

## USO DE BIOMATERIALES COMO ALTERNATIVA PARA LA REMEDIACIÓN DE JALES MINEROS

JESÚS RAFAEL SIQUEIROS VALENCIA<sup>1</sup>, RENÉ LOREDO PORTALES<sup>2</sup>, VERÓNICA MORENO RODRÍGUEZ<sup>3</sup>, RAFAEL DEL RIO SALAS<sup>4</sup>

### RESUMEN

**Los beneficios de la industria minera son innegables, sin embargo, los residuos son frecuentemente asociados con problemáticas medioambientales, debido la presencia de elementos potencialmente tóxicos. Las técnicas de remediación propuestas son diversas, aunque recientemente se ha popularizado el uso de biomateriales como una alternativa sustentablemente económica, en donde se utilizan biomateriales adsorbentes sintetizados mediante pirólisis de desechos biológicos. En este trabajo se probó al bone char (BC; bio hidroxapatita), sintetizado a partir de huesos de ganado vacuno para la remediación de jales mineros históricos de San Felipe de Jesús, Sonora, mediante un diseño experimental factorial. Los resultados mostraron que el BC disminuye la producción de sales eflorescentes, además de amortiguar parámetros como el pH y CE, demostrando su potencial para el tratamiento de drenaje ácido de mina.**

*Palabras clave:* jales mineros, sales eflorescentes, biomateriales, remediación

<sup>1</sup>Pasante, Ingeniería en Geociencias, Universidad Estatal de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, [j-rsv@live.com](mailto:j-rsv@live.com).

<sup>2</sup>Doctorado, Departamento de Ciencias Ambientales, División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato, Irapuato, Guanajuato, México, [r.loredo@ugto.mx](mailto:r.loredo@ugto.mx), ORCID: 0000-0003-0493-4532.

<sup>3</sup>Doctorado, Ingeniería en Geociencias, Universidad Estatal de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, [veronica.moreno@ues.mx](mailto:veronica.moreno@ues.mx), ORCID: 0000-0001-9033-6824.

<sup>4</sup>Doctorado, Instituto de Geología, Estación Regional del Noroeste, Universidad Nacional Autónoma de México, Hermosillo, Sonora, México, [rdelrio@geologia.unam.mx](mailto:rdelrio@geologia.unam.mx), ORCID: 0000-0002-4474-172X.

*Autor de correspondencia:* Rene Loredo Portales, [r.loredo@ugto.mx](mailto:r.loredo@ugto.mx)

**Recibido:** 22 / 10 / 2021

**Aceptado:** 19 / 03 / 2022

**Publicado:** 31 / 03 / 2022

### Cómo citar este artículo:

Siqueros Valencia, J. R., Loredo Portales, R., Moreno Rodríguez, V., & Del Rio Salas, R. (2022). USO DE BIOMATERIALES COMO ALTERNATIVA PARA LA REMEDIACIÓN DE JALES MINEROS. EPISTEMUS, 15(31). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v15i31.208>

## USE OF BIOMATERIALS AS AN ALTERNATIVE FOR REMEDIATION OF MINE TAILINGS

### ABSTRACT

*The benefits of the mining industry are undeniable; however, its waste is frequently associated with environmental problems, due to the presence of potentially toxic elements. The proposed remediation techniques are diverse, although the use of biomaterials has recently become popular as an economical sustainable alternative, where adsorbent biomaterials synthesized by pyrolysis of biological waste are used. In this work, bone char (BC; bio hydroxyapatite), synthesized from cattle bones, was tested for the remediation of historic mining tailings in San Felipe de Jesús, Sonora, through a factorial experimental design. The results showed that BC reduces the production of efflorescent salts, in addition to buffering parameters such as pH and EC, demonstrating its potential for treating acid mine drainage.*

**Key words:** Mine tailings, efflorescent salts, biomaterials, remediation

## Introducción

Del lado de los beneficios innegables de la minería, esta actividad genera una cantidad importante y diversa de residuos derivados de sus procesos; de estos, los jales mineros, tienen mayor relevancia ambiental, ya que generalmente quedan a merced de las condiciones climáticas, y sin algún tipo o escaso tratamiento de remediación, representando un grave problema ambiental dado que suelen contener altas concentraciones de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT), como: As, Cd, Pb, Cr, Zn, Al, entre otros.

