

Reducción de cromo hexavalente usando una película de Nanocelulosa de Candelilla-FeO₃ sobre un electrodo Au

Ana Beatriz Morales-Cepeda ^{1,*}, Claudia Esmeralda Ramos-Galván ², Elda Elizabeth Villalobos-Neri ¹, Daniela García-Castelán ²

¹ Centro de Investigación en Petroquímica, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cd. Madero, Altamira, México

² Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cd. Madero

* Autor de correspondencia: ana.mc@cdmadero.tecnm.mx

Contaminación de agua, suelo y aire (Contaminación de agua)

Recibido: 30 de julio de 2025

Aceptado: 2 de octubre de 2025

Publicado: 29 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.565>

Resumen: Una película de nanocelulosa de candelilla con FeO₃ fue dopada sobre un electrodo de oro para reducir el cromo hexavalente a cromo (III). Esta reducción fue caracterizada mediante análisis de voltamperometría cíclica, observando el rendimiento electroquímico en la reducción del cromo hexavalente. También se caracterizó la película de nanocelulosa de candelilla con FeO₃ por medio del microscopio óptico, para observar las fibras de nanocelulosa y la distribución de las partículas de Fe en el material. Las películas mostraron en la superficie el Fe al aumentar la cantidad de este. La caracterización de voltamperometría cíclica demostró mayor actividad en la reducción del Cr VI a Cr III al aumentar la cantidad de FeO₃ en la película sobre el electrodo de oro.

Palabras clave: nanocelulosa de candelilla, reducción Cr VI, película, electrodo de Au

Reduction of hexavalent chromium using a Candelilla-FeO₃ nanocellulose film on an Au electrode

Abstract: A candelilla nanocellulose film with FeO₃ was deposited onto a gold electrode to reduce hexavalent chromium to chromium III. This reduction was characterized by cyclic voltammetry analysis, which observed the electrochemical performance during the reduction of Cr VI. The candelilla nanocellulose film with FeO₃ was also characterized using an optical microscope to observe the nanocellulose fibers and the distribution of Fe particles in the material. The films showed the presence of Fe on the surface by increasing its amount. Cyclic voltammetry characterization demonstrated increased activity in the reduction of Cr VI to Cr III as the amount of FeO₃ increased in the film on the gold working electrode.

Keywords: candelilla nanocellulose, Cr VI reduction, film, Au electrode

Introducción

La contaminación debido a metales pesados es uno de los grandes problemas que existen en áreas de industrialización intensiva a consecuencia de la descarga de agua residual contaminada con metales pesados que utilizan las industrias químicas como el cadmio, cromo, cobre, níquel, plomo y zinc, lo que implica un peligro para la salud de los seres vivos. El cromo hexavalente es utilizado en la industria de acabados metálicos, pigmentos y en la producción del acero inoxidable. Este cromo VI es dañino para la flora, fauna y el ser humano por ser altamente tóxico, ya que es de fácil absorción por las células del cuerpo; en cambio, el estado oxidado de Cr III es menos tóxico; la ventaja es que precipita con facilidad y no es tan fácilmente absorbido por las células.

Por otro lado, la nanocelulosa proviene de celulosa, polímero natural por excelencia, ya que es el más abundante en el planeta. La nanocelulosa se obtiene de métodos químicos, mecánicos o biológicos; se ha demostrado que tiene capacidad electroquímica para la retención de metales en su estructura.

La nanocelulosa obtenida de la candelilla ha sido estudiada por Pulido-Barragán *et al.* (2021), reportado su método de extracción. Gómez-Rojas *et al.* (2022) demostraron que la nanocelulosa con FeO₃ puede ser implementada en electrodos en la detección de Pb II o para oxidar iones de plomo en soluciones acuosas. En esta investigación se estudió el efecto de la nanocelulosa de candelilla/FeO₃ en la reducción de Cr III.

