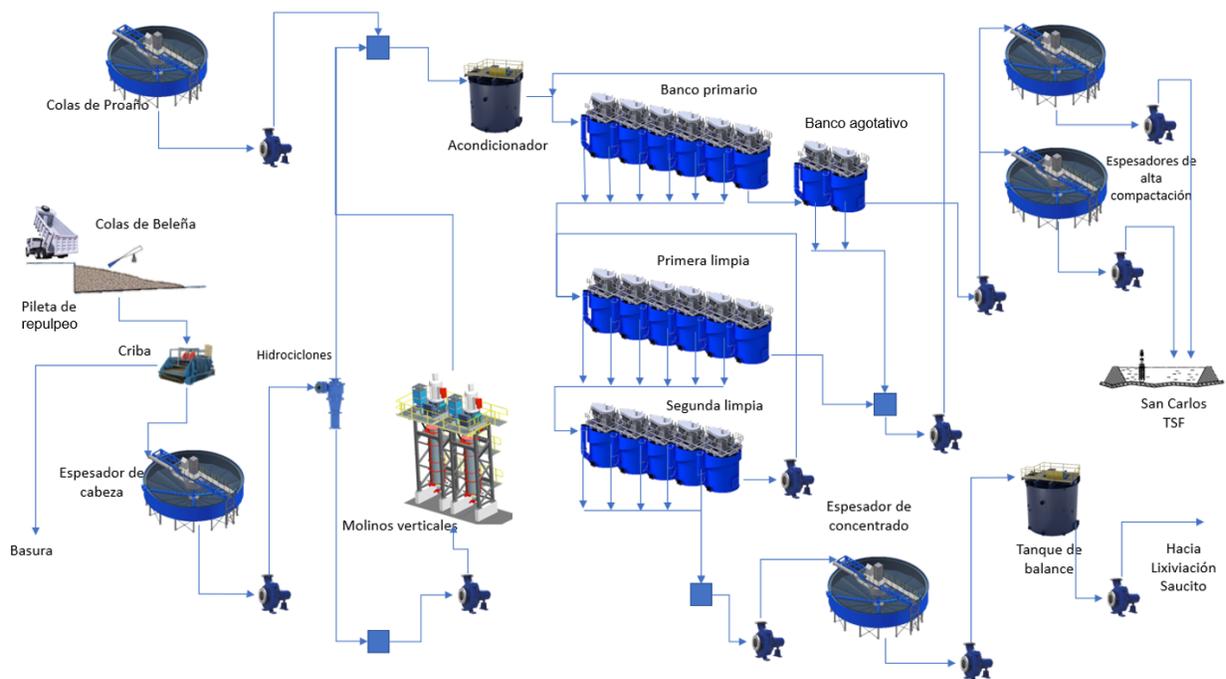
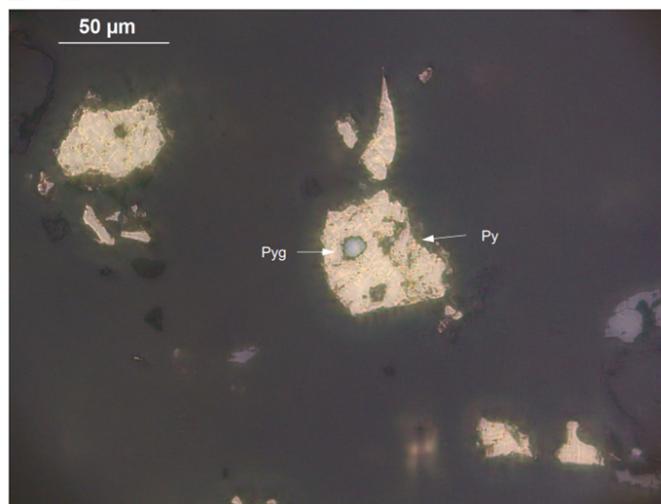


Figura 1. Diagrama de flujo de la planta de piritas.

En la **figura 1** se muestra el diagrama de flujo de la planta, se puede observar que la alimentación de jales frescos (colas Proaño) ingresan directamente al acondicionador y posteriormente al circuito de flotación. Por otra parte, los jales antiguos son reminados y transportados hacia la pileta de repulpeo, donde se forma una pulpa que alimenta al circuito de clasificación, los finos de ciclones pasan al acondicionador y los gruesos son reducidos de tamaño en dos molinos verticales, el producto final llega al acondicionador y se mezcla junto con los jales frescos. El circuito de flotación cuenta con banco primario y agotativo, el concentrado pasa por dos etapas de limpia para obtener el producto final, el cual es bombeado hasta la planta de lixiviación dinámica de Saucito para recuperación de metales de valor.

