



Cuantificación voltamperométrica de mercurio basada en nanopartículas de Bi₂O₃ Voltametric quantification of mercury based on Bi₂O₃ nanoparticles

E.M. Roa-Hernández ^{a*}, G.A. Álvarez Romero ^b

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área Académica de Química, Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5, C.P. 42184, Mineral de la Reforma Hidalgo, México.

Resumen

Los electrodos modificados representan una estrategia eficaz para potenciar la capacidad de los sensores electroquímicos, permitiendo mejorar su sensibilidad, selectividad y reproducibilidad. En el presente trabajo, se propone el desarrollo de un electrodo de pasta de carbono modificado con óxido de bismuto (Bi₂O₃-EM) para la determinación de iones mercurio (Hg²⁺) en agua potable, mediante voltamperometría diferencial de pulsos por redisolución anódica (DPSV). Tras la evaluación de la metodología, y el correspondiente análisis estadístico se alcanzó un límite de detección de 1.65 µmol/L, un rango lineal de 5.78 a 20 µmol/L con una tasa de recuperación del 97.5% al 99.2% en muestras de agua. Esto demuestra que el método es útil para la determinación de mercurio a niveles traza.

Palabras Clave: Electrodo modificado, óxido de bismuto, voltamperometría diferencial por redisolución anódica, mercurio.

Abstract

Modified electrodes represent an effective strategy for enhancing the performance of electrochemical sensors, improving sensitivity, selectivity and reproducibility. In the present work, a carbon paste electrode modified with bismuth oxide (Bi₂O₃-EM) is proposed for the determination of mercury ions (Hg²⁺) in water, using differential pulse stripping voltammetry (DPSV) as analytical technique. After the evaluation all the variables and the corresponding statistical analysis, a detection limit of 1.65 µmol/L was achieved, with a linear range of 5.78 to 20 µmol/L, and a recovery rate of 97.5% to 99.2% in water samples. This demonstrates that the method is useful for the determination of mercury at trace levels.

Keywords: Modified electrodes, bismuth oxide, anodic stripping pulse voltammetry, mercury.

1. Introducción

El mercurio se ha consolidado como uno de los contaminantes de mayor relevancia a nivel global debido a su alta toxicidad, incluso en concentraciones traza. En el medio ambiente, este metal pesado puede presentarse como diferentes especies químicas provenientes de fuentes naturales, suelos y minerales, de igual forma existen diversas fuentes tanto industriales como domésticas. Aunque actualmente su uso se encuentra regulado o incluso prohibido sigue prevaleciendo en pequeñas cantidades en el ambiente lo que representa un riesgo para la salud, debido a que presenta alta afinidad a grupos sulfhídrico, diversas enzimas y aminoácidos, lo que favorece su bioacumulación en órganos clave como el cerebro, los riñones y los glóbulos rojos. Por

esta razón la detección de mercurio a niveles traza genera una mayor relevancia (Martín, González y Costa, 2013).

Por lo anterior, es fundamental el desarrollo de métodos analíticos sensibles que permiten su cuantificación precisa en distintas matrices ambientales y biológicas (Verma, et al, 2018). La NOM-127-SSA1-2021, establece un límite máximo permisible de mercurio en agua para consumo humano de 0.006 ppm (DOF, 2022) asimismo, la NOM-001-SEMARNAT-2021 señala que el límite permitido para mercurio en descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación como ríos, arroyos, canales y drenes es de 0.01 ppm de acuerdo con el promedio mensual (DOF, 2022). El uso de técnicas analíticas como espectrometría de absorción atómica con vapor frío, espectrometría de fluorescencia de vapor frío y espectroscopía

*Autor para la correspondencia: giaan@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: giaan@uaeh.edu.mx (Giaan Arturo Álvarez Romero), ro366643@uaeh.edu.mx (Edgar Miguel Roa Hernández)

de masas con plasma de acoplamiento inductivo han sido propuestas para la determinación de mercurio en cuerpos de agua (Afkhani et al, 2006); sin embargo, debido a la necesidad de pretratamientos, los altos costos de mantenimiento y a que no son apropiados para realizar seguimiento en campo, se han buscado alternativas novedosas. En este sentido, las técnicas electroquímicas representan una buena alternativa ya que se consideran rentables y en general presentan alta sensibilidad, buena selectividad, análisis rápidos capaces de realizarse en campo y bajo costo (Moutcine y Chtaini, 2018; Gao y Huang, 2013).

El electrodo de trabajo es el componente clave en cualquier técnica electroquímica, ya que en su superficie ocurre la transformación redox del analito. En voltamperometría, esta reacción produce una corriente cuya magnitud se relaciona directamente con la concentración de la sustancia de interés en la solución (Berrazueta, 2015). Los electrodos de trabajo comúnmente utilizados son de oro, platino, carbono y mercurio (Harris, 2015). En conjunto con voltamperometrías basadas en pulsos de potencial, se pueden detectar concentraciones en el rango micromolar (Harris, 2015).

