

Método sustentable de recuperación de plata de efluentes mineros por adsorción con hidrogeles

Sustainable method for silver recovery from mining effluents by hydrogel adsorption

Banda Mendoza Sofía Desirée (1), Cuevas Miranda David Alejandro (2), Davalos Guzmán Rosa María (3), Gamiño Arroyo Zeferino (4), Sánchez Cadena Lorena Eugenia* (5).

^{1,2,3,4}[Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato]

⁵[Departamento de Ingeniería Civil, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato] | Dirección correo electrónico: [lesanchez@ugto.mx]

Resumen

Los efluentes mineros contienen metales pesados y otros contaminantes que pueden dañar los ecosistemas acuáticos y terrestres, además representan una pérdida económica, por el desperdicio de metales preciosos como la plata. Tradicionalmente, se ha utilizado la adsorción con carbón activado para el tratamiento de estos efluentes. Sin embargo, el uso de hidrogeles (HG) resulta aún más rentable, ya que estos materiales tienen un tiempo de retención de agua mayor, lo que mejora su capacidad de adsorción. En el presente trabajo, se sintetizaron hidrogeles de poliácido de sodio (NaPAA), poliácido de calcio (CaPAA) y un hidrogel Combinado para adsorber plata de efluentes mineros de manera sustentable. Una vez sintetizados, los hidrogeles se sumergieron en soluciones de AgNO_3 , a diferentes concentraciones (82.62 ppm, 147.74 ppm, 174.22 ppm, y 222 ppm). Se calculó el porcentaje de hinchamiento y por medio de absorción atómica se obtuvieron las isotermas de adsorción. En el sistema por lotes, el hidrogel Combinado mostró la mayor capacidad de adsorción (62.5 mg/g), ajustándose al modelo de Langmuir. A través de un análisis de SEM-EDS se evidencia la presencia de plata sobre la superficie de los hidrogeles después de la adsorción. El HG Combinado se probó también en régimen continuo. Los resultados muestran que una columna de adsorción empacada con este HG, logró un nivel de porcentaje de adsorción de 40% en 20 min. Se evaluó también la eficacia del hidrogel Combinado en un sistema por lotes utilizando una solución ácida de jales mineros reales, y se obtuvo una capacidad de adsorción de 0.266 mg/g. Estos hidrogeles son una alternativa sustentable para el tratamiento de jales mineros, ofreciendo un material de adsorción económico para la industria, contribuyendo así, con la economía circular.

Abstract

Mining effluents contain heavy metals and other contaminants that can harm aquatic and terrestrial ecosystems and represent an economic loss due to the waste of precious metals like silver. Traditionally, activated carbon adsorption has been used for the treatment of these effluents. However, the use of hydrogels (HG) is even more cost-effective, as these materials have a greater water retention time, which improves their adsorption capacity. In this work, sodium polyacrylate (NaPAA), calcium polyacrylate (CaPAA), and a Combined hydrogel were synthesized to adsorb silver from mining effluents sustainably. Once synthesized, the hydrogels were immersed in AgNO_3 solutions at different concentrations (82.62 ppm, 147.74 ppm, 174.22 ppm, and 222 ppm). The swelling percentage was calculated, and adsorption isotherms were obtained through atomic absorption. In the batch system, the Combined hydrogel showed the highest adsorption capacity (62.5 mg/g), fitting the Langmuir model. SEM-EDS analysis evidenced the presence of silver on the surface of the hydrogels after adsorption. The Combined HG was also tested in a continuous regime. Results showed that a packed adsorption column with this HG achieved an adsorption level of 40% in 20 minutes. The effectiveness of the Combined hydrogel was also evaluated in a batch system using an acidic solution of real mining tailings, here, an adsorption capacity of 0.266 mg/g was obtained. These hydrogels are a sustainable alternative for the treatment of mining tailings, offering an economical adsorption material for the industry, thus contributing to the circular economy.

Palabras clave: Hidrogel; plata; adsorción; sustentable.

Introducción

La contaminación de las aguas por plata contenida en efluentes mineros los cuales contienen una gran cantidad de metales pesados se ha convertido en un motivo creciente de preocupación en los últimos años.[1] Las emisiones de plata se encuentran tradicionalmente ligadas a vertidos industriales, mineros y los relacionados con la industria de la fotografía.[2]

Este tipo de vertidos son extremadamente dañinos para las comunidades microbianas y los invertebrados acuáticos, aunque es de baja toxicidad para los humanos. Se ha descubierto que las nanopartículas de plata en el suelo disminuyen significativamente los indicadores de actividad enzimática.[3]

