

Estudio de las variables de operación para la remoción de níquel de soluciones acuosas en sistemas por lote

Study of operating variables for the removal of nickel from aqueous solutions in batch systems

Nallely Yunuen Rubio Campos¹, Iris Violeta Hernández Cervantes², Isela Paulina Castro Becerra², Sinaí Nieto Escoto¹, Edson Alejandro Molina Barrientos¹, Jessica Guadalupe Nieto Escoto³

¹ Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato, Colegio de Nivel Medio Superior, Universidad de Guanajuato.

² División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.

³ Licenciatura en Químico Farmacéutico Biólogo, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.
nrubio@ugto.mx

Resumen

En este trabajo se presenta el estudio del proceso de adsorción en sistemas por lote usando residuos agroindustriales de dos marcas comerciales que se obtuvieron de una casa habitación para la remoción de níquel en solución acuosa. Se analizó el efecto del tiempo de contacto, la concentración inicial del adsorbato y pH de la solución, como las variables de operación que puedan favorecer la adsorción del ion metálico y se determinó el Punto de Carga Cero para los residuos de café. La cuantificación del contenido de níquel en las muestras se realizó por Espectrofotometría de Absorción Atómica. Los resultados de los ensayos por lote indicaron que el mecanismo de adsorción se favorece a la concentración inicial del ion metálico de 4 mg/L, tiempo de contacto de 45 minutos para la marca MK y 60 minutos marca MS. El análisis por Espectrometría Infrarroja de los materiales indicó la presencia de los grupos funcionales característicos de la molécula de cafeína, mostrando desplazamiento en los picos una vez que se llevó a cabo la adsorción de iones níquel.

Palabras clave: níquel; café; adsorción; PCC, IR.

Introducción

El níquel es un metal de transición ampliamente utilizado en la industria debido a sus propiedades físicas y químicas, como la resistencia a la corrosión y la alta conductividad. Se encuentra comúnmente en aleaciones, baterías, monedas y en la producción de acero inoxidable; presente principalmente en la industria aeroespacial, automotriz, química y en la minería. Sin embargo, la actividad en la industria de la minería ha llevado a un incremento en la liberación de níquel al medio ambiente, especialmente a cuerpos de agua [1].

La presencia de níquel Ni(II) en el agua puede provenir de desechos industriales, escurrimientos de suelos contaminados, lixiviados de residuos mineros o aguas residuales mal tratadas. Una vez en el agua, este metal puede acumularse en organismos acuáticos y entrar en la cadena alimentaria, representando un riesgo tanto para los ecosistemas como para la salud humana. La exposición prolongada al níquel en concentraciones elevadas puede causar efectos tóxicos, incluyendo problemas dermatológicos, respiratorios y, en algunos casos, enfermedades como cáncer [2].

En este contexto, la contaminación por níquel en el agua constituye un problema ambiental importante que requiere atención, tratamiento, monitoreo y estrategias eficaces de control y remediación. Existen distintas tecnologías disponibles para su tratamiento: precipitación química, ósmosis inversa, electrodiálisis, coagulación, intercambio iónico, floculación; sin embargo, algunos son altamente costosos o pueden generar subproductos que causan impacto al ambiente. La adsorción ha demostrado ser una de las más eficaces, económicas y versátiles [3].

La adsorción es un proceso que consiste en donde el metal se deposita sobre la superficie de un material sólido, conocido como adsorbente, y puede aplicarse con éxito incluso a bajas concentraciones del contaminante. Para optimizar la remoción de níquel mediante adsorción, es fundamental estudiar el efecto de diversas variables de operación, como el pH de la solución, la concentración inicial de níquel, el tiempo de contacto, la temperatura y la cantidad de adsorbente utilizada. La evaluación sistemática de estos parámetros permite comprender mejor el mecanismo del proceso y diseñar condiciones óptimas para su aplicación a escala industrial [4].

Variables de operación el proceso de adsorción

Dentro de las variables de operación para la adsorción de níquel en soluciones acuosas se presentan las siguientes características: [5].