Un fenómeno común en las zonas áridas es la oxidación de sulfuros, en conjunto con fenómenos de capilaridad, que ocurren en los depósitos de jales mineros, formando costras de sales solubles conocidas como sales eflorescentes [1] y [2]. Las sales eflorescentes pueden ser transportadas fácilmente el aire al medio ambiente circundante [3]. Debido a esto, surge la necesidad de implementar técnicas de remediación económicamente rentables, cuyos efectos positivos ocurran en el corto plazo y se mantengan por un tiempo considerable, sin que se requiera mayor inversión; ya que la mayoría de las técnicas empleadas actualmente suelen mostrar efectos a largo plazo y requieren continua intervención durante sus procesos [4] y [5].

En años recientes, se ha popularizado la adición de enmiendas de biomateriales que se obtienen a partir de la pirólisis de desechos orgánicos, y que son prometedores para la inmovilización de EPT y en específico de metales pesados, debido a las propiedades que presentan. Un ejemplo de estos materiales es el bone char (BC), compuesto de fosfato tricálcico (hidroxiapatita;  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ), que se sintetiza mediante la pirólisis de huesos animales de desecho, derivados de las industrias del procesamiento de carnes [6]. Las aplicaciones del BC son amplias, desde micro fertilizante (por su alto contenido en P) [7], hasta su capacidad de remover el fluoruro

del agua potable [8] y [9]. Además, el BC posee una elevada porosidad y potencial para actuar como material absorbente cuando es aplicado en los suelos [10]. El objetivo del presente trabajo fue probar el efecto de la adición de BC, obtenido a partir de fémur de ganado vacuno, en jales mineros de San Felipe de Jesús, Sonora, sobre la disminución de la producción de sales eflorescentes y con ello evaluar su potencial uso como técnica de remediación de residuos de mina.

## Metodología

### Localización del área de estudio

El área de estudio se encuentra a 142 km al NE de Hermosillo en el municipio de San Felipe de Jesús. La zona de estudio que contiene los jales mineros abandonados se localiza al sur del poblado a 2 km aproximadamente (Figura 1).

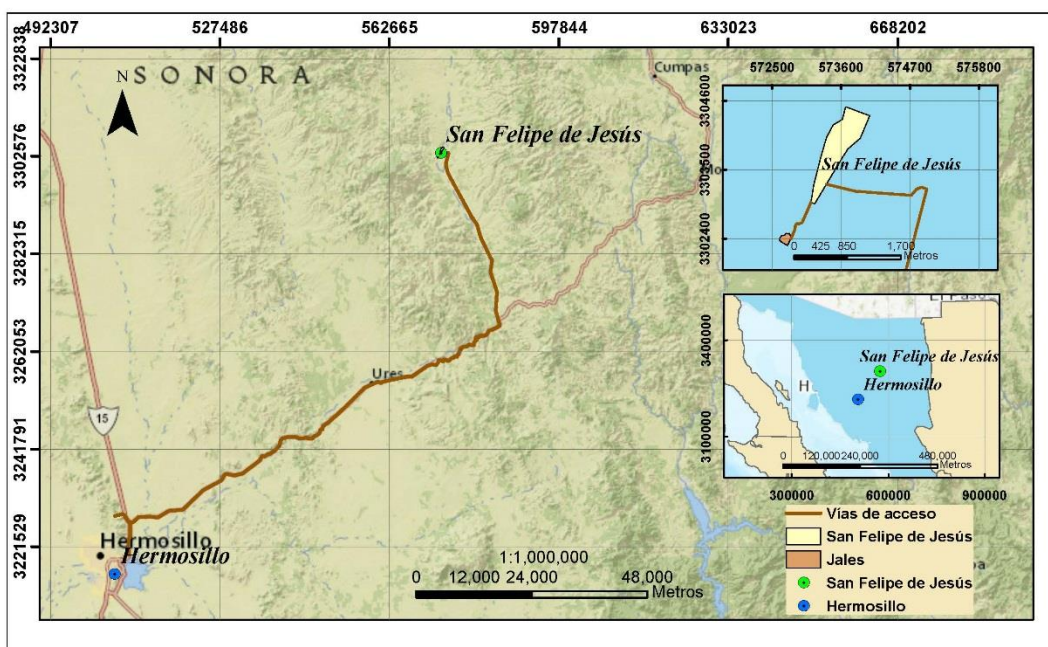


Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio y el poblado de San Felipe de Jesús.

