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

Nanoestructuras magnéticas decoradas con plata, aplicadas en la detección y degradación de compuestos orgánicos persistentes en agua.

Silver-decorated magnetic nanostructures applied to the detection and degradation of persistent organic compounds in water

Elisa Valentina Arcos Gallardo[1], Mario Alejandro Rodríguez Rivera[2], María del Rosario Galindo González[3]
Facultad de minas metalurgia y geología. Universidad de Guanajuato, ev.arcosgallardo@ugto.mx[1]
Centro de Investigaciones en Óptica. mrodri@cio.mx[2]
Investigadora por México asignada a la Universidad de Guanajuato. mr.galindo@ugto.mx[3]

Resumen

El incremento en la presencia de contaminantes farmacéuticos en los cuerpos de agua ha impulsado la búsqueda de tecnologías alternativas capaces de complementar los tratamientos convencionales de aguas residuales. Entre estas, los procesos electroquímicos y fotoelectroquímicos asistidos por nanomateriales han despertado un interés creciente debido a su capacidad para promover reacciones de oxidación sobre compuestos orgánicos persistentes. En el presente trabajo se evaluó el comportamiento electroquímico de electrodos de vidrio conductor FTO modificados con óxido de grafeno, magnetita sintetizada mediante molienda y coprecipitación, así como magnetita adicionada con distintas concentraciones de nanopartículas de plata. La caracterización se realizó mediante voltametría cíclica utilizando una celda de tres electrodos, empleando como contaminante modelo una solución de paracetamol obtenida a partir de una digestión simulada y complementando los ensayos con irradiación ultravioleta para evaluar el efecto fotoelectroquímico de los materiales.

Los voltamogramas obtenidos permitieron identificar diferencias significativas en la respuesta electroquímica de los distintos recubrimientos, observándose modificaciones en la intensidad de corriente, la aparición de procesos de oxidación adicionales y cambios en el comportamiento de las reacciones conforme aumentó la concentración del fármaco y se incorporó la irradiación UV. Durante los experimentos asistidos por luz ultravioleta se detectó, además, la formación de un material coloidal cuya cantidad aumentó con el tiempo de irradiación y con determinadas composiciones de los electrodos, fenómeno que también se manifestó durante las pruebas de fotodegradación.

La caracterización mediante espectroscopía UV-Visible mostró variaciones temporales en la absorbancia de las muestras, particularmente alrededor de los 300 nm, compatibles con la formación y posterior transformación de especies químicas intermedias durante el proceso de degradación. Aunque las técnicas empleadas no permitieron identificar de manera concluyente la naturaleza de dichas especies, la correlación entre la respuesta voltamétrica, los cambios espectroscópicos y las observaciones experimentales sugiere que la combinación de magnetita, nanopartículas de plata e irradiación UV favorece procesos fotoelectroquímicos complejos que ameritan estudios posteriores mediante técnicas avanzadas de caracterización.

Palabras clave: contaminantes emergentes; tratamiento de aguas residuales; voltametría cíclica; foto-electroquímica; magnetita; nanopartículas de plata; paracetamol

Introducción

El incremento en el uso de productos farmacéuticos ha favorecido la liberación continua de compuestos bioactivos hacia cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Estos compuestos, introducidos principalmente mediante la excreción, efluentes hospitalarios, actividades industriales y la disposición inadecuada de medicamentos, representan una fuente importante de contaminación ambiental debido a su persistencia y actividad biológica.

La razón por la que el tratamiento de aguas residuales convencional no da abasto contra esta amenaza es porque se está hablando de un contaminante emergente. Por concepto, esta plétora de contaminantes representa a aquellas sustancias cuya presencia y distribución en el ambiente y su consecuente impacto en este han comenzado a reconocerse a mayor detalle gracias al desarrollo de técnicas analíticas más sensibles químicamente. Esto significa que aún en la actualidad precisan de mayor investigación, lo cual despierta un interés colectivo por generar una respuesta y mejorar las técnicas de tratamiento de aguas residuales con el fundamento adecuado.

Muchos contaminantes emergentes presentan una elevada estabilidad química y mantienen su actividad biológica incluso después de ser liberados al ambiente, lo que puede provocar alteraciones fisiológicas, reproductivas y endocrinas comprobables en diversos organismos acuáticos (como los insecticidas clorados que liberan componentes estrogénicos; o fungicidas e insecticidas con componentes anti-androgénicos que además han demostrado inhibir el comportamiento reproductivo en mamíferos) *(Becerril Bravo, 2009*). Cabe mencionar que estas sustancias, en su mayoría antropogénicas, se acumulan y persisten en el medio acuático con facilidad, y son resistentes a los procesos biológicos con los que generalmente se busca descomponer los contaminantes químicos en el agua.