### **Antecedentes históricos y objetivo de la planta.**

La planta se diseñó para procesar jales de la flotación plomo-zinc, y también para el beneficio de jales antiguos que, por ineficiencias de la época y leyes de cabeza altas, bajo las condiciones actuales aún conservan un valor económico; el concentrado que se produce es de pirita con asociaciones de oro y plata, como se muestra en la **figura 2**.



**Figura 2.** Micrografía de partículas de pirita ( $\text{Py-FeS}_2$ ) con asociación de pirargirita ( $\text{Pyg-Ag}_3\text{SbS}_3$ ).

Durante la puesta en marcha y rampa de arranque operativa, los resultados financieros de la planta no fueron favorables. Los altos costos operativos, un esquema de reactivos agresivo y poco selectivo que generaba gran cantidad de impurezas y bajos grados, menores leyes de cabeza de alimentación a la planta, altos costos de maquila para el procesamiento de concentrado en la planta de lixiviación dinámica en Saucito y algunas complicaciones operativas con el reminado de jales generaron resultados marginales, con pérdidas económicas.

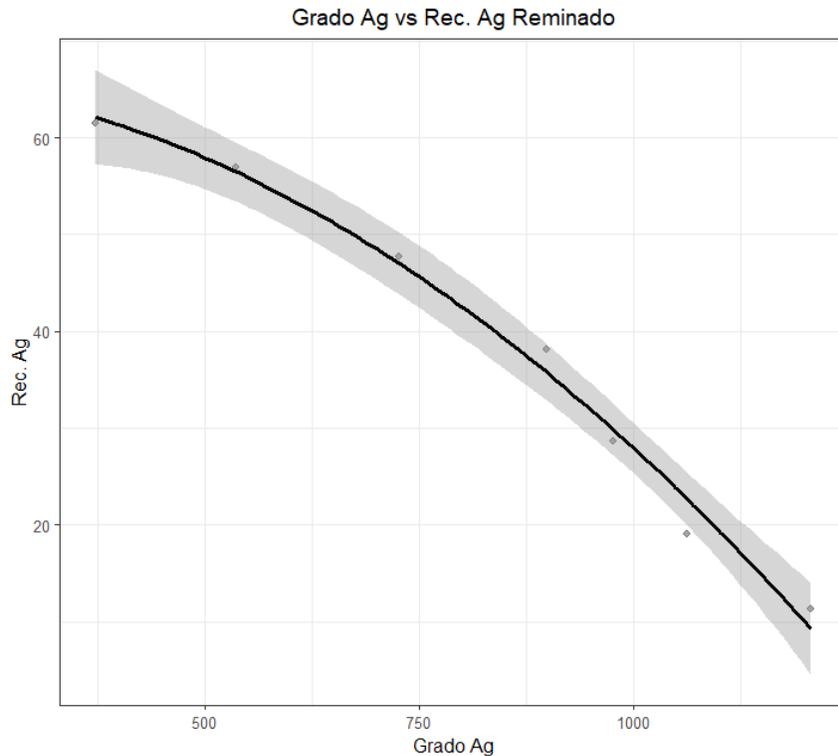
Para revertir esta situación, se estuvieron monitoreando y evaluando distintos parámetros metalúrgicos, como la razón de concentración, la recuperación y el grado del concentrado; además se realizó un seguimiento al control de costos de la planta y con esto se hizo un análisis de sensibilidad económica para identificar las características del concentrado que aporten mayor beneficio financiero.

## METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### Curvas grado-recuperación

A nivel laboratorio se realizaron pruebas de flotación y se generaron curvas grado-recuperación de plata para los concentrados obtenidos de tres alimentaciones distintas a la planta: jales reminados, jales frescos y la mezcla de ambos jales, la planta tiene la practicidad de ser operada con estas tres distintas configuraciones.

Para cada una de las curvas se realizó un ajuste lineal para obtener los modelos de regresión, los cuales se implementarán para realizar el análisis de sensibilidad económica.



