

## Efecto de los Iones $\text{Ca}^{2+}$ y $\text{SO}_4^{2-}$ en la flotación de carbón: uso de agua reciclada

Danay A. Charles<sup>1,2\*</sup>, Gloria I. Dávila-Pulido<sup>1</sup>, Adrián A. González-Ibarra<sup>1</sup>, Armando Salinas-Rodríguez<sup>2</sup>,  
Mitzué Garza-García<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela Superior de Ingeniería, Universidad Autónoma de Coahuila, Boulevard Adolfo López Mateos S/N,  
Independencia, Nueva Rosita 26830, Coahuila, México

<sup>2</sup>CINVESTAV Unidad Saltillo, Av. Industria Metalúrgica #1062, parque industrial Saltillo-Ramos Arizpe 25900,  
Coahuila, México.

[\\*d\\_charles@uadec.edu.mx](mailto:d_charles@uadec.edu.mx)

### RESUMEN

Mediante este estudio se evaluó el efecto de la presencia de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  en el agua de proceso en la calidad del concentrado de carbón obtenido por flotación utilizando un diseño experimental factorial 2<sup>3</sup>. Se determinó que cuando el agua de proceso contiene 800 mg/L de  $\text{Ca}^{2+}$  y 960 mg/L de  $\text{SO}_4^{2-}$  a pH 7 y 9, el contenido de ceniza es de 11.6%. Sin embargo, al realizar la flotación a pH 9 en presencia de 400 mg/L de  $\text{Ca}^{2+}$  y 960 mg/L de  $\text{SO}_4^{2-}$ , el contenido de ceniza se incrementa hasta 20.9%. Esto demuestra que el uso de agua reciclada impacta significativamente la calidad del carbón. Además, la interacción entre los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  tiene la mayor influencia, con un valor de F de 17.81 según el ANOVA. Asimismo, se identificaron ciertas combinaciones de niveles que indican una mejora significativa en la eficiencia del uso del agua reciclada en el proceso. Este estudio subraya la importancia de controlar las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  para optimizar la calidad del carbón flotado.

**PALABRAS CLAVE:** carbón ; flotación; ceniza; iones en agua

## ANTECEDENTES

La industria del procesamiento de minerales enfrenta un desafío significativo con respecto al uso del agua, especialmente en el contexto de una creciente crisis hídrica. Según las estadísticas presentadas por Conagua en el 2021, las operaciones mineras en México a menudo dependen de grandes volúmenes de agua y se estima que alrededor del 16% de ésta provino de fuentes recicladas, es decir, mediante recirculación (CONAGUA, 2021).

En la actualidad, el uso de agua reciclada en la industria de procesamiento de minerales se ha vuelto necesario, principalmente debido a las regulaciones ambientales diseñadas para proteger el medio ambiente y promover el uso eficiente del agua (Dávila-Pulido y Uribe-Salas 2014). Sin embargo, la química del agua de proceso es completamente diferente a la del agua de pozo, lo que genera preocupación sobre los efectos de las especies químicas presentes en el agua de recirculación en la recuperación y separación selectiva de los minerales, así como en la calidad del concentrado obtenido por flotación (Rao et al., 1989).

Es importante considerar que el uso de agua recirculada en el proceso de flotación puede afectar significativamente la flotabilidad y selectividad de separación de los minerales de mena. Los contaminantes típicos del agua incluyen sustancias coloidales, iones de metales pesados, tiosulfatos, sulfitos, sulfatos, cloruros, magnesio, calcio, sodio y potasio. Estas sustancias (además de los residuos de reactivos como espumantes, colectores, dispersantes, entre otros (Biçak et al. 2012)) pueden actuar inadvertidamente como inhibidores o activadores de minerales específicos.

Los iones de calcio y de sulfato son las dos sustancias más comunes en el agua de proceso en las plantas de procesamiento de minerales. El calcio resulta del uso de hidróxido de calcio como regulador del pH y de la disolución de minerales que lo contienen (e.g., calcita, dolomita, etc.). Por su parte, las concentraciones de sulfato por encima del punto de saturación para la precipitación de yeso se deben a la oxidación natural de los minerales de sulfuro por el oxígeno atmosférico durante la molienda, el acondicionamiento, la flotación y la concentración. Se sabe que, en condiciones alcalinas el sulfuro ( $\text{S}^{2-}$ ) se oxida a sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), pasando por especies intermedias como polisulfuro ( $\text{S}_n^{2-}$ ), tiosulfato ( $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ) y sulfito ( $\text{SO}_3^{2-}$ ) (Ralston et al., 2007). El agua de proceso típica tiene una concentración de calcio de aproximadamente 700 mg/L, mientras que las concentraciones de sulfato pueden alcanzar el punto de saturación (aproximadamente 1700 mg/L) o más (cuando el agua está en equilibrio metaestable) (Levy et al., 2001; Deng et al., 2013). El efecto de los iones disueltos en el agua reciclada sobre la flotabilidad de los minerales ha sido objeto de muchos estudios. La literatura confirma que la acción de los iones de calcio es dominante sobre la de los iones de sulfato, que también están presentes en solución (Ikumapayi, 2010; Ikumapayi et al., 2012). En este contexto, el objetivo de este estudio fue investigar el efecto de la presencia individual y combinada de los iones de calcio y sulfato a pH 7 y 9 sobre la calidad del concentrado de carbón utilizando un diseño experimental factorial  $2^3$ .

## METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### **Materiales**

Se utilizó una muestra de carbón con un contenido de ceniza de 13.8%. Se empleó una celda de flotación Denver con 1 litro de capacidad. Se mantuvo una relación de 15% de sólidos (i.e., 176 g/L) con un tamaño de partícula de -150/+106  $\mu\text{m}$ . Como fuente de iones se utilizaron  $\text{NaSO}_4$  y  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  grado reactivo. Como colector se empleó diésel y MIBC como espumante. El pH se reguló con soluciones de hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) y ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ) 1 M.

### **Diseño experimental 2<sup>3</sup>**

Para llevar a cabo el estudio se empleó un diseño experimental factorial 2<sup>3</sup>, que incluye dos niveles para cada uno de los tres factores estudiados: concentración de iones  $Ca^{2+}$ , concentración de iones  $SO_4^{2-}$  y pH. En la Tabla 1 se presentan los niveles establecidos, así como la respectiva codificación para cada factor.

**Tabla 1.** Codificación de niveles y sus factores.

Factor	Nivel	Codificación
pH	7	-1
	9	+1
$Ca^{2+}$ , mg/L	400	-1
	800	+1
$SO_4^{2-}$ , mg/L	960	-1
	1920	+1

### **Procedimiento experimental**

Se preparó una solución con la concentración de iones de calcio y sulfato requerida para cada prueba experimental, así como con el pH seleccionado. La pulpa se acondicionó en esta solución por 5 minutos. Posteriormente, se adicionó una concentración de 250 g/t de colector y 100 g/t de espumante, los cuales se acondicionaron durante 4 y 3 minutos, respectivamente. El tiempo de flotación fue de 5 minutos (equivalente hasta terminar espuma). A cada prueba se le determinó el contenido de ceniza de acuerdo con la norma ASTM D 3174-02. Finalmente, los resultados de la variable de respuesta (i.e., contenido de ceniza) fueron procesados en el software estadístico Minitab 18.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### **Contenido de ceniza**

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los tratamientos experimentales para el contenido de ceniza en el concentrado mineral como variable de respuesta. Los experimentos se llevaron a cabo por duplicado y el promedio se presenta en la última columna de la tabla.

**Tabla 2.** Resultados de las pruebas experimentales de la variable de respuesta.

Prueba	pH	Calcio	Sulfato	Contenido de ceniza, %		
				1	2	Promedio
1	-1	-1	-1	11.71	12.38	12
2	-1	-1	+1	11.86	12.04	11.9
3	-1	+1	-1	11.04	11.57	11.3
4	-1	+1	+1	12.97	12.61	12.8
5	+1	-1	-1	19.23	20.56	19.9
6	+1	-1	+1	13.82	13.20	13.5
7	+1	+1	-1	11.21	11.92	11.6
8	+1	+1	+1	13.34	12.97	13.2

Con el objetivo de evaluar la eficiencia del proceso de flotación, en la Tabla 3 se presenta el contenido de ceniza en las colas de flotación. Se observa que los contenidos de ceniza oscilan entre 33 y 61%, estos resultados indican que el proceso de separación fue eficiente, ya que como se puede observar, las colas del proceso están constituidas principalmente por minerales de ganga.

**Tabla 3.** Resultados de las pruebas experimentales de la variable de respuesta.

Prueba	pH	Calcio	Sulfato	Contenido de ceniza, %		
				1	2	Promedio
1	-1	-1	-1	34.03	33.61	33.8
2	-1	-1	+1	39.85	40.72	40.2
3	-1	+1	-1	25.57	25.84	25.7
4	-1	+1	+1	46.79	45.82	46.3
5	+1	-1	-1	46.21	47.39	46.8
6	+1	-1	+1	61.19	59.21	60.2
7	+1	+1	-1	50.85	49.48	50.2
8	+1	+1	+1	57.24	58.63	57.9

### **Análisis de varianza (ANOVA)**

En la Tabla 4 se presentan los resultados del análisis de varianza. Se muestra que los tres factores estudiados (concentración de  $Ca^{2+}$ , concentración de  $SO_4^{2-}$  y pH) tienen un impacto estadísticamente significativo en el contenido de ceniza del carbón flotado. La interacción entre los iones  $Ca^{2+}$  y  $SO_4^{2-}$  fue la

de mayor influencia, con un valor F de 17.81, indicando una fuerte interacción entre estos iones y las partículas presentes en la pulpa de flotación.