Ante este panorama, el desarrollo de tecnologías que permitan eliminar o transformar estos contaminantes se ha convertido en una línea de investigación de suma prioridad dentro del tratamiento de aguas residuales. Diversas investigaciones *(Torres et al., 2023)* en materia de esta problemática han explorado la utilización de bacterias, hongos y enzimas para la degradación de una amplia variedad de compuestos orgánicos. No obstante, la estabilidad química de muchos de ellos representa una limitante en la eficacia de estos métodos en determinadas condiciones, lo cual es un llamado a la búsqueda de metodologías complementarias.

Bajo este contexto, los procesos electroquímicos y fotoelectroquímicos han despertado un interés creciente *(Moreno Mejía, 2017)* debido a su capacidad de promover la degradación de contaminantes persistentes, por medio de la generación de especies altamente reactivas sin necesidad de una adición constante de reactivos químicos. Así mismo, el empleo de materiales con propiedades electrocatalíticas ha permitido mejorar la eficiencia de estos procesos, favoreciendo la transferencia de carga y el aprovechamiento de la energía luminosa durante las reacciones de oxidación.

La combinación de un potencial eléctrico con irradiación luminosa favorece la separación de pares electrón-hueco y promueve la formación de especies reactivas de oxígeno, como radicales hidroxilo (•OH) y radicales superóxido (O_2•$^-$), capaces de oxidar una amplia variedad de contaminantes orgánicos hasta transformarlos en productos menos tóxicos o bien, mineralizarlos.

Con este panorama en mente, el presente trabajo busca un acercamiento desde la electroquímica para evaluar el comportamiento de electrodos de vidrio FTO modificados con distintos nanomateriales destacando entre ellos óxidos y nanopartículas metálicos en un medio acuoso con micro saturaciones de un contaminante modelo. Estos materiales fueron preparados a manera de superficies activas en el electrodo; y su respuesta fue estudiada mediante voltametría cíclica bajo condiciones convencionales y asistida por luz UV. La comparación entre estos sistemas permitió analizar la influencia de cada modificación superficial sobre la respuesta electroquímica del electrodo, con el mero propósito de comprender de qué manera la adición de nanomateriales y la irradiación UV añaden variables al desempeño fotoelectroquímico del sistema.

Metodología

Los experimentos se realizaron utilizando vidrios conductores con una película de óxido de indio/estaño (FTO) como sustrato para la elaboración de los electrodos de trabajo. Como materiales activos se emplearon el óxido de grafeno, magnetita sintetizada mediante molienda (etiquetada como magnetita A) y por coprecipitación (magnetita B); así como nanopartículas de plata en suspensión. Para la preparación de las tintas, se utilizó alcohol isopropílico como solvente y Nafión como agente aglutinante. Los ensayos electroquímicos se realizaron en una solución buffer de fosfatos a pH 7, empleando Paracetamol (P1T8) previamente sintetizado como fármaco modelo.

Las mediciones electroquímicas fueron realizadas con un potenciostato BioLogic SP-150e, utilizando una celda convencional de tres electrodos. Las gráficas fueron realizadas auxiliadas por el programa EC-Lab, en una computadora conectada al potenciostato.

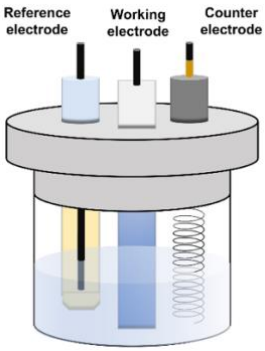


Figura 1. Ejemplo ilustrativo de una celda convencional de tres electrodos (de izq. a der.: de referencia, de trabajo y contraelectrodo).

1. Materiales Previamente Disponibles.
2.

En el laboratorio ya se disponía de algunos materiales, incluyendo las soluciones del fármaco modelo y las tintas hechas a base de óxido de grafeno (tinta GO + magnetita).

La solución de fármaco, sintetizada y descrita por Segovia Hernández (2025), como se muestra en la figura 2, se preparó mediante una simulación de digestión en jugo gástrico, disolviendo 0.333mL de HCl en agua desionizada, a la que se le añadió un comprimido de Paracetamol de 500mg y se agitó constantemente a 25°C durante 8 horas. Se buscó simular de la manera más aproximada la vida media de eliminación del fármaco, así como su metabolización en el hígado y su excreción por vía renal. Para esto último, a la solución resultante se le adicionaron 20mL de urea al 0.3 M, manteniendo una temperatura de 36 a 37°C que lograra simular la temperatura corporal promedio.

