VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Materiales poliméricos electroactivos multifuncionales para aplicaciones sostenibles

Multifunctional electroactive polymeric materials for sustainable applications

Ángel David Campos Ríos[1], Carlos Adrian Cano Preciado[1], Mariana Alonso Ramirez[1], Ángel de Jesús García Durán[1], Oswaldo Emmanuel Hernández Gama[1], Fátima del Carmen Montes Domínguez[1], Silvia Gutiérrez Granados[1]
[1]División de Ciencias Naturales y Exactas, Departamento de Química, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México.
gutigs@ugto.mx

Resumen

Los polímeros conductores son una familia de compuestos cuyas cadenas principales se encuentran conjugadas, lo que les otorga propiedades eléctricas y ópticas excepcionales, las cuales pueden ser moduladas mediante procesos de dopaje. La polianilina (PANI) destaca entre estos materiales por su estabilidad ambiental, facilidad de síntesis, conductividad eléctrica modulable y con multiples estados redox, lo que la hace particularmente atractiva para aplicaciones en sensores electroquímicos y catálisis. El Nafion, por su parte, es un polímero perfluorosulfonado con propiedades de intercambio iónico que ha sido ampliamente utilizado en aplicaciones electroquímicas debido a su alta conductividad iónica y estabilidad química. En este trabajo, se exploran las aplicaciones multifuncionales de la polianilina para la detección de iones Cu(II) en muestras acuosas, como el mezcal, y para la reducción electroquímica de nitratos mediante la modificación con magnetita. Asimismo, se evalúa el uso del Nafion para la detección de metales de transición (Co, Mn, Ni) presentes en la masa negra extraída de baterías de litio. Estos estudios demuestran el potencial de los materiales poliméricos electroactivos como plataformas versátiles para aplicaciones sostenibles en el monitoreo ambiental y la recuperación de recursos.

Palabras clave: Electropolimerización, Polianilina, Nafion, Electroquímica bipolar.

Resumen Gráfico



Figura 1. Principales aplicaciones de los polímeros electroactivos multifuncionales.

Antecedentes

Los polímeros son macromoléculas constituidas por unidades monoméricas repetitivas que, en su forma convencional, se han considerado tradicionalmente como materiales aislantes eléctricos. Sin embargo, el descubrimiento de los polímeros conductores, que poseen cadenas principales con enlaces simples y dobles alternados (estructuras conjugadas), revolucionó la concepción de estos materiales al demostrar que pueden presentar propiedades eléctricas y ópticas análogas a las de los semiconductores inorgánicos. La estructura conjugada de estos polímeros permite la deslocalización de los electrones π, generando una banda de conducción que puede ser modulada mediante procesos de dopaje químico o electroquímico.

Los **p**olímeros conductores típicos incluyen el poliacetileno (PA), la polianilina (PANI), el polipirrol (PPy), el politiofeno (PTh), el poli(para-fenileno) (PPP), el poli(fenilenvinileno) (PPV) y el polifurano (PF). Estos materiales presentan ventajas significativas sobre los materiales inorgánicos convencionales, incluyendo una síntesis sencilla, procesabilidad en solución, flexibilidad mecánica, ligereza, estabilidad ambiental y la posibilidad de ajustar sus propiedades mediante modificaciones químicas o electroquímicas.

Los materiales poliméricos multifuncionales representan una evolución en este campo, ya que combinan las propiedades eléctricas, ópticas y mecánicas de los polímeros conductores con funcionalidades adicionales, como la capacidad de reconocimiento molecular, propiedades catalíticas o respuestas a estímulos externos. Estas características los hacen particularmente atractivos para aplicaciones en dispositivos electrónicos orgánicos, sensores, actuadores, almacenamiento de energía y aplicaciones biomédicas. La incorporación de polímeros conductores en sistemas híbridos con nanopartículas metálicas, óxidos metálicos o materiales carbonáceos permite potenciar sus propiedades y superar limitaciones inherentes a su forma prístina, como la baja conductividad en ciertos estados o la limitada área superficial.

La PANI es uno de los polímeros conductores más estudiados y prometedores debido a su excepcional estabilidad ambiental, alta conductividad eléctrica, facilidad de síntesis, bajo costo y propiedades electroquímicas y ópticas modulables. La PANI puede existir en diferentes estados de oxidación: leucoesmeraldina (completamente reducida e incolora), esmeraldina (semioxidada) y pernigranilina (completamente oxidada). La forma conductora de la PANI es la sal de esmeraldina, que se obtiene mediante la protonación de la base de esmeraldina en medio ácido. La conductividad de la PANI depende del grado de dopaje y puede variar desde valores característicos de un semiconductor hasta conductividades metálicas cuando el pH es inferior a 3.

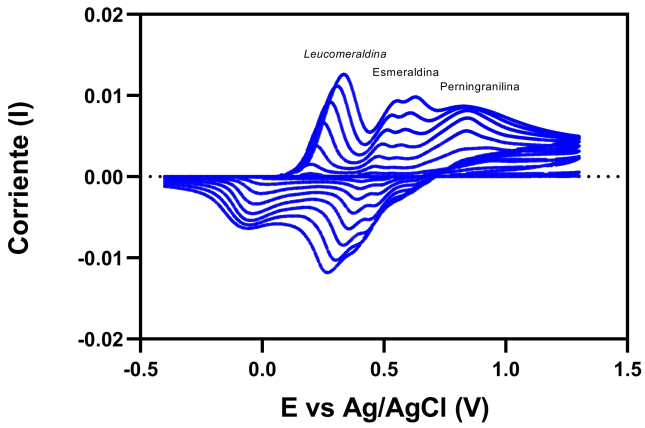


Figura 2. Voltamperometría cíclica de la polimerización de la Anilina y los diferentes estados de oxidación de la PANI.