### **Colecta y procesamiento de las muestras**

Se colectaron muestras de jales mineros ricos en óxidos (rojos) y ricos en sulfuros (grises) (JR y JG respectivamente), en 6 estaciones de muestreo, con un total de 6 muestras y de acuerdo con la NMX-AA-132-SCFI-2016 [11] El material se trasladó al Laboratorio de Ciencias Ambientales (LCA) de la Estación Regional del Noroeste (ERNO) del Instituto de Geología (IGL) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Las muestras se secaron durante 24 h a temperatura ambiente y posteriormente se tomaron submuestras, mediante el método de cono y cuarteo de acuerdo con “Campos y Campos (2017)” [12], finalmente se tamizaron a tamaño de partícula <2 mm para almacenarse hasta su análisis.

### **Síntesis de bone char**

Para realizar la síntesis del biomaterial se utilizaron huesos de fémur de ganado vacuno, obtenidos de desechos de forma comercial en el mercado municipal de Hermosillo. El BC se obtuvo mediante pirolisis a 700 °C de acuerdo con “Encinas Yáñez, 2019” [13] y “Andreu et al. (2008)” [14]. Trabajos previos han demostrado que la metodología empleada, produce BC con las mejores características de contenido de hidroxiapatita, presencia de grupos funcionales y porosidad [13].

### **Experimento con enmiendas de bone char en jales mineros**

La parte experimental se basó en la determinación de la movilidad con agua meteórica en columnas de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009 [15]. El procedimiento consistió en hacer pasar un fluido de extracción a través de una columna con una muestra de mineral, por un periodo de 24 h y con una relación del fluido de extracción/mineral de

1:1. El diseño experimental fue factorial general completo, con jales y enmiendas de BC en proporciones de 0 %, 10 % y 20 % esto por duplicado tanto para el JR como para JG, empleando como variables el pH, CE y concentraciones de EPT. Para formar las sales eflorescentes se tomó una muestra de 25 ml del efluente de la lixiviación, que se secó a 45 °C en un horno de secado en placas de Petri.