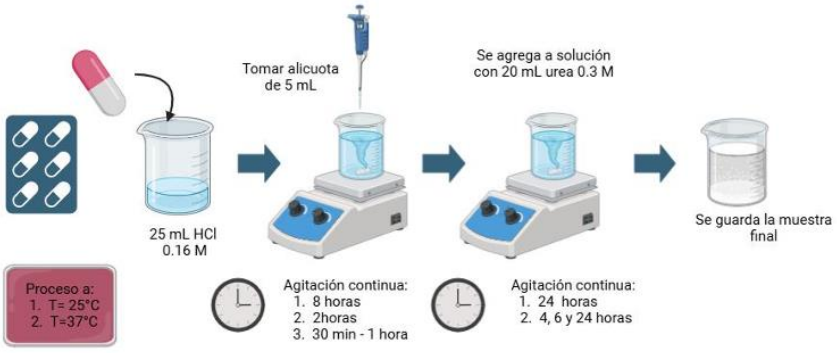


Figura 2. Ilustración de la digestión sintética del fármaco y su excreción, así descrita por Segovia Hernández (2025) en su trabajo.

El grafeno utilizado para la elaboración de las tintas había sido previamente caracterizado. En su trabajo, Segovia Hernández presenta que poseen morfología en láminas y esférica; una morfología heterogénea que fue comprobada mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Las tintas ya habían sido realizadas para el momento de inicio de este proyecto, utilizando la misma concentración de alcohol isopropílico, salvo la ausencia de Nafión en su contenido.

3. Preparación de los Electrodos

Para la elaboración de las tintas base, se dispersaron 20µL de ambas especies de magnetita en 400µL de alcohol isopropílico, contenidos en un tubo Eppendorf. La diferencia entre magnetita A y B es la ruta de síntesis (Magnetita A coprecipitación, magnetita B molienda). Esta solución sería agitada en baño ultrasónico por aproximadamente 40 minutos, antes de la adición de 15µL del agente aglutinante (Nafión). Al final, una última sonicación durante 30 minutos. Por otra parte, para la elaboración de las tintas adicionadas con nanopartículas de plata se sigue el mismo procedimiento, salvo por la excepción de incorporar 20, 50 y 100µL de la plata en suspensión antes del primer tratamiento ultrasónico.

Al final, sobre cada vidrio FTO ya limpio, seco y con la película conductora hacia arriba; se depositó una gota de 50µL de tinta, preparándose dos electrodos por cada composición, como se muestra en la figura 3. Esta gota se esparce cuidadosamente, procurando que cubriese un cuadrado de 1x1cm del vidrio bien, dejase suficiente espacio para la punta del caimán del electrodo de trabajo. Además, se dejan dos vidrios FTO completamente limpios para realizar las pruebas de voltametría en blanco, como referencia.

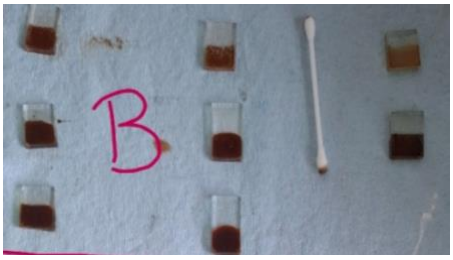


Figura 3. Electrodos de vidrio FTO con tinciones adicionadas con plata. De arriba hacia abajo: Ag20B, Ag50B, Ag100B.

1. Evaluación Electroquímica

Las pruebas electroquímicas fueron realizadas empleando una celda de tres electrodos, compuesta por un electrodo de trabajo (vidrio FTO), uno de referencia (Ag/AgCl) y un contra-electrodo de platino. Como electrolito, una solución buffer de fosfatos a pH 7; de la cual se utilizaron 20mL por cada prueba. La celda electroquímica consta de tres electrodos deben ser acomodados de manera equidistante. Todos los electrodos son conectados de manera cuidadosa, evitando que los caimanes se sumerjan en la solución. Las mediciones se realizaron mediante voltametría cíclica con parámetros de potencial de -2 a 2 V, un rango de E de -10 a 10 V y una velocidad de barrido de 100 mV/s. Al finalizar cada barrido, se adicionó una alícuota de 100µL de la solución del fármaco, realizándose uno o dos barridos adicionales antes de incorporar la siguiente alícuota; hasta llegar a los 1000µL.



Figura 4. Celda electroquímica en funcionamiento con un agitador integrado. A la izquierda, electrodo de trabajo. Al centro, contraelectrodo. A la derecha, electrodo de referencia.

1. Evaluación Fotoelectroquímica

Con el propósito de evaluar la influencia de la irradiación sobre la respuesta electroquímica del sistema, una serie adicional de ensayos se realizó bajo iluminación UV, manteniendo constantes las demás condiciones experimentales descritas anteriormente. Se utilizaron todas las tintas de Magnetita A y B, y se hicieron 3 combinaciones con nanoparticulas de plata en 20, 50 y 100µL de plata.

2. Fotodegradación

Los experimentos de fotodegradación se realizaron en una solución de 50:5mL, correspondiendo estas cantidades a Buffer y solución de fármaco en Buffer (20:1mL) respectivamente. Los electrodos utilizados para estas pruebas los hechos con tinta de Magnetita B: una sin Ag adicionada y otra con 100µL de plata. Estos permanecieron sumergidos en la solución durante cuatro horas bajo irradiación UV y agitación magnética continua; sin aplicar ningún barrido electroquímico.