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

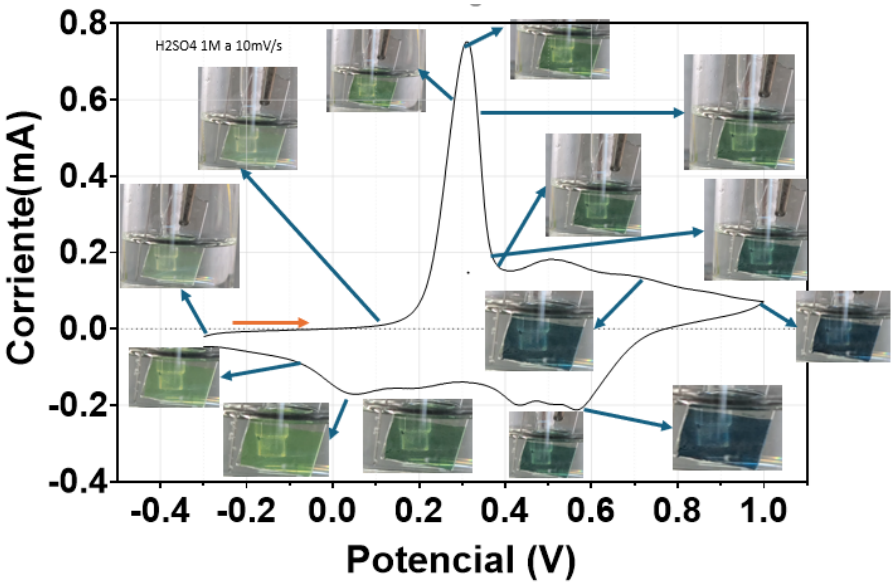


Figura 3. Propiedades electrocrómicas de la PANI.

La PANI presenta una notable versatilidad en términos de métodos de síntesis, incluyendo la polimerización química oxidativa, la polimerización electroquímica, la polimerización interfacial y la técnica de electrohilado, entre otras. La polimerización electroquímica permite el control preciso del espesor y la morfología de las películas mediante la manipulación de parámetros como el potencial aplicado, la densidad de corriente y el tiempo de deposición. La PANI puede sintetizarse en diversas morfologías, incluyendo nanofibras, nanopartículas, hidrogeles y películas delgadas, lo que amplía sus posibilidades de aplicación.

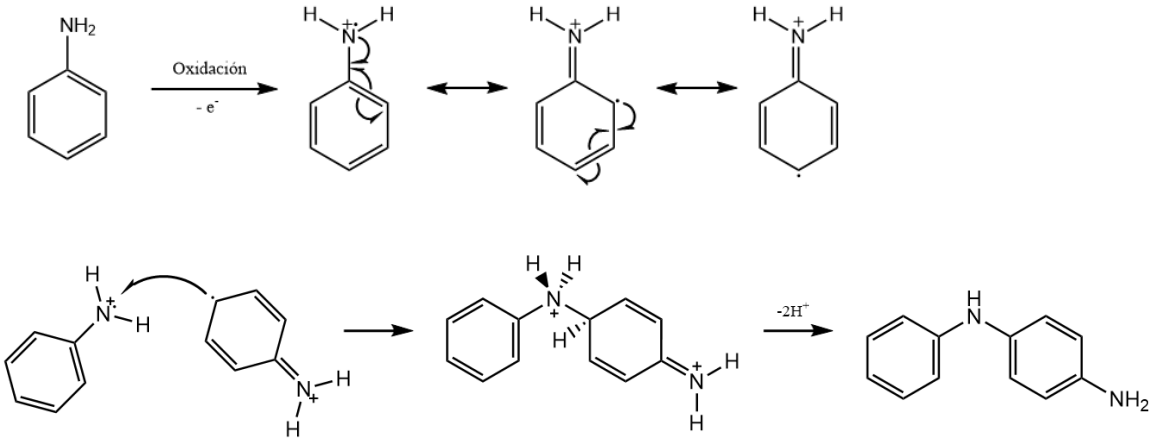


Figura 4. Mecanismo de Oxidación de la Anilina e inicio de su polimerización.

Entre las aplicaciones de la PANI se incluyen su uso en supercondensadores, baterías recargables, prevención de corrosión, sensores, celdas solares, dispositivos electrocrómicos y aplicaciones biomédicas [#]. Su capacidad para formar complejos con iones metálicos, debido a la presencia de grupos amino e imino en su estructura, la convierte en un material ideal para el desarrollo de sensores electroquímicos para la detección de metales pesados. La PANI ha demostrado ser efectiva en la detección de iones como Cu(II), Pb(II), Cd(II), Hg(II) y Co(II) mediante técnicas electroquímicas como la voltamperometría de pulso diferencial y la voltamperometría de redisolución anódica.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Además de sus aplicaciones en sensores, la PANI ha sido utilizada como matriz para la inmovilización de catalizadores, incluyendo óxidos metálicos y nanopartículas metálicas, para la catálisis electroquímica de reacciones relevantes en el ámbito energético y ambiental. La afinidad entre la PANI y las nanopartículas metálicas permite mejorar la actividad catalítica, la selectividad y la estabilidad de los sistemas catalíticos, lo que resulta de gran interés para aplicaciones como la reducción electroquímica de nitratos, la evolución de hidrógeno y la reducción de oxígeno.

El Nafion es un polímero perfluorosulfonado desarrollado originalmente por DuPont que presenta una estructura de politetrafluoroetileno (PTFE) con cadenas laterales que contienen grupos ácido sulfónico ($-SO_3H$). Esta arquitectura molecular confiere al Nafion propiedades excepcionales, incluyendo una alta conductividad iónica, estabilidad química y térmica, y resistencia mecánica. La conductividad iónica del Nafion está relacionada con la formación de canales hidrofílicos que permiten el transporte de protones y cationes, lo que lo hace particularmente adecuado para aplicaciones electroquímicas.

El Nafion ha sido ampliamente utilizado como membrana de intercambio iónico en celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC), electrolizadores de agua y baterías de flujo redox. Su capacidad para formar películas delgadas y su estabilidad en medios ácidos han permitido su uso como modificador de electrodos en sensores electroquímicos, donde actúa como una matriz de intercambio iónico que facilita la difusión de analitos y mejora la selectividad del sensor.

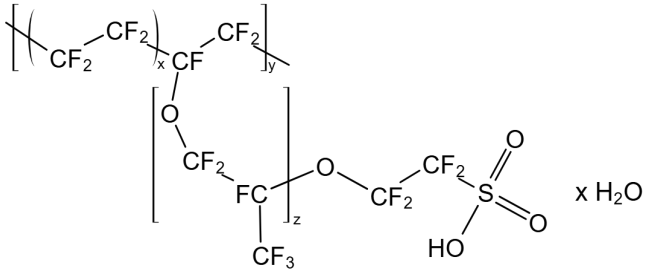


Figura 5. Estructura del Nafion.