Para la determinación del mercurio se han utilizado distintos tipos de electrodos de oro o bien electrodos modificados en su superficie con este metal, sin embargo, su principal desventaja es el conocido fenómeno de los cambios estructurales de la superficie del oro, lo que puede conducir a resultados poco precisos e inexactos (Gao y Huang, 2013). Esto hace necesario el buscar nuevos materiales que brinden a los electrodos de trabajo propiedades únicas que mejoren la electrocinética de analitos como mercurio, asegurando un análisis preciso y exacto con buena sensibilidad y bajos límites de detección. En este sentido, el bismuto resulta una excelente alternativa pues se ha demostrado que puede formar amalgamas con otros metales para concentrarlos en su superficie aumentando así la señal analítica generada. Aún más, el uso de nano estructuras para la modificación de electrodos de pasta de carbono ofrece ventajas por la sinergia entre los materiales brindando alta sensibilidad, excelente resolución de picos, la facilidad para renovar la superficie del electrodo, bajo costo, insensibilidad al oxígeno disuelto en soluciones acuosas e insignificante toxicidad. (Wang et al, 2022; Baldrianova, L., Svancara, I., & Sotiropoulos, S., 2007).

En base a lo anterior, en el presente trabajo se propone el uso de un electrodo de pasta de carbono modificado con nanopartículas de óxido de bismuto ($\text{BiO}_3\text{-EM}$) para la determinación de Hg^{2+} en cuerpos de agua mediante voltamperometría diferencial de redisolución anódica (DPSV). Al usar esta técnica se pretende reducir el Bi^{3+} de las nanopartículas para favorecer la formación de nanocúmulos de bismuto en la superficie del electrodo formando una amalgama Bi/Hg que concentre al analito en la superficie; posteriormente se realiza un barrido voltamperométrico por pulsos en sentido anódico para reoxidar el mercurio, esperando obtener una respuesta confiable aún a concentraciones bajas del contaminante.

2. Metodología experimental

2.1. Materiales y soluciones

Para los estudios de caracterización se usó voltamperometría cíclica considerando soluciones de ferrocianuro de potasio 0.1 mol/L. Para los estudios de voltamperometría diferencial por redisolución anódica para la determinación de Hg^{2+} se usó un buffer de acetatos 0.1 mol/L como electrolito soporte. Se consideraron diferentes soluciones estándar de nitrato de mercurio para la construcción de la curva de calibración.

Los experimentos electroquímicos se realizaron en una celda de tres electrodos utilizando un electrodo Ag/AgCl como referencia y una barra de grafito ultrapuro como electrodo auxiliar a temperatura ambiente, en un potenciostato BASi-Epsilon.

2.2. Fabricación del electrodo

Se mezcla el polvo de grafito ultrapuro al 99.99% de pureza (Fluka) y las nanopartículas de óxido de bismuto (Aldrich) con tamaño de partícula de 90-210 nm con una pureza del 99.8%, los cuales se mezclan en diferentes proporciones %p/p respectivamente, posteriormente se agregan 4 a 6 gotas de aceite mineral como aglomerante hasta formar una pasta uniforme. Se corta un segmento de 2 a 3 cm del cuerpo de una jeringa de insulina, la mezcla se compacta de manera homogénea en el interior del tubo y se coloca un contacto eléctrico en uno de los extremos. La superficie del electrodo se pule usando papel de alta blancura antes de cada medición electroquímica.

2.3. Mediciones electroquímicas

Los análisis por voltamperometría cíclica se realizaron mediante barrido en sentido catódico en un intervalo de potencial desde -400 a 900 mV y velocidades de barrido entre 10 y 100 mV/s. Se usó ferrocianuro de potasio 0.1 mol/L para evaluar el área electroactiva de los electrodos de trabajo.

Se elaboraron soluciones estándar de nitrato de mercurio a diferentes pH: 3.5, 4, 4.5 y 5 mediante el uso de un buffer de acetatos 0.1 mol/L. Se monitoreó el rendimiento del electrodo en términos de estabilidad y respuesta en los diferentes pH. El parámetro principal evaluado fue el potencial en el que Hg^{2+} se reduce a Hg^0 , observando a qué pH el proceso se lleva a cabo de manera más eficiente.

Se buscó evaluar los parámetros de la redisolución para maximizar la señal anódica de manera puntual iniciando con el voltaje de depósito considerando un rango de -200 hasta -700 mV, el tiempo de deposición entre 30 y 600 segundos, el periodo de pulso entre 100 y 300 ms y el paso de pulso entre 2 y 20 mV.

2.4. Análisis estadístico y selectividad

Se prepararon soluciones standard de nitrato de mercurio en el buffer de acetatos considerando concentraciones entre 5 y 20 $\mu\text{mol/L}$. Asimismo, se efectuaron análisis de posibles interferentes utilizando metales que se sabe están presentes en muestras reales, como cobre, plomo y cadmio en concentraciones establecidas a partir de sus límites máximos permisibles, conforme a la NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF, 2022) analizando el efecto sobre la respuesta analítica

la altura de pico del analito con 10 veces la concentración de dichos interferentes

3. Resultados y discusión

Todas las etapas del estudio metodológico están orientadas a maximizar la señal analítica, que corresponde al pico anódico derivado de la oxidación de mercurio sobre el electrodo de trabajo.