A intervalos previamente establecidos (inicio, 15 minutos, 30 minutos, 45 minutos, 1 hora, 2 horas, 3 horas y 4 horas), se extrajeron alícuotas de 1mL para su posterior análisis espectrofotométrico, que fueron almacenados y etiquetados en viales ámbar para una preservación efectiva.

3. Análisis por Espectroscopía UV-Visible

Las muestras obtenidas de ambos experimentos de fotodegradación fueron analizadas mediante espectroscopía UV-Visible, para registrar los cambios en absorbancia y transmitancia a lo largo del tiempo con el propósito de evaluar la evolución del sistema durante el tratamiento fotoelectrocatalítico. Para este análisis se utilizaron celdas de acrílico, a las que se le añadió cada alícuota obtenida de 1mL diluida en 2mL de agua desionizada para alcanzar el volumen necesario.

Resultados y Discusión

1. Voltametría Cíclica

Se elaboraron los siguientes electrodos: Se realizaron pruebas del voltametría cíclica con el vidrio FTO en blanco, con tal de disponer de un marco de referencia experimental con el cual comprobar futuros resultados. Para los primeros barridos, se utilizaron parámetros de medición ligeramente menores a los previamente establecidos, variando el potencial a un intervalo de -1.5 a 1.5 V.

2. Voltametría Cíclica de Magnetita B

Los voltamogramas obtenidos para los electrodos modificados con Magnetita B muestran un incremento progresivo de la corriente anódica conforme aumenta la concentración del paracetamol en la celda electroquímica, lo que sugiere una mejora en la transferencia de carga respecto al vidrio FTO sin modificar. Este comportamiento podría asociarse, en primra instancia, a la carga de la doble capa eléctrica que se establece al comenzar el barrido de potencial. Sin embargo, considerando la naturaleza del material empleado, también es posible que en esta región tengan lugar procesos de reducción relacionados con los estados de oxidación del hierro presentes en la magnetita, particularmente entre las especies de Fe. Los resultados con la magnetita A no fueron tan favorables y en lo consecutivo se trabajó con magnetita B

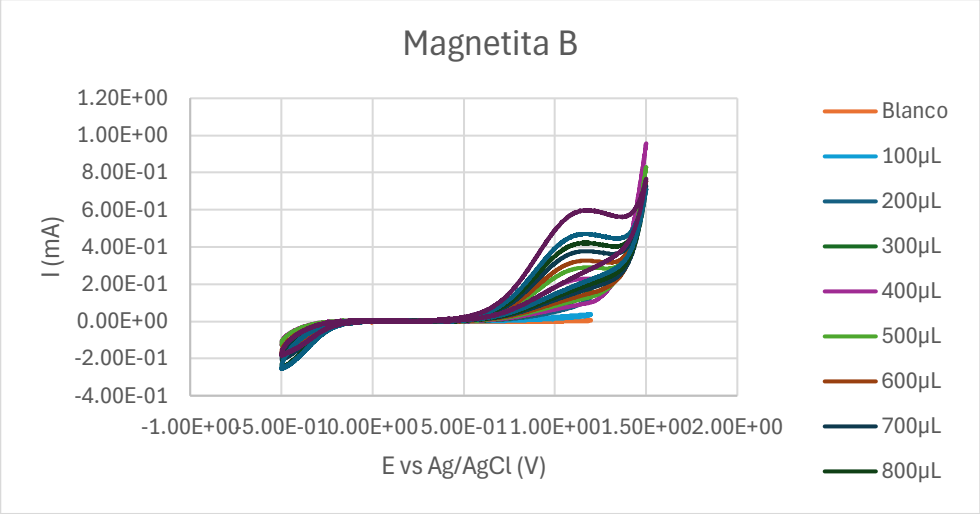


Figura 5. Gráfica comparativa total de los barridos voltamétricos de la Magnetita A

En consecuencia, la respuesta observada probablemente sea el resultado de la contribución simultánea de fenómenos capacitivos y de procesos redox superficiales en el material, cuya influencia disminuye conforme el potencial alcanza la región donde predomina la oxidación del analito. Obsérvese también, en la siguiente figura 5, que la corriente pico de mayor intensidad se alcanza durante el barrido a concentración de 400µL. Esta cifra, a lo largo del trabajo experimental, se ha convertido en una constante que tiende a marcar el inicio de cambios de comportamiento en el sistema de la celda electroquímica.