Las películas de Nafion pueden ser depositadas sobre electrodos de diversos materiales, incluyendo carbono vítreo, oro, platino y óxido de indio-estaño (ITO), proporcionando una superficie funcionalizada que puede ser empleada para la detección de metales de transición como Co, Mn y Ni.

Durante los últimos años, ha aumentado la demanda por los polímeros electroactivos multifuncionales, ya que estos se presentan como alternativas viables para el monitoreo ambiental y la recuperación de recursos valiosos. La contaminación por metales pesados en cuerpos de agua y productos alimenticios representa un riesgo significativo para la salud humana y los ecosistemas. El cobre, por ejemplo, es un contaminante común en bebidas alcohólicas como el mezcal, donde su presencia se debe principalmente a la corrosión de los alambiques de cobre utilizados en el proceso de destilación. La detección precisa de Cu(II) es crucial para garantizar la seguridad del producto y cumplir con las regulaciones mexicanas que limitan su concentración a 2 ppm.

Asimismo, los nitratos son contaminantes ambientales de creciente preocupación debido a su impacto en la calidad del agua y su relación con problemas de salud como la metahemoglobinemia. La reducción electroquímica de nitratos, catalizada por sistemas basados en PANI modificada con magnetita (Fe_3O_4) representa una estrategia prometedora para la eliminación de este contaminante, aprovechando las propiedades conductoras y de complejación de la PANI junto con la actividad catalítica de las nanopartículas de magnetita.

Por otro lado, la creciente demanda de baterías de litio para dispositivos electrónicos y vehículos eléctricos ha generado un volumen considerable de residuos que contienen metales valiosos como Co, Mn y Ni. La recuperación de estos metales de la masa negra extraída de baterías de litio agotadas no solo reduce el impacto ambiental de estos residuos, sino que también proporciona una fuente secundaria de materias primas

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

críticas. Debido a su capacidad para intercambiar iones metálicos y su estabilidad química, el nafion puede ser utilizado para la detección y cuantificación de estos metales, facilitando su recuperación y reutilización.

Una de las técnicas más importantes empleada en la síntesis de polímeros y su posterior caracterización es la voltamperometría cíclica (VC). Esta técnica electroquímica con un amplio campo de aplicación en la determinación cuantitativa de analitos, en el análisis de caracterización y en el estudio de procesos de difusión, adsorción, reducción y oxidación. La técnica de voltamperometría consiste en la aplicación de un potencial, que varía en el tiempo, a un electrodo de trabajo en un sistema electroquímico y, consecuentemente, en la medición de la corriente resultante en función de ese potencial. Para ello, se utilizan 3 electrodos, un electrodo de trabajo (ET), un electrodo de referencia (ER) y un contraelectrodo (CE).

El potencial de la celda electroquímica alcanza un umbral a partir del cual la especie electroactiva se oxida o se reduce y genera una corriente eléctrica que fluye en el electrodo de trabajo: corriente faradaica. En principio, la modulación externa del potencial para que ocurra la transferencia de electrones está vinculada con la diferencia de energía entre el orbital molecular desocupado de menor energía LUMO y el orbital molecular ocupado de mayor energía HOMO.

Otra técnica de interés es la electroquímica bipolar, la cual se caracteriza por la ausencia de conexión eléctrica directa al electrodo que actúa como centro de reacción. En esta técnica, un material conductor (electrodo bipolar) se sumerge en una disolución electrolítica y se polariza mediante la aplicación de un campo eléctrico externo entre dos electrodos de alimentación. Esta polarización genera una diferencia de potencial a lo largo del electrodo bipolar, de modo que su extremo más cercano al polo positivo actúa como ánodo y el extremo opuesto como cátodo, promoviendo reacciones redox asimétricas en sus superficies.

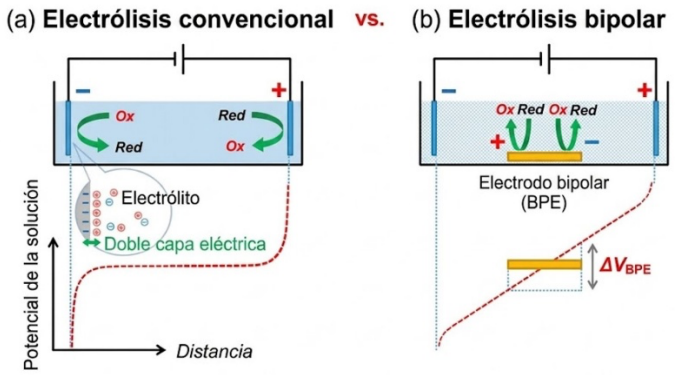


Figura 6. Comparativa entre celda electroquímica convencional vs celda de electroquímica bipolar.

Al no requerir conexión eléctrica directa al electrodo de trabajo, la electroquímica bipolar permite el control del potencial de la disolución en lugar del potencial del electrodo. Esta característica facilita la modificación simultánea de matrices de electrodos, la funcionalización de materiales delicados como el grafeno, y el desarrollo de dispositivos para detección multiplexada. La electroquímica bipolar encuentra aplicaciones en áreas como sensores, electrodeposición, electroinjerto y síntesis de nanopartículas asimétricas.

En este trabajo, se presenta el desarrollo y la evaluación de sistemas basados en PANI y Nafion para aplicaciones sostenibles en el monitoreo ambiental y la recuperación de recursos, destacando el potencial de estos materiales poliméricos electroactivos como herramientas versátiles para abordar desafíos ambientales y energéticos contemporáneos.

Metodología

Se estudiaron 3 aplicaciones de los polímeros previamente mencionados, cada una con una metodología en particular, las cuales se detallan a continuación.