**Figura 3.** Curva grado-recuperación de plata en concentrado de pirita generado con jales reminados.

De las curvas de las **figuras 3, 4 y 5** se obtuvieron los modelos (1), (2) y (3), para reminado, jales frescos y mezcla, respectivamente:

$$Rec. Ag = 66.39 - 4.3 \times 10^{-5} * Ag^2 + 4.57 \times 10^{-3} * Ag \quad (1)$$

$$Rec. Ag = 58.8 - 1.03 \times 10^{-3} * Ag^2 + 0.15 * Ag \quad (2)$$

$$Rec. Ag = 79.05 - 7.45 \times 10^{-5} * Ag^2 - 9.85 \times 10^{-2} * Ag \quad (3)$$

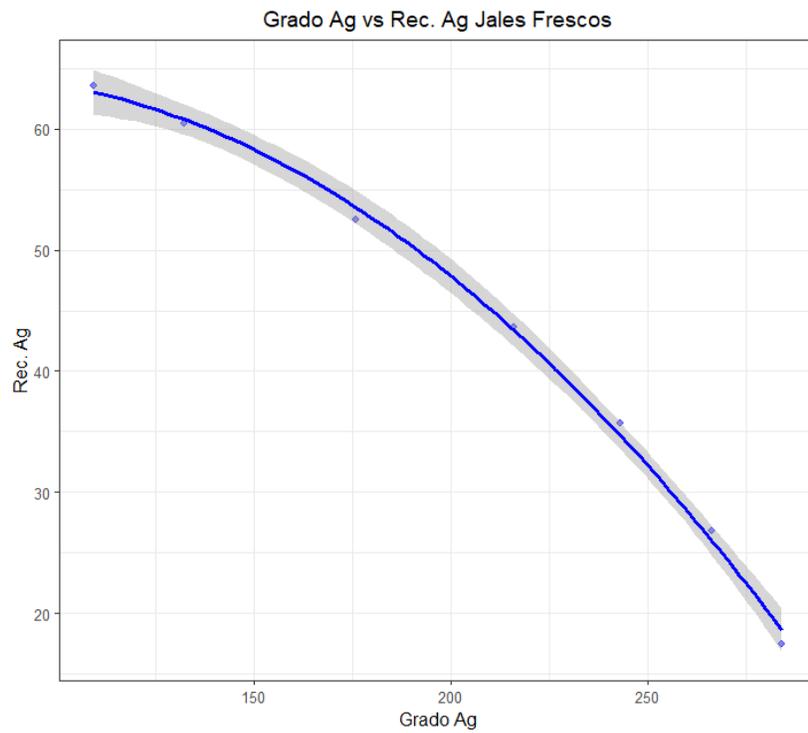


Figura 4. Curva grado-recuperación de plata en concentrado de pirita generado con jales frescos.

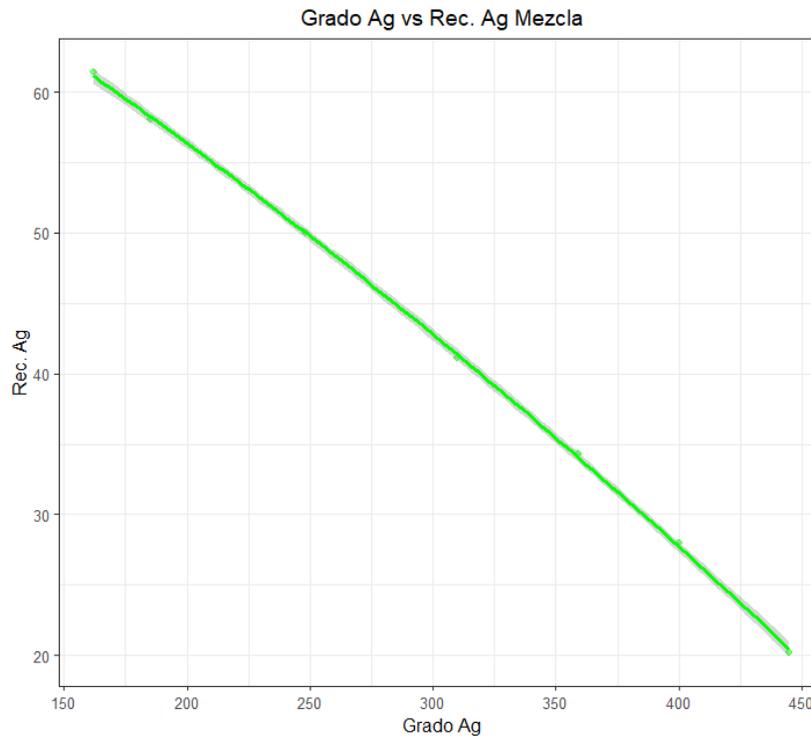
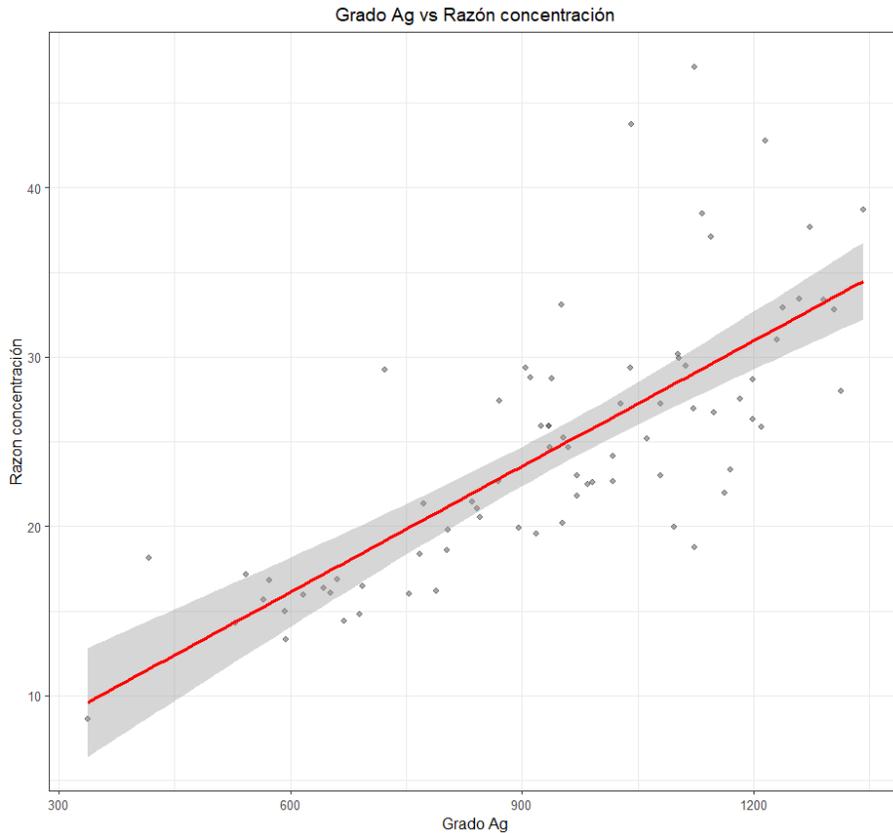