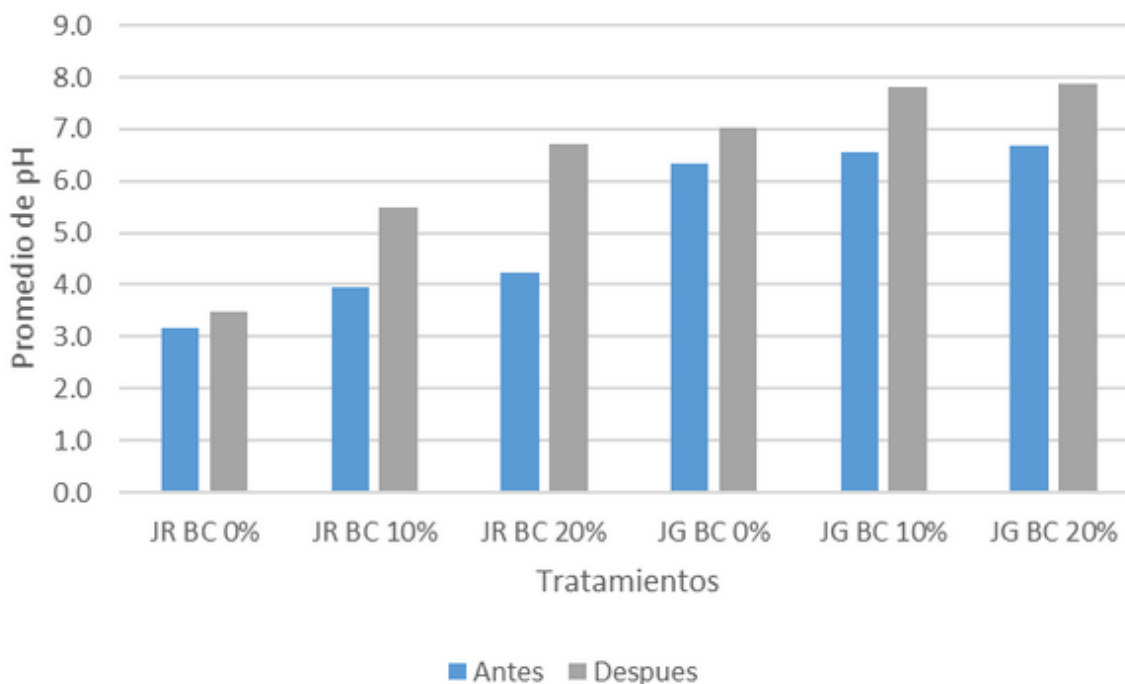
### **Procedimientos analíticos**

El pH y la Conductividad eléctrica (CE), se determinaron de acuerdo con “Ponce de León et al. (2012)” [16]. Los análisis de Difracción de rayos-X (DRX), para identificación de fases y semi-cuantificación, se realizaron en el IG, UNAM de acuerdo con “Morales-Pérez et al. (2021)” [17]. La caracterización mediante espectroscopía electrónica de barrido (SEM) realizó en el LCA, ERNO [17]. El análisis de contenido total, se realizó una digestión de acuerdo con el método 3050b de la “USEPA (1996)” [18]. El análisis se realizó empleando un espectrómetro de emisión atómica de plasma por microondas de nitrógeno (MP-AES), para Pb, Mn y Zn.

## **Resultados y discusión**

### **Parámetros fisicoquímicos**

Se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los valores de pH iniciales y finales para todos los tratamientos excepto para los JR con 0 % de BC. Mientras que los valores de pH finales solo mostraron diferencias significativas entre todos los tratamientos de JR. Al final de la experimentación se observó un incremento del pH proporcional a la adición de BC a excepción del tratamiento con 0 % de BC en los JG (Figura 2).

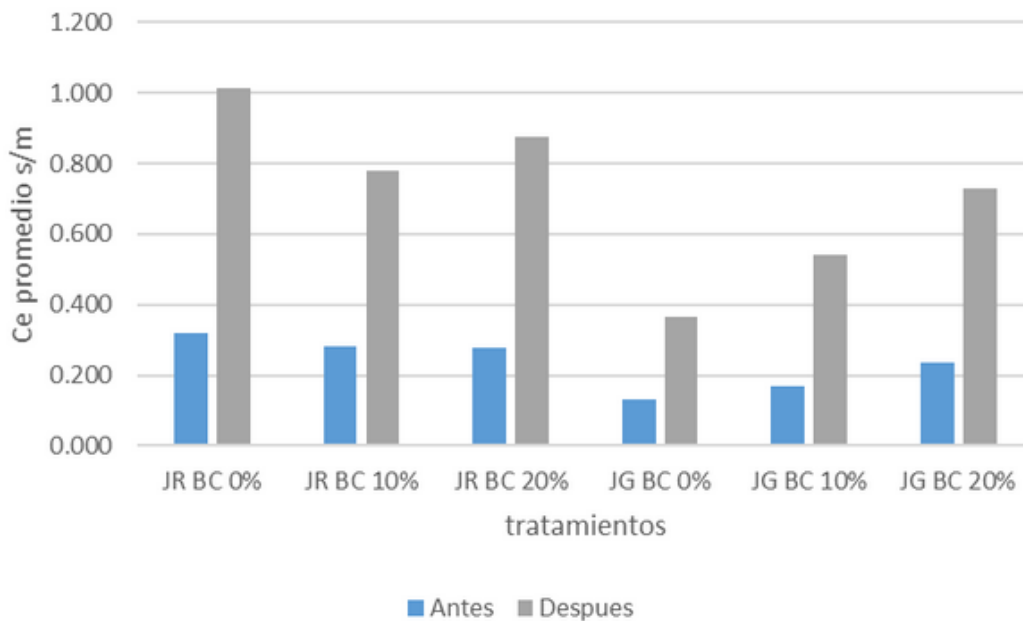


**Figura 2. Resultados de los valores de pH medidos antes y después de la lixiviación con agua meteórica, para las mezclas de Jales ricos en óxidos (JR) y jales ricos en sulfuro (JG) con bone char (BC).**

De acuerdo con los resultados, el BC ejerce un efecto inmediato sobre el pH de los jales mineros. Este efecto obedece a la solubilización del BC que consume acidez incrementando el pH de la solución [19] y [20]. La alcalinización del tratamiento de JG sin enmienda de BC puede atribuirse al efecto amortiguador del pH, de minerales presentes en los jales como la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y yeso ( $\text{CaSO}_4$ ), además de que estos jales mineros han sido expuestos en menor grado a las condiciones ambientales [21].

Los valores de CE sólo mostraron diferencias significativas al final del experimento para todos los tratamientos; específicamente para los JR los valores de CE, muestran diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los tratamientos de 0 y 10 % de BC y entre los tratamientos 0 y 20 % de BC, con

valores menores al tratamiento con 0 % de BC. Mientras que, para los JG, los valores de CE muestran diferencias significativas en todos los tratamientos ( $p < 0.05$ ), directamente proporcionales a la adición de enmienda de BC (Figura 3).