Existen diversos métodos para el tratamiento de aguas que contienen plata, sin embargo, son costosos, entre ellos están la filtración por membrana, electrodiálisis, ósmosis inversa y nanofiltración; a su vez, también se puede separar la plata por medio de adsorción, esta es más económica y fácil, normalmente se utilizan resinas de intercambio iónico o carbón activado. La plata tiene un gran valor económico en la industria, de manera que su recuperación representa un doble beneficio, el ecológico y el económico. [4]

En el presente proyecto se estudia la recuperación de plata en solución por medio de adsorción con hidrogeles de CaPAA, NaPAA y Combinado, con el fin de aprovechar la capacidad de estos materiales para retener agua, y con esto aumentar el tiempo de contacto entre el hidrogel y la plata. Los resultados obtenidos mediante la determinación de la concentración de plata por espectroscopía de absorción atómica muestran que los tres hidrogeles son capaces de adsorber la plata, siendo el que mayor capacidad de adsorción presenta es el hidrogel Combinado (62.5 mg/g). Por otra parte, un análisis SEM-EDS sobre los hidrogeles demostró que estos adsorbentes, efectivamente contienen plata una vez que se han puesto en contacto con la solución de AgNO_3 .

Con el fin de estudiar la aplicación de esta técnica, se implementó una columna empacada con hidrogel combinado y se obtuvo que en régimen continuo este material también es capaz de adsorber la plata. Se realizó la desorción de la plata retenida en el hidrogel por medio de una solución ácida, los resultados muestran que la migración de la plata hacia la solución es posible en bajas concentraciones. La efectividad de este hidrogel se probó también en una solución ácida con jales mineros reales, alcanzando una capacidad de adsorción de 0.266 mg/g.

Hidrogeles

Los hidrogeles son polímeros súper absorbentes que presentan una gran afinidad por el agua,[5] tomando en cuenta que las propiedades de estos pueden ser modificadas de acuerdo con su composición y finalidad de uso [6,7]. En este caso de estudio, una de las propiedades más importantes fue la capacidad de retención de metales pesados como la plata mediante el método de adsorción por intercambio iónico en soluciones de distintas concentraciones de AgNO_3 y efluentes mineros.

Adsorción

La adsorción consiste en poner en contacto un fluido con un material poroso llamado adsorbente. Uno o más de los componentes del fluido (el adsorbato) son atraídos a la superficie. Uno de los adsorbentes más empleados es el carbón activado.

Existe un tipo de adsorción que implica el *intercambio iónico*, el adsorbente contiene grupos con carga que interactúan con iones presentes en el líquido. La aplicación más conocida del intercambio iónico es la suavización del agua, para eliminar iones de calcio y magnesio, y sustituirlos con iones de sodio.

La adsorción se puede llevar a cabo tanto en régimen continuo y por lotes. Dado que los procesos industriales operan en condiciones continuas, este estudio es práctico para el tratamiento de aguas residuales y/o efluentes mineros.[8]

Construcción de la isoterma de adsorción de Langmuir y Freundlich

A través del cálculo de las isotermas, se puede conocer si el mecanismo de adsorción es de manera predominante una adsorción física o química.

Con los resultados obtenidos en la absorción atómica, los cálculos pertinentes fueron realizados para cada uno de los 3 tipos de hidrogeles, obteniendo así la isoterma de adsorción mediante la ecuación de Langmuir y Freundlich linealizada para las diferentes concentraciones iniciales.[9]

La ecuación de Freundlich tiene la forma general:

$$q_e = K_f C^{1/n}$$

Donde q es la concentración de soluto en el sólido (mg adsorbato/g adsorbente), C es la concentración de soluto en ppm. K_f y n son constantes y n debe ser menor a 1.

Mediante un balance de masa, se pudo calcular en base a los resultados obtenidos en la absorción atómica los mg de plata adsorbidos por cada hidrogel. En base a los datos experimentales obtenidos, se revisa a qué tipo de isoterma se ajusta mejor.

La ecuación de Freundlich es un instrumento útil para describir los datos. Los datos se ajustan a la forma logarítmica de la ecuación:

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C$$

La cual nos da una línea recta con pendiente $1/n$ y ordenada en el origen igual al valor de $\ln K_F$.

Así pues, para la ecuación de Langmuir, su forma general queda de la siguiente manera:

$$q_e = q_{\max} \cdot \frac{C \cdot b}{(1 + b \cdot C)}$$

Donde q es la concentración de soluto en el sólido (mg adsorbato/g adsorbente), C es la concentración de soluto en ppm, b es una constante referida a la afinidad de adsorción y la $q_{\max}$ es la constante referida a la cantidad máxima de sorción. La forma lineal de esta ecuación queda de la siguiente manera:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b q_{\max}} + \frac{1}{q_{\max}} C_e$$

Materiales y metodología

Síntesis de hidrogeles y prueba en Batch

Tres tipos de hidrogeles fueron sintetizados, poliacrilato de sodio, poliacrilato de calcio y un hidrogel combinado. Cada hidrogel fue preparado utilizando una solución de 10 mL, siguiendo la metodología descrita por Tasaki [10].