3.1. Evaluación del electrodo de trabajo

Se probaron diferentes proporciones p/p de grafito: Bi_2O_3 en la mezcla composite del electrodo realizando la técnica de voltamperometría diferencial de pulso por redisolución anódica (VDPRA) De acuerdo con distintas literaturas un pH alrededor de 5 suele situarse cercano al punto isoeléctrico para ciertos compuestos preparados con Bi_2O_3 , lo que resulta una carga favorable para la adsorción de especies y reactividad electroquímica (Akşit, D. et al, 2025, Tran, V. et al, 2024, Mane, V. et al, 2024). Conforme a lo anterior se preparó una solución tampón de acetatos a pH 5 en presencia de $20 \mu\text{mol/L}$ del ion mercurio. La proporción que presentó una mayor corriente de pico anódico es la 75:25 en comparación con los otros porcentajes evaluados como se puede observar en la Figura 1. Este resultado demuestra la mejora de la señal analítica gracias a la formación de Bi que permite la amalgama con el mercurio; a proporciones mayores de la óptima la señal decrece dado que se pierde conductividad en la mezcla composite del electrodo. Por consiguiente, la composición 75:25 se usa para los análisis posteriores.

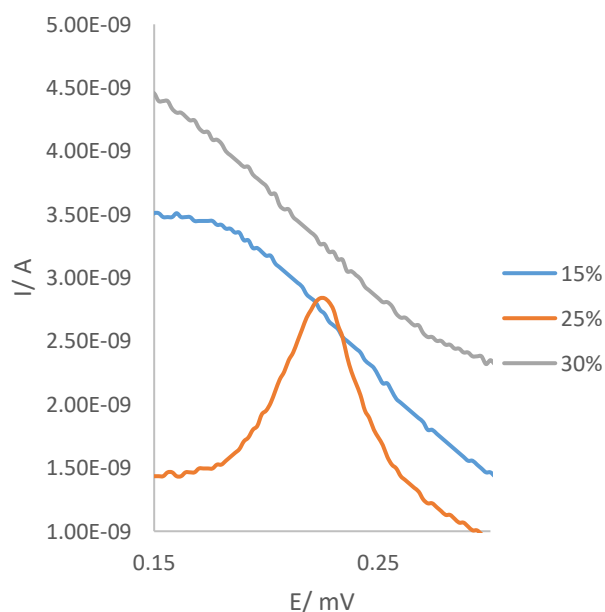


Figura 1. Efecto de la proporción de Bi_2O_3 en la mezcla composite del electrodo de trabajo en la onda anódica asociada a la oxidación de Hg^{2+} , usando VDPRA en una solución tampón de acetato a pH5, con concentración de $20 \mu\text{mol/L}$ de nitrato de mercurio.

El potencial de depósito se estudió probando voltajes entre -600 y -700 mV y evaluando la intensidad de la onda anódica

asociada a la oxidación del Hg (II). Como se puede observar en la Figura 2, el óptimo se registra al imponer un potencial de -500 mV donde se asegura un adecuado depósito de mercurio en la superficie del electrodo de trabajo.

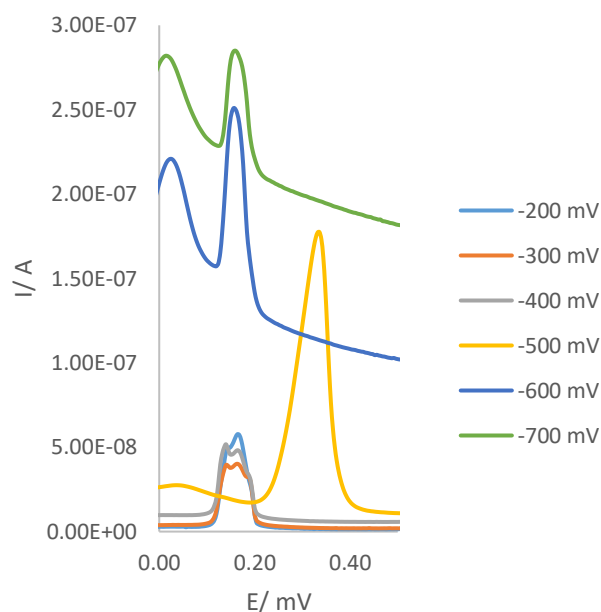


Figura 2. VDPRA obtenidas a diferentes potenciales de depósito obtenidas en una solución tampón de acetato a pH 5 con una concentración de $20 \mu\text{mol/L}$ de nitrato de mercurio.

Posteriormente, se analizó el tiempo de depósito considerando tiempos entre 30 y 180 s. Como se observa en la Figura 3, en un tiempo de depósito de 30 s se obtuvo una señal voltamperométrica máxima y bien definida, por lo que selecciona este tiempo para los experimentos subsiguientes.