**Figura 3. Resultados de los valores de CE medidos antes y después de la lixiviación con agua meteórica, para las mezclas de Jales ricos en óxidos (JR) y jales ricos en sulfuro (JG) con bone char (BC).**

Al final del experimento los valores de CE de los JR con adición de BC, muestran una disminución independientemente de la enmienda de BC. Este efecto puede deberse a la precipitación de fosfatos e hidróxidos insolubles con cationes de EPT. Por el contrario, en los JG se muestra un incremento proporcional de la CE principalmente al final del experimento, esto puede deberse a que los JG no han sido expuestos en el mismo grado a los procesos de lixiviación y por ello incrementen la cantidad de cationes en solución además de que la solubilización del BC es menos importante a pH alcalinos y por ende no se produce la remoción de EPT [22] y [23].



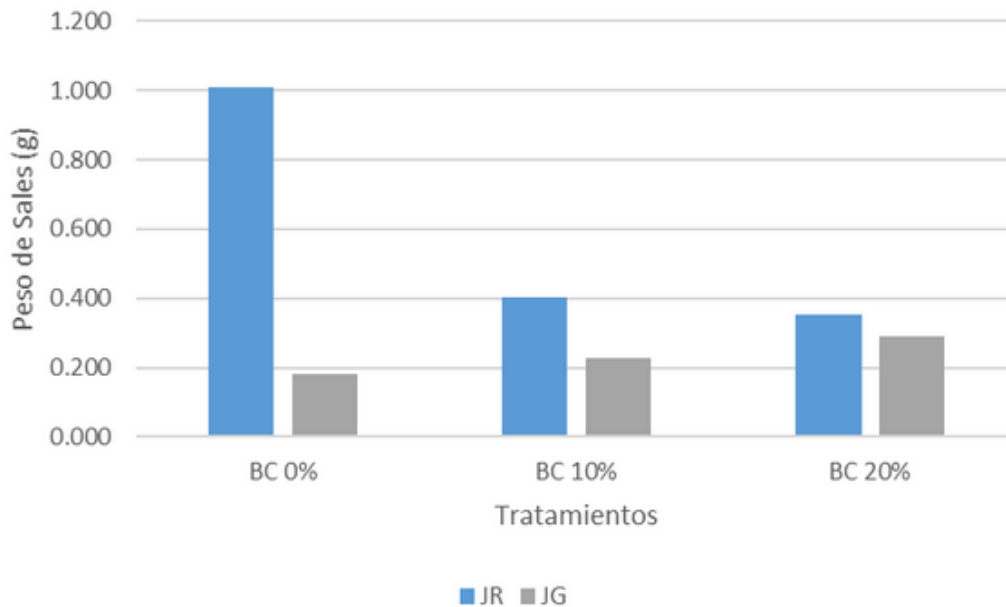
### **Contenido elemental y mineralogía**

La composición elemental de los jales mineros. Los principales EPT presentes en los JR son Al, Mn, Pb en concentraciones de alrededor de 5850, 2127 y 5489 ppm, respectivamente. Mientras que, para los JG, los EPT presentes en mayor concentración son el Al, Zn, Pb y Mn en concentraciones de alrededor de 6947, 4117, 5159 y 16362 ppm, respectivamente. La composición de los jales mineros es en general similar a excepción del Zn, que muestra concentraciones menores para los JR.

Los análisis de DRX mostraron que las especies más abundantes en los jales mineros son: cuarzo, yeso y calcita, otras fases presentes en los JG son la actinolita y caolinita mientras que en los JR jarosita, hematita y plagioclasa intermedia. Mediante DRX solo se lograron identificar algunas fases asociadas a los EPT presentes en mayor concentración como la mimetita. Sin embargo, los análisis de DRX antes y después de la experimentación no muestran una diferencia clara en la composición y mineralogía de los jales mineros.

### **Producción de sales eflorescentes**

El peso de las sales generadas para los JG mostró diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los tratamientos de 0 y 20 % de BC y entre los tratamientos de 10 y 20 % de BC. En el caso de los JR se hallaron diferencias significativas entre los tratamientos con 0 y 10 % de BC y entre los tratamientos con 0 y 20 % de BC; la generación de sales de JG mostró un incremento significativo en el tratamiento con 20 % de BC respecto al tratamiento con 0 % de BC. Por otro lado, la generación de sales de JR disminuyó con respecto al tratamiento con 0 % de BC (Figura 4).