Figura 5. Curva grado-recuperación de plata en concentrado de pirita generado con jales mezclados.

Se puede observar que, para cada alimentación o mineral de cabeza, el grado que se obtiene con cada una de estas configuraciones es distinto, y no se observa un impacto significativo en la recuperación obtenida.

Además, se tomaron datos de planta de grados de concentrado producidos y de razón de concentración, con ambos se verificó correlación y se realizó ajuste lineal.



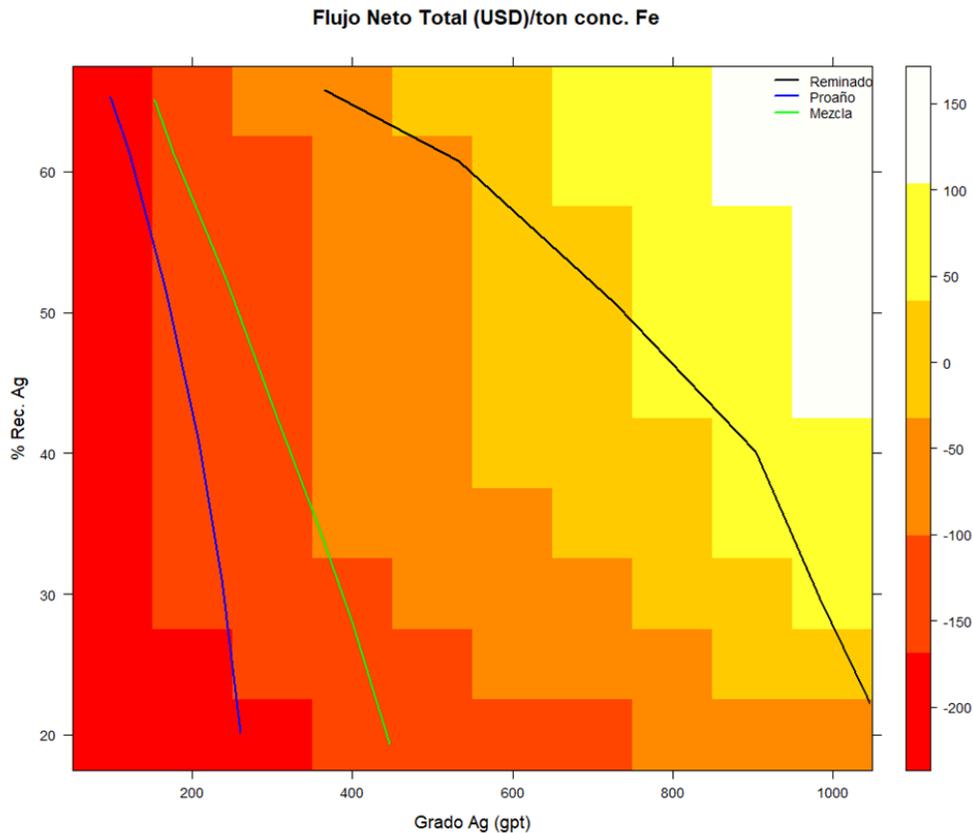
**Figura 6.** Grado de Ag en concentrado de pirita vs razón de concentración.