1. Electrosíntesis de PANI con magnetita y evaluación en la reducción de nitratos

Los electrodos de trabajo se prepararon mediante la electropolimerización de anilina sobre electrodos de grafito utilizando **VC con un** potenciostato. Para ello, se preparó una solución electrolítica compuesta por 0.913 mL de anilina y 25 mL de H_2SO_4 1 M, aforada a un volumen final de 100 mL, con la cual se llevó a cabo el proceso de electropolimerización para obtener los electrodos recubiertos con polianilina. Posteriormente, se evaluaron dos metodologías diferentes para la incorporación de magnetita (Fe_3O_4) sobre la superficie de los electrodos.

En la primera metodología, se dispersaron 0.5 mg de magnetita en 10 mL de una solución EtOH/H_2O (50:50 v/v), la cual fue sometida a sonicación durante 30 minutos para favorecer la dispersión homogénea de las partículas. Los electrodos polimerizados se mantuvieron inmersos en esta suspensión durante toda la noche; posteriormente, se retiraron, se dejaron secar a temperatura ambiente y se emplearon en las pruebas electroquímicas.

En la segunda metodología, se preparó una solución acuosa de 20 mM de cloruro férrico ($FeCl_3$) y 10 mM de cloruro ferroso ($FeCl_2$), ajustando el pH a 3 mediante la adición de HCl. Los electrodos polimerizados se sumergieron en esta solución durante 30 min y, una vez retirados y secados, se introdujeron en 10 mL de una solución de hidróxido de amonio (NH_4OH) ajustada a pH 9, donde se mantuvieron a 60 °C durante 15 minutos para promover la formación in situ de magnetita sobre la superficie del polímero conductor. Para cada una de las metodologías se prepararon cuatro electrodos, obteniéndose un total de ocho electrodos: dos destinados a las pruebas en medio de Na_2SO_4 a pH 1 y dos para las pruebas en Na_2SO_4 a pH 4, con el fin de realizar experimentos por duplicado en cada condición.

Todas las pruebas electroquímicas se llevaron a cabo en una celda electroquímica utilizando un potenciostato AUTOLAB controlado con el software NOVA 2.16. Como electrolito soporte se emplearon dos soluciones independientes de Na_2SO_4, ajustadas a pH 1 y pH 4, para evaluar la influencia del pH en el desempeño electroquímico de los materiales sintetizados. La actividad de los electrodos para la reducción electroquímica de nitratos se evaluó registrando inicialmente la respuesta del electrodo únicamente en la solución de sulfato de sodio; posteriormente, se realizaron adiciones sucesivas de nitrato hasta alcanzar concentraciones de 2 mM y 4 mM, registrando la respuesta electroquímica después de cada adición. Este procedimiento permitió comparar el comportamiento electroquímico de los electrodos obtenidos mediante ambas metodologías de incorporación de magnetita y determinar su desempeño en la reducción electroquímica de nitratos.

2. Sensor electrocrómico de Cu(II) en mezcal con un electrodo bipolar ITO/PANI

Se realizaron pruebas exploratorias mediante VC, para ello, se estudiaron diferentes concentraciones de Mezcal en H_2SO_4 para determinar cual proporción es ideal para el estudio mediante electroquímica bipolar. Para estos experimentos se utilizo un ET de carbon vitreo, un ER de Ag/AgCl y un CE de Pt. Las VC se realizaron de -1.0V a 0.6V, a velocidades de barrido de 25, 50 y 100mV/s. El electrolito soporte fue H_2SO_4, la concentración varia en cada experimento, debido a que se estudiaron diversas proporciones de Mezcal/ H_2SO_4.

Para la preparación de las placas de ITO con PANI depositado sobre su superficie, se lava la placa de ITO mediante sonicación. El depósito se realiza mediante VC, se sumerge 1cm del ITO en una celda electroquímica. El ER utilizado es Ag/AgCl. El CE es un alambre de Pt. La celda cuenta con 5mL de solución de Anilina al *0.0125M* en H_2SO_4 al *0.5M*. La electropolimerización se realiza a una velocidad de barrido de 10mV/s, a una ventana de -0.3V a 1.2V durante 9 ciclos.

Los electrodos ITO/PANI se utilizan para determinar Cu(II) en soluciones ácidas mediante electroquímica bipolar (fig. #). En la celda izquierda, ocurre la oxidación y se agrega una solución de H_2SO_4 *0.01M* junto con

el ITO/PANI. En la celda derecha, ocurre la reducción de Cu(II), por lo tanto, aquí se añade **una punta de grafito, además de** las soluciones de Cu(II) en H_2SO_4, **además de** las diluciones de mezcal en H_2SO_4.



Figura 7. Celda de Electroquímica bipolar.

La celda se conecta a una fuente de alimentación configurada a 3.1V. Esta se deja encendida 30s para que se pueda oxidar el PANI/ITO, después se apaga, se realiza la adición de una solución de Cu(II) equivalente al 2mM y se esperan 30s para que homogenice la solución, se vuelve a encender la fuente y se repite el proceso para cada adición.

Para determinar la [Cu(II)], se toma una foto después de cada oxidación y en base a una curva de calibración creada con el programa **"IMAGEJ".**

3. Caracterización del níquel, cobalto y manganeso presentes en baterías de ion litio desechadas sobre electrodo Pt/Nafion/MN

Primeramente, se realizó una caracterización de los sulfatos de cada uno de los metales (Ni, Mn y Co) en donde se preparó una solución de 10mL 0.1M de dichas sales con 0.1M de KCl para que este funja como electrolito soporte. La caracterización se realizó por medio de estudios de voltamperometría cíclica (VC) con un potenciostato BioLogic (Figura 8), utilizando un electrodo de trabajo (ET) de Pt de 3mm de diámetro, un electrodo de referencia de Ag/AgCl y un contraelectrodo de Pt.



Figura 8. Potenciostato BioLogic.

Antes de realizar el experimento de voltamperometría cíclica se realizó una limpieza sobre el electrodo de trabajo que consistió en pulir el ET sobre alúmina de tres diámetros de grano diferente (1µm, 0.3µm y 0.05µm),

posteriormente se sonicó el ET en agua desionizada y en acetona por 90 segundos. A las soluciones a estudiar se les realizó burbujeó de nitrógeno por cinco minutos para desplazar el oxígeno disuelto y así disminuir la resistencia del sistema.