Para evaluar la capacidad de adsorción de plata de los hidrogeles, soluciones de nitrato de plata a diferentes concentraciones fueron hechas (82.62, 147.74, 174.38 y 222 ppm). Cada solución se preparó en un volumen de 250 mL. Se tomaron 20 mL de cada una para realizar las pruebas con los hidrogeles.

Los hidrogeles fueron pesados antes de ser sumergidos en las soluciones de nitrato de plata. Posteriormente, se sumergieron en las soluciones durante un tiempo determinado. Al finalizar la inmersión, se retiraron los hidrogeles y se pesaron nuevamente para obtener con esto el porcentaje de hinchamiento. El porcentaje de hinchamiento (%Hinchamiento) se calcula utilizando la siguiente fórmula:[11]

$$\%Hinchamiento = \frac{Peso_{final} - Peso_{inicial}}{Peso_{inicial}} \times 100$$

Cada prueba se realiza por triplicado para mejorar la precisión de los resultados. Un estudio comparativo entre los tres tipos de hidrogel (NaPAA, CaPAA y combinado) se llevó a cabo para cada concentración de solución de nitrato de plata.

Para los hidrogeles en la solución de 147.74 ppm, se midió el cambio de peso cada 24 horas durante un periodo de 3 días, con el objetivo de determinar el punto de equilibrio en el cual el hidrogel deja de adsorber plata. En el caso de las otras tres soluciones (82.62, 174.38 y 222 ppm), se realizó una medición a las 24 horas de estar sumergido el hidrogel. De cada muestra, se extrajo 1 mL y se diluyó hasta un volumen de 20 mL para observar el cambio de concentración a través de absorción atómica. Esto permitió determinar si la concentración de plata disminuía en comparación con la concentración inicial antes de sumergir los hidrogeles.

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Con el fin de caracterizar los hidrogeles, se realiza un estudio por medio de SEM y EDS para determinar si los hidrogeles después de estar en contacto con las soluciones de nitrato de plata a 222 y 174.38 ppm, efectivamente había adsorbido este elemento. El objetivo de esto es que, mediante un análisis elemental se pueda evidenciar la presencia de plata en le hidrogel después de la adsorción.

Construcción de las isotermas de Langmuir y Freundlich

A través del cálculo de las isotermas, se puede conocer si el mecanismo de adsorción es de manera predominante una adsorción física o química.

Con los resultados obtenidos en la absorción atómica, se realizaron los cálculos para cada uno de los 3 tipos de hidrogeles, obteniéndose así las isotermas. En base a los datos experimentales se revisa a qué tipo de isoterma se ajusta mejor.

Columna empacada

Para evaluar si el sistema en continuo tenía la misma o mayor efectividad que el sistema batch para la adsorción de plata, se montó una columna empacada utilizando el hidrogel Combinado. En una columna de vidrio de 25 cm de altura y 1centimetro de diámetro, se colocó una masa de 0.502 g de hidrogel como adsorbente. A través de esta columna, se hizo pasar una solución de 174 ppm de AgNO_3 a un flujo de 10 mL/min.

Cada 5 minutos, se tomó una muestra de 1 mL, la cual se diluyó a un volumen de 20 mL. Posteriormente, se midió la concentración de plata, mediante absorción atómica. Los datos obtenidos se utilizaron para construir la gráfica del porcentaje de adsorción, utilizando las siguientes fórmulas:

Concentración remanente: adsorción inicial – adsorción al tiempo de medición

$$\% \text{ adsorción} = \frac{C_0 - C_t}{C_t} \times 100$$

Desorción

Con el fin de recuperar la plata de los hidrogeles, se preparó una solución de ácido nítrico a 1M, en la cual se sumergió cada hidrogel por separado, para ello se midió, la cantidad de plata liberada durante un periodo de 24 horas mediante absorción atómica, para cada HG.

Prueba en jales mineros

Probada la capacidad de los hidrogeles para la remoción de plata mediante soluciones preparadas de AgNO_3 , se evaluó su capacidad de adsorción utilizando jales mineros provenientes de una mina de Hidalgo, el cual fue diluido previamente con ácido nítrico para disolver los sólidos presentes. Luego, se aplicó la metodología empleada en el método por lotes utilizando el hidrogel combinado. La concentración de plata en la muestra de jale minero se midió mediante espectroscopía de absorción atómica, tanto antes como después de haber sumergido el hidrogel, para evaluar su capacidad de remoción de plata.

Resultados y discusión

Resultado de síntesis de hidrogeles

Las siguientes imágenes en la Figura 1 muestran los 3 tipos de hidrogeles sintetizados a partir de la metodología descrita.