Materiales y Métodos

Obtención de la nanocelulosa con FeO_3

La nanocelulosa de la candelilla se obtuvo del procedimiento reportado por Pulido-Barragán *et al.* (2021). La nanocelulosa con FeO_3 se obtuvo con el procedimiento de Maccllesh del Pino *et al.* (2020) y Gómez-Rojas *et al.* (2023). El proceso ocurre en un medio alcalino, utilizando para un gramo de celulosa de candelilla blanqueada, 16 mg de N-oxil-2,2,6,6-tetrametilpiperidina (TEMPO, Aldrich), 100 mg de NaBr (Aldrich) y 15 ml de NaOCl (Fermont) en 100 ml de agua destilada. En el caso de la nanocelulosa-Fe se necesita calcular el porcentaje de Fe requerido (Tabla 1). El TEMPO 0.01 mmol y NaBr 0.1 mmol se agregan a la celulosa de candelilla previamente disuelta en agua. Una vez disuelta la celulosa, se disolvió sulfato de hierro (Fermont) en agua, esta muestra se mantuvo en agitación constante hasta la disolución completa del TEMPO. Posteriormente se agregó NaClO, se monitorea el pH de la reacción ya que debe mantenerse en un intervalo de 10 – 11 con ayuda de NaOH 0.5 M (Fermont) a temperatura ambiente. La nanocelulosa con Fe obtenida se somete a lavados utilizando agua hasta obtener un pH neutro.

Tabla 1 Diseño de Experimentos para un gramo de celulosa de candelilla

Muestra		%Fe
Nanocelulosa	NC	0
Nanocelulosa con Fe al 3%	NC – Fe3	3
Nanocelulosa con Fe al 5%	NC – Fe5	5
Nanocelulosa con Fe al 7%	NC – Fe7	7

Elaboración de películas de nanocelulosa FeO_3 sobre el electrodo

Se vertieron 2 mililitros de una solución de NC- FeO_3 sobre un electrodo de Au de marca Methrom®, se secó a la temperatura de 30 °C por 4 días hasta la evaporación (Figura 1). Las películas de Nanocelulosa FeO_3 , en microscopio óptico, se realizaron vertiendo la solución de NC-FeO, con isopropanol se dejó secar a 30°C por 96 horas hasta evaporación.



Figura 1. Electrodo de Au con NC-Fe%

Se utilizó un microscopio óptico ZEISS® Axio Lab. A1® (hecho en Alemania) utilizando una Cámara Motic® (hecho en Reino Unido), el software utilizado fue Motic®. Para el análisis de voltamperometría, se utilizó un potenciostato Metrohm® 910 PSTAT mini, con electrodos de Au.

Resultados y Discusión

La nanocelulosa con FeO_x obtuvo diferentes coloraciones desde un color anaranjado cercano a la tonalidad rojiza conforme la concentración de hierro fue aumentando (Figura 2).

Microscopio óptico. En la Figura 3, se observan las nanopartículas de hierro en el microscopio con luz polarizada en tonos verdes y azules, además de ciertos colores como el naranja o el dorado que representan la nanocelulosa. Al aumentar la concentración de hierro, aumenta; se observan de color azul verdoso correspondientes al Fe dispersados conforme se obtenga mayor cantidad de Fe en la superficie.



Figura 2. Soluciones de NC con 3%, 5% y 7% de Fe de izquierda a derecha

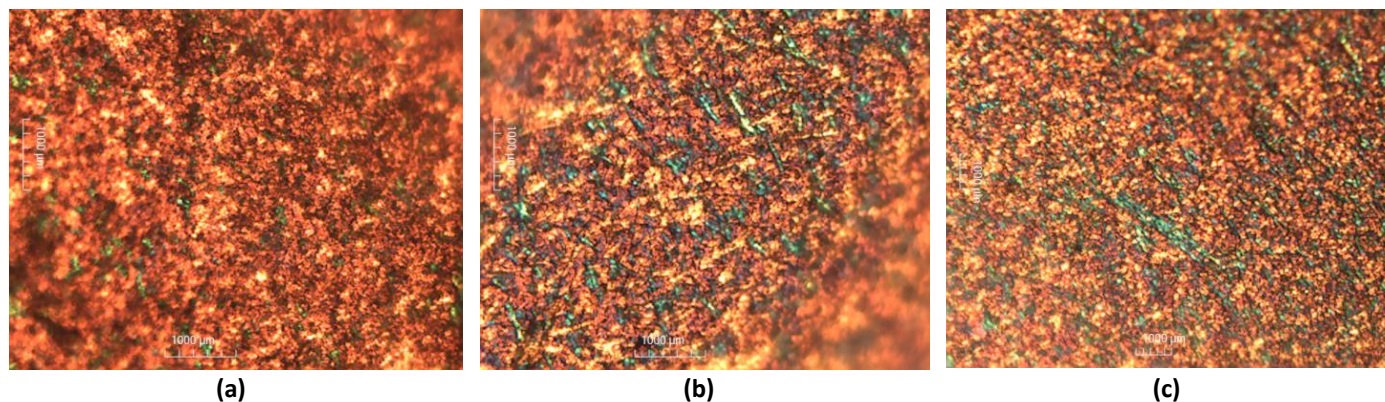


Figura 3. Imágenes del microscopio óptico con luz polarizada de las películas NC-Fe con a) 3% Fe, b) 5% Fe y c) 7% Fe