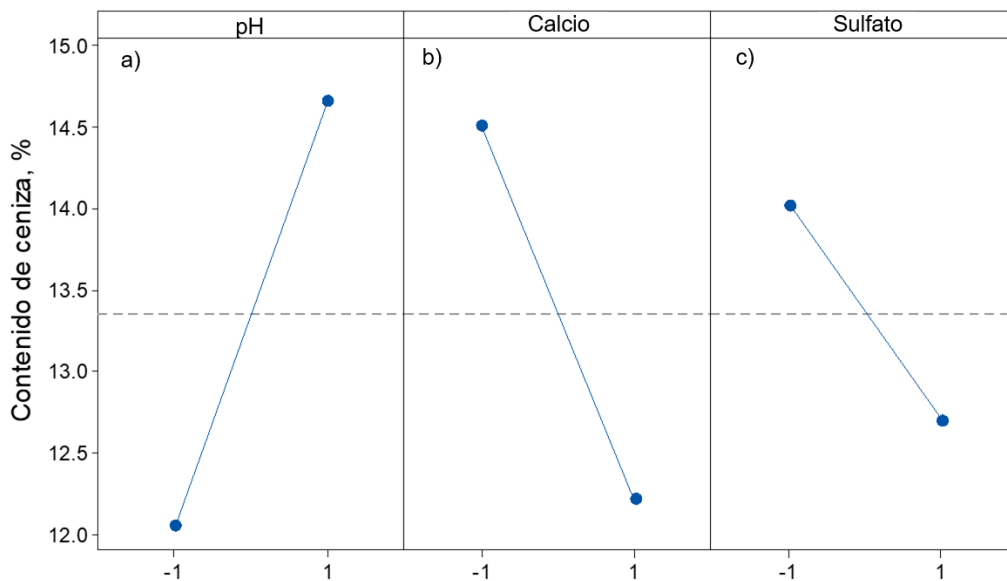
**Tabla 4.-** Tabla del ANOVA para el contenido de ceniza del concentrado de carbón

Fuente	G.L.	S.C.	C.M.	F	P
pH	1	27.06	27.06	17.54	0.003
Calcio	1	20.96	20.96	13.59	0.006
Sulfato	1	7	7	4.54	0.066
pH × Calcio	1	21.21	21.21	13.75	0.006
pH × sulfato	1	13.32	13.32	8.64	0.019
Calcio × Sulfato	1	17.94	17.94	17.81	0.003
pH × Calcio × Sulfato	1	17.94	17.94	11.63	0.009
Error	8	12.34	1.54	-	-
Total	15	147.35	-	-	-

En la Figura 1 se presentan los efectos individuales del pH, y las concentraciones de calcio y sulfato). En la Figura 1a se aprecia que al aumentar el pH de flotación de 7 a 9, el contenido de ceniza se incrementa de 12 a 14.7%. Esto se puede atribuir a que el cambio en el pH tiene un efecto en la solubilidad de los iones  $Ca^{2+}$  y  $SO_4^{2-}$  (Xun et al., 2021). A pH 9, estos iones pueden formar complejos o precipitados que interactúan con las partículas de carbón, favoreciendo el arrastre de partículas y aumentando su contenido de ceniza.

En el caso del  $Ca^{2+}$  (Figura 1b) se observa que el contenido de ceniza disminuye al aumentar la concentración de 400 a 800 mg/L. El  $Ca^{2+}$  puede actuar como floculante, causando la aglomeración de partículas de arcilla y otras impurezas (Hosten & Cirak, 2013; Tang et al., 2016). Estas aglomeraciones son menos propensas a flotar y, por lo tanto, son más fáciles de separar del carbón, reduciendo el contenido de ceniza.

En la Figura 1c se presenta el efecto individual de los iones  $SO_4^{2-}$  sobre la variable de respuesta, en donde se observa un comportamiento similar al obtenido al evaluar el efecto de los iones de calcio, aunque en menor proporción, ya que al utilizar una concentración de 960 mg/L la ceniza es de aproximadamente 14%, y este valor se reduce hasta 12.6% al aumentar la concentración de esta especie a 1920 mg/L. El  $SO_4^{2-}$  puede interactuar electrostáticamente con las partículas de carbón y las impurezas. Cuando existe un mayor contenido de estos iones pueden modificar la carga superficial de las partículas, mejorando la adsorción de los reactivos de flotación en el carbón y reduciendo la adsorción en las impurezas (Fuerstenau, y Pradip, 2005; Somasundaran y Wang, 2006).