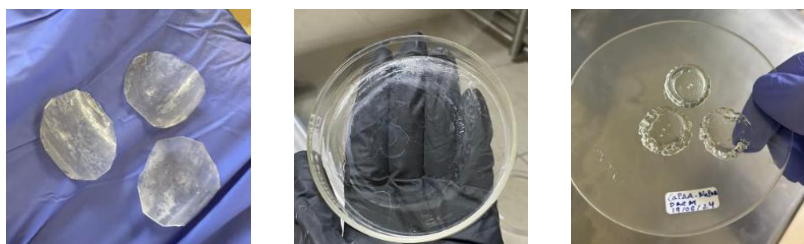


Figura 1. Muestra de la síntesis de los hidrogeles NaPAA, CaPAA y combinado.

En la Tabla 1, se presentan los pesos promedio de cada uno de los hidrogeles. Esta información será utilizada para realizar el cálculo del porcentaje de hinchamiento y el de la capacidad de adsorción de cada HG.

Se sintetizaron 4 series de 3 hidrogeles de cada uno de los adsorbentes estudiados (NaPAA, CaPAA y Combinado) para poder hacer las pruebas por triplicado. Las soluciones sintéticas de AgNO_3 a evaluar comprenden 4 concentraciones diferentes en función de la plata (82.62 ppm, 147.74 ppm, 174.22 ppm y 222 ppm), de manera que, cada una de las 4 series se fue sumergiendo en cada solución.

Tabla 1. Promedio del peso inicial de los hidrogeles utilizados en la experimentación por lotes.

Peso promedio de hidrogel NaPAA (g)	Peso promedio de hidrogel CaPAA (g)	Peso promedio de hidrogel Combinado (g)
--	--	--

Serie 1	0.137	0.097	0.373
Serie 2	0.183	0.135	0.075
Serie 3	0.100	0.167	0.071
Serie 4	0.143	0.122	0.050

Porcentaje de hinchamiento

En la tabla 2 se presentan los resultados del porcentaje de hinchamiento promedio para cada tipo de hidrogel sumergido en las diferentes soluciones de plata a distintas concentraciones. En la primera columna se muestra la concentración inicial de Ag en cada una de las soluciones de AgNO_3 . En la segunda columna se encuentra el porcentaje de hinchamiento promedio del triplicado del hidrogel NaPAA. En la tercera columna se enlistan los valores del porcentaje de hinchamiento promedio del triplicado del hidrogel CaPAA. Finalmente, en la cuarta columna se muestran los resultados del porcentaje de hinchamiento promedio del triplicado del hidrogel combinado.

Como puede observarse en los datos presentados, los diferentes hidrogeles muestran comportamientos variados en cuanto a su hinchamiento en presencia de las soluciones a diferentes concentraciones. Los resultados indican que la capacidad de hinchamiento de los hidrogeles estudiados varía según la concentración de Ag en la solución y el tipo de hidrogel utilizado. Este comportamiento en cierta manera se debe a la absorción de agua con el paso del tiempo, lo cual sugiere que tanto la composición del hidrogel, la concentración de plata y el tiempo de contacto entre el hidrogel y la solución, influyen significativamente en el comportamiento de hinchamiento de estos materiales.

Tabla 2. Porcentaje de hinchamiento para cada tipo de hidrogel sumergido en soluciones de plata a distintas concentraciones.

Concentración inicial de Ag en solución (ppm)	Porcentaje de hinchamiento promedio del triplicado de hidrogel NaPAA (%)	Porcentaje de hinchamiento promedio del triplicado de hidrogel CaPAA (%)	Porcentaje de hinchamiento promedio del triplicado de hidrogel combinado (%)
82.62	753.73	622.71	1101.77
147.74	813.87	1022.18	432.47
174.22	952.10	609.23	1404.00
222	1301.34	502.78	1226.17

Determinación de la concentración de plata en las soluciones

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos mediante absorción atómica para el sistema NaPAA-Solución de AgNO_3 . En la primera columna se indica la concentración inicial de Ag en cada una de las soluciones de AgNO_3 . En la segunda columna se enlistan la concentración de cada una de las soluciones después de la adsorción y finalmente en la tercera columna se tienen las ppm de Ag retenida por el hidrogel. De igual manera en la tabla 2 se presentan los valores para el sistema CaPAA-Solución de AgNO_3 y en tabla 3 los correspondientes al hidrogel Combinado-Solución de AgNO_3 . Como puede observarse en los tres casos, los hidrogeles estudiados sí son capaces de adsorber la plata, mostrando una tendencia creciente de adsorción conforme la concentración de plata en la solución aumenta.

Tabla 3. Concentraciones obtenidas para el hidrogel de NaPAA.