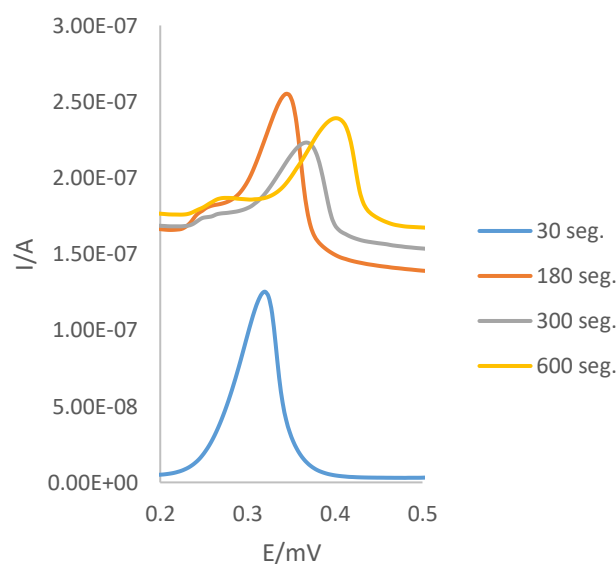


Figura 3. VDPRA obtenidas a diferentes tiempos de depósito en una solución tampón de acetato a pH 5 en presencia de $20 \mu\text{mol/L}$ de nitrato de mercurio.

En cuanto a los parámetros específicos de la voltamperometría diferencial de pulsos, de acuerdo con los resultados mostrados en la Figura 4 se tienen corrientes equivalentes para periodos de pulso de 200, 250 y 300 ms, por lo que se escoge el valor más pequeño para reducir el tiempo del barrido de potencial y así reducir el tiempo de obtención de resultados.

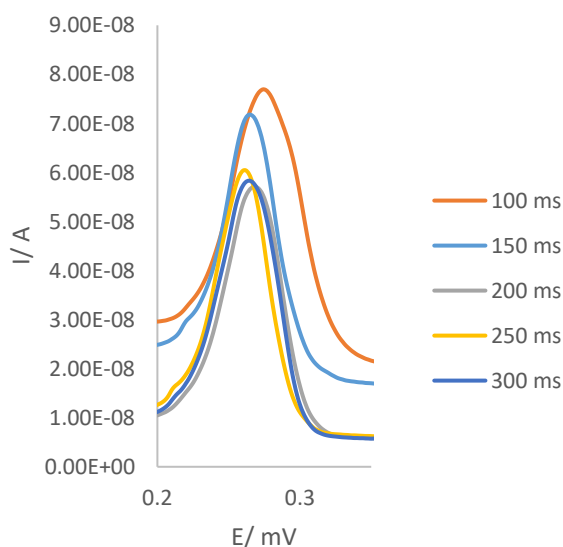


Figura 4. VDPRA obtenidas a diferentes periodos de pulso en una solución tampón de acetato a pH 5 en presencia de 20 $\mu\text{mol/L}$ de nitrato de mercurio.

Finalmente, al evaluar el paso de pulso se determinó que un valor de 2 mV resultó óptimo dando lugar a un pico voltamperométrico más definido, con mayor intensidad en la corriente de pico anódico y una buena línea base (Figura 5).

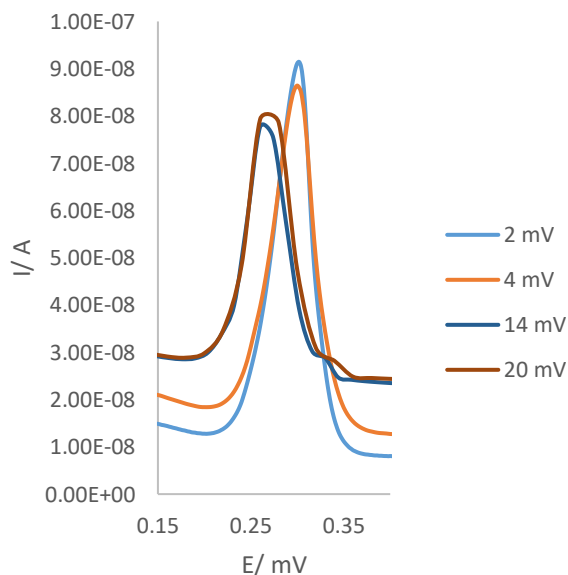


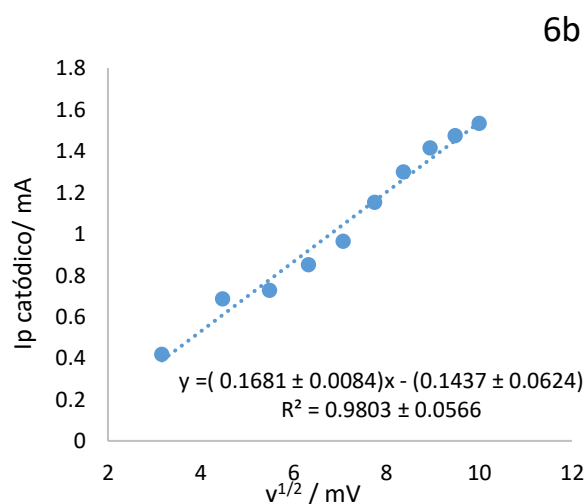
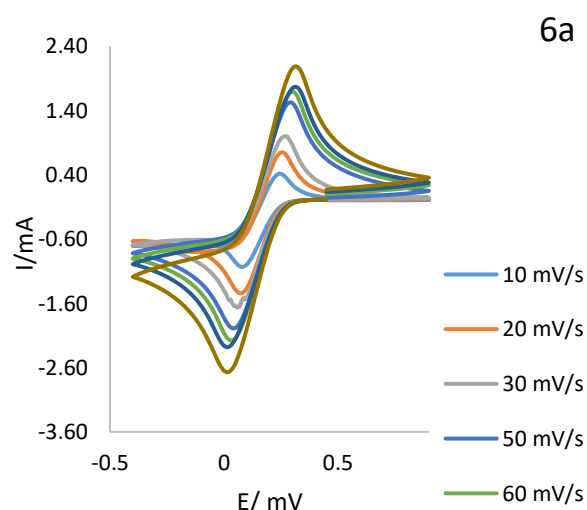
Figura 5. VDPRA obtenidas a diferentes pasos de pulso en una solución tampón de acetato a pH 5 en presencia de 20 $\mu\text{mol/L}$ de nitrato de mercurio.