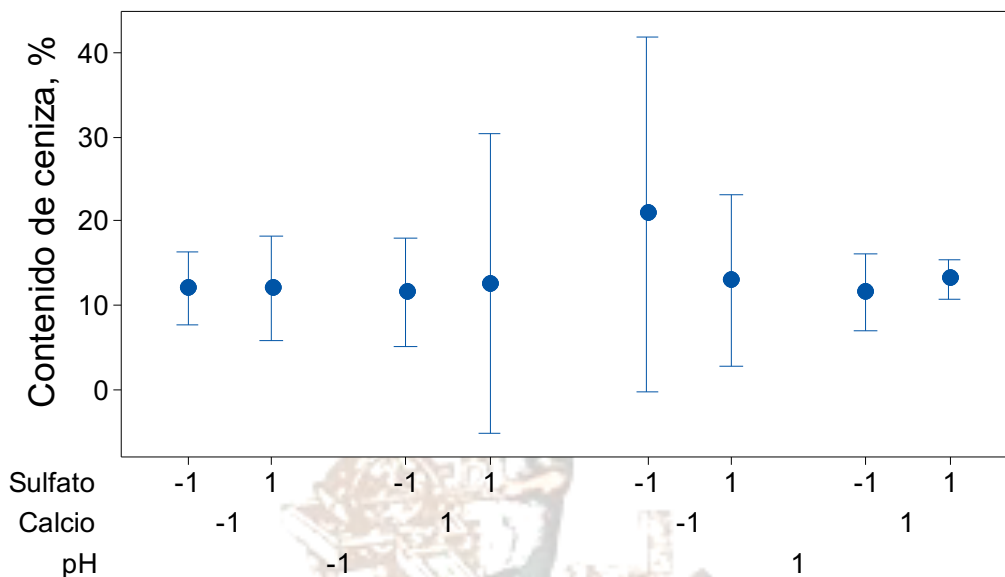


**Figura 1.** Efecto individual del pH, calcio y sulfato en la variable de respuesta

La gráfica de intervalos presentada en la Figura 2 muestra el efecto de los tres factores de estudio sobre el contenido de ceniza del carbón flotado (i.e., concentración de  $SO_4^{2-}$  y  $Ca^{2+}$  y pH). Cada factor se evalúa en dos niveles, codificados como -1 (nivel bajo) y +1 (nivel alto). La combinación de estos niveles produce ocho condiciones experimentales diferentes.

El esquema de sulfato/calcio/pH que presentan los mayores intervalos de contenido de ceniza son las condiciones +1/+1/-1 y -1/-1/+1 indicando una mayor variabilidad y un mayor contenido promedio de ceniza. Para el primer caso, a pH 7 (-1) y en el nivel +1 de ambos iones indica que, aunque tanto sulfato como calcio en nivel +1 pueden favorecer la reducción de ceniza, un pH en el nivel -1 puede contrarrestar estos efectos al alterar la carga superficial y la solubilidad de los iones. Esta interacción compleja resulta en un mayor intervalo de contenido de ceniza. Mientras que para el segundo caso a pH 9 con niveles -1 para los iones se atribuye a que la baja concentración de sulfato y calcio puede ser insuficiente para estabilizar la superficie del carbón y mejorar la adsorción del colector, resultando en una flotación menos eficiente y generando un mayor arrastre de ceniza.

La combinación que optimiza las condiciones para la calidad del carbón flotado (i.e., bajo contenido de ceniza) es en el esquema de +1/+1/+1. Los niveles +1 de sulfato y calcio, así como de pH, favorecen la hidrofobicidad del carbón y la precipitación de impurezas, resultando en el menor intervalo de contenido de ceniza.



