

Evaluación y Análisis del Circuito de Separación Plomo/Cobre

Estreyker Chávez de Alba¹, Juan Luis Reyes Bahena²

¹ IMMSA, Unidad San Martín, Mineral de San Martín, Sombrerete, Zacatecas, México,
estreyker.chavez@mm.gmexico.com

² IMMSA, Corporativo, Arsénico 700, Fracc. Morales, 78180 San Luis Potosí, S.L.P., México.
juanluis.reyes@mm.gmexico.com

RESUMEN

En cualquier proceso de separación de un concentrado bulk por el método de flotación existen variables controlables y variables no controlables inherentes al proceso de flotación. Por ello, regularmente, uno de los productos concentrados siempre es de mejor respuesta metalúrgica (grado/recuperación) que el otro. Cuando se usa NaCN para la depresión del mineral portador de Cu en un concentrado bulk (Pb/Cu), el mineral flotable (minerales portadores de Pb) llega a ser el principal reto metalúrgico para garantizar maximizar el grado y recuperación de este debido a las variables no controlables en el proceso de separación Pb/Cu. De aquí el objetivo de esta investigación es entender y conocer el efecto de las variables controlables en la optimización del proceso de separación Pb/Cu. La investigación metalúrgica se basó en la evaluación y el análisis de pruebas de flotación a nivel laboratorio y el diagnóstico del circuito de separación en la planta. El estudio concluye que el control del pH juega un rol importante en el proceso de separación Pb/Cu; mejorando la cinética de flotación del mineral de plomo y; por otro lado, inhibiendo la flotabilidad del mineral de cobre interactuando con el cianuro para un mayor control en la separación Pb/Cu. El tiempo de flotación, en presencia de oxígeno, afecta significativamente el proceso el cual degrada el cianuro libre en el proceso debido a la variabilidad del potencial oxido-reducción en el sistema provocando baja eficiencia de separación Pb/Cu; lo que lleva a la necesidad de incrementar el consumo de cianuro para evitar recuperar el mineral de cobre en el concentrado flotado (minerales portadores de plomo). La adición escalonada de cianuro ayuda a reducir la degradación del cianuro libre en función del tiempo de flotación y cantidad de oxígeno disponible en la pulpa.

PALABRAS CLAVE: *Evaluación, cinética; separación Pb/Cu; óxido-reducción; flotación.*

ANTECEDENTES

La separación de los minerales de Pb y de Cu por flotación es un proceso común en la minería para extraer estos metales de sus minerales. La flotación bulk (Pb/Cu) en las primeras etapas del proceso en algunos casos es económicamente viable por la alta recuperación de estos metales comparado con una flotación selectiva secuencial, para lo cual se utilizan reactivos que permiten una flotación conjunta de ambos minerales portadores de Pb y Cu. Generalmente, el metal de menor contenido es el que se flota mientras que el otro se deprime. Cuando el Pb se deprime, se utiliza reactivos generadores de iones SO_3^{2-} , (tales como: SO_2 , bisulfitos, sulfitos combinados con sulfato ferroso, tiosulfato, hiposulfitos). Cuando se deprime el Cu, se utiliza principalmente el NaCN como reactivo depresor principal, sin embargo, la separación puede estar limitada con la presencia de minerales de cobre secundarios y/o metales de Au y Ag (nativos). El principal reto en cualquier proceso de separación (Pb/Cu, Pb/Zn o Cu/Mo) es la baja calidad y recuperación del mineral que se flota; como resultado de las múltiples variables del proceso; tales como: tipo de asociación, minerales contaminantes, condiciones químicas (pH, ORP), tipo y exceso de colector, etc., razón por la cual estos procesos en cada una de las diferentes unidades responde de manera diferente y por ello, el estudiar y diagnosticar es la herramienta principal para entender el comportamiento de estas variables en la relación grado/recuperación.

La Figura 1 muestra el comportamiento del proceso de separación Pb/Cu, en el cual se flota preferencialmente el mineral de plomo y se deprime el mineral de cobre con NaCN. Como se observa, la recuperación es muy variable debido a la alta relación Cu/Pb y con ello, el exceso de cianuro requerido buscando tener la depresión del mineral de cobre.