3. Voltametría Cíclica de Magnetita B (Adicionada con 20µL de NPs Ag)

La tinta de Magnetita B adicionada con plata resistió visiblemente bien todo el proceso de los barridos voltamétricos y sus duplicadoque fueron emitidos. Como se observa en la figura 6, la adición de NPs de plata modifica la respuesta del electrodo de manera considerable, respecto de la Magnetita B por sí sola. Además, se percibe mucho mejor la región anódica de la reacción, entre los 0.8 y 1.2 V, traduciéndose como un favorecimiento a la transferencia electrónica y a la aceleración del proceso de oxidación del analito.

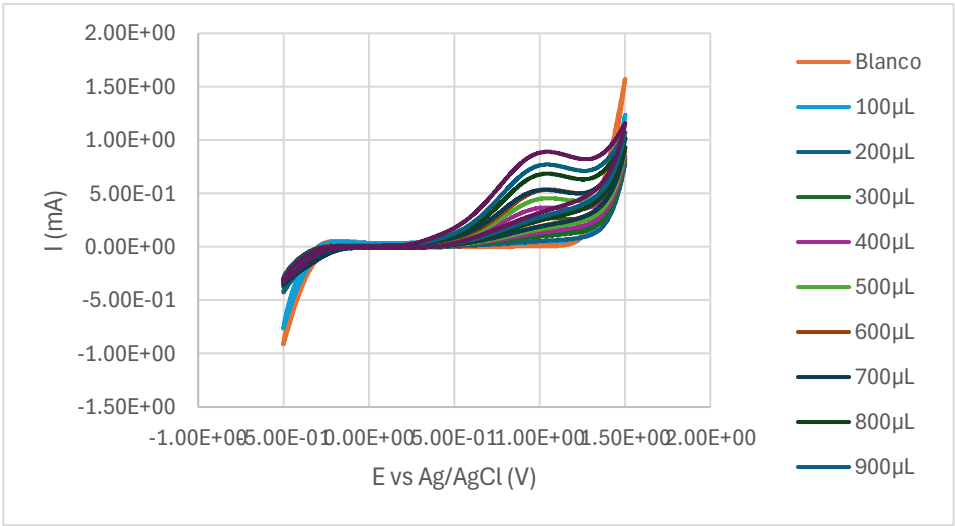


Figura 6. Compilación de los voltamogramas de los primeros barridos, Ag20B.

No obstante, todos los barridos alcanzan corrientes menores al primero, con la solución buffer en blanco. Sobre este comportamiento se formula que el electrodo podría haberse pasivado; dada la producción de materiales intermedios a lo largo de la reacción, que podrían haber sido adsorbidos en la superficie del vidrio, cubrir parcialmente la tinción y efectivamente bloquear sitios activos del electrodo. Esta idea fue comprobable mediante una prueba sencilla, en la que el electrodo fue retirado y enjuagado con agua desionizada después del primer barrido. Al ser este sumergido de vuelta en la solución buffer, el primer barrido volvía a ser más intenso, pero el duplicado volvía a disminuir en intensidad. Otra hipótesis plausible implica el consumo de las especies de plata de la superficie, ya que, si una porción de estas se oxida, entonces la actividad electrocatalítica que originalmente posee se ve comprometida hasta que la superficie vuelva a estabilizarse.

4. Voltametría Asistida, UV con Ag20B

A partir de este punto se observó un cambio realmente significativo en las corrientes pico. En este experimento en particular fue donde se documentó una cantidad mayor de fenómenos a analizar, como la decreciente intensidad de la corriente, el cambio de color a un oscuro más quemado y la aparición de una sustancia descrita como “traza negra” que, en principio, aparentaba provenir del electrodo de trabajo después de un cierto tiempo de reposo. Las señales que se observan en la figura 7, entre valores de potencial de -0.3 y 0.3 V pueden atribuirse a la presencia de las Nanopartículas de Plata, pero se observa un incremento considerable en la intensidad de corriente, lo cual nos lleva a pensar que la luz UV vis, favorece la transferencia de carga y mejora la selectividad al analíto.