Los estudios de voltamperometría cíclica se realizaron a una velocidad de barrido de 20mV/s, con un rango de intensidad de 10mA, un ancho de banda de 6 y la ventana de potencial varió según el metal estudiado. Para el $NiSO_4$ se utilizó una ventana de 1.0 a -1.0 V, en el caso del $MnSO_4$ la ventana de potencial va de 1.4 a -0.2 V y para el $CoSO_4$ la ventana de potencial utilizada fue de 0.3 a -1.0.

Para la segunda etapa es necesario preparar una tinta con los desechos de baterías de ion litio, para ello se utilizó 40 mg de masa negra (desechos calcinados obtenidos del ánodo de las baterías de ion litio), 200µL de i-Pr, 190µL de EtOH y 10µL de nafion. Dicha solución se preparó en un eppendorf y se dejó abierto toda una noche para mejorar la consistencia de la tinta. Para realizar la caracterización de la tinta por voltamperometría cíclica se preparó una solución de KCl 0.1 M y se realizó la modificación del ET. La modificación del ET consistió en realizar una adición de 0.5µL de tinta sobre el ET, y dejando secar dicha tinta por 20 minutos para dejar una capa delgada y uniforme. Posteriormente, se introdujo el ET modificado en la celda electroquímica junto con la solución de KCl 0.1 M, el electrodo de referencia y el contraelectrodo. Se realizó el estudio de voltamperometría cíclica de la tinta a una velocidad de barrido de 20mV/s, con un rango de intensidad de 10mA, un ancho de banda de 6, un previo burbujeo de nitrógeno al electrolito soporte por 5 minutos y una ventana de potencial de 1.4 a -1.2 V para observar las señales correspondientes a cada uno de los metales previamente estudiados por individual.

Por último, para mejorar la comprensión de las señales obtenidas de la tinta se realizó una tercera parte experimental que consistió el realizar una VC del ET modificado con una adición de 2mL de la solución de $NiS0_4$, posteriormente se realizó la limpieza del ET, se modificó, se preparó más electrolito soporte y se adicionó 2mL de $MnSO_4$ y se realizó lo mismo para el $CoSO_4$.

Resultados y discusión

1. Electrosíntesis de PANI con magnetita y evaluación en la reducción de nitratos

Los **VC** evidenciaron que la modificación de los electrodos de grafito con polianilina (PANI) y magnetita (Fe_3O_4) alteró la respuesta electroquímica del sistema, reflejándose en variaciones de la corriente catódica respecto al grafito sin modificar. El electrodo PANI/Fe_3O_4 presentó la mayor modificación en la respuesta; sin embargo, la adición de nitratos (2 y 4 mM) no produjo la aparición de picos de reducción claramente definidos, ya que la respuesta estuvo dominada por la reacción de evolución de hidrógeno. Estos resultados indican que, aunque la incorporación de PANI y Fe_3O_4 modifica las propiedades electroquímicas de la interfaz electrodo/electrolito, no se observó un incremento significativo en la actividad electrocatalítica hacia la reducción de nitratos bajo las condiciones evaluadas.

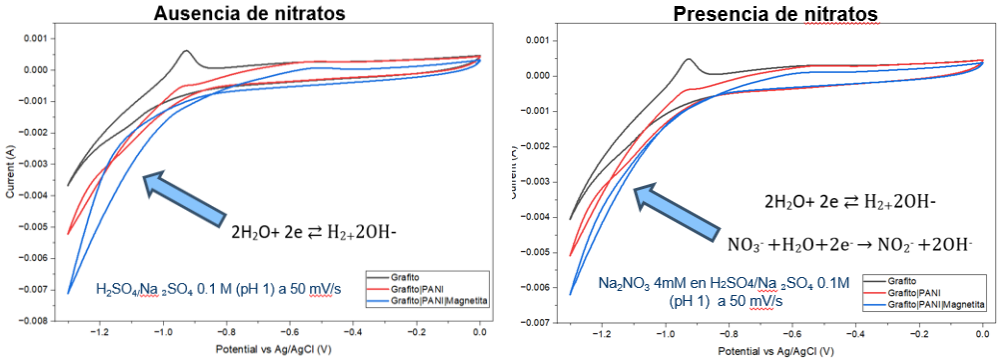


Figura 9. Comparativa de respuesta de referencia de buffer de SO_4^- (izq) vs adición de NO_3^- (der).

2. Sensor electrocrómico de Cu(II) en mezcal con un electrodo bipolar ITO/PANI

Las pruebas de exploración revelaron que el mezcal por si solo no muestra señales significativas en VC (fig 11). Después se exploraron varias diluciones de Mezcal en H_2SO_4 para determinar cual seria apropiada para las pruebas por elecroquimica bipolar.

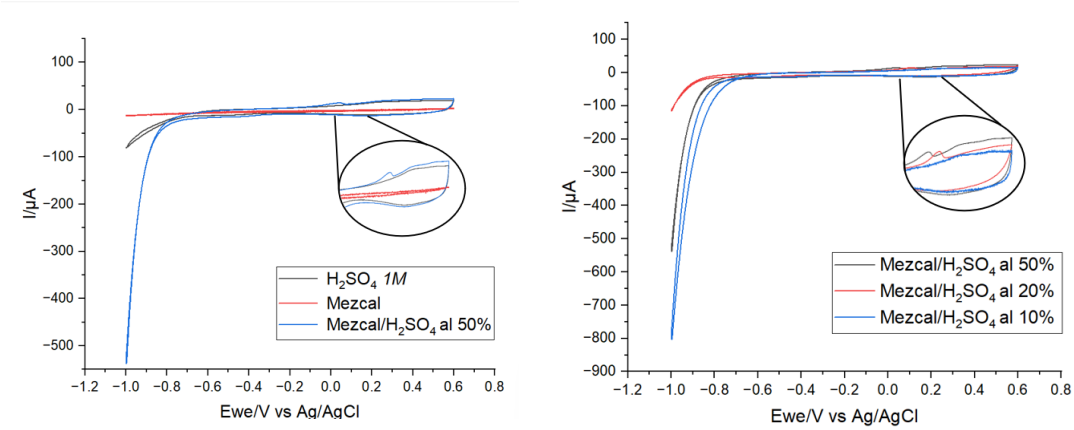


Figura 10. VC del perfil del mezcal, electrolito soporte y mezcla de muestra problema (izq) y VC del mezcal en diferentes diluciones de H_2SO_4.