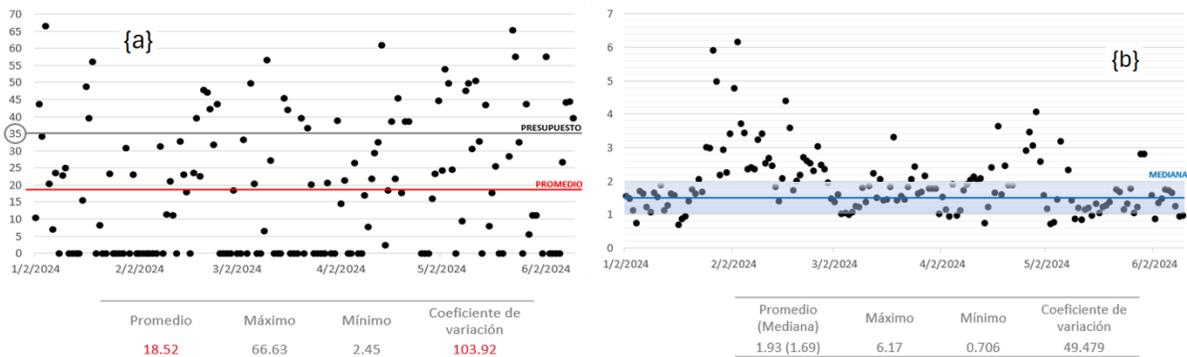


Figura 1. Comportamiento de la recuperación de Pb en el Conc. Plomo y la relación Cu/Pb en alimentación ({a} – Recuperación Pb; {b} – Relación Cu/Pb)

La Figura 1 muestra que la recuperación de Pb es mayor al 50% cuando la relación Cu/Pb en la alimentación al circuito de flotación es menor a 2.5; hasta una relación 1 a 1 de estos metales. La afectación de la alta relación Cu/Pb en el proceso de separación afecta significativamente el grado de Pb en el

concentrado de plomo debido a la falta de NaCN requerido para lograr la depresión del mineral de Cu (Figura 2).

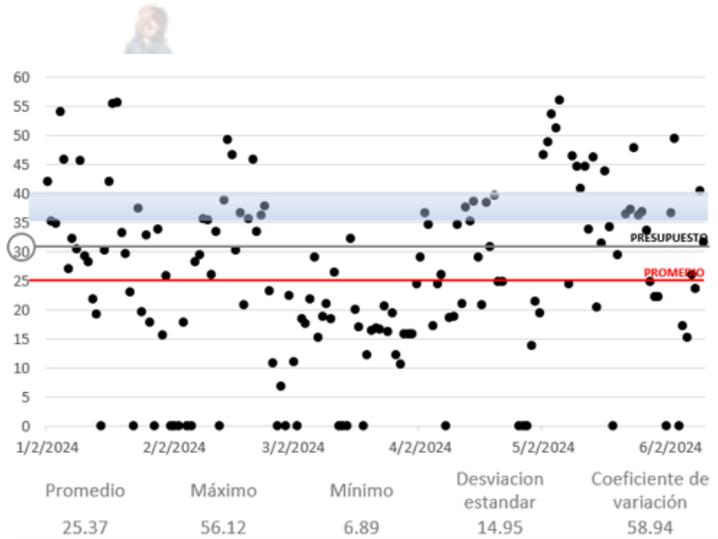


Figura 2. Grado de Pb (%) en el concentrado de plomo

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

El NaCN utilizado en para la depresión del mineral de cobre es preparado a una concentración de 4.5 % (p/v); y la muestra mineral de estudio corresponde pulpa de la alimentación al proceso de separación Pb/Cu buscando evaluar el comportamiento de la variabilidad de la relación Cu/Pb en el proceso de separación bajo las variables de interés de este estudio. Para evitar cualquier modificación o alteración de la química de la pulpa, las pruebas de flotación se realizaron inmediatamente después de colectar la muestra en planta.

La Tabla 1 muestra el esquema de trabajo de las pruebas metalúrgicas realizadas para evaluar e investigar el comportamiento de las variables operativas en el proceso de separación Pb/Cu, con un total de 28 pruebas en esta primera etapa de evaluación.

Para estudiar el efecto de la variabilidad de la relación Cu/Pb, se realizaron pruebas metalúrgicas bajo la mejor condición de la separación Pb/Cu resultado de la evaluación de la primera etapa de este estudio (20 ml NaCN a pH 9.5 y a pH natural para efecto comparativo, mediante una cinética de flotación para diagnosticar el tiempo de residencia en la flotabilidad del mineral de Pb y Cu.