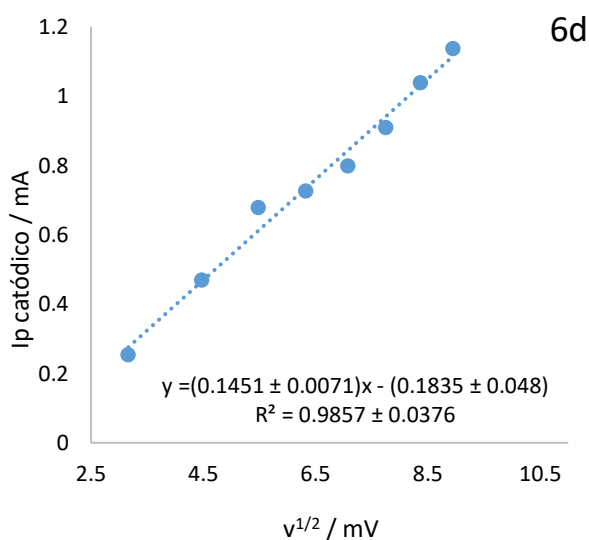
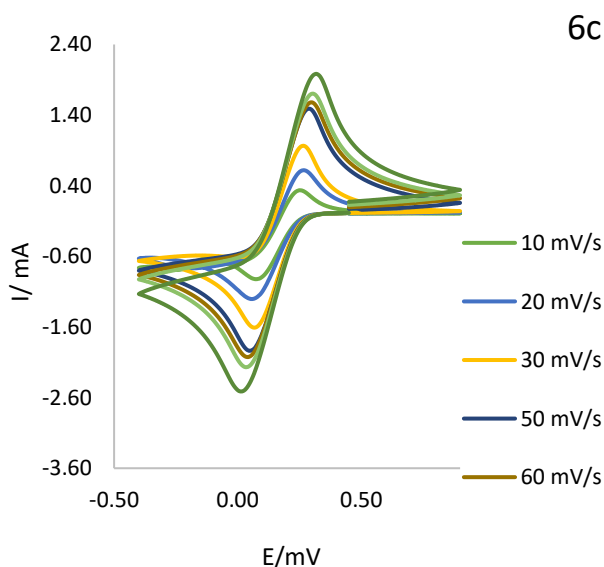
3.2. Caracterización del área electroactiva

Mediante la ecuación de Randles-Sevcik es posible relacionar la corriente de pico con respecto a una concentración fija de analito para así poder estimar el área electroactiva de un electrodo (Gutiérrez, E., 2017).

Por lo que para calcular el área electroactiva del electrodo modificado ($\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-EM}$) se empleó voltamperometría cíclica a diferentes velocidades de barrido (10, 50 y 100 mV/s) en una solución 0.1 M de ferricianuro de potasio (Figuras 6a y 6b). A partir de las corrientes de pico catódico obtenidas en los voltamperogramas, se construyó una curva de corriente de pico vs velocidad de barrido, cuya pendiente permitió calcular el área electroactiva ajustando la ecuación Randles-Sevcik (1).

Se realiza el procedimiento antes mencionado para identificar el área electroactiva de un electrodo de pasta de carbono sin la presencia de Bi_2O_3 (EPC) y poder comparar el carácter electroquímico de ambos electrodos. (Figura 6c y 6d).





Figuras 6. Representaciones graficas empleadas para la determinación de los parámetros en la ecuación de Randles-Sevcik. a. Familia de voltamperogramas cíclicos obtenido a diferentes velocidades de barrido para electrodo modificado (Bi₂O₃-EM) en un medio de 0.1 M de ferricianuro de potasio. b. Representación de la intensidad de corriente de pico anódico frente a la raíz cuadrada de la velocidad de barrido (a partir de los datos mostrados en la Figura a). c. Familia de voltamperogramas cíclicos obtenido a diferentes velocidades de barrido para electrodo sin la presencia de Bi₂O₃ (EPC) en un medio de 0.1 M de ferricianuro de potasio d. Representación de la intensidad de corriente de pico anódico frente a la raíz cuadrada de la velocidad de barrido (a partir de los datos mostrados en la Figura c).

$$I_p = 2.69 \times 10^5 A D^{\frac{1}{2}} [A] v^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Despejando el área (2)

$$A = \frac{I_p}{2.69 \times 10^5 (D^{\frac{1}{2}}) [A] v^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

donde:

(D) es igual al coeficiente de difusión del ion ferricianuro $6 \times 10^{-6} \frac{cm^2}{s}$, [A] es la concentración del ferricianuro de potasio 0.1 mol/L.