Se puede apreciar que el mezcal puro no muestra la presencia de cobre, tampoco una dilución al 10%, por lo tanto, se analizaran mediante electroquímica bipolar las diluciones al 20% y al 50%.

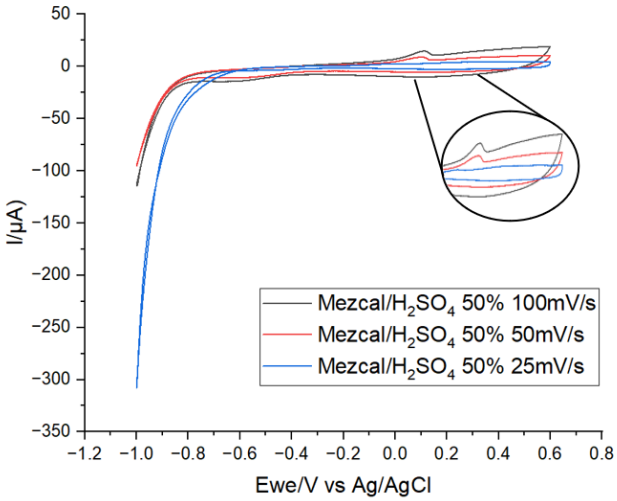


Figura 11. VC de Mezcal en H_2SO_4 al 50%.

Las VC del mezcal diluido al 50% a diversas velocidades de barrido indican la presencia de la oxidación de Cu(II).

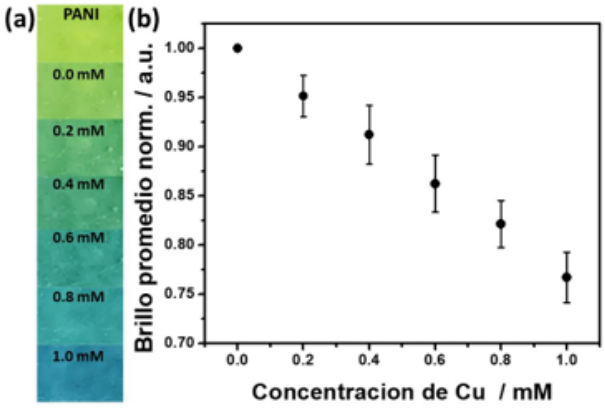


Figura 12. Curva de calibración creada en IMAGEJ, relaciona el color de la PANI respecto a la [Cu(II)].

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

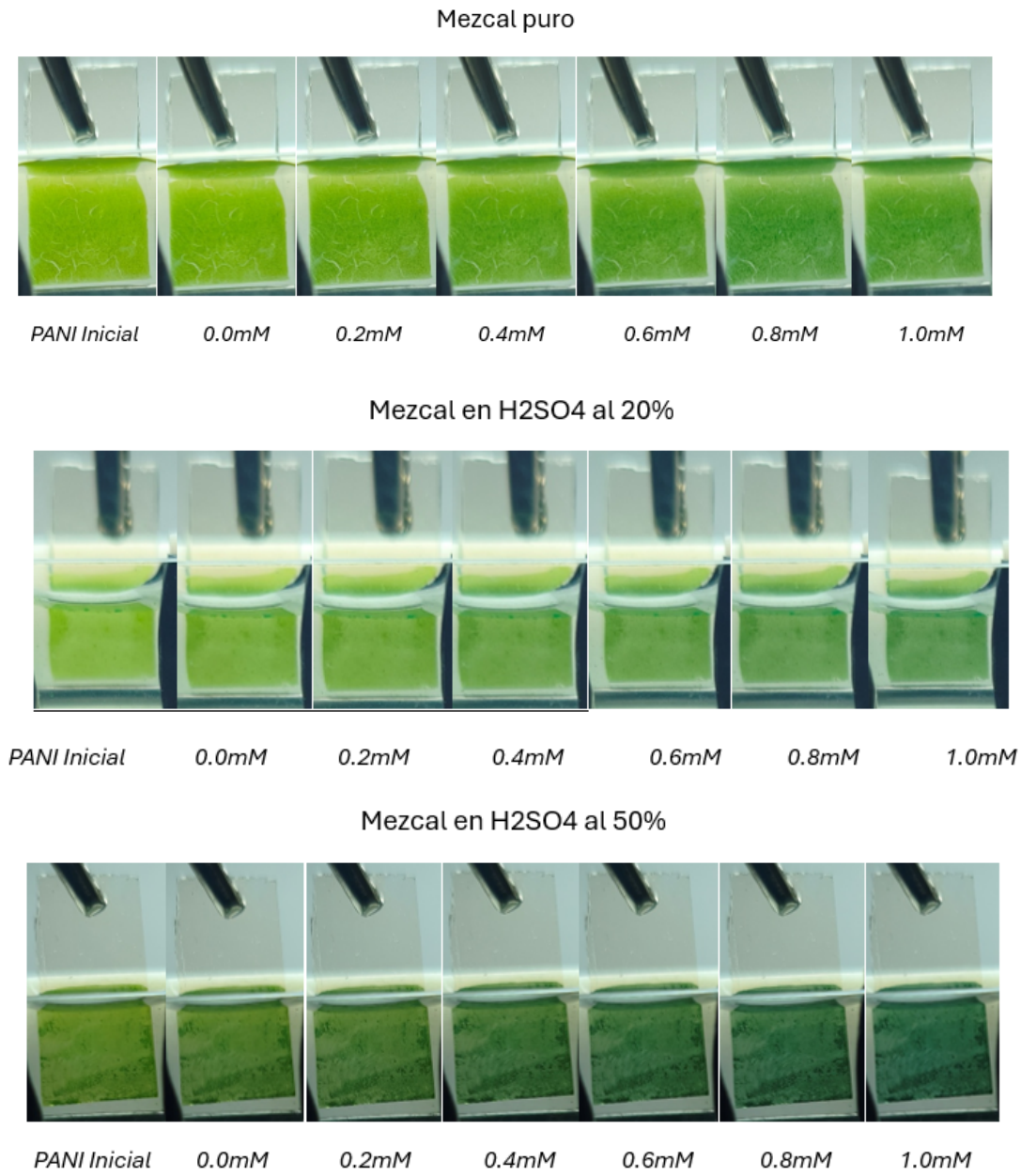


Figura 13. Comparativa de ITO/PANI de adiciones de Cu(II) a Mezcal a diversas concentraciones.