Adicionalmente, se investigó la dosificación escalona del NaCN para entender el efecto depresor del mineral de cobre en función del tiempo de flotación en la separación Pb/Cu, considerando el 100% de la adición en la alimentación al proceso de separación, 70% en la alimentación y 30% en la etapa agotativa.

Tabla 1. Esquema de pruebas metalúrgicas realizadas en la separación Pb/Cu

pH	ml de NaCN @ 4.5%p/v				Condiciones Experimentales	
	0	10	20	30	Tiempo de flotación	4 min
Natural	P1	P5	P9	P13	Agitación de celda	1120 RPM
9.5	P2	P6	P10	P14	% sólidos	~10%
10.5	P3	P7	P11	P15	Temperatura	Ambiente
11.5	P4	P8	P12	P16	Cantidad de pulpa	2L (2.23kg)
9.0	P17	P18	P19			
9.5	P20	P21	P22			
10.0	P23	P24	P25			
10.5	P26	P27	P28			

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los grados de Pb y Cu, así como la recuperación de Pb y Cu en el concentrado de plomo es mostrada en Tabla 2. En función del pH y de la adición de NaCN se logra dar la separación Pb/Cu. A mayor dosificación de NaCN, mayor es la depresión del mineral de cobre; sin embargo, también se observa una depresión del mineral de plomo, así como una afectación en el grado de Pb.

Tabla 2. Resultados de grado y recuperación de Pb y Cu en el concentrado de plomo

	NaCN	Ensaye (%)		Recuperación (%)	
	ml	Pb	Cu	Pb	Cu
pH Natural (~7.4)	0	7.64	19.84	91.5%	93.1%
	10	19.53	10.00	85.2%	17.1%
	20	18.02	7.48	63.6%	10.2%
	30	11.16	8.37	34.0%	9.9%
pH 9.5	0	8.64	19.64	93.3%	93.5%
	10	18.55	10.74	94.4%	25.2%
	20	21.24	6.16	78.5%	9.7%
	30	11.10	7.40	35.9%	10.5%
pH 10.5	0	6.83	20.75	84.5%	91.4%
	10	18.66	8.18	88.1%	14.1%
	20	18.08	6.74	82.8%	11.2%
	30	16.46	7.55	84.9%	13.9%
pH 11.5	0	5.46	18.79	86.0%	92.5%
	10	15.12	8.85	81.2%	15.3%
	20	17.01	6.97	71.3%	9.2%
	30	12.34	7.60	49.9%	9.2%

Es importante comentar que sin NaCN no hay separación Pb/Cu, sin embargo, a un pH mayor a 9.5 en la pulpa disminuye el grado y recuperación del mineral de plomo observándose un mejor grado y recuperación del mineral de cobre (Figura 3); ya que a pH mayores de 9.5 la flotabilidad del mineral de plomo disminuye con la presencia de compuestos OH^- sobre la superficie del mineral de plomo que la hace hidrofílico.