- Temperatura:
Afecta la capacidad de adsorción de acuerdo si el proceso es físico o químico.
- Concentración del adsorbato:
Mayor concentración en fase líquida o gaseosa hasta alcanzar la saturación del adsorbente.
- pH de la solución acuosa:
Determinante en la adsorción de metales pesados y contaminantes orgánicos.
- Tiempo de contacto:
Mayor tiempo permite una mayor interacción entre adsorbente y adsorbato.
- Tamaño de partícula del adsorbente:
Menor tamaño de partícula tendrá mayor área superficial disponible.
- Tipo de adsorbente:
Son materiales con alta área superficial que tienen la capacidad de retener moléculas de gases o líquidos en su superficie. Puede haber adsorbentes naturales y sintéticos.

Es por esto, que la remoción de níquel de solución acuosas puede utilizarse como adsorbente, uno del tipo natural que puede ser algún desecho agroindustrial disponible en la región, dado que, al utilizar materiales sustentables, se mejorará la limpieza del vital líquido por medio de un impacto menor con materiales como cáscaras de huevo, residuos vegetales, entre otros. Los adsorbentes naturales son una opción prometedora para la remediación ambiental debido a su bajo costo, sostenibilidad, y capacidad para eliminar contaminantes.

México y aquellos países que cuentan con una enorme biodiversidad de especies vegetales y frutales son atractivos para el establecimiento de industrias alimentarias o agroindustrias, las cuales generan miles de toneladas de residuos vegetales o frutales por año.

Por ello, la utilización de estos residuos, principalmente las cáscaras de las frutas, para la eliminación de los contaminantes presentes en los efluentes acuosos, es un alternativa de gran potencial y de aprovechamiento que presenta diversas ventajas como ser materiales bioadsorbentes de bajo costo, disponibilidad, adecuada capacidad de adsorción, factibilidad de mejorar a través de modificación química, susceptible a la regeneración, degradabilidad lo que conduce a un menor número de problemas en la disposición final posterior a la adsorción [6].

En este trabajo se plantea estudiar el proceso de adsorción que ocurre con los desechos de café por medio del efecto del tiempo de contacto, concentración inicial del adsorbato y pH de la solución.

Metodología

Preparación del adsorbente

Los residuos de café fueron recolectados del café desgastado de una casa habitación para dos marcas comerciales. Estos residuos fueron lavados con agua destilada para eliminar las impurezas y coloración y enseguida se secaron en un horno a 60°C durante 24 horas (Figura 1). El material lavado y secado, se hizo pasar a través de tamices de diferentes tamaños, empleándose para los siguientes experimentos el de tamaño de partícula de 0.25 mm, ya que se ha reportado de trabajos previos, es el que presenta mayor capacidad de adsorción para el elemento.



Figura 1. Secado del material adsorbente. a) Marca Kirkland y (MK) b) Starbucks (edición especial) (MS).

Determinación del Punto de Carga Cero

El experimento se realizó para cada uno de los materiales (diferente marca comercial), para lo cual, se tomaron 50 mL de agua destilada y se colocaron en matraces Erlenmeyer de 125 mL, ajustando el pH de cada solución entre 2 y 11 unidades, adicionando las cantidades adecuadas de ácido clorhídrico (HCl) 0.1 N e hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N. A estas soluciones se añadió 0.25 g de muestra de material y transcurridos 48 horas, bajo agitación y temperatura ambiente, se procedió a medir el valor del pH final (Figura 2). El PCC corresponde al punto donde la curva del pH final en función del pH inicial corta la diagonal. Las mediciones del PCC se realizaron en un pHmetro HI 253 Hanna Instruments.



Figura 2. Sistema de agitación para la determinación del PCC.

Adsorción de níquel en sistemas batch

- 1) A partir de una solución estándar de 1000 mg/L de níquel (marca Merck), se prepararon soluciones de níquel de 4, 20 y 40 mg/L y se ajustó a pH 2 con ácido nítrico (HNO_3) 0.1N e hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N usando un pHmetro ORION 4STAR y por medio de agitación continua.
- 2) Se tomaron 50 mL de cada solución y se pusieron en contacto con 0.25 g de residuo de café (para las dos marcas comerciales) en un vaso de precipitados de 100 mL. El sistema se agitó a 380 rpm a temperatura ambiente usando una parrilla eléctrica marca CORNING PC-420D y se mantuvo en contacto a los tiempos: 15, 30, 45, 60, 75 y 90 minutos para permitir el desarrollo del proceso de adsorción. Simultáneamente, la misma cantidad de solución, pero sin material se pusieron a las mismas condiciones, como correspondiente control (Figura 3).
- 3) Se repitieron los pasos anteriores para los pH 4 y pH 6.