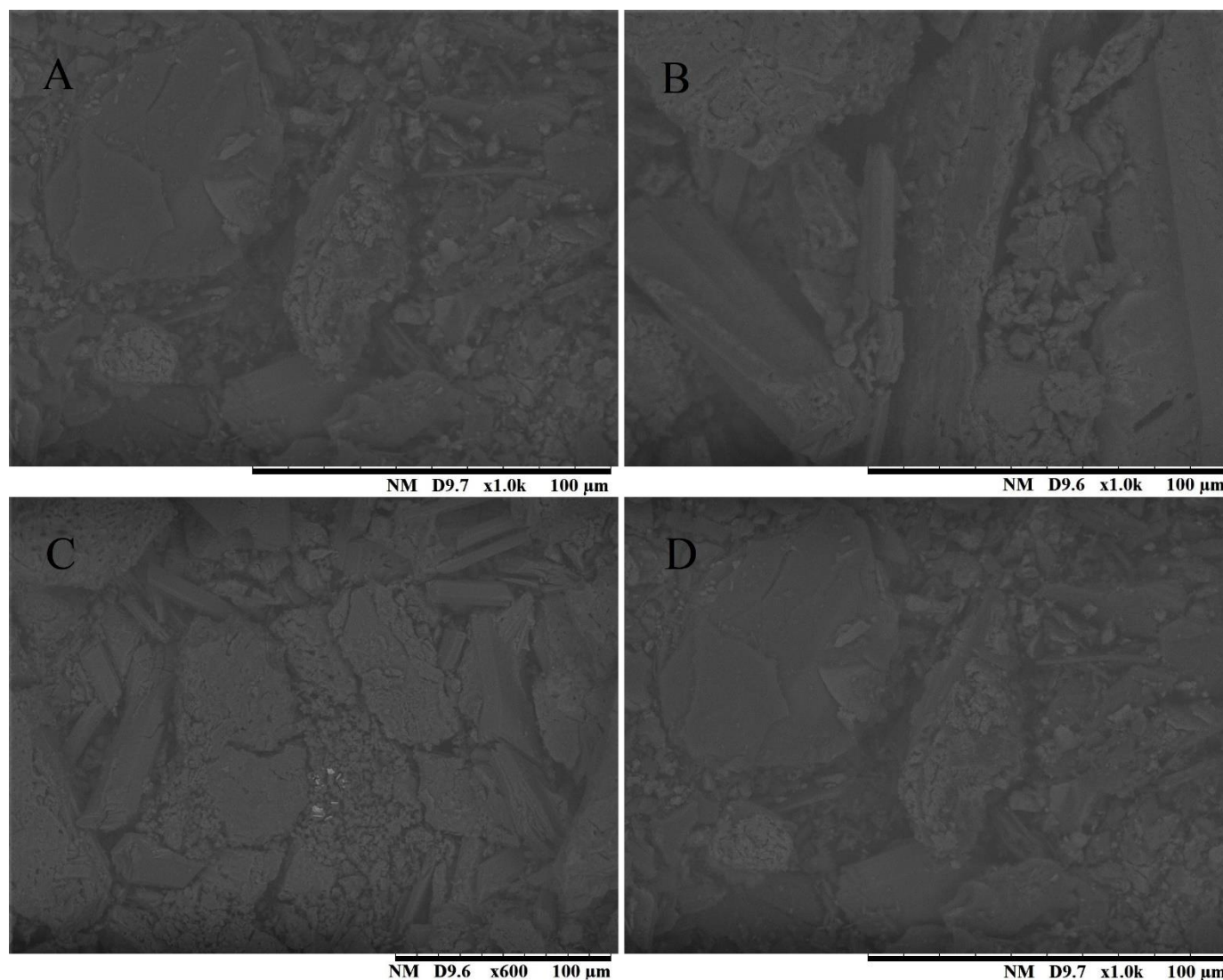


**Figura 4. Resultados de la producción de sales eflorescentes por cada 25 ml de efluente, para las columnas con mezclas de Jales ricos en óxidos (JR) y jales ricos en sulfuro (JG) con bone char (BC).**

En el caso de los JR, la disminución puede explicarse por ambos; la adsorción de cationes sobre la superficie del BC y el efecto amortiguador que produce su disolución. Mientras que, en el caso de los JG, aunque muestran valores cercanos a la neutralidad o ligeramente alcalinos, es probable que contengan más especies solubles debido a que estos materiales no han sido expuestos en el mismo grado a los procesos de lixiviación [17].