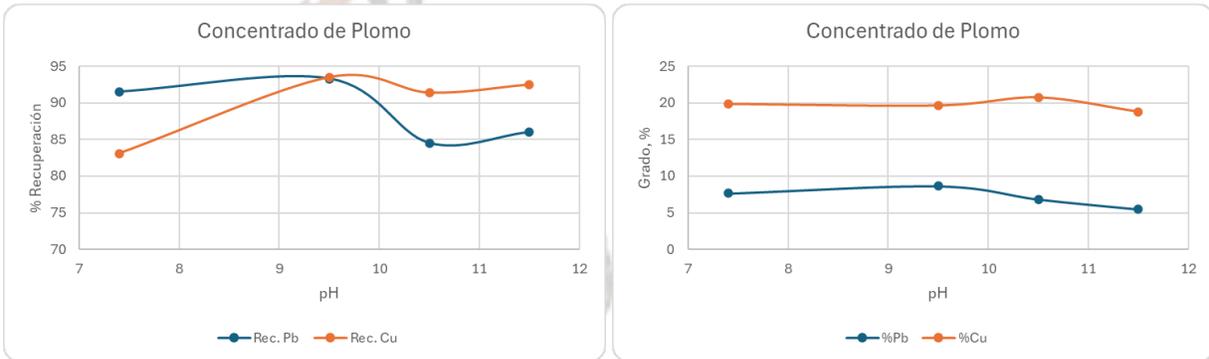


Figura 3. Efecto del grado y recuperación de Pb y Cu sin NaCN

Los mejores resultados de la flotación del mineral de plomo y la depresión del mineral de cobre ocurre a un pH entre 9.0 y 10.0; y a pH mayores aun cuando se observa una separación hay una mayor depresión del mineral de plomo por efecto de un carácter más hidrofílico. Es importante hacer notar el comportamiento del bajo grado de Pb obtenido en esta primera etapa de evaluación del proceso de separación; el cual es resultado del alto porcentaje de insoluble que hay en la alimentación al proceso de separación Pb/Cu, uno de los principales contaminantes no deseados en el concentrado.

La Tabla 3 muestra las condiciones electroquímicas de las pulpas en la evaluación de la separación Pb/Cu. El valor de ORP (mV) disminuye y se hace negativo a mayor dosificación de NaCN y esto es variable en función del pH de la pulpa; sin embargo, hay una zona específica de ORP que favorece la eficiencia de separación Pb/Cu. Este comportamiento del ORP en la pulpa en función de la recuperación en el proceso de separación muestra que el rango de 50 a 150 mV es favorable para incrementar la eficiencia de separación Pb/Cu a una dosificación de NaCN en el rango de 10 a 20 ml (Figura 4).

Efecto de la Variabilidad

Bajo las condiciones de pH natural y a pH 9.5 con 20 ml de NaCN se investigó la variabilidad de la relación Cu/Pb en la eficiencia de separación Pb/Cu mediante estudios cinéticos de flotación para investigar la eficiencia del proceso de separación en función de la relación Cu/Pb, mientras que la variación del pH (natural y 9.5) fue para confirmar y evaluar el comportamiento de la hidrofobicidad del mineral de plomo en el proceso de separación Pb/Cu.

Tabla 3. Condiciones electroquímicas de la pulpa en el proceso de separación Pb/Cu

		Condiciones Electroquímicas de la Pulpa					
		Condición Inicial		Ad NaCN		Condicional final	
pH	ml NaCN	pH	mV	pH	mV	pH	mV
~8.0	0	7.70	180	7.71	305	7.60	282
	10	7.72	173	9.60	86	9.22	96
	20	7.61	176	10.31	-43	10.45	-14
	30	7.61	134	10.99	-218	11.44	-100
9.5	0	7.33	158	9.55	127	8.71	138
	10	7.30	155	9.51	124	9.63	65
	20	7.33	141	9.50	111	10.20	50
	30	7.38	103	9.63	-79	11.54	-133
10.5	0	7.41	216	10.70	171	10.13	138
	10	7.38	191	10.51	141	10.90	104
	20	7.38	183	10.61	133	11.51	70
	30	7.36	182	10.43	121	11.65	59
11.5	0	7.24	351	11.56	132	11.50	112
	10	7.22	358	11.53	119	11.70	83
	20	7.37	217	11.52	100	11.89	22
	30	7.40	170	11.48	-63	11.97	-55