Concentración inicial de Ag en solución (ppm)	Concentración promedio de Ag en solución del triplicado después de la adsorción (ppm)	Concentración de Ag en el hidrogel (mg/L)
---	---	---

82.62	39.13	43.49
147.74	5.73	142.01
174.22	12.86	161.36
222	11.24	210.76

Tabla 4. Concentraciones obtenidas para el hidrogel de CaPAA.

Concentración inicial de Ag en solución (ppm)	Concentración promedio de Ag en solución del triplicado después de la adsorción (ppm)	Concentración de Ag en el hidrogel (mg/L)
82.62	4.7	77.92
147.74	3.7	144.04
174.22	6.48	167.74
222	6.22	215.78

Tabla 5. Concentraciones obtenidas para el hidrogel combinado.

Concentración inicial de adsorbato (ppm)	Concentración adsorbato promedio del triplicado (ppm)	Concentración de Ag en HG (mg/L)
82.62	23.68	58.93
147.74	3.10	144.63
174.22	18.14	156.24
222	11.36	210.63

Determinación del mejor hidrogel adsorbente de plata.

En la tabla 6 se presentan los resultados del cálculo de la capacidad de adsorción para cada hidrogel sumergido en soluciones de plata a distintas concentraciones. Los datos muestran que los hidrogeles estudiados tienen capacidades de adsorción variables según la concentración de AgNO_3 . En particular, el hidrogel combinado destaca por su capacidad de adsorción significativamente mayor en comparación con los hidrogeles NaPAA y CaPAA, logrando remover hasta un 64% de la plata presente en la solución que estaba a 174.22 ppm. Este comportamiento indica que el hidrogel combinado es el más eficiente en la adsorción de plata en todas las concentraciones evaluadas. La combinación de componentes en este hidrogel mejora su eficacia para adsorber plata, convirtiéndolo en la mejor opción para aplicaciones que requieren la remoción de plata de soluciones acuosas.

Tabla 6. Capacidad de adsorción de los hidrogeles sumergidos en soluciones de plata a distintas concentraciones.

Concentración de Ag en solución (ppm)	q del hidrogel NaPAA (mg Ag/ g HG)	q del hidrogel CaPAA (mg Ag/ g HG)	q del hidrogel Combinado (mg Ag/ g HG)
82.62	4.75	29.69	15.65
147.74	20.73	11.54	20.29
174.22	22.62	25.84	62.49
222	42.29	27.52	59.06

Construcción de la isoterma de adsorción de Langmuir y Freundlich

Con los datos obtenidos en la experimentación, se construyeron las isotermas de Langmuir y Freundlich para cada tipo de hidrogel. En estas, se reflejan los miligramos de plata adsorbidos por gramo de hidrogel utilizado (q) en relación con las diferentes concentraciones a las que se sumergió cada hidrogel. Como lo muestran los resultados, los valores experimentales obtenidos se adaptan mejor a la ecuación de Freundlich, lo que denota la formación de enlaces fuertes entre el adsorbato y el adsorbente.