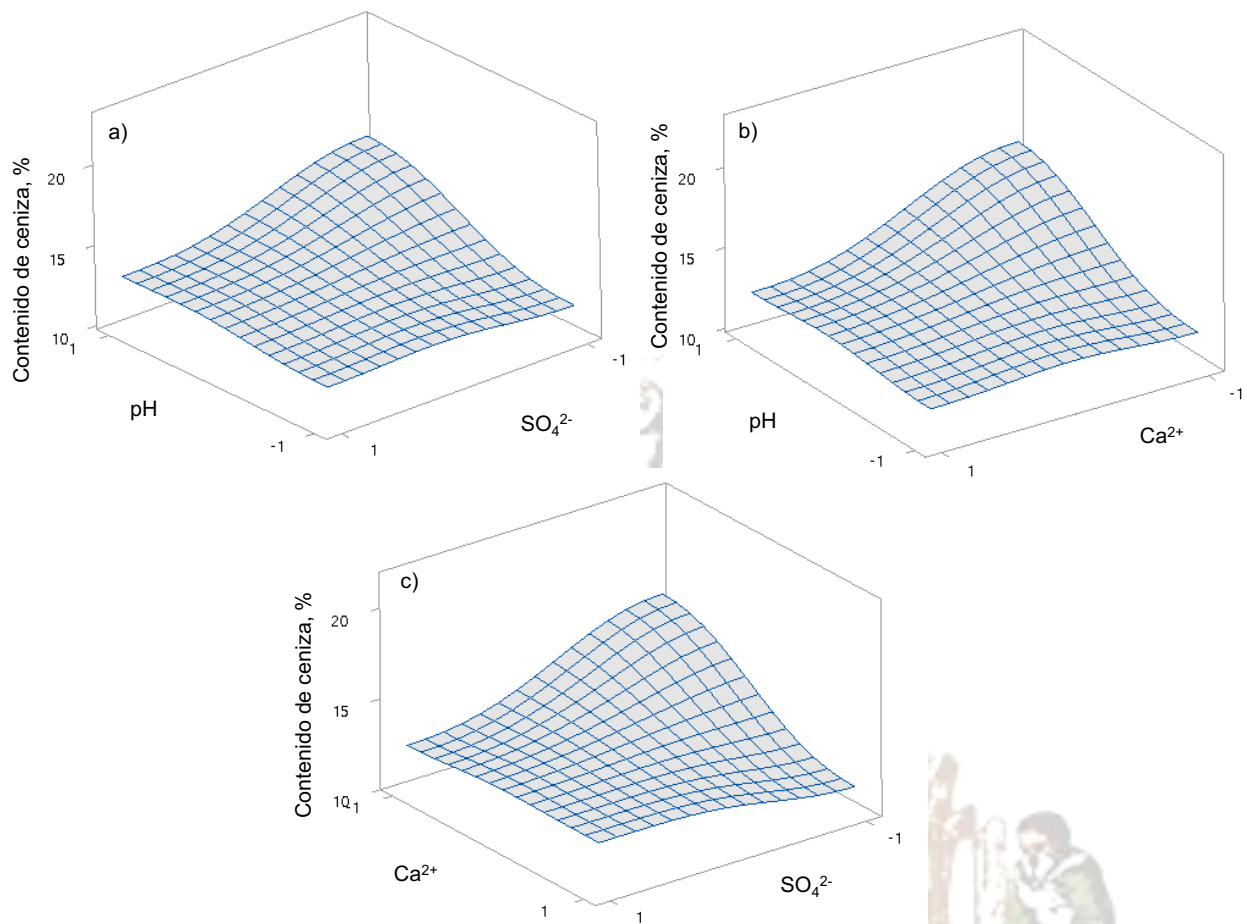
Las desviaciones estándar individuales se utilizaron para calcular los intervalos.

**Figura 2.** Gráfica de intervalos para el contenido de ceniza, 95% IC para la media

En la Figura 3 se presentan las gráficas de superficie, éstas muestran la relación entre los factores (a) pH vs  $\text{SO}_4^{2-}$ , (b) pH vs  $\text{Ca}^{2+}$  y (c)  $\text{SO}_4^{2-}$  vs  $\text{Ca}^{2+}$  sobre la variable de respuesta. En la Figura 3a se observa que el punto de mayor contenido de ceniza es en las condiciones -1/-1 de pH/ $\text{SO}_4^{2-}$ . Al emplear un pH de 7 (-1) en la presencia de 960 mg/L de  $\text{SO}_4^{2-}$  (-1) puede generar un cambio en la carga superficial de las partículas y la solubilidad de los iones, afectando negativamente la calidad del carbón (i.e., alto contenido de ceniza).

Por su parte, La influencia de la interacción del pH y los iones de  $\text{Ca}^{2+}$  se presenta en la Figura 3b. En donde se puede apreciar que las condiciones menos favorables para la calidad del carbón son en el esquema +1/-1, es decir, cuando la flotación se realiza en a pH 9 con presencia de 400 mg/L  $\text{Ca}^{2+}$ . Esto puede deberse a que bajo esta concentración los iones  $\text{Ca}^{2+}$  pueden actuar como activador de algunas partículas minerales. Dando como resultado un incremento en la cantidad de impurezas en el concentrado de carbón, lo que se refleja en un mayor porcentaje de ceniza.