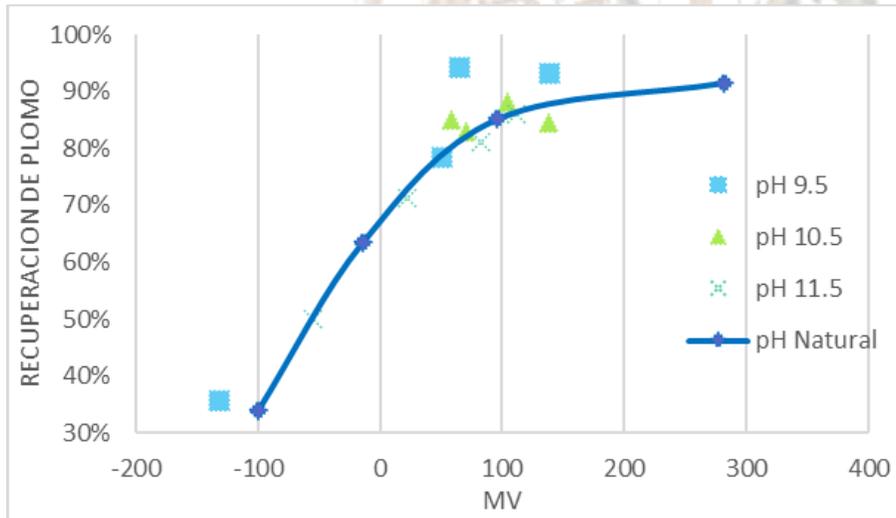


Figura 4. Recuperación de plomo en función del pH/ORP a diferentes pH

La cinética de flotación

Basado en los resultados de la cinética de flotación en el concentrado de plomo, a 1 minuto se observa el mejor grado de plomo; mientras que a un mayor tiempo de flotación el grado de Pb disminuye y el Cu aumenta reduciendo así la selectividad en el proceso de separación Pb/Cu. Con relación a la recuperación, entre los 2 y 3 minutos se observa la mejor selectividad del proceso de separación Pb/Cu, mayor recuperación de plomo y menor recuperación de cobre en el concentrado de plomo; por lo que se confirma que el tiempo de flotación en el proceso de separación es un factor crítico para lograr la máxima eficiencia del proceso (Figura 5).

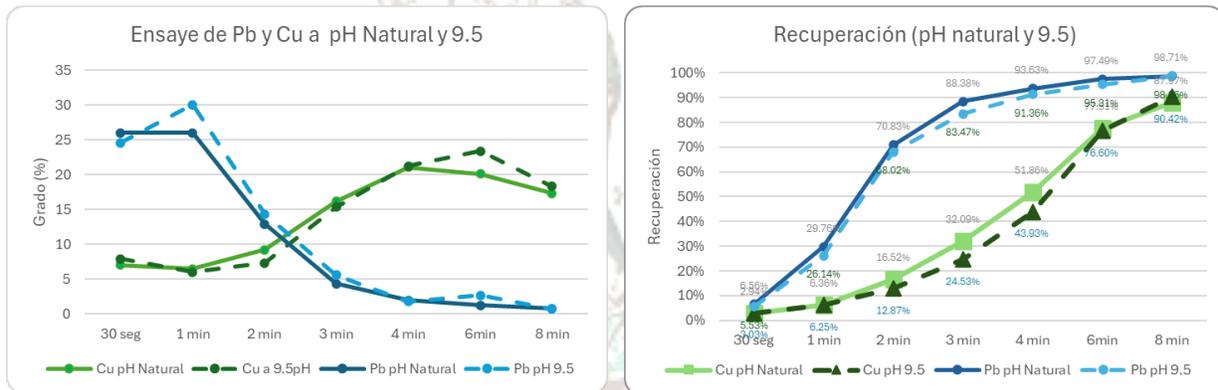


Figura 5. Comportamiento cinético en el concentrado de plomo a pH natural y pH 9.5

El efecto de una mayor recuperación de cobre a tiempos largos de flotación se atribuye a la degradación del cianuro debido a la interacción del oxígeno del aire en el proceso de flotación; lo que resulta en la reactivación del mineral de cobre.

El comportamiento de la flotabilidad del mineral de plomo y cobre a pH natural y 9.5 no muestra un cambio significativo en la selectividad del proceso de separación Pb/Cu, por lo que se concluye que bajo a estas condiciones el efecto del pH no es significativo.

La relación Cu/Pb

Con el tiempo de flotación adecuado, el pH óptimo y la cantidad de NaCN correcta, la relación Cu/Pb en el proceso de separación tiene un comportamiento interesante en la eficiencia de separación (Figura 6). A mayor relación Cu/Pb; es decir, mayor contenido de cobre comparado con plomo, el grado de plomo disminuye debido al incremento del grado de cobre; mientras que la recuperación de plomo disminuye ligeramente sin un cambio significativo del mineral de cobre.