NaPAA

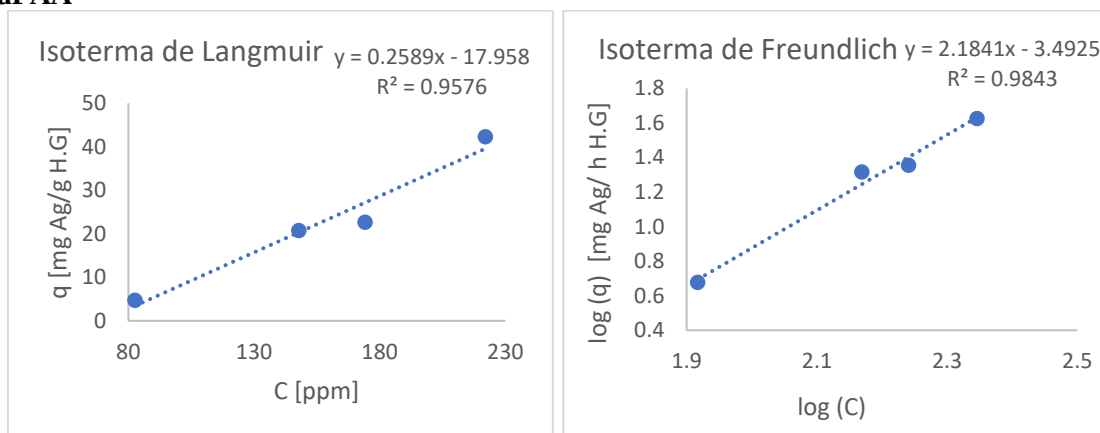


Figura 2. Isotermas de adsorción obtenidos para el hidrogel de NaPAA

CaPAA

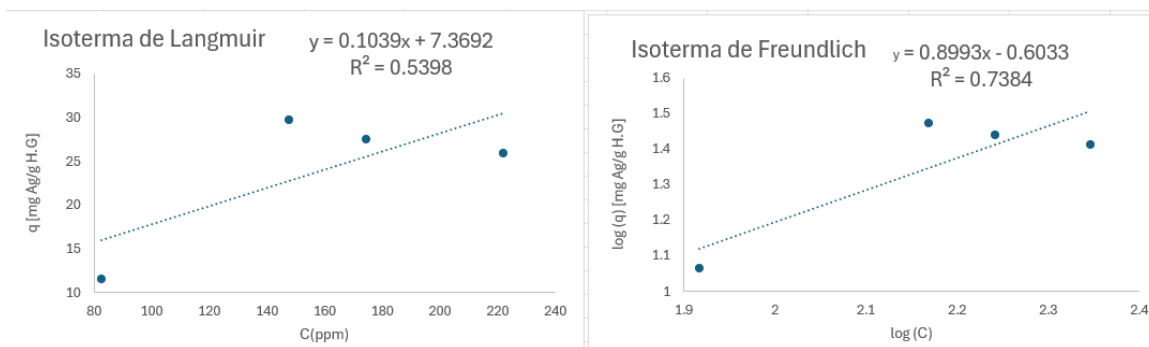


Figura 3. Isotermas de adsorción obtenidos para el hidrogel de CaPAA.

Combinado

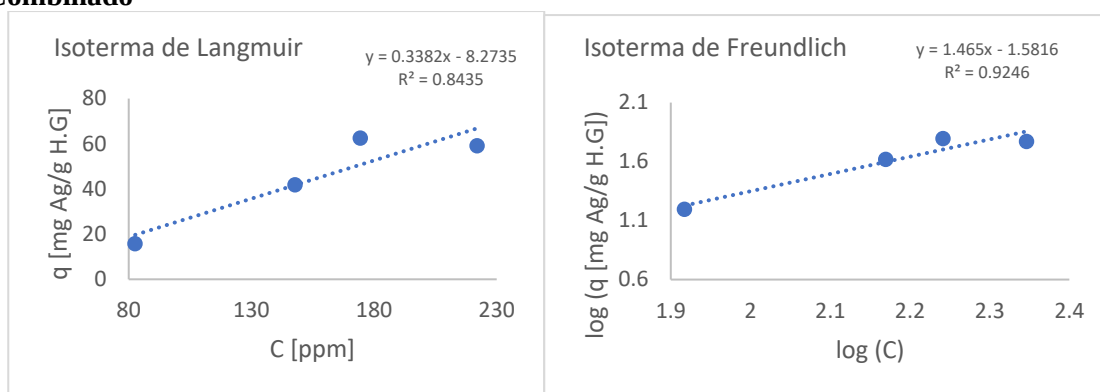


Figura 4. Isotermas de adsorción obtenidos para el hidrogel combinado.

Caracterización de los hidrogeles por análisis SEM-EDS

En las imágenes obtenidas por la microscopía electrónica de barrido (SEM) se muestra la morfología de la superficie de los tres tipos de hidrogeles que adsorbieron la plata. En la figura 5, 6 y 7 se muestran las fotografías obtenidas de los hidrogeles secos (NaPAA, CaPAA y Combinado), después de estar en contacto con la solución de AgNO_3 a una concentración de 222 mg/L durante 24 horas para el HG de NaPAA y de 174.22 mg/L para los HG de CaPAA y Combinado. Como se puede observar, en cada caso se visualizan una especie de gránulos que corresponden a la plata atrapada por hidrogel. Así mismo, el análisis elemental denota la presencia de plata unida al hidrogel.