Se obtiene el siguiente modelo que explica la relación del grado de plata vs la razón de concentración para los datos operativos:

$$\text{Razón concentración} = 1.24 + 0.024 * Ag \quad (4)$$

**Análisis de sensibilidad.**

Para realizar el análisis de sensibilidad se utilizó el software estadístico R. Se generó un texto con código (script) donde se cargaron los modelos de las curvas de grado recuperación y el modelo entre la relación de grado de plata y razón de concentración, con ellas se simularon escenarios con diferentes niveles de grado y recuperación de plata y se evaluó el flujo neto de efectivo por cada tonelada de concentrado producido.



**Figura 7.** Sensibilidad económica de concentrado de pirita, flujo neto por tonelada de concentrado producida.

Para facilitar la interpretación de resultados, estos se graficaron en forma de mapa de calor (heatmap) mostrando distintas zonas de color para diferentes valores de flujo neto de efectivo por tonelada de concentrado. También se pueden observar las tres curvas grado-recuperación para las tres corrientes (jales reminaados, jales frescos y mezcla).

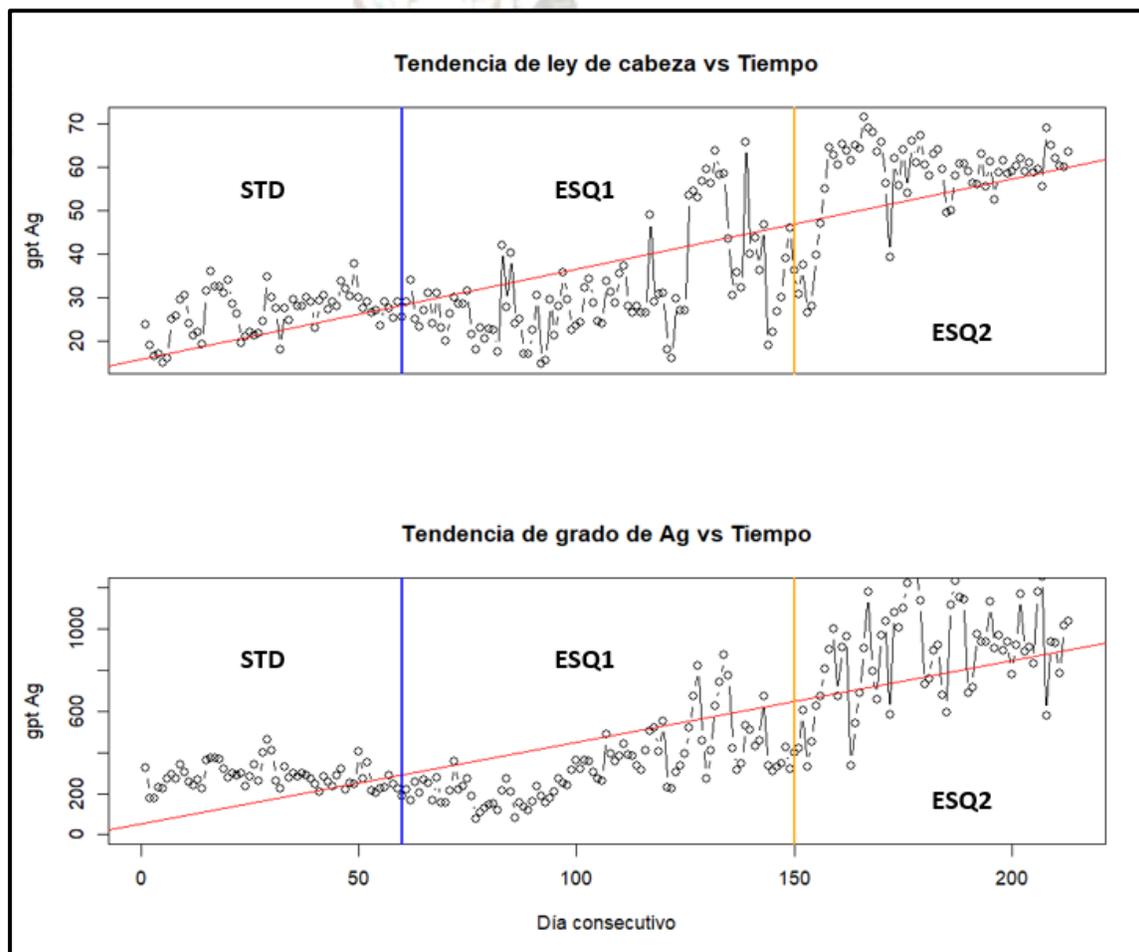
En la **figura 7** podemos observar que la zona roja y naranja caen en una zona de pérdida económica, por lo tanto, flotar jales frescos y la mezcla de ambos jales no es rentable. Por otro lado, con la flotación de jales reminaados se observa que a partir de la zona amarilla comenzamos a generar flujo de efectivo y que

