

Electropolimerización de EDOT y 5-amino-1,10-fenantrolina en DES para la modificación de sensores electroquímicos

Estefania Godoy-Colin ^{1,2,*}, Adrián López-Yáñez ^{1,2}, Gastón Martínez-De Jesús ¹, Silvia Corona-Avendaño ² y Manuel Palomar-Pardavé ²

¹ División de Ingeniería Química y Bioquímica, TecNM/Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Av. Tecnológico S/N, Ecatepec 55210, Estado de México, México

² Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, Ciudad de México, México

* Estefania Godoy Colin: al2193803826@azc.uam.mx; Tel.: 7731565877

Desarrollo Sustentable (Materiales Sustentables)

Recibido: 22 de agosto de 2025

Aceptado: 7 de octubre de 2025

Publicado: 2 de marzo de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.621>

Resumen: La modificación de electrodos con polímeros conductores sintetizados por electropolimerización en disolventes eutécticos profundos (DES por sus siglas en inglés) representa una estrategia prometedora para el desarrollo de sensores electroquímicos. Es por ello, que en este trabajo se modificó la superficie de un electrodo de carbón vítreo (GCE) con el polímero de la molécula 3,4 etilendioxi-fenol (EDOT) para formar PEDOT o de la molécula 5-amino-1,10-fenantrolina (5Aphen) para formar Poly5Aphen, a partir de un disolvente eutéctico profundo a base de cloruro de colina y urea (reline). Los resultados obtenidos por voltamperometría cíclica (VC) mostraron que es posible polimerizar EDOT y 5Aphen sobre la superficie del GCE al emplear un DES. Por otro lado, con la técnica de caracterización por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Espectroscopía de Dispersión de Energía de Rayos X (EDS), se realizó un análisis microestructural y morfológico, así como un análisis elemental del electrodo GCE modificado con PEDOT y Poly5Aphen, que sugieren una electrodeposición homogénea del polímero conductor sobre el electrodo GCE. Además de que fue posible incrementar el área electroactiva del electrodo de GCE modificado con los polímeros conductores (GCE/PEDOT y GCE/Poly5Aphen) con respecto al electrodo GCE desnudo.

Palabras clave: Electropolimerización, Disolventes Eutécticos Profundos, PEDOT, Poly5Aphen, Electrodo Carbón Vítreo

Electropolymerization of EDOT and 5-amino-1,10-phenanthroline in DES for the modification of electrochemical sensors

Abstract: The modification of electrodes with conducting polymers synthesized by electropolymerization in deep eutectic solvents (DES) represents a promising strategy for the development of electrochemical sensors. Therefore, in this work, the surface of a glassy carbon electrode (GCE) was modified with the polymer of the molecule 3,4-ethylenedioxyphenol (EDOT) to form PEDOT or the molecule 5-amino-1,10-phenanthroline (5Aphen) to form Poly5Aphen, starting from a deep eutectic solvent based on choline chloride and urea (reline). The results obtained by cyclic voltammetry (CV) showed that it is possible to polymerize EDOT and 5Aphen on the surface of the GCE using a DES. On the other hand, using the Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) characterization techniques, a microstructural and morphological analysis, as well as an elemental analysis of the GCE electrode modified with PEDOT and Poly5Aphen, was performed, which suggested a homogeneous electrodeposition of the conductive polymer on the GCE electrode. In addition, it was possible to increase the electroactive area of the GCE electrode modified with the conductive polymers (GCE/PEDOT and GCE/Poly5Aphen) with respect to the bare GCE electrode.

Keywords: Electropolymerization, Deep eutectic solvents, PEDOT, Poly5Aphen, Glassy Carbon Electrode

Introducción

La modificación de electrodos con polímeros conductores (PCs) a partir de técnicas electroquímicas se ha consolidado como una estrategia versátil para diseñar superficies con alta área electroactiva, cinética de transferencia de carga favorable y selectividad química ajustable, todas ellas propiedades cruciales en sensores electroquímicos dirigidos a analitos biológicamente relevantes como la dopamina (DA). En este contexto, el empleo de disolventes eutécticos profundos (deep eutectic solvents, DES) como medio de electrosíntesis ha emergido como alternativa “verde” y funcional a los solventes orgánicos y