Determinación de níquel por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA)

- 1) De una solución estándar de 1000 ppm de níquel se tomaron alícuotas en matraces aforados para obtener soluciones de concentración: 1, 5 y 8 ppm con la finalidad de obtener la curva de calibración.
- 2) Se leyeron las muestras en un Espectrómetro de Absorción Atómica, modelo AAnalyst 200 Perkin Elmer a 341.48 nm, realizando las diluciones necesarias para que fuera posible la lectura en la zona de la curva de calibración (Figura 4).
- 3) La concentración obtenida en cada muestra representa la cantidad de níquel que el material no logró adsorber.

Resultados y discusión

Determinación del Punto de Carga Cero

Los valores del PCC obtenidos para estos dos residuos agroindustriales se muestra en la Figura 1, en donde se aprecia la similitud de estos dos materiales. Para la marca MS el valor corresponde a 5.31 y para la marca MK 5.88. Esto indica que la superficie del material está cargada positivamente cuando el pH del medio sea menor al de adsorbente. De lo contrario, su carga será negativa cuando el pH del medio sea mayor al del residuo del café.

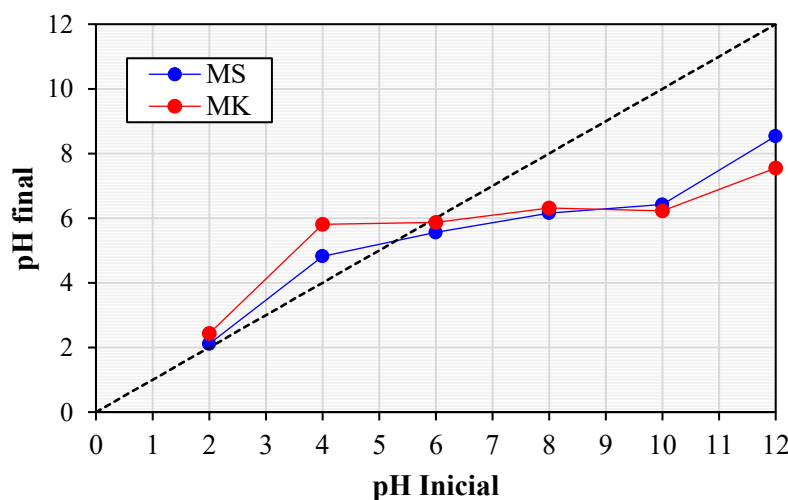
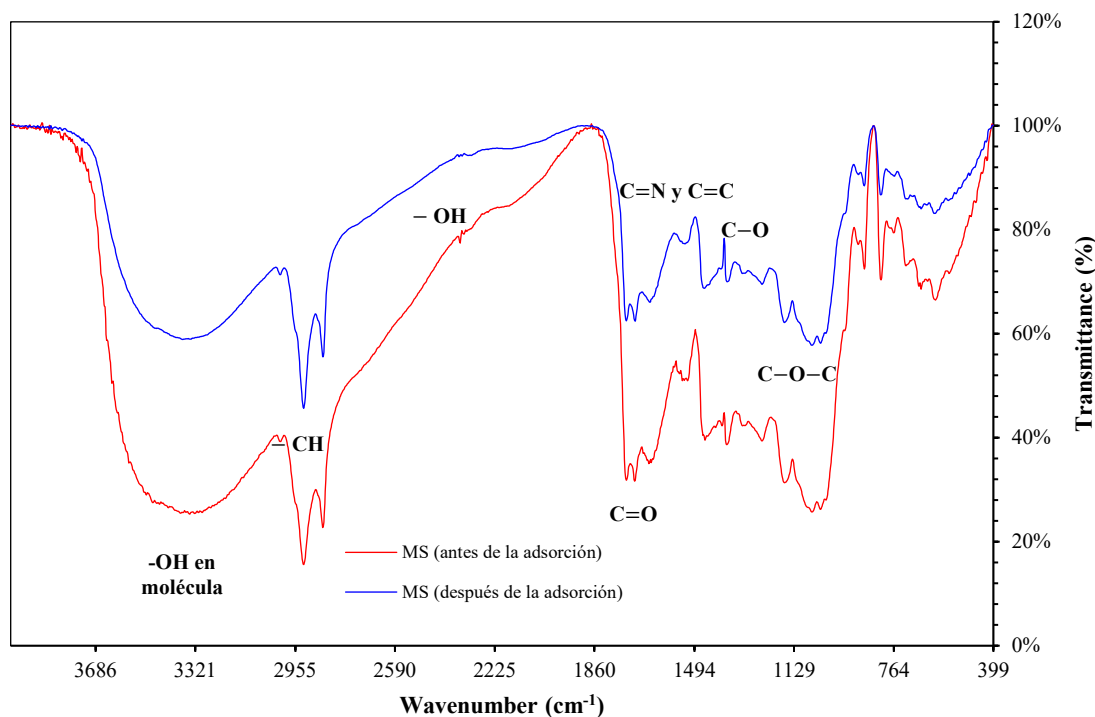