los valores mayores a 800 gramos por tonelada de grado de plata generan flujo de efectivo positivo, entre 50 y 100 USD/tonelada de concentrado producido.

### **Cambio de esquema de reactivos.**

Con los resultados del análisis de sensibilidad y bajo la necesidad de generar valor económico al concentrado de pirita aumentando el grado de plata, se probaron dos esquemas alternos al estándar con dos objetivos principales, disminuir costo y tener mayor selectividad, ya que no todas las piritas tienen asociaciones con plata.

La configuración y dosificaciones de los tres esquemas de reactivos evaluados se muestra en la **tabla 1**.



**Figura 8.** Tendencia en ley de cabeza y grado de plata en concentrado de pirita.

La tendencia en tiempo del comportamiento en el grado de plata en el concentrado con cada esquema de reactivos se puede apreciar en la **figura 8**. También se puede observar en la misma figura que se tiene un incremento en la ley de cabeza que alimenta a la planta, esto se debió a que se comenzó a procesar

únicamente jales remuinados ya que los jales frescos y la mezcla de jales no son rentables, como se puede apreciar en el análisis de sensibilidad.

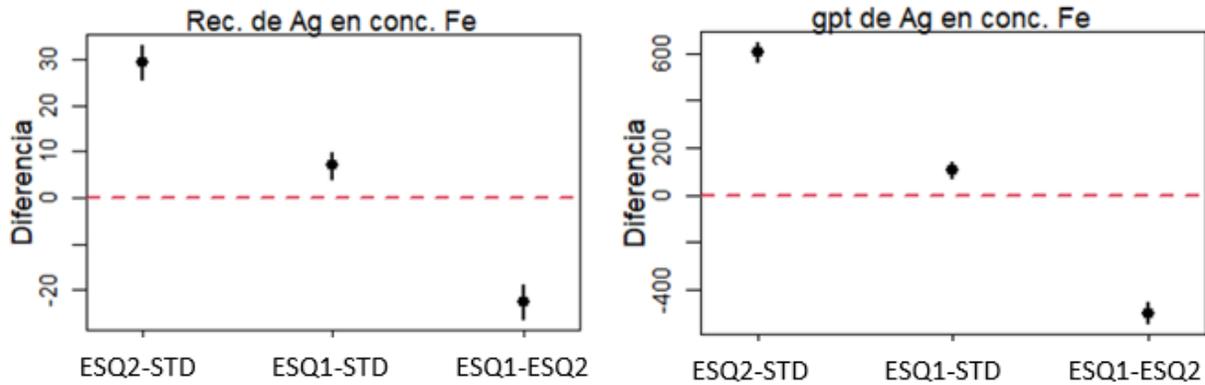


Figura 9. Intervalos de confianza al 95% para la diferencia en medias de la recuperación y grado de plata.

Con los datos evaluados de cada esquema durante las pruebas en planta, se realiza un análisis ANOVA para demostrar que existe evidencia estadística en la diferencia de las recuperaciones y grados obtenidos.

En la figura 9 se graficaron las diferencias en los promedios de los distintos esquemas, demostrándose que el mejor desempeño se logró con esquema número dos, tanto en recuperación como en grado de plata.

Tabla 1. Esquemas de reactivos evaluados en planta.