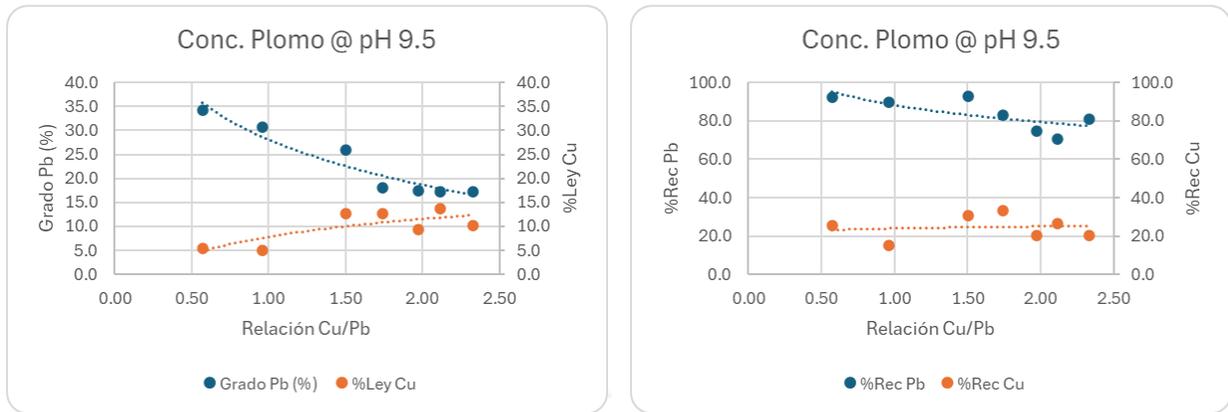


Figura 6. Comportamiento del grado y recuperación en el concentrado de plomo en el proceso de separación

La Figura 7 muestra el comportamiento del grado y recuperación de cobre en el mineral deprimido del proceso de separación Pb/Cu el cual tiene una tendencia constante (sin cambio significativo) en función de la relación Cu/Pb. Sin embargo, la recuperación de plomo se incrementa significativamente a mayor relación Cu/Pb; es decir, a menor contenido de plomo en el proceso, la dispersión de las partículas de plomo es mucho más difícil lo que limita el contacto burbuja partícula afectando así su recuperación en el concentrado de plomo.

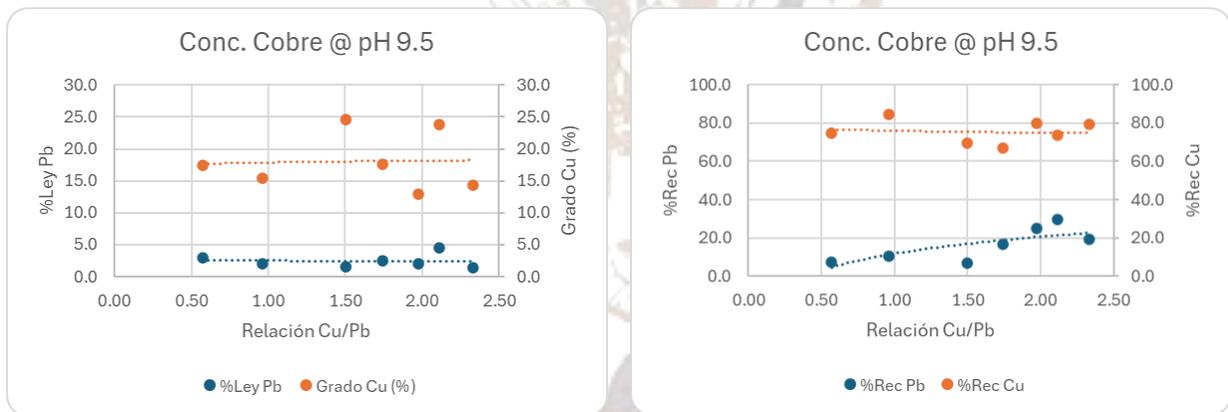


Figura 7. Comportamiento del grado y recuperación en el concentrado de cobre en el proceso de separación

Adición escalonada

Los resultados de la evaluación a nivel laboratorio permitió cuantificar el efecto del pH y la relación Cu/Pb para maximizar la relación grado/recuperación en el circuito de separación Pb/Cu; con lo cual, bajo las condiciones ideales se investiga la adición escalonada del NaCN para entender el efecto depresor sobre el mineral de cobre a nivel planta. Las pruebas se realizaron considerando el 70% de NaCN en el primario y 30% en el agotativo del proceso de separación Pb/Cu.

Para evaluar el comportamiento de la adición escalona del NaCN en la planta se realiza un muestreo metalúrgico, en el cual resaltan las siguientes condiciones (Figura 8):

- Los tiempos de flotación actuales en planta son significativamente más prolongados que los observados en las pruebas metalúrgicas del laboratorio. Como resultado, se tiene un consumo excesivo de NaCN para mantener deprimido el mineral de cobre, afectando negativamente la recuperación de plomo.
- Basado en los resultados del muestreo, la segunda limpia no aporta significativamente a la recuperación de plomo, generando una alta recirculación en el circuito; por lo que una evaluación más detallada es necesaria para mejorar el proceso de separación Pb/Cu.