Detección electroquímica de Cr VI mediante un electrodo de Au dopado con NC – Fe

Para el análisis con electrodos de oro se trabajó con un electrodo de oro dopado con NC-Fe%. La respuesta voltamperimétrica del cromo hexavalente a varias velocidades de barrido se examinó mediante voltametría de barrido lineal en un electrodo de oro ($A = 0.07 \text{ cm}^2$).

Los voltamperogramas registrados a diferentes velocidades de exploración ($10\text{--}400 \text{ mV s}^{-1}$) en una solución de HCl 0.1 M que contiene 50 M de Cr VI se muestran en la figura 4. Estos revelan un proceso con un potencial máximo de $+0.27 \text{ V}$ (10 mV s^{-1}), que se encontró que cambiaba hasta $+0.25 \text{ V}$ (400 mV s^{-1}) con un aumento de la velocidad de exploración. El potencial máximo no depende significativamente de la velocidad de barrido, lo que sugiere que la reacción es electroquímicamente reversible en el electrodo de Au.

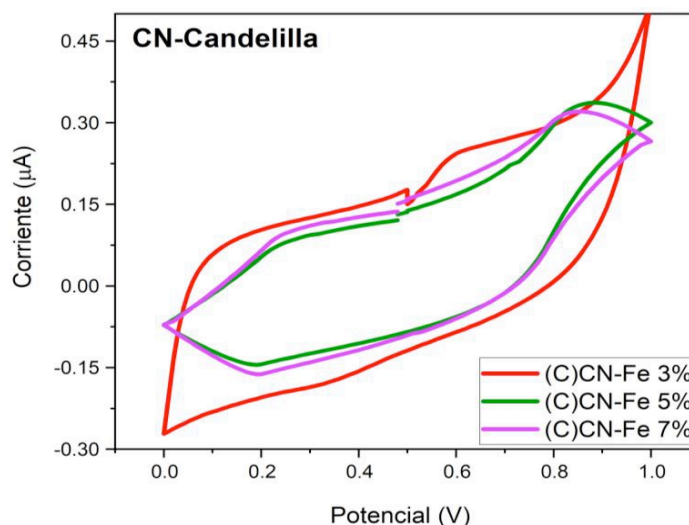


Figura 4. Voltamperograma cíclico ampliado

Después de los voltamperogramas que se tienen como referencia se procedió a realizar dos análisis electroquímicos, uno de ellos con una concentración de 5 mg/L de Cr VI y otro con una concentración de 0.05 mg/L de Cr VI, de igual forma con una variación en la velocidad de barrido tomando el siguiente rango 0.1-1 V/s, por lo que se obtuvieron los siguientes voltamperogramas cíclicos mostrados en las figuras 5a, 5b, 5c y 5d.