En la Figura 3c se muestra el efecto de la interacción de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  sobre el contenido de ceniza presente en el concentrado de carbón. En esta grafica se observa un punto óptimo correspondiente al esquema de  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$  de -1/+1 (i.e., 960 y 800 mg/L, respectivamente), en donde se obtiene el menor contenido de ceniza ( $\approx 10\%$ ) En contraparte, se observa un incremento importante en la variable de respuesta al evaluar el esquema -1/-1 (i.e., 960 y 400 mg/L), es decir, bajo estas condiciones se obtendrá un concentrado de carbón con 20% de ceniza. Este comportamiento indica la influencia del contenido de iones de calcio en el agua de proceso.



**Figura 3.-** Gráfica de superficie para la variable de respuesta: contenido de ceniza, %. a) pH - sulfato b) pH - Calcio  
b) Sulfato - Calcio

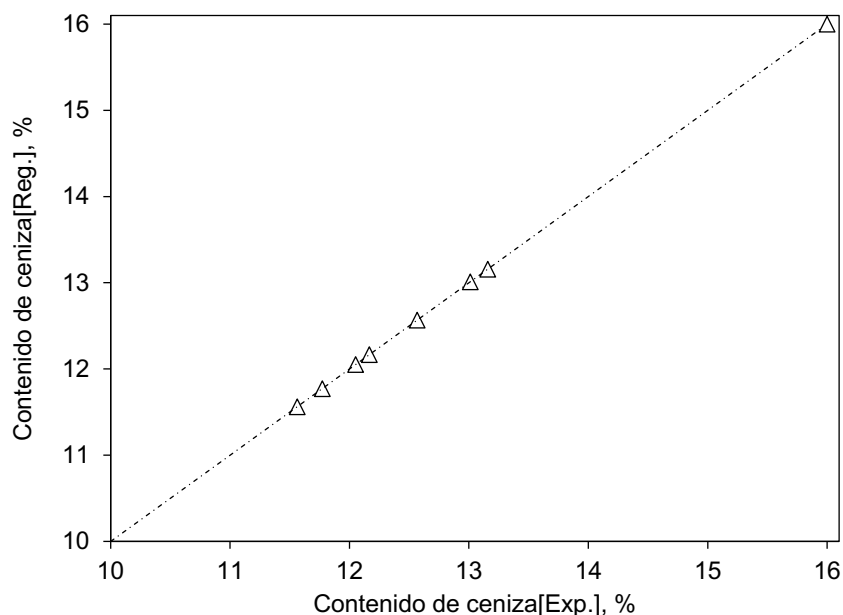
En la Ec. 1. se presenta la ecuación de regresión, la cual describe el comportamiento de la variable de interés, en función de los factores individuales y su interacción.

$$\begin{aligned}
 \text{Ceniza, \%} = & 13.359 - 1.301a + 1.301A + 1.145b - 1.145B + 0.662c - 0.662C - 1.152ab + \\
 & 1.152aB + 1.152Ab - 1.152AB - 0.913ac + 0.913aC + 0.913Ac - 0.913AC + 1.310bc - \\
 & 1.310bC - 1.310Bc + 1.310BC - 1.059abc + 1.059abC + 1.059aBc - 1.059aBC + 1.059Abc - \\
 & 1.059AbC - 1.059ABC + 1.059ABC
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 1}$$

En donde las constantes a y A representan a el pH en los niveles -1 y +1, respectivamente. Para los iones de calcio se empleó la constante b para el nivel -1 y B para el nivel +1. Asimismo, para los iones de sulfato se emplearon las constantes c y C para ambos niveles utilizados (-1 y +1). Es importante mencionar que la ecuación es válida para los valores codificados de las variables independientes del diseño estadístico.



En la Figura 4 se presenta la relación entre el contenido de ceniza estimado utilizando la ecuación de regresión (Ec. 1) y el contenido de ceniza promedio obtenido experimentalmente. Se observa que existe una perfecta correlación entre ambas variables. Además, se aprecia que el contenido de ceniza que es posible obtener en el panorama experimental desarrollado, se encuentra en un rango entre 10 y 16 %.



**Figura 4.** Relación entre el contenido de ceniza estimado con la ecuación de regresión y el obtenido experimentalmente.

### **Caracterización de la ceniza**

Debido a que la relación entre la recuperación y el contenido de ceniza puede variar en función de las características del carbón y de las condiciones de proceso; es importante considerar que los constituyentes de la ceniza (i.e., compuestos inorgánicos) tienden a flotar junto con el carbón, lo que reduce la calidad del producto final. En la Figura 5 se presenta el patrón de difracción de la ceniza obtenida bajo el esquema -1/-1/1 de los factores sulfato, calcio y pH, respectivamente (i.e., 960 mg/L  $\text{SO}_4^{2-}$ , 400 mg/L  $\text{Ca}^{2+}$  y pH 7). Se observa que la ceniza está compuesta principalmente por anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ), cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). La composición de la ceniza es esencial para comprender su idoneidad para diversas aplicaciones industriales, su impacto ambiental y su seguridad en términos de salud pública y ocupacional.