La adición de Cu(II) a una solución únicamente de mezcal tiene sentido, pues las VC nos indican que en ausencia de H2SO4, la detección de Cu(II) es prácticamente nula.

A pesar de que la dilución al 20% y al 50% tienen valores similares de corriente (podría ser que una mayor concentración de alcohol en la muestra de 50% de mezcal interfiera con la medición) mediante electroquímica bipolar se aprecia que la dilución al 50% presenta una pigmentación mas oscura respecto al blanco, esto indica que cuenta con una concentración inicial de Cu(II).

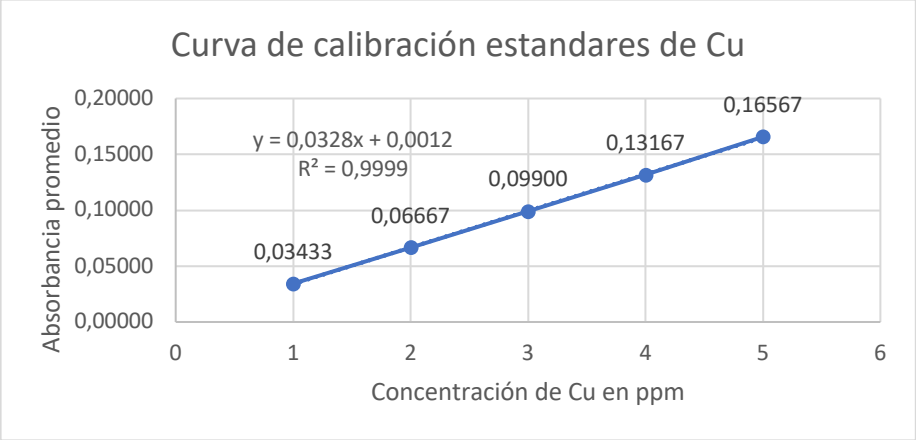
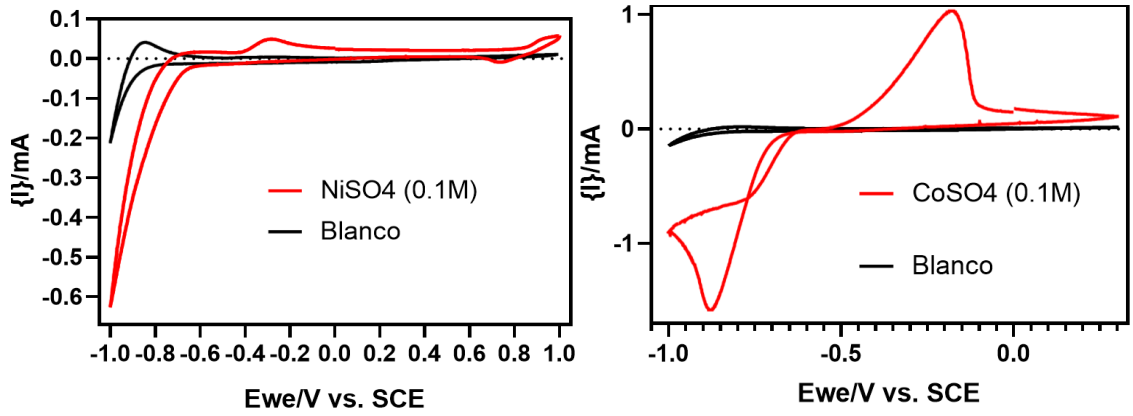


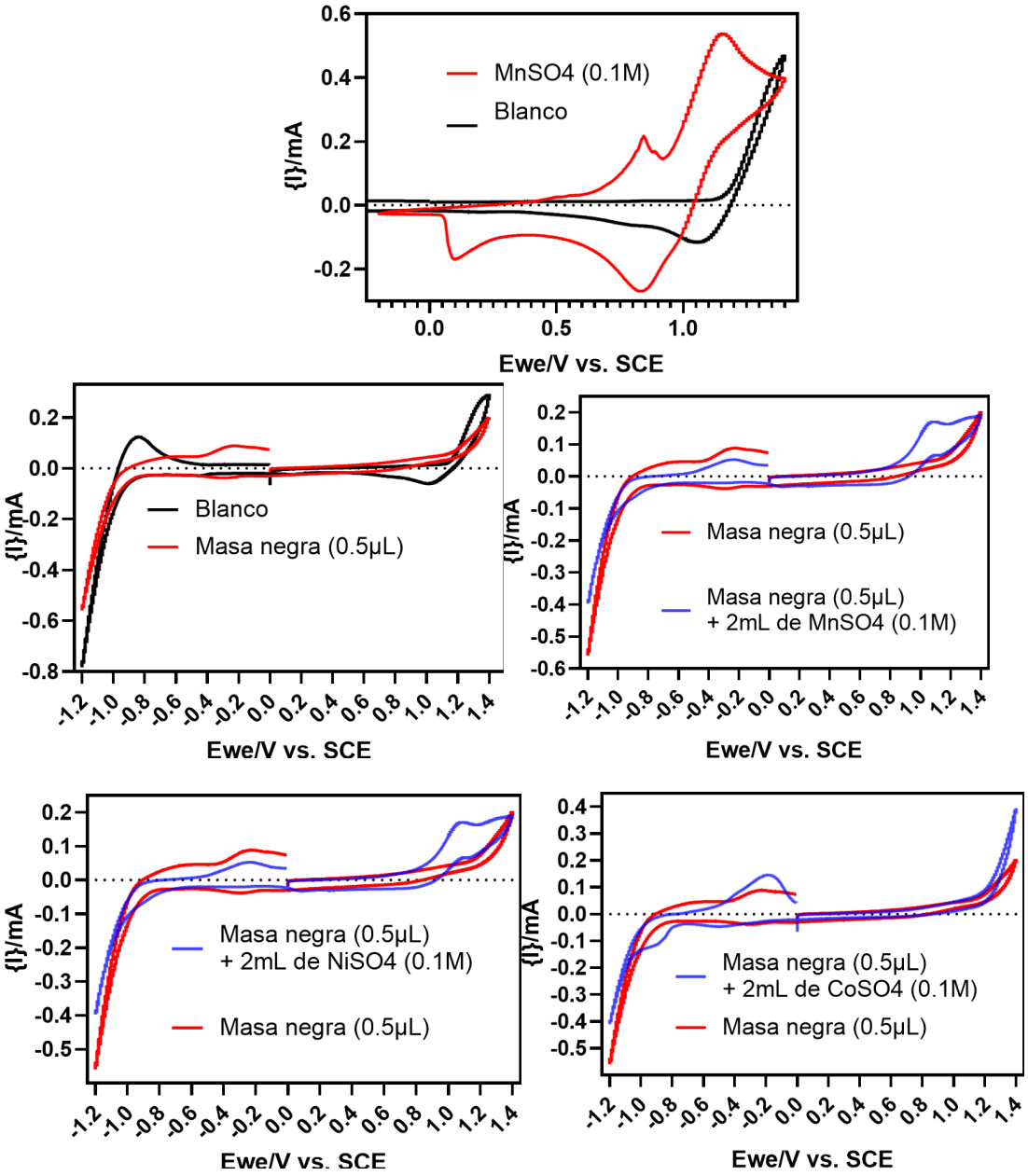
Figura 14. Curva de calibración de Cu mediante absorción atómica.