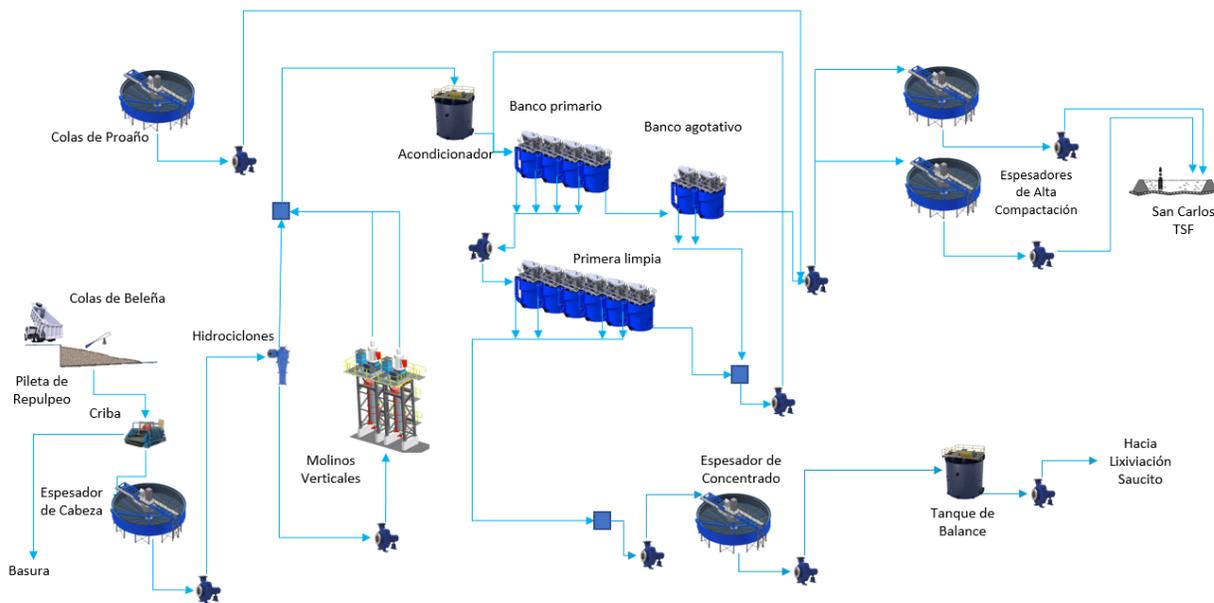
Reactivo	Estándar (kg/ton)	ESQ1 (kg/ton)	ESQ2 (kg/ton)
Espumante	0.050	0.050	0.025
Xantato	0.400	--	--
Colector 1	0.030	--	--
Colector 2	0.020	--	--
Floculante	0.040	0.040	0.040
Sulfato de cobre	0.500	--	--
Cal	0.200	--	--
Colector 1	--	0.090	--
Colector 2	--	0.030	--
Colector 1	--	--	0.090
<b>Total (USD/ton)</b>	<b>\$ 3.1</b>	<b>\$ 1.3</b>	<b>\$ 0.52</b>

Además de las ventajas metalúrgicas, el esquema 2 tiene un ahorro de 2.58 dólares por tonelada el cual tiene un impacto positivo en la economía de la planta.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base a la sensibilidad económica y a la necesidad de incrementar el grado de plata en el concentrado fue necesario realizar adecuaciones en el circuito de flotación, esto debido a que los jales frescos y la mezcla de jales no es rentable, por lo que se toma la decisión de procesar únicamente jales reminaados.

El circuito de celdas original estaba compuesto de 6 celdas primarias, 2 celdas agotativas, 6 celdas de primer limpia y 5 celdas de segunda limpia. Después de las adecuaciones únicamente quedaron en operación 4 celdas primarias, 2 agotativas y 4 celdas limpiadoras, como se puede observar en la **figura 10**.



**Figura 10.** Diagrama de planta pirita para flotación de jales reminaados.

El impacto generado por la adecuación del circuito de la planta para tratar jales reminaados y el cambio de esquema de reactivos, en el que se tuvo un ahorro del 83% respecto a esquema de diseño, se vio reflejado en los costos operativos de la planta, como se puede apreciar en la **figura 11**.

La sección gris de las barras corresponde a la proporción del costo total por concepto de materiales de operación y reactivo, a partir de diciembre que se realizó el cambio de esquema se nota la disminución en este rubro. Por concepto de energía eléctrica, se tuvo ahorro en la demanda energética consumida por las celdas y equipo de bombeo que quedaron fuera por la adecuación.