Figura 3. Sistema de agitación para la determinación del PCC.

Espectro IR de los materiales MS y MK por FTIR

La Figura 4a) y 4b), muestran los espectros IR de café antes y después de la adsorción de iones Ni(II), para las marcas MS y MK, respectivamente. Se presentan picos alrededor de 3300 cm^{-1} corresponde a la banda (-OH), a 1744 cm^{-1} (grupos carbonilo), un pico -OH se observa alrededor de 2349 cm^{-1} y un pico de flexión CH-OH se observa a 1460 cm^{-1} , para el residuo de café antes de la adsorción [7]. Se puede observar que cuando el material adsorbe Ni(II), se aprecian desplazamientos en estos picos. Los grupos funcionales para los materiales analizados se muestran en la Tabla 2.



a)

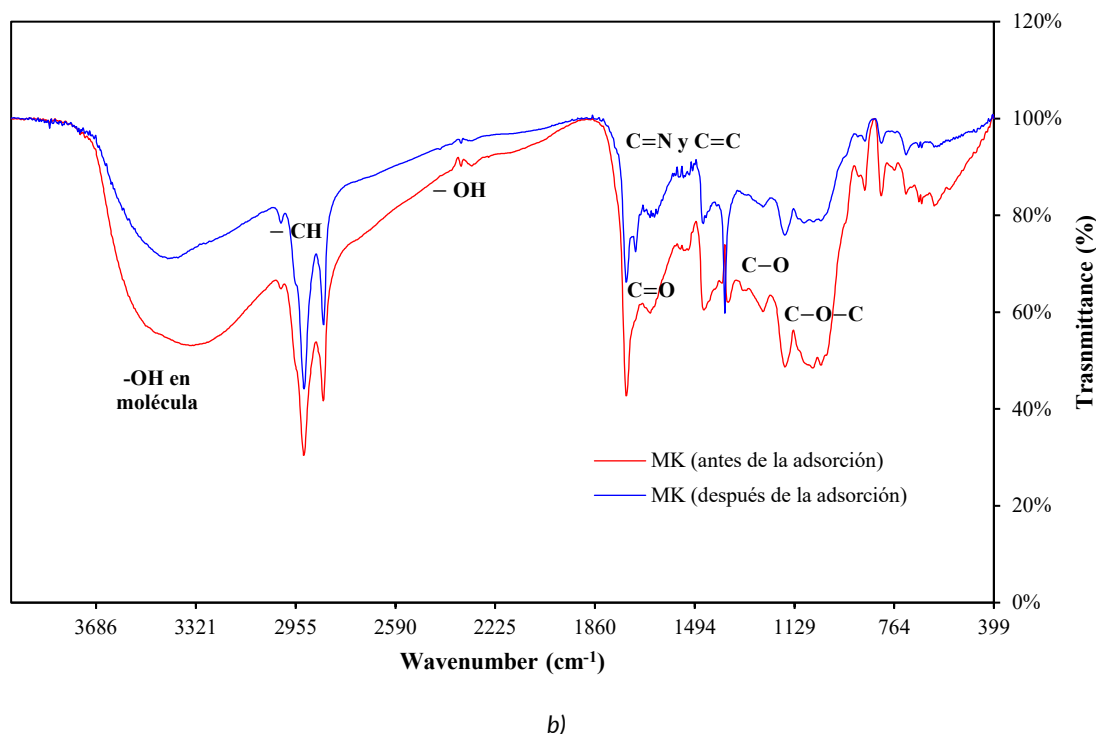


Figura 4. Espectros FTIR para el residuo de café. a) residuo de café MS y b) residuo de café (MK).