Con el despeje adecuado de la ecuación Randle-Sevcik (2) se obtuvo un área de 2.55 cm² para Bi₂O₃-EM mientras que para el EPC resultó de 2.20 cm², estos resultados sugieren que el electrodo modificado presenta un mayor número de sitios activos disponibles para la transferencia de carga, lo cual es deseable ya que implica mejorar la sensibilidad del método.

3.3. Evaluación de la metodología para determinar mercurio

Se estudió la influencia del electrolito soporte y el valor de pH en la señal de pico del mercurio (II). La literatura de *Yongfang L. et al* señala que trabajar con valores de pH demasiados bajos incrementa el riesgo de formar hidrógeno en la superficie del electrodo modificado, lo cual podría interferir con el proceso de depósito y afectar la sensibilidad del análisis, no obstante, en medios alcalinos, el mercurio (II) tiende a formar hidroxocomplejos, lo que disminuye la fracción disponible del analito y reduce la intensidad de la corriente de pico, por ello, se seleccionó trabajar en un rango de pH 3-5 (Li. Y et al, 2024). Los resultados mostraron variaciones significativas en el comportamiento del electrodo modificado dependiendo del pH de la solución como se observa en la Figura 7. La corriente de pico anódico más alta se obtuvo al usar una solución tampón de acetatos 0.1 mol/L a pH 5.

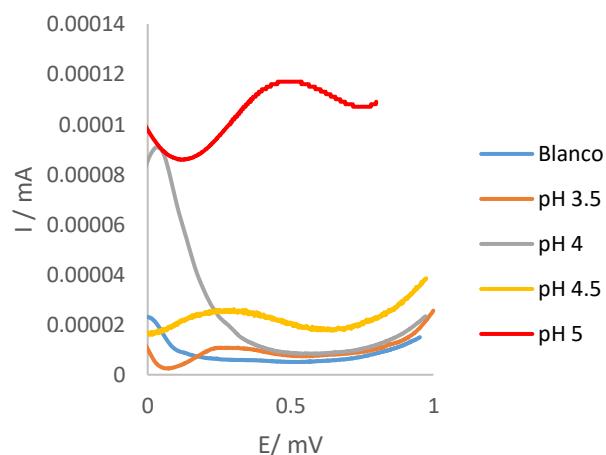


Figura 7. Voltamperogramas cíclicos obtenidos en una solución de nitrato de mercurio 20 μmol/L en buffer de acetatos 0.1 mol/L a diferentes pH en sentido anódico.

Para evaluar la capacidad analítica de la metodología óptima propuesta, se realizó una curva de calibración con diferentes estándares de nitrato de mercurio (Figura 8) y realizando el correspondiente análisis estadístico, se determinaron los parámetros reportados en la Tabla 1.

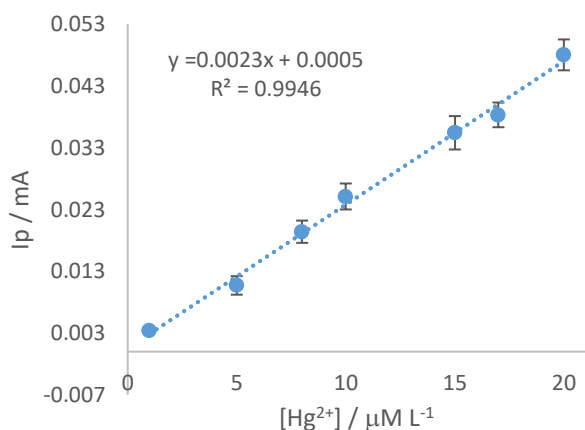


Figura 8. Curva de calibración de corrientes de pico anódico vs concentración de estándares de ion mercurio en un intervalo 1-20 μmol/L, en una solución tampón de acetato 0.1 mol/L a pH 5.

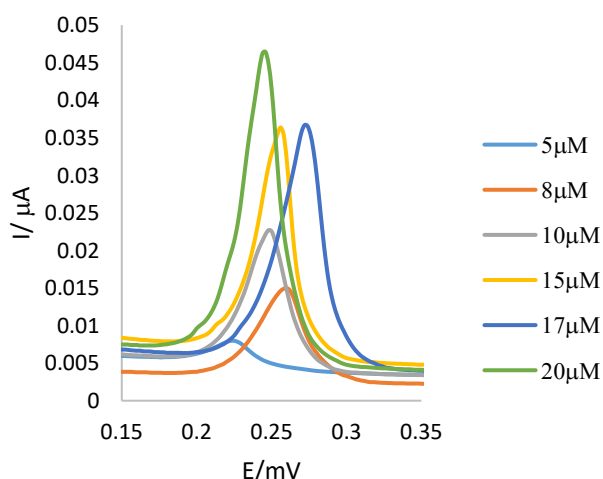


Figura 9. Familia de voltamperogramas obtenidos usando diferentes estándares de mercurio en buffer de acetatos 0.1 mol/L a pH 5.