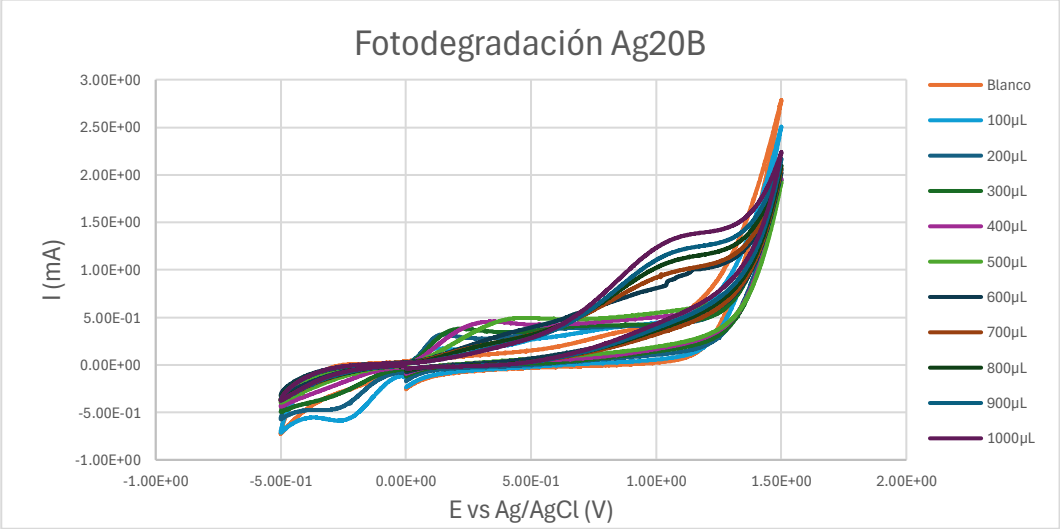


Figura 7. Comparación entre los voltamogramas de los primeros barridos del electrodo Ag20B sin UV (arriba) y asistida con UV (abajo).

5. Fotodegradación con Magnetita B

El resultado obtenido de estas dos últimas pruebas experimentales es una serie de diagramas de espectroscopía UV-Vis. En estos espectros se logran observar cambios significativos en la región comprendida entre los 290 y 400nm, donde se localizan las principales bandas de absorción asociadas al sistema aromático del paracetamol y sus posibles productos asociados de oxidación.

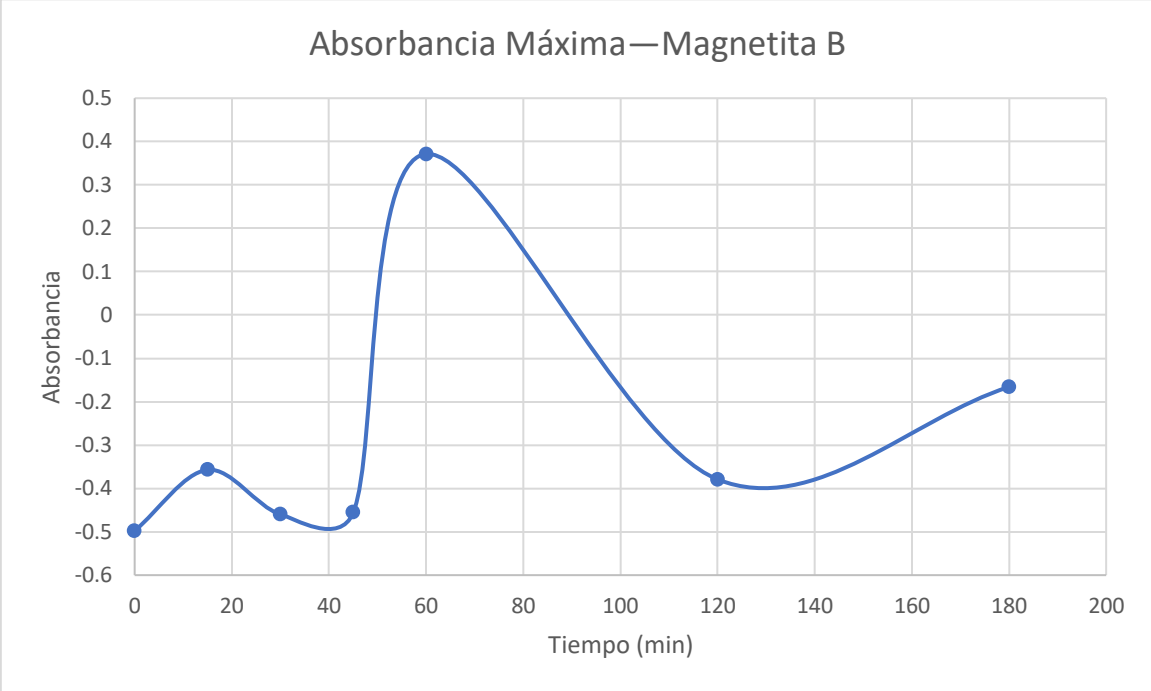


Figura 8. Gráfica de la absorbancia máxima contra el tiempo de fotodegradación, Magnetita B.

La muestra que fue tomada a la hora de irradiación presentó la mayor absorbancia positiva, alcanzando un máximo cercano de 3.8 alrededor de los 250nm. Por otra parte, las muestras tomadas en los demás intervalos de tiempo muestran valores predominantemente negativos. Este comportamiento no parece seguir una tendencia monotónica de disminución, lo que sugiere que durante la fotodegradación no ocurrió solamente la desaparición progresiva del paracetamol—sino también la formación de especies intermedias, con características ópticas diferentes, y su posterior transformación.

La banda positiva del intervalo de 1 hora podría atribuirse a la acumulación temporal de productos de oxidación, que absorben intensamente las emisiones de 300 a 200nm.

Posteriormente, al disminuir esta señal progresivamente hacia la línea de referencia sugiere que estos materiales siguen reaccionando o se transforman en productos menos absorbentes, posiblemente asociados con la formación del coloide previamente mencionado.