La muestra de mezcal dilucida dio una intensidad promedio de 0.347, lo cual ajustado al valor sin diluir del mezcal, corresponde a un 0.35mM. Al tener en cuenta que la muestra se diluyo al 50% de mezcal, tenemos una concentración inicial de Cu(II) de 0.35mM, lo cual al diluirse al 50% equivale a una concentración de Cu(II) inicial de 0.175mM, lo cual se puede apreciar en las fotos de la figura 13. Donde el PANI oxidado sin adiciones de mexcal al 50% tiene un color similar al del blanco de PANI con adición de Cu(II) al 2mM.

3. Caracterización del níquel, cobalto y manganeso presentes en baterías de ion litio desechadas sobre electrodo Pt/Nafion/MN

El estudio por voltamperometría cíclica de los sulfatos de Ni, Mn y Co confirmaron que las condiciones de experimentación son adecuadas para determinar cada uno de los cationes metálicos que son objetivo de estudio en los desechos de las baterías de ion litio. Se logró identificar el voltaje oxido reducción de cada uno de los metales. Al realizar la VC de la masa negra (MN) se observó que el Ni y el Mn se encontraban presentes en los desechos de baterías de ion litio. Para el Co no se logró identificar su proceso óxido-reducción en la MN, esto se puede deber a una muy baja concentración presente en los desechos de baterías de ion litio, ya que se realizó un estudio de absorción atómica lo que arrojó que la concentración de Co rondaba las 10 ppm. Por lo anterior, se conjetura que la concentración de Co presente en los 0.5µL de tinta, utilizada para modificar el ET, es tan baja que no presenta señal en voltamperometría cíclica. Y, aunque no se haya observado una señal correspondiente al cobalto dentro del estudio esto no es evidencia suficiente como para afirmar que no existe la presencia de Co en los desechos de baterías de ion litio.





Conclusiones

Los diversos estudios sobre PANI y nafion demostraron que estos polímeros cuentan con aplicaciones adicionales a las previamente reportadas, entre las mas importantes se encuentan:

- Tanto el nafion como la PANI son eficientes para la caracterización electroquímica de especies iónicas.
- Se confirmó que el potencial de la reducción de nitratos se sobrepone al potencial de evolución de

hidrogeno sobre el electrodo grafito/PANI/magnetita.

- El sensor electrocrómico ITO/PANI permite detectar Cu(II) en muestras de bebidas alcohólicas sin necesidad de tratar la muestra.
- Se confirma la presencia de Ni y Mn en los desechos de las baterías de ion litio mediante el uso de electrodos modificados con nafion.

Referencias

Deshmukh, M. A., Gicevicius, M., Ramanaviciene, A., Shirsat, M. D., Viter, R., & Ramanavicius, A. (2017). Hybrid electrochemical/electrochromic Cu(II) ion sensor prototype based on PANI/ITO-electrode. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 248, 527–535. https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.03.167

Fernandes, L. C., Correia, D. M., Fernández, E., Tariq, M., Esperança, J. M. S. S., & Lanceros-Méndez, S. (2020). Design of ionic-liquid-based hybrid polymer materials with a magnetoactive and electroactive multifunctional response. *ACS Applied Materials & Interfaces,* 12(37), 42089–42098. https://doi.org/10.1021/acsami.0c10746

González-Hernández, J., & Garcia-Céspedes, J. (2024). Voltamperometría: fundamentos electroquímicos y aplicaciones. *Revista de Química*, 38(2), 2–17. https://doi.org/10.18800/quimica.202402.001

Kotowicz, S., Hajduk, B., Bak, A. I., Pajak, A. K., Kumari, P., Jarka, P., & Cosutchi, I. (2026). Aniline electropolymerization on indium tin oxide nanofilms with different surface resistivity. *Nanomaterials*, 16(3), 165. https://doi.org/10.3390/nano16030165

Lin, C. H., Lin, J. H., Chen, C. F., Ito, Y., & Luo, S. C. (2022). Conducting polymer-based sensors for food and drug analysis. *Journal of Food and Drug Analysis,* 30(1), 1–18.

Namsheer, K., & Rout, C. S. (2021). Conducting polymers: A comprehensive review on recent advances in synthesis, properties and applications. *RSC Advances*, 11(10), 5659–5697. https://doi.org/10.1039/d0ra09623g

Salinas, G., Ibanez, J. G., Vásquez-Medrano, R., & Frontana-Uribe, B. A. (2018). Analysis of Cu in Mezcal commercial samples using square wave anodic stripping voltammetry. *Journal of Electrochemical Science and Technology,* 9(4), 276–281. https://www.jecst.org/upload/pdf/E1JTC5_2018_v9n4_276.pdf

Zahra, R., Drissi, N., & Kumar, A. (2025). Enhanced HER activity through $FeAlO_3$ perovskite oxide incorporated with conducting polymer PANI. *Inorganic Chemistry Communications*, 172, 113609. https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113609