Tabla 2. Grupos funcionales en el residuo de café por medio de análisis de FTIR.

Grupo funcional	Antes de la adsorción (MK)	Antes de la adsorción (MS)	Después de la adsorción (MK)	Después de la adsorción (MS)
-OH en molécula de agua	3331.08	3366.23	3351.02	3351
-CH	2925.01	2924.53	2924.32	2924.25
-OH	2349.49	2349.01	2349.0	2349.6
C=O	1744.51	1743.16	1744.71	1743.31
C=N y C=C	1657.32	1651.49	1651.02	1656.86
CH-OH	1460.11	1454.77	1462.48	1457.28
C-N	1371.35	1375.44	1384.26	1373.95
C-O	1244.24	1246.08	1244.00	1245.51
C-O-C	1164.01	1163.21	1164.6	1163.90

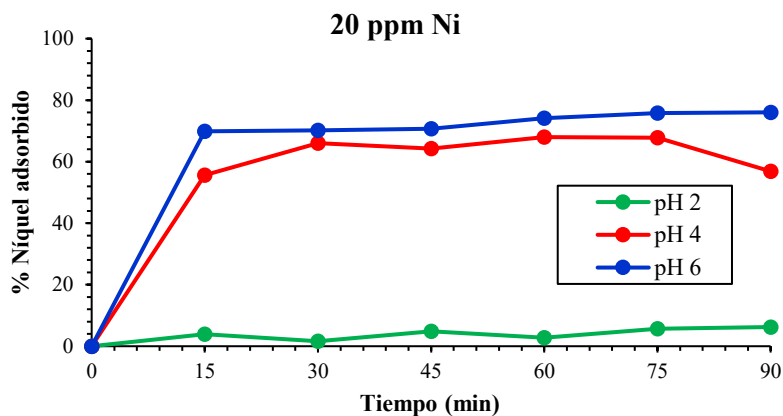
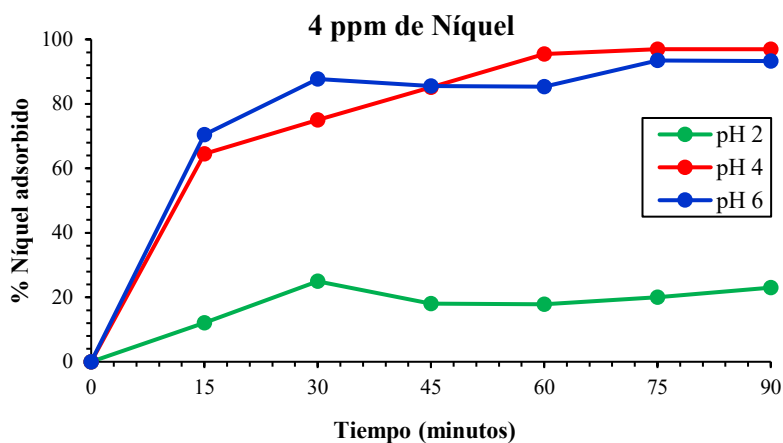
Adsorción de níquel en función del tiempo de contacto y pH

En esta etapa, los parámetros: tiempo de contacto y pH se variaron para tres concentraciones iniciales distintas de Ni(II) para la marca MS, mientras que para la marca MS, únicamente se efectuó para la concentración de 4 mg/L, ya que, de estudios previos, se obtuvieron porcentajes bajos para las concentraciones de 20 y 40 mg/L [3]. La temperatura ambiente, masa de adsorbente y velocidad de agitación (280 rpm) se mantuvieron constantes. El efecto del tiempo de contacto en la eficiencia de adsorción de Ni(II) se muestra en la Figura 5a), 5b) y 5c), empleando el material marca MS. Como se muestra en la Figura 5a), para una concentración inicial de iones Ni(II) de 4 mg/L, la tasa de adsorción inicialmente aumentó en los primeros 30 minutos, alcanzando eficiencias de remoción 22.9% y 93.6%, para pH 2 y 6, respectivamente. El proceso de adsorción pareció proceder rápidamente cuando el número de sitios disponibles es mucho mayor

que el número de especies metálicas a adsorber. Para el pH 4 los porcentajes de adsorción del ion metálico se obtuvieron a los 60 minutos con un valor correspondiente de 95.4%.