Por otra parte, es importante destacar las oscilaciones en la región de 200 a 290nm, que principalmente podrían atribuirse a ruido instrumental, a la efectividad de las celdas de acrílico que se utilizaron, y a posibles fenómenos de dispersión de la luz ocasionados por partículas suspendidas en la solución. Por lo tanto, esta región bien podría no considerarse para el análisis cuantitativo de la degradación.

6. Fotodegradación con Ag100B (Magnetita B + 100µL de NPs de Ag)

La evolución temporal de los espectros UV-Vis mostró un incremento pronunciado de la absorbancia alrededor de los 300nm, alcanzando un máximo aproximadamente a las 2 horas de haberse iniciado la fotodegradación. Posteriormente, la intensidad de esta banda comenzó una disminución gradual, que es un comportamiento compatible con la formación y posterior consumo de especies intermediarias como se ha sugerido en el experimento anterior. La presencia simultánea de una elevación de la línea base y de partículas coloidales observadas durante la experimentación en el sistema propone, además, que parte de la respuesta espectral podría verse influenciada por fenómenos de dispersión de la luz asociados a la formación de agregados en suspensión.

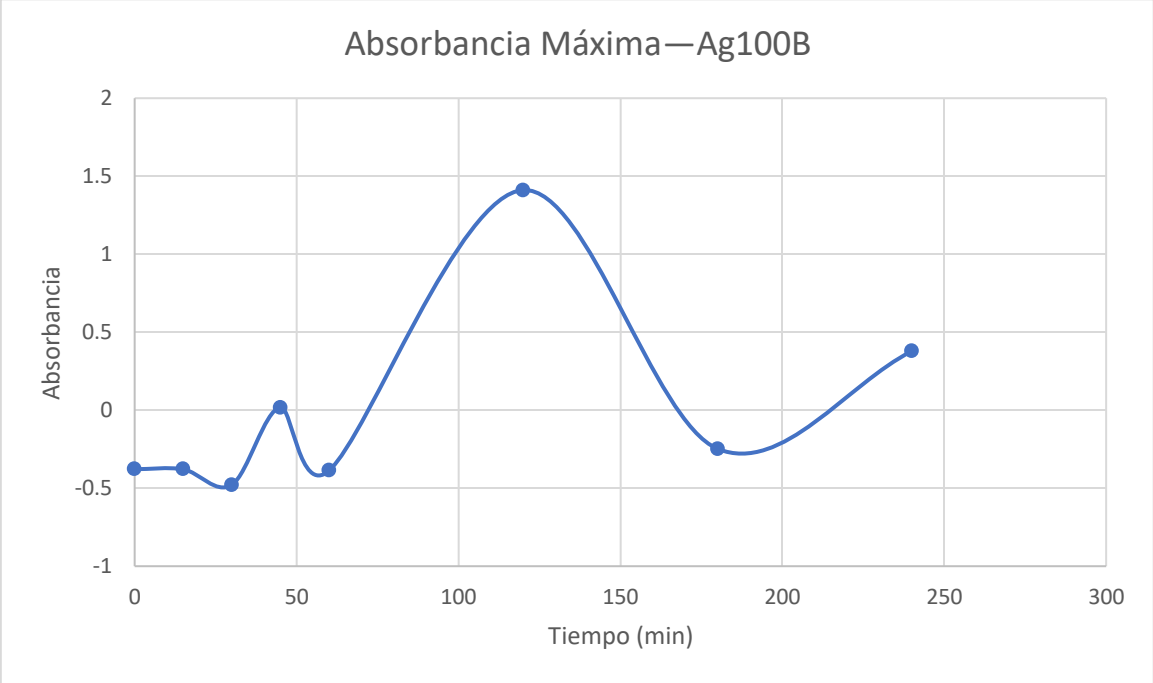


Figura 4.12.1. Gráfica de la absorbancia máxima contra el tiempo de fotodegradación, Ag100B.

Conclusiones

El presente trabajo permitió evaluar el comportamiento electroquímico y fotoelectroquímico de electrodos de vidrio FTO modificados con óxido de grafeno, magnetita sintetizada mediante distintos métodos y nanopartículas de plata; empleando la voltametría cíclica como principal técnica de caracterización. En conjunto, los resultados obtenidos demostraron que las modificaciones superficiales influyen de manera importante en la respuesta electroquímica del sistema, favoreciendo la aparición de procesos de oxidación diferenciados y cambios en la intensidad de las corrientes registradas conforme aumentó la concentración del contaminante modelo. Asimismo, la incorporación de radiación UV modificó de forma apreciable el comportamiento de los electrodos, evidenciando la participación de procesos fotoelectroquímicos adicionales.