De acuerdo con los análisis por SEM, en las muestras de las sales eflorescentes para ambos tratamientos de jales mineros sin enmienda de BC y con enmienda de BC, se observa una morfología similar que presente agregados y prismas de sales probablemente sulfatos y carbonatos. Las fases, presentan un mayor tamaño en los tratamientos con enmienda de BC. Además, se observaron algunas fases con presencia de elementos de mayor peso atómico en los

tratamientos que no contienen enmiendas de BC independientemente del tipo de jal (Figura 5). La semi-cuantificación con Detector de Energía Dispersiva (EDX), mostró un comportamiento similar en todas las muestras de sales eflorescentes (JR, JG con y sin enmienda de BC), en donde los principales EPT asociados a las sales son: Zn, Pb, Mn.



**Figura 5. Micrografías de las sales eflorescentes producidas en los tratamientos: A, JR 100% BC 0%; B, JR 80% BC 20% C, JG 100 % BC 0 % y; D, JG 80 % BC 20 %.**

Estos resultados muestran que los principales EPT asociados a la movilización asociada a la formación de sales eflorescentes son Zn, Pb, Mn y Al, independientemente del tipo de jale minero, presumiblemente por la formación de sulfatos y carbonatos. Estas especies químicas son altamente solubles y pueden representar un riesgo potencial de movilización y toxicidad mediante la dispersión hídrica por disolución y eólica por su tamaño del orden de micras. Estas especies químicas muestran también un alto grado de disponibilidad [17].

## Conclusiones

De acuerdo con los resultados, el BC ejerce un efecto inmediato sobre el pH de los jales mineros amortiguándolo. Al final del experimento los valores de CE de los JR con adición de BC, muestran una disminución independientemente del porcentaje de enmienda de BC, estos resultados son prometedores para la inhibición de la formación de drenaje ácido de mina.

La producción de sales eflorescentes a partir de los efluentes de lixiviación de los Jales mineros mostró decrementos significativos con las enmiendas de BC y muestran la formación de fases más estables de sulfatos y carbonatos presumiblemente. Finalmente, los EPT asociados a los jales mineros son Zn, Pb, Al y Mn. Estos resultados confirman que la adición de BC en los jales mineros reduce la formación de sales eflorescentes y presumiblemente reduce el contenido de EPT.

## Reconocimientos

A la DGAPA-PAPIIT y PRODEP-NPCT proyectos IN204918, IN113519 y CESUES-PTC-035. Al LCA, ERNO UNAM y al Q. F. Martínez Rodríguez por su asistencia en el LCA.

## Referencias

- [1] R. H. Johnson, D. W. Blowes y W. D. J. Robertson, «The hydrogeochemistry of the Nickel Rim mine tailings impoundment, Sudbury, Ontario,» *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 41, nº 1-2, pp. 49-80, 2000.
- [2] B. Dold y L. Fontboté, «Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing,» *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 74, nº 1-3, pp. 3-55, 2001.
- [3] B. G. Lottermoser, *Sulfidic mine wastes in mine wastes*, Berlin: Springer, 2010.
- [4] S. C. Wetzel, M. K. Banks y A. P. Schwab , *Rhizosphere effects on the degradation of pyrene and anthracene in soil in Phytoremediation of Soil and Water Contaminants, USA: American Chemical Society*, 1997, pp. 254-262.
- [5] P. J. Harvey, B. F. Campanella, P. M. Castro, H. Harms, E. Lichtfouse, A. R. Schäffner, S. Smrcek y D. Werck-Reichhart, «Phytoremediation of polyaromatic hydrocarbons, anilines and phenols,» *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 9, nº 1, pp. 29-47, 2002.
- [6] M. J. Zwetsloot, J. Lehmann, T. Bauerle, S. Vanek, R. Hestrin y A. Nigussie, «Phosphorus availability from bone char in a P-fixing soil influenced by root-mycorrhizae-biochar interactions,» *Plant and soil*, vol. 408, nº 1, pp. 95-105, 2016.
- [7] M. Gulyás, M. Fuchs, I. Kocsis y G. Füleky, «Effect of the soil treated with biochar on the rye-grass in laboratory experiment,» *Acta Universitatis Sapientiae, Agriculture and Environment*, vol. 6, nº 1, pp. 24-32, 2014.
- [8] V. Hernández-Montoya, M. P. Elizalde-Gonzalez y R. Trejo-Vazquez, «Screening of commercial sorbents for removal of fluoride in synthetic and groundwater,» *Environmental Technology*, vol. 28, nº 6, pp. 595-607, 2007.
- [9] N. Kawasaki, F. Ogata, H. Tominaga y I. Yamaguchi, «Removal of fluoride ion by bone char produced from animal biomass,» *Journal of Oleo Science*, vol. 58, nº 10, pp. 529-535, 2009.
- [10] K. F. Mendes, K. E. Hall, V. Takeshita, M. L. Rossi y V. L. Tornisielo, «Animal bonechar increases sorption and decreases leaching potential of aminocyclopyrachlor and mesotrione in a tropical soil,» *Geoderma*, vol. 316, nº 1, pp. 11-18, 2018.