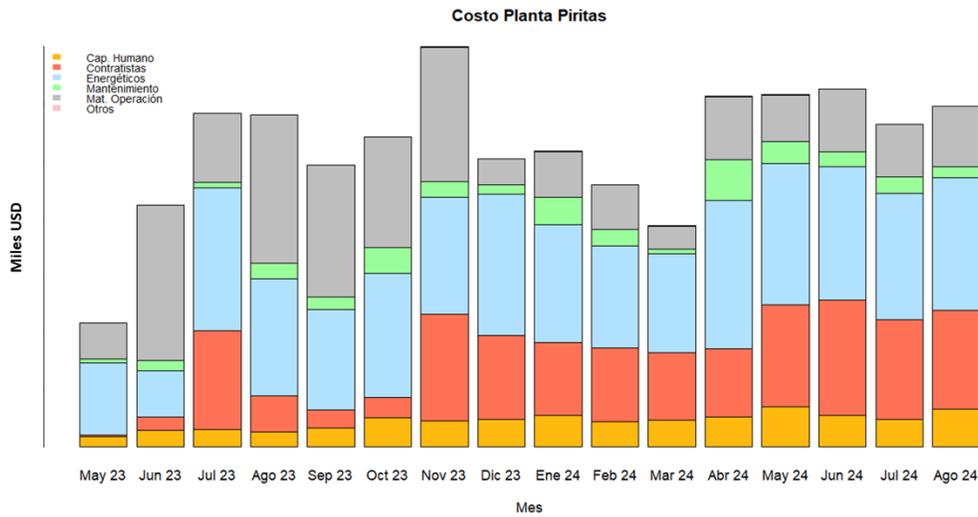


Figura 11. Costos por concepto de planta de flotación de piratas.

Sin embargo, por la vida útil y desgaste normal de los componentes de los equipos: molinos verticales, celdas de flotación, equipos de bombeo, etc., se tiene un incremento en costo desde inicios de año 2024.

Finalmente, en la **figura 12** se muestra el flujo neto de efectivo en miles de dólares que generó la planta por mes desde el inicio de operaciones. De manera contrastante y en eje secundario se muestra el grado de plata en el concentrado para visualizar como el cambio en la filosofía operativa, de tener una flotación agresiva y producir concentrados con bajo grado, a comenzar a ser altamente selectivos, generó resultados financieros favorables para el negocio.

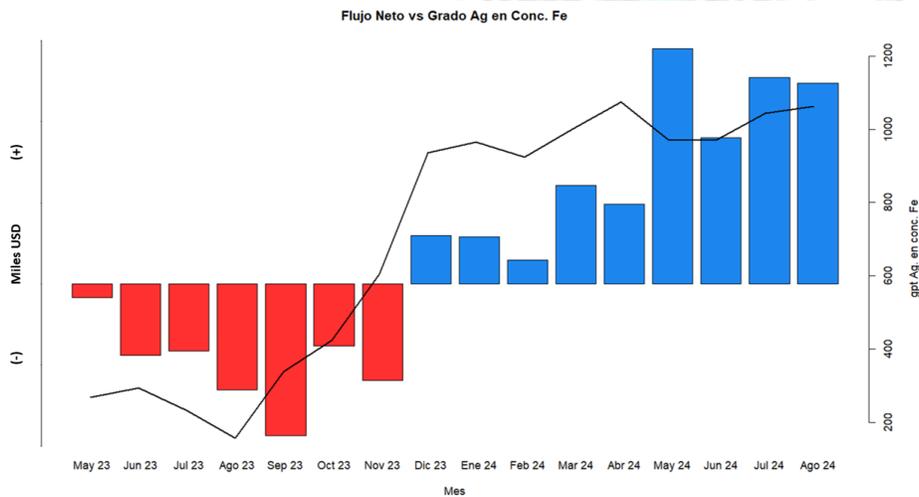


Figura 12. Flujo neto de efectivo por mes vs grado de plata en concentrado de piratas producido.

## CONCLUSIONES

Se implementó un esquema de flotación de pirritas altamente selectivo para mejorar el grado de los concentrados de fierro, en lugar de una flotación agresiva que buscaba la recuperación de metales valiosos. Con lo anterior se logró revertir la situación financiera del proyecto pasando de un flujo de efectivo negativo a tener márgenes de utilidad que permiten la continuidad operativa.

Es necesario que los estudios realizados para mejorar parámetros metalúrgicos como son el tamaño de partícula en molienda, grados y recuperación, optimización de esquemas de reactivos, etc., sean complementados con estudios económicos que involucren los costos operativos, precios de los metales, etc., para buscar maximizar la utilidad del negocio.

En la industria minera, debido a la alta volatilidad de los precios de los metales y costos, se requiere mantener actualizados los esquemas operativos que permitan obtener no solo los mejores resultados metalúrgicos sino la mejor recuperación económica.

## REFERENCIAS

- Neethling S.J. (2012). Grade-recovery curves: A new approach for analysis of and predicting from data plant.
- PMICSA (2019). Parámetros de diseño planta concentradora de flotación de fierro.
- Torres S. (2023). Evaluación de esquemas alternos en planta de pirritas.
- Meléndez K, Quintero M, Carrillo L, Godinez O, Núñez A, Santacruz A (2014). Recuperación de oro y plata en pirritas de Fresnillo y Saucito.