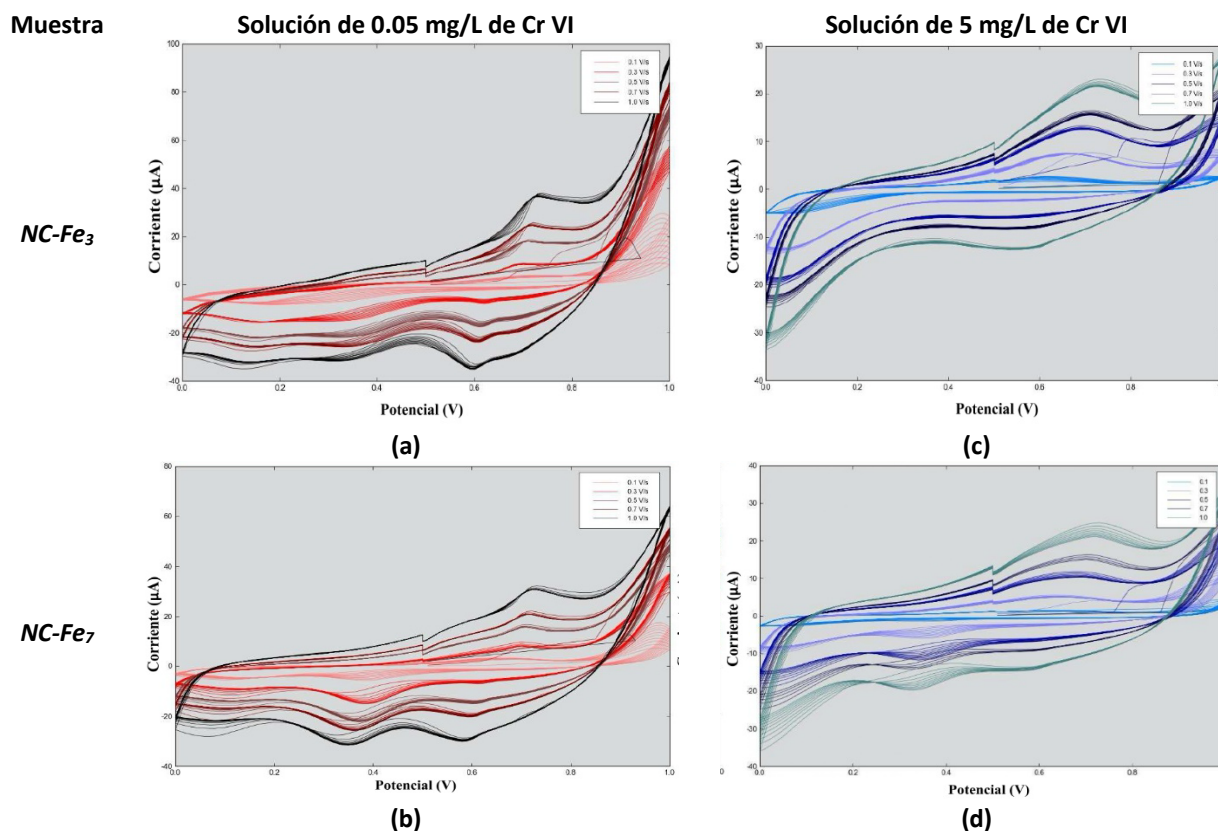


Figura 5. Voltamperograma cíclico con electrodo de Au dopado

Conclusiones

El electrodo de oro dopado con la película de nanocelulosa de candelilla con Fe fue capaz de reducir el cromo VI a cromo III. Este resultado nos propone una oportunidad para la reducción del cromo, que es un contaminante en la industria textilera, de acero, etc. Esta película ha sido capaz de oxidar plomo y reducir cromo en diferentes electrodos, lo que abre una ventana a nuevas investigaciones, como seguir estudiando su carácter óxido-reductor en el tratamiento de aguas residuales de la industria de textilera, de acero, etc.

Agradecimientos y financiamiento: Se agradece al Tecnológico Nacional de México y al Instituto Tecnológico de Ciudad Madero por el apoyo económico recibido, así como por el uso de las instalaciones del Centro de Investigación en Petroquímica.

Bibliografía

- Pulido-Barragán, E. U., Morales-Cepeda, A. B., Castro-Guerrero, C. F., Koschella, A., & Heinze, T. (2021). Upgrading *Euphorbia antisiphilitica* fiber compost: A waste material turned into nanocrystalline cellulose. *Industrial Crops and Products*, *160*, 113111. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113111>
- Macclesh del Pino Pérez, L. A., Morales-Cepeda, A. B., & Castro-Guerrero, C. F. (2021). One-step *in situ* synthesis of Ag/AgCl nanoparticles in a cellulose nanofiber matrix for the development of energy storage paper. *Cellulose*, *28*, 6339–6351. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03922-7>
- Gómez-Rojas, A. G., Macclesh del Pino Pérez, L. A., Castro-Guerrero, C. F., Ramos-Galván, C. E., & Morales-Cepeda, A. B. (2023). Electrochemical oxidation of Pb(II) using carbon electrodes doped with nanocellulose-FeOx. *Fibers*, *11*(1), 8. <https://doi.org/10.3390/fib11010008>