Entre los hallazgos más relevantes destaca la observación de un material coloidal generado durante las pruebas asistidas por irradiación UV, cuya formación pareció depender tanto de la concentración del fármaco como de la composición del electrodo empleado. De manera complementaria, los análisis mediante espectroscopía UV-Vis revelaron cambios temporales en la absorbancia de las muestras, particularmente en la región cercana a los 300 nm, comportamiento compatible con la formación y posterior transformación de especies químicas intermedias durante el proceso de fotodegradación. Aunque las técnicas empleadas no permiten identificar de manera concluyente la naturaleza de dichas especies, la coincidencia entre las observaciones experimentales, la respuesta voltamétrica y la evolución espectroscópica constituye una evidencia consistente de que el sistema presenta una dinámica química más compleja que la simple degradación directa del contaminante.

En este sentido, el presente estudio representa un punto de partida para investigaciones posteriores orientadas a comprender con mayor profundidad los mecanismos involucrados en estos procesos. Resultaría de particular interés complementar la caracterización mediante técnicas capaces de identificar los productos de reacción generados durante la fotodegradación, tales como cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (LC-MS), cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) o espectroscopía Raman e infrarroja (FTIR), con el propósito de establecer la naturaleza de las posibles especies intermedias observadas durante la experimentación.

De igual forma, la caracterización fisicoquímica del material coloidal detectado durante las pruebas constituye una línea de investigación de especial interés, ya que podría aportar información valiosa acerca de los mecanismos de transformación del contaminante y del papel desempeñado por los nanomateriales empleados. Técnicas como microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopía electrónica de transmisión (TEM), dispersión dinámica de luz (DLS), difracción de rayos X (DRX) o espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS) permitirían determinar la morfología, composición elemental, tamaño de partícula y posible naturaleza cristalina de este material, contribuyendo a esclarecer su origen y evolución durante el proceso fotoelectroquímico.

Finalmente, también resulta pertinente profundizar en el estudio de la superficie de los electrodos antes y después de los ensayos electroquímicos. La posible formación de capas de pasivación, la redistribución de las nanopartículas de plata, los cambios morfológicos del recubrimiento o la acumulación de productos de reacción podrían analizarse mediante técnicas de microscopía y análisis superficial, permitiendo correlacionar dichos cambios con la disminución de la respuesta voltamétrica observada en algunos experimentos. En conjunto, estos estudios contribuirían a comprender con mayor detalle los mecanismos responsables de la actividad fotoelectrocatalítica de los materiales evaluados y favorecerían el diseño de electrodos con mayor estabilidad, reproducibilidad y eficiencia para aplicaciones futuras en el tratamiento de aguas residuales.

En términos generales, los resultados obtenidos muestran que la combinación de magnetita, nanopartículas de plata e irradiación UV constituye un sistema con una respuesta fotoelectroquímica notablemente diferente a la observada en los materiales individuales. Si bien el alcance del presente estudio no permite establecer de manera definitiva los mecanismos de reacción involucrados, las evidencias experimentales obtenidas sugieren la participación de procesos complejos de transferencia electrónica y transformación química que justifican una investigación más profunda. En este sentido, más que responder por completo a la problemática planteada, este trabajo abre nuevas interrogantes acerca de la naturaleza de los productos generados y del papel que desempeñan los nanomateriales durante la degradación de contaminantes farmacéuticos, estableciendo así una base sólida para el desarrollo de estudios posteriores.

Bibliografía/Referencias

García Mendoza A., Baeza Reyes A. (23 enero de 2023). Primer acercamiento a las técnicas electroquímicas. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. UNAM.

Becerril Bravo, J. E. (2009, August 10). Contaminantes emergentes en el agua. *Revista Digital Universitaria, 10*(1067–6079). Coordinación de Publicaciones Digitales. DGSCA-UNAM.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2025). Ministerio Para La Transición Ecológica Y El Reto Demográfico. https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/contaminantes-emergentes.html

Torres, A., Rodríguez, H. A., & Ayala, M. (2023). Contaminantes emergentes en México: panorama actual, retos y una posible solución biotecnológica. *TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, *26*. https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2023.590

Moreno Mejía, A. I. (2017). *Degradación Electroquímica de Contaminantes Emergentes de un Efluente de la Industria Farmacéutica* [Tesis].

Segovia Hernández, E. (2025). *Determinación de contaminantes orgánicos persistentes en agua, mediante dispositivos electroquímicos* [Tesis].

Hirohisa Yamada, Kazuki Yoshii, Masafumi ASAHI, Masanobu CHIKU, Yuki KITAZUMI, Cyclic Voltammetry Part 1: Fundamentals, Electrochemistry, 2022, Volume 90, Issue 10, Pages 102005, Released on J-STAGE October 31, 2022, Online ISSN 2186-2451, Print ISSN 1344-3542, https://doi.org/10.5796/electrochemistry.22-66082, https://www.jstage.jst.go.jp/article/electrochemistry/90/10/90_22-66082/_article/-char/en