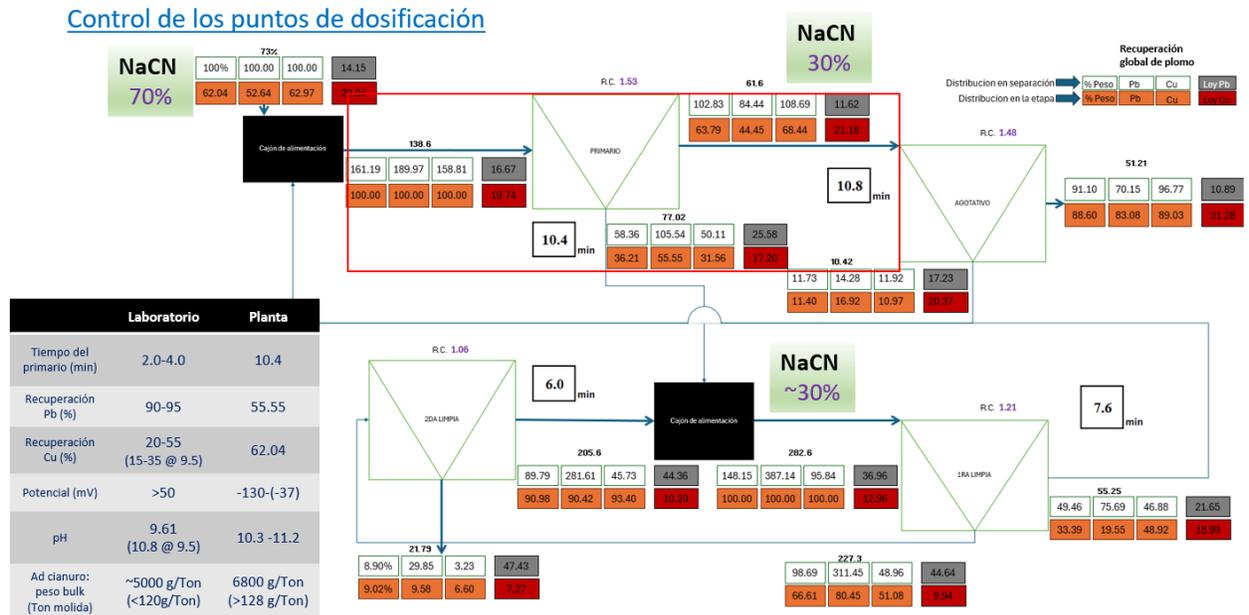


Figura 8. Evaluación escalonada de la adición del NaCN en el circuito de separación Pb/Cu

Modificación del circuito de separación Pb/Cu

En resumen, la optimización del tiempo de flotación en las etapas de primario y agotativo, así como el control de pH son parámetros claves para mejorar el proceso de separación Pb/Cu. Estos cambios fueron implementados en el proceso, lo que llevo a mejorar los resultados en planta sin afectar el grapo y recuperación del concentrado de cobre. La optimización del tiempo de flotación permitió disminuir la adición de NaCN, controlando el ORP (mV) de la pulpa y por consiguiente la mejora en la recuperación de plomo, una mejora de 30.0% unidades (Figura 9).

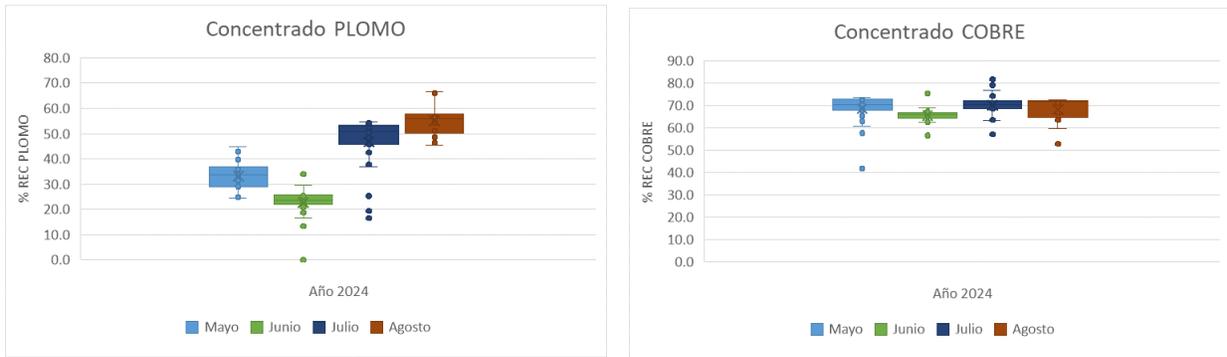


Figura 9. Recuperación de Pb en Conc. Plomo y Cu en Conc. Cobre (antes y después de las modificaciones)