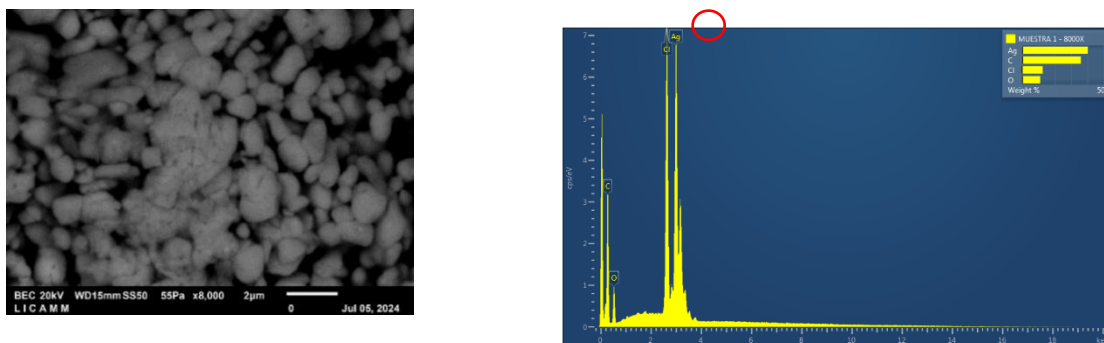


Figura 5. Análisis SEM-EDS de hidrogel de NaPAA

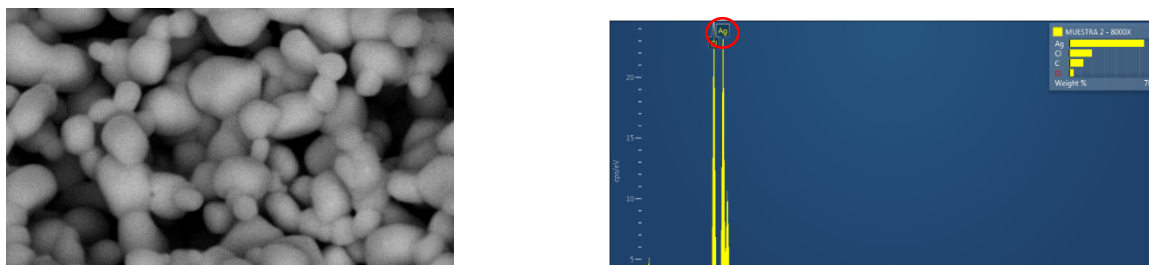


Figura 6. Análisis SEM-EDS de hidrogel de CaPAA

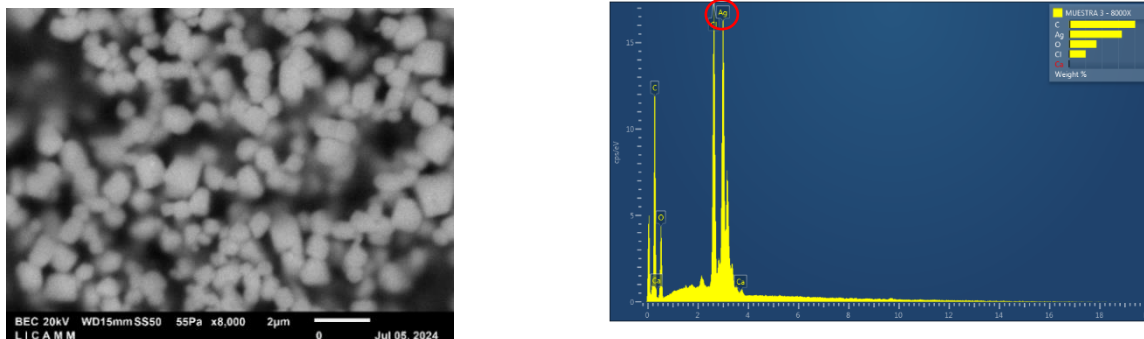


Figura 7. Análisis SEM-EDS de hidrogel combinado.

Sistema en continuo con columna de adsorción empacada

Con la finalidad de aplicar en un futuro esta metodología, se estudió la capacidad de adsorción del HG Combinado ahora como empaque de una columna en régimen continuo.

La siguiente tabla muestra las concentraciones obtenidas por absorción atómica de las muestras de AgNO_3 tomadas a la salida de la columna empacada cada 5 minutos. Con estos resultados, se puede observar cómo la adsorción de plata es rápida al inicio, alcanzando un 26% a los 5 minutos. Además, se observa que a los 20 minutos se llega a un pico de adsorción del 40%, manteniendo esta tendencia. De acuerdo con la experimentación, conforme el tiempo transcurre el porcentaje de adsorción en la columna aumenta.

Tabla 7. Concentración y porcentaje de adsorción para la columna empacada con hidrogel combinado respecto al tiempo.

Tiempo en minutos	Concentración de Ag en la solución de AgNO_3 a la salida de la columna (mg/L)	Adsorción (%)
0	174	0%
5	129.5	26%
10	115.9	33%
15	117.22	33%
20	104.66	40%
25	108.22	38%
30	108.08	38%

Esto indica que el sistema puede ser escalado para procesos industriales, ofreciendo una solución viable en la remoción de plata presente en aguas residuales o para la recuperación de metales valiosos.

Desorción de plata de los hidrogeles

Con el fin de conocer si se puede separar la plata presente en el hidrogel después de la adsorción, se llevó a cabo la desorción de la plata por medio de una solución de ácido nítrico 1M. El análisis de las soluciones de ácido nítrico en la absorción atómica mostró una baja concentración de plata como se observa en la tabla 8, lo que concuerda con las isothermas calculadas (Freundlich), donde al formarse enlaces fuertes, la desorción es poco viable, por lo que se sugiere utilizar un método electroquímico para separar la plata del hidrogel.

Tabla 8. Concentración de Ag en mg/L de las soluciones de HNO_3 en las que se pusieron en contacto cada tipo de hidrogel después de 24 horas para el proceso de desorción.