Tabla 1. Parámetros obtenidos mediante el análisis estadístico de los datos de la curva de calibración.

R^2	0.9946
Intervalo de linealidad (mmol/L)	5.52-20
LOD (mmol/L)	1.65 ± 0.03
LOQ (mmol/L)	5.52 ± 0.06
Sensibilidad (mA/mM)	2.30 ± 0.07

4. Efecto de interferentes

La presencia simultánea de otros metales en matrices acuosas puede generar interferencias significativas debido a la competencia de sitios activos presentes (Yang et al, 2013), el

trabajo de Habekost muestra que algunos metales como en Cd(II) y Pb(II) pueden llegar a ser detectados desde el orden de nanomoles con electrodos de bismuto (Habekost, 2023). Por lo que se investigaron los efectos de interferencia en la señal analítica en presencia de algunos iones metálicos que comúnmente pueden encontrarse en muestras de agua como Cd(II), Pb(II) y Cu(II).

De acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021, establece la concentración permisible de metales como el Cd(II) y Pb(II) es de 0.2 ppm y de Cu(II) es de 4 ppm por promedio mensual (DOF, 2022). Se llevaron a cabo experimentos voltamperométricos utilizando un estándar de 20 μmol/L de nitrato de mercurio, en presencia de 0.02 ppm de cada interferente con el fin de mantener condiciones experimentales comparables. Se observó que la presencia de Cd(II) y Pb(II) generó una disminución significativa en la altura de pico del analito, mientras que para el Cu(II) se registró un aumento de señal (Figura 10).

Estos resultados indican que la cuantificación precisa de mercurio en matrices reales requiere la aplicación de la metodología de adición patrón, la cual permite corregir el efecto matriz provocado.

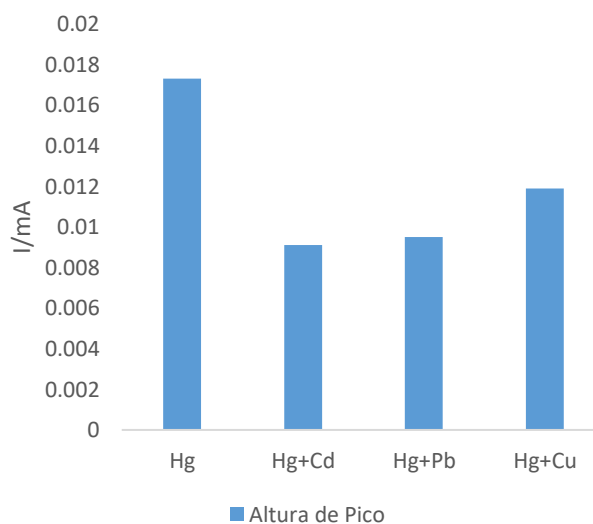


Figura 10. Análisis de interferentes en la respuesta voltamperométrica de Hg(II) a 0.2 ppm en presencia de Cd(II), Pb(II) y Cu(II) a 0.02 ppm.

5. Muestras Reales y validación del método

Usando la metodología propuesta, se analizaron muestras de agua embotellada y de cuerpos de agua natural usados como fuente de agua potable del estado de Hidalgo.

El análisis de todas las muestras usando la metodología basada en Espectroscopía de Absorción Atómica por vapor en frío dio negativo a la presencia de mercurio, por lo que se dopan las muestras con un estándar para alcanzar una concentración de 20 ppm y se evalúan los porcentajes de recuperación obtenidos con la técnica de adición patrón. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Análisis cuantitativo de muestras de agua dopadas con 20 ppm de nitrato de mercurio y su correspondiente porcentaje de recuperación.

Concentración de Hg ²⁺ de dopaje: 20 ppm		
	Cantidad encontrada de Hg ²⁺ ppm	Porcentaje de recuperación
Muestra comercial 1	9.79 ± 0.01	97.9
Muestra comercial 2	9.88 ± 0.02	98.8
Muestra comercial 3	9.92 ± 0.02	99.2
Rio	9.75 ± 0.04	97.5
Presa	9.88 ± 0.06	98.8

En todos los casos, se pueden observar porcentajes de recuperación cercanos al 100%, incluyendo las muestras de río y presa a las cuales no se realizó pretratamiento, lo que indica la exactitud del método en este tipo de muestras.

De acuerdo con otros trabajos relacionados con la detección de Hg mediante DPSV el uso de microelectrodos de fibra de carbono modificado con nanopartículas de oro han mostrado elevados porcentajes de recuperación, LOD, sensibilidad y rangos lineales (Perz-Uresta et al. 2021., Sahoo et al., 2015). No obstante, el objetivo del proyecto se centra en desarrollar un electrodo menos tóxico y potencialmente más económico manteniendo la capacidad de detectar niveles trazas de mercurio mediante un método electroanalítico sensible y reproducible.