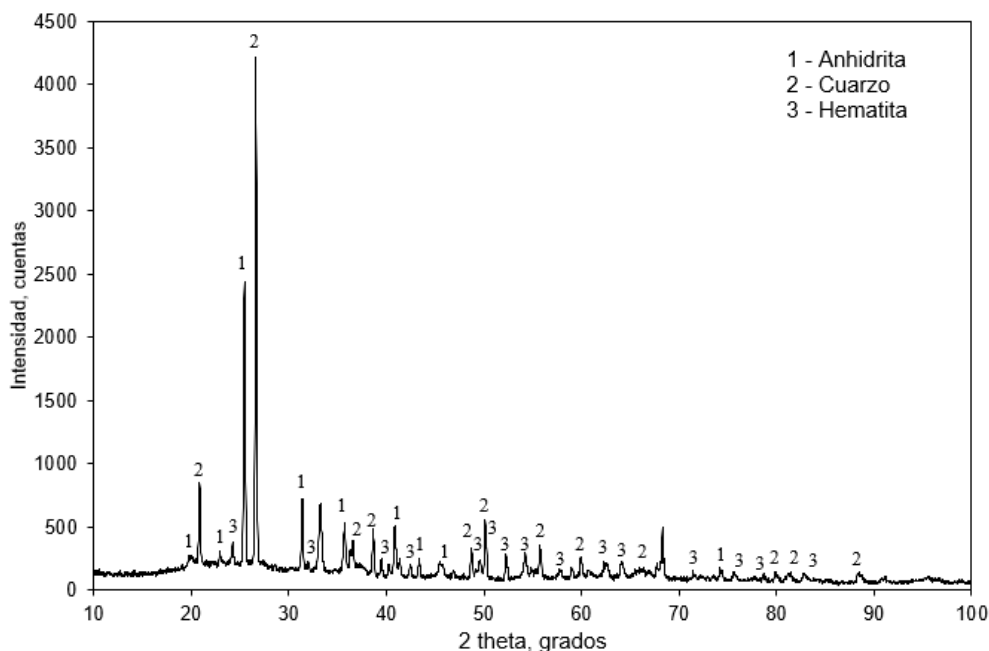


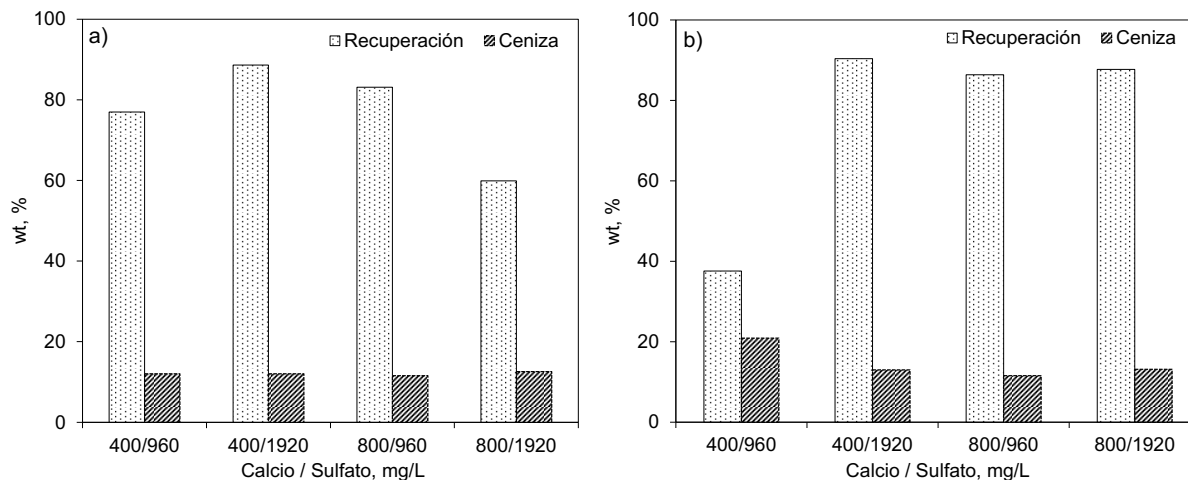
Figura 5. DRX de ceniza de carbón.