La calidad del concentrado de plomo tuvo una ligera disminución debido al mineral de ganga, principal contaminante en el proceso que llega al concentrado bulk; mientras que el grado de cobre en el concentrado de cobre mejoro significativamente, un incremento de 2.0% (Figura 10).

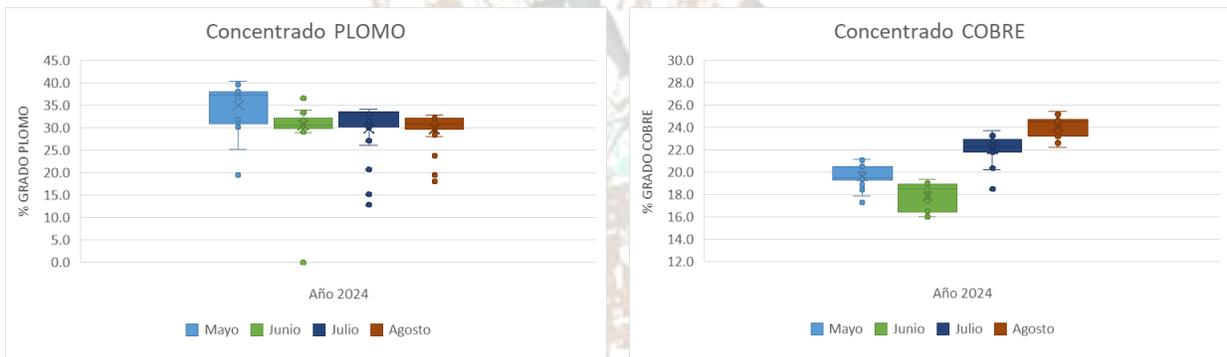


Figura 10. Calidad del concentrado de plomo y cobre en el proceso de separación Pb/Cu (antes y después de las modificaciones)

CONCLUSIONES

La evaluación y análisis del proceso de separación Pb/Cu permitió entender el comportamiento de las principales variables de operación para optimizar la eficiencia del proceso. Con la identificación de los factores clave que afectan la recuperación de plomo en el proceso de flotación se concluyó que la adición de cianuro, el pH, el tiempo de flotación y el ORP (mV) de la pulpa son parámetros críticos que deben ser controlados para optimizar la recuperación de plomo.

En resumen, el análisis del circuito de separación permite remarcar que el pH óptimo de la separación, para el mineral en estudio, se encuentra en el rango de 9.0 y 10.0; junto a la cantidad de cianuro necesario para controlar el ORP de la pulpa mayor a 50 mV. El tiempo de flotación es un parámetro clave para la optimización del proceso; tiempos prolongados generan adiciones excesivas de NaCN lo que disminuye la

selectividad y eficiencia del proceso de separación. El tiempo de flotación, siendo un parámetro crítico, depende de la flotabilidad del mineral de plomo, y los tiempos prolongados incrementa la degradación del cianuro libre a un mayor contenido de oxígeno en la pulpa lo cual disminuye el potencial activo del cianuro para la depresión del mineral de cobre resultando en una reactivación.

REFERENCIAS

- Reyes Pérez, M., Reyes Domínguez, I. A., Flores Guerrero, M. U., Barrientos Hernández, F. R., Pérez Labra, M., & Juárez Tapia, J. C. (2020). El papel depresor del pH durante la flotación sin colector de mineral de galena conteniendo esfalerita. *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, 7(7), 55-61.
- Reyes Bahena, J.L, Gonzalez Muñiz, M.J., Escamilla Ojeda, M.C. (2016). Situación actual de la separación Pb/Cu. IV Seminario Técnico Flottec, Noviembre 25, 2016. Zacatecas, Zac., México.
- Zegarra, J., Perez, C. (1976). Selección de procedimientos de separación Cu-Pb por flotación y optimización económica. *CITEM Revista del Instituto Científico y Tecnológico Minero*, 2: 17-32.