En la Figura 5b) se presentan los porcentajes de adsorción de Ni(II) para una concentración inicial del metal de 20 mg/L. Como puede observarse, existe una tendencia similar para los valores de pH 4 y 6, obteniéndose la máxima cantidad adsorbida del metal en los primeros 60 minutos. Para el pH de 2, a los 45 minutos de tiempo de contacto el porcentaje de remoción máxima es de 4.8%.

En la Figura 5c) se puede apreciar que el residuo de café adsorbe iones Ni(II) a pH 6 para un tiempo de contacto de 45 minutos, cuyo valor corresponde al 49.1%. A pH 4 los porcentajes de adsorción disminuyen a 38.6% y un tiempo de contacto de 60 minutos, mientras que para el pH de 2 la eficiencia máxima de remoción se alcanza a los 75 minutos y corresponde a un valor de 13.1%. Esto indica que conforme aumenta la concentración inicial del adsorbato, la capacidad del material para adsorber iones metálicos disminuye.



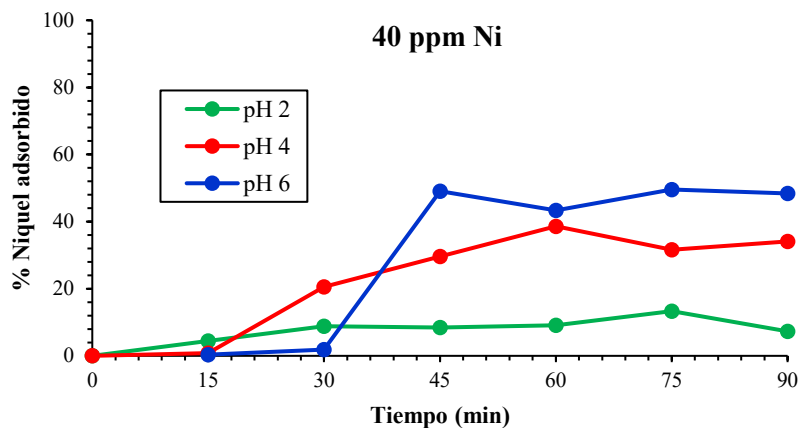


Figura 5. Adsorción de Ni(II) en función del tiempo de contacto y pH, material adsorbente (MS). a) Concentración inicial de Ni(II) 4 mg/L, b) Concentración inicial de Ni(II) 20 mg/L y c) Concentración inicial de Ni(II) 40 mg/L.

En la Figura 6 se muestra el gráfico correspondiente a la adsorción de Ni(II) sobre material de marca MK para diferentes concentraciones iniciales, pH 4 en función del tiempo de contacto. Como puede observarse, los porcentajes de adsorción máximos obtenidos se obtienen para una concentración inicial de adsorbato de 4 mg/L y un tiempo de contacto de 40 minutos y corresponde al 98.7%. Por otro lado, conforme aumenta la concentración inicial del ion metálico, los porcentajes de adsorción disminuyen, esto se debe a que los sitios activos de los materiales se van ocupando y el mecanismo de adsorción se vuelve menos efectivo porque habrá menos sitios libres para las moléculas del adsorbato.