- [11] D. O. d. I. F. Secretaría de Gobernación, «dof.gob.mx,» 6 Marzo 2017. [En línea]. Available: [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5475373&fecha=06/03/2017](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5475373&fecha=06/03/2017). [Último acceso: 22 Octubre 2021].
- [12] M. M. Campos y C. R. Campos, «Applications of quartering method in soils and foods,» *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 7, n° 1, pp. 35-39, 2017.
- [13] M. F. Encinas-Yáñez, «Informe final de actividades de prácticas profesionales,» Cordinación Divisonal de Ciencias Biológicas y de la Salud, Sonora, 2019.
- [14] G. C. Andreu , P. M. Saval, B. F. Brotons y T. J. A. Abril, «Prácticas de materiales de construcción I.T.O.P. Práctica No. 3,» Universidad de Alicante, España, 2008.
- [15] D. o. d. I. F. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, «dof.gob.mx,» 30 Agosto 2011. [En línea]. Available: <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4485/semarnat1/semarnat1.htm>. [Último acceso: 22 Octubre 2021].
- [16] D. L. H. C. Ponce , Q. M. Hernández, P. C. Vanegas y C. S. Heydrich, *Conceptos y procedimientos para el análisis de muestras ambientales*, Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.
- [17] A. Morales-Pérez, V. Moreno-Rodríguez, R. Del Rio-Salas, N. G. Imam, B. González-Méndez, T. Pi-Puig, E. F. Molina-Freaner y R. Loredó-Portales, «Geochemical changes of Mn in contaminated agricultural soils nearby historical mine tailings: Insights from XAS, XRD and, SEP,» *Chemical Geology*, vol. 573, n° 1, p. 120217, 2021.
- [18] U. E. P. A. USEPA, «epa.gov,» 1 Diciembre 1996. [En línea]. Available: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>. [Último acceso: 22 Octubre 2021].
- [19] P. H. Warren, G. W. Kallemeyn, H. Huber, F. Ulf-Møller y W. Choe, «siderophile and other geochemical constraints on mixing relationships among HED-meteoritic breccias,» *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 73, n° 19, pp. 59518-5943, 2009.
- [20] N. Siebers, K. Jens y P. Leinweber, «Siebers, N., Kruse, J. and Leinweber, P., 2013. Speciation of phosphorus and cadmium in a contaminated soil amended with bone char: Sequential fractionations and XANES spectroscopy,» *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 224, n° 5, pp. 1-13, 2013.

- [21] V. Jobbágy, T. Altitzoglou, P. Malo, V. Tanner y M. Hult, «A brief overview on radon measurements in drinking water,» *Journal of environmental radioactivity*, vol. 173, nº 1, pp. 18-24, 2017.
- [22] E. Gruden, P. Bukovec y M. Zupančič, «Preliminary evaluation of animal bone char as potential metal stabilization agent in metal contaminated soil,» *Acta Chimica Slovenica*, vol. 64, nº 3, pp. 577-581, 2017.
- [23] S. S. Alquzweeni y R. S. Alkizwini, «Alquzweeni, Saif S., and Rasha S. Alkizwini. "Removal of Cadmium from Contaminated Water Using Coated Chicken Bones with Double-Layer Hydroxide (Mg/Fe-LDH),» *Water*, vol. 12, nº 8, p. 2303, 2020.

**Cómo citar este artículo:**

Siqueros Valencia, J. R., Loredó Portales, R., Moreno Rodríguez, V., & Del Río Salas, R. (2022). USO DE BIOMATERIALES COMO ALTERNATIVA PARA LA REMEDIACIÓN DE JALES MINEROS. *EPISTEMUS*, 15(31). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v15i31.208>