6. Conclusiones

Mediante las diferentes etapas de evaluación de la metodología propuesta se ha logrado determinar mercurio en cantidades traza, de acuerdo con el análisis estadístico de la curva de calibración se obtuvo un límite de detección de 1.65 µmol/L. Los datos muestran alta precisión en los resultados lo que impacta positivamente en términos de repetibilidad y reproducibilidad. Este trabajo representa un punto de inicio para el desarrollo de metodologías electroanalíticas basadas en bismuto que puedan determinar metales pesados en muestras de aguas, ya que la configuración de los electrodos de pasta permitiría la incorporación de otros modificantes que permitan una sinergia con el óxido de bismuto.

Agradecimientos

El autor agradece al Dr. Giaan Arturo Álvarez Romero por su valioso apoyo como asesor, poner a disposición reactivos y material de laboratorio, así mismo por compartir sus conocimientos para el desarrollo de un diseño experimental exitoso. De igual manera agradece al Laboratorio de Química

Análítica 2 de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por su apoyo en la instrumentación y la estancia de trabajo. Por último, agradece al Sr. Miguel Edgar Roa Granados, a la Sra. Virginia Hernández Zapata, a Susana Roa Hernández y a Maya Sofia Gómez Sánchez por su apoyo incondicional, paciencia, motivación y respaldo constante a lo largo del desarrollo de este proyecto.

Referencias

- Afkhami, A., Madrakian, T., & Siampour, H. (2006). Highly selective determination of trace quantities of mercury in water samples after preconcentration by the cloud-point extraction method. *International Journal of Environmental and Analytical Chemistry*, 86(15), 1165-1173. DOI: 10.1080/03067310600797531
- Baldrianova, L., Svancara, I., & Sotiroopoulos, S. (2007). Anodic stripping voltammetry at a new type of disposable bismuth-plated carbon paste mini-electrodes. *Analytica Chimica Acta*, 599(2), 249-255. DOI: 10.1016/j.aca.2007.07.067
- Berrazueta Lanas, M. E. (2015). *Desarrollo y validación de un método para la determinación de mercurio en aguas residuales, por voltamperometría* (Master's thesis, Quito: UCE).
- DOF. (2022). NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, "Agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de la calidad del agua". Especificaciones sanitarias de metales y metaloides. Diario Oficial de la Federación, Méx., 02 de mayo de 2022.
- DOF(2022). NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, "que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación". Límites Permisibles para Metales y Cianuros. Diario Oficial de la Federación, Méx., 11 de marzo de 2022.
- Gao, C., & Huang, X. J. (2013). Voltammetric determination of mercury (II). *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 51, 1-12. DOI: 10.1016/j.trac.2013.05.010
- Gutiérrez Pineda, E. A., & Bolzán, A. E. (2017). Ingeniería de superficies de electrodo modificadas mediante materiales poliméricos responsivos y nanopartículas metálicas.
- A. Habekost, "Stripping voltammetry with a bismuth electrode as an alternative to mercury electrode - a contribution to green chemistry." *World Journal of Chemical Education*, vol. 11, no. 3 (2023): 92-96. DOI: 10.12691/wjce-11-3-12.
- Harris, D. C. (2015). *Quantitative Chemical Analysis* (9.^a ed.). W. H. Freeman and Company.
- Martín-Yerga, D., González-García, M. B., & Costa-García, A. (2013). Electrochemical determination of mercury: A review. *Talanta*, 116, 1091-1104. DOI: 10.1016/j.talanta.2013.07.056
- Moutcine, A., & Chtaini, A. (2018). Electrochemical determination of trace mercury in water sample using EDTA-CPE modified electrode. *Sensing and bio-sensing research*, 17, 30-35. DOI: 10.1016/j.sbsr.2018.01.002
- Pérez-Uresta, N., Bolaños-Mendez, D., Montero-Jiménez, M., Fernández, L., Debut, A., & Espinoza-Montero, P. (2021). CUANTIFICACIÓN ELECTROQUÍMICA DE MERCURIO (II) EN MEDIO ACUOSOSOBRE UN MICROELECTRODO DE FIBRA DE CARBONO MODIFICADO CON NANOPARTÍCULAS DE ORO. *infoANALÍTICA*, 9(1), 49-66.
- Sahoo, S., Satpati, A. K., & Reddy, A. V. R. (2015). Electrochemically deposited gold nanoparticles on a carbon paste electrode surface for the determination of mercury. *Journal of AOAC International*, 98(2), 506-511. DOI: 10.5740/jaoacint.13-355
- Verma, R. K., Sankhla, M. S., & Kumar, R. (2018). Mercury contamination in water & its impact on public health. *International Journal of Forensic Science*, 1(2), 72-78.
- Wang, Y., Wu, X., Sun, J., Wang, C., Zhu, G., Bai, L. P., ... & Zhang, W. (2022). Stripping voltammetric determination of cadmium and lead ions

based on a bismuth oxide surface-decorated nanoporous bismuth electrode. *Electrochemistry Communications*, 136, 107233
Yang, D., Wang, L., Chen, Z., Megharaj, M., & Naidu, R. (2013). Investigation of copper (II) interference on the anodic stripping

voltammetry of lead (II) and cadmium (II) at bismuth film electrode. *Electroanalysis*, 25(12), 2637-2644. DOI: 10.1002/elan.201300375