Tipo de hidrogel	Concentración de Ag en solución de HNO_3 (mg/L)
NaPAA	2.8
CaPAA	3.1
Combinado	3.4

Adsorción de plata de efluentes mineros con hidrogel

Después de realizar pruebas preliminares con soluciones sintéticas de AgNO_3 para determinar el mejor hidrogel adsorbente de plata, se procedió a verificar su efectividad en condiciones representativas del entorno minero. Por ello, se analizó el hidrogel Combinado poniéndolo en contacto 24 horas con una solución ácida de 0.02 L de jales mineros recolectados de una mina en el estado de Hidalgo.

Los resultados obtenidos mediante absorción atómica mostraron una concentración de plata inicial de 8.06 mg/L y de 1.38 mg/L después de poner en contacto el hidrogel Combinado con dicha solución. Estos resultados indican una disminución significativa de la concentración de plata correspondiente a 6.68 mg/L, lo que representa una capacidad de adsorción de 0.266 mg/g.

Este comportamiento indica que el hidrogel Combinado no solo es eficaz para las soluciones sintéticas de AgNO_3 , sino que también en aplicaciones prácticas utilizando jales mineros reales. Esto abre la posibilidad de su implementación en procesos de tratamiento de efluentes mineros, contribuyendo con la mitigación de impactos ambientales negativos y la sustentabilidad.

Conclusiones

A través de este estudio se demuestra que los tres hidrogeles analizados son capaces de adsorber plata. De los tres, el hidrogel combinado presenta una mayor eficiencia en la adsorción de plata, según los resultados y el análisis de la capacidad de adsorción, que para el HG Combinado fue de 62.49 mg/g lo cual representa una remoción del 64% de la plata presente en la solución. De acuerdo con el cálculo de las isothermas, los 3 sistemas que usan NaPAA, CaPAA y Combinado se ajustan a la isoterma de Freundlich, sugiriendo la formación de enlaces fuertes entre adsorbato y adsorbente.

Por otra parte, el análisis por SEM-EDS mostró la presencia de plata en la superficie de cada hidrogel después de la adsorción. Los resultados obtenidos para la columna en sistema continuo fueron muy prometedores, logrando un 40% de adsorción de plata en tan solo 20 minutos. Además, el estudio demostró que el hidrogel Combinado alcanza una capacidad de adsorción de 0.266 mg/g para remover plata de jales mineros reales de la muestra proveniente de una mina en Hidalgo.

De manera que se demuestra que el uso de hidrogeles en la adsorción de plata presente en jales mineros representa una solución sustentable y eficiente para la gestión de residuos, mejorando la calidad del agua y disminuyendo el impacto ambiental de esta industria.

Bibliografía/Referencias

- [1] Contaminación de las aguas costeras por plata. (22 de octubre de 2010). El Agua - .
<https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2010/10/22/131528>
- [2] Resumen de Salud Pública: Plata (Silver) (26 de enero de 2021). Cdc.gov. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs146.html
- [3] Miguel, R. E. (2019). Estrategias de gestión de arenas descartadas de fundición en función de sus características químicas y ambientales. <https://doi.org/10.35537/10915/35594>
- [4] Carbotecnia.info. Recuperado el 15 de julio de 2024, de <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/quimica-del-agua/plata-en-el-agua-y-sus-efectos-en-la-salud/>
- [5] K.J. Buchanan, B. Hird, T.M. Letcher, Polym. Bull. 15 (1986) 325.
- [6] T. Yoshitake, Polym. Digest 30 (1981) 10.
- [7] S.H. Gehreke, G.P.Andrews,E.L.Cussler, Chem.Eng.Sci.41 (1986) 2153.
- [8] Wankat, P. C. (2017). Ingeniería de procesos de separación (2ª ed.). Pearson Educación de México, S.A. de C.V.
- [9] Geankopolis, C. J. (2006). Procesos de transporte y principios de procesos de separación (4.a ed., pág. 774–775). Grupo Editorial Patria.
- [10] Tasaki, J. “Spread of Discrete Structural Changes in Synthetic Polyanionic Gel: A Model of Propagation of a Nerve Impulse” *theor. Biol.* (2002) 218, 497–505 doi:10.1006/yjtbi.3095, available online at <http://www.idealibrary.com>
- [11] Silverstein Robert Milton. (2016). Identification spectrométrique de composés organiques. Bruxelles: De Boeck supérieur ISBN: 978-2-8073-0293-
- [12] Rifi, E.-H., Lakkis, D., & Leroy, J. M. (2005). Extraction de l'argent par des gels d'acide polyacrylique–polyacrylate de sodium. Application à l'élimination des ions chlorures. *Comptes Rendus Chimie*, 8(8), 917-921. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2004.12.011>
- [13] AlSamman, M. T., & Sánchez, J. (2021). Recent advances on hydrogels based on chitosan and alginate for the adsorption of dyes and metal ions from water. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(10), 103455. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103455>