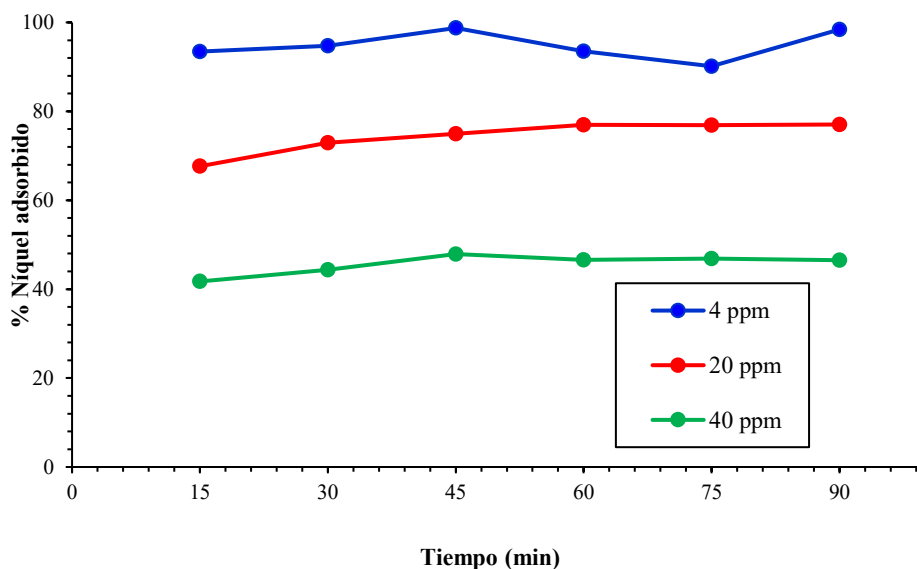


Figura 6. Adsorción de Ni(II) en función del tiempo de contacto y concentración inicial del material adsorbente (MK), a pH 4 constante.

Conclusiones

Se estudió la adsorción de iones Ni (II) utilizando residuo de café de dos marcas comerciales. El punto de carga cero determinados para ambos materiales, indica que la carga superficial de los residuos de café es positiva, ya que el valor del pH del medio es 4 y es menor al PCC de los residuos que fueron: 5.31 y 5.88.

Los experimentos de adsorción en sistemas batch reportaron porcentajes de adsorción altos para la concentración inicial de 4 mg/L para ambos materiales, con valores de 98.7% y 95.5%, para las marcas MK y MS, respectivamente. Sin embargo, para la marca MK se obtienen la adsorción de Ni(II) a los 45 minutos, mientras que para la marca MS a los 60 minutos de contacto. Además, los porcentajes disminuyen, conforme se incrementa la concentración inicial del adsorbato.

Los espectros IR para ambas muestras, indicaron la presencia de los grupos funcionales característicos de la estructura de la cafeína, en donde los picos de estos grupos se ven desplazados después de que los residuos de café adsorben iones Ni(II).

Finalmente, este tipo de materiales pueden ser considerados como una alternativa prometedora para el tratamiento de aguas contaminadas con iones Ni(II), ya que es son bajo costo y sostenibles.

Bibliografía/Referencias

- [1] Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2005). *Toxicological profile for nickel*. U.S. Department of Health and Human Services. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp15.html>
- [2] Bericht. (s.f.). *¿Cuáles son las propiedades del níquel?*. Bericht. Recuperado el 16 de julio de 2025. <https://www.bericht.es/cuales-son-propiedades-del-niquel>
- [3] Cabello Meza, O. H., Ruiz Torres, M. Á., Murrieta Escoto, S., Madrigal Vargas, A. G., Jorge Ramírez Luna, C. A., Ontiveros Mota, R., Regalado Hernández, M. F., & Carrillo Castro, P. B. N. (2024). Valoración del residuo de café para la remoción de níquel. *Jóvenes en la Ciencia*, 28, 4444. <https://doi.org/10.15174/jc.2024.4444>
- [4] Dabrowski, A. (2001). Adsorption-from theory to practice. *Adv. Colloid and Interface Sci.* 93, 135-224.
- [5] Babel, S., & Kurniawan, T. A. (2003). Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 97(1-3), 219-243. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00263-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00263-7)
- [6] Bhagat, R., & Khandeshwar, S. R. (2024). Removal of nickel from industrial wastewater by an agro-based composite adsorbent. *Nature Environment and Pollution Technology*, 23(1), 505-515. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2024.v23i01.047>
- [7] Saxene, M., Sharma, N., & Saxene, R. (2020). Highly efficient and rapid removal of toxic dye: Adsorption kinetics, isotherm, and mechanism studies on functionalized multiwalled carbon nanotubes. *Surface and Interfaces*; 21(100639), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.surf.2020.100639>