### **Recuperación vs contenido de ceniza**

Los resultados de la recuperación de carbón, así como el contenido de ceniza, se presentan en la Figura 6. En la Figura 6a se presentan los resultados obtenidos a pH 7. Se observa que la recuperación más alta es de 88.6% con un contenido de ceniza de 12.1%; la cual se obtuvo en presencia de 400 mg/L de  $\text{Ca}^{2+}$  y 1920 mg/L de  $\text{SO}_4^{2-}$ . En contraste, al aumentar la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  a 800 mg/L la recuperación alcanzada es de 59.9% y el contenido de ceniza es de 12.6%. En la Figura 6b, se aprecia que la menor recuperación es de 37.6% cuando la flotación se realiza a pH 9 y en presencia de 400 mg/L de calcio y 960 mg/L de sulfato. Además, el concentrado obtenido bajo estas condiciones presenta el mayor (i.e., 20.9%). La mayor recuperación a pH 9 es de 90.4%, obtenida al incrementar la concentración de iones de sulfato a 1920 mg/L y mantener la de iones de calcio en 400 mg/L, con un contenido de ceniza de 13%.

### **CONCLUSIONES**

Mediante este estudio se demuestra que la presencia de iones de calcio y sulfato en el agua de recirculación afecta significativamente la calidad del carbón flotado. Las interacciones entre estos iones y el pH del agua de proceso son determinantes clave en la flotabilidad y selectividad del carbón. Se encontró que concentraciones más altas de  $\text{Ca}^{2+}$  en combinación con altos niveles de  $\text{SO}_4^{2-}$  mejoran la calidad del concentrado, mientras que concentraciones más bajas de  $\text{Ca}^{2+}$  pueden llevar a un aumento en el contenido de ceniza.



**Figura 6.** Recuperación y ceniza de la flotación de carbón -150/+106  $\mu\text{m}$ , 250 g/t colector y 100 g/t espumante, 15% de sólidos. A) pH 7. B) pH 9

El control de las concentraciones de iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  en el agua de recirculación es crucial para optimizar la calidad del carbón flotado. Los resultados de este estudio pueden servir como guía para mejorar los procesos de flotación y gestionar mejor el uso del agua en las plantas de procesamiento de minerales, promoviendo prácticas más sostenibles y eficientes.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Coahuila por las instalaciones del laboratorio y las facilidades otorgadas. Asimismo, al CINVESTAV Unidad Saltillo por el apoyo en la caracterización.

## REFERENCIAS

Bıçak, Ö., Ekmekçi, Z., Can, M., Öztürk, Y. (2012). The effect of water chemistry on froth stability and surface chemistry of the flotation of a Cu–Zn sulfide ore. *International Journal Of Mineral Processing*, 102-103, 32-37. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.09.005>

Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2021). Estadísticas en el agua de México 2021. Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). Disponible en: [https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2023/10/EAM\\_2021.pdf](https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2023/10/EAM_2021.pdf)

Dávila-Pulido, G., y Uribe-Salas, A. (2014). Effect of calcium, sulphate and gypsum on copper-activated and non-activated sphalerite surface properties. *Minerals Engineering*, 55, 147-153. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.10.006>

Deng, M., Liu, Q., Xu, Z. (2013). Impact of gypsum supersaturated solution on surface properties of silica and sphalerite minerals. *Minerals Engineering*, 46-47, 6-15. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.03.013>

Fuerstenau, D. W., y Pradip. (2005). Zeta potentials in the flotation of oxide and silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 74(S1-4), 167-176.

Hosten, C., y Cırak, M. (2013). Flocculation behavior of clayey dolomites in borax solutions. *Powder Technology*, 235, 263-270. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.10.033>

Ikumapayi, F.K., (2010). Flotation Chemistry of Complex Sulphide Ores: Recycling of Process Water and Flotation Selectivity. Ph.D. Thesis, Lulea University of Technology, Sweden.

Ikumapayi, F.K., Makitalo, M., Johansson, B., Hanumantha Rao, K., (2012). Recycling of process water in complex sulphide ore flotation. In: Proc. XXVI International Mineral Processing Congress, New Delhi, India, pp. 4411–4425.

Levay, G., Smart, R.St.C., Skinner, W.M. (2001). The impact of water quality on flotation performance. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* (March–April), 69–75.

Ralston, J., Fornasiero, D., Grano, S. (2007). Pulp and solution chemistry. *Froth flotation: A century of innovation*, 227.

Rao, S., y Finch, J. (1989). A review of water re-use in flotation. *Minerals Engineering*, 2(1), 65-85. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(89\)90066-6](https://doi.org/10.1016/0892-6875(89)90066-6)

Somasundaran, P., y Wang, D. (2006). *Reagents in mineral technology*. CRC Press.

Tang, J., Zhang, Y., Bao, S. (2016). The Effect of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  on the Dispersion and Flocculation Behaviors of Muscovite Particles. *Minerals*, 6(3), 93. <https://doi.org/10.3390/min6030093>

Xun, L., Hu, J., Shi, Q., Zhang, G. (2021). Effects of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  ions on fluorite flotation. *Physicochemical Problems Of Mineral Processing*, 57(2), 95-104. <https://doi.org/10.37190/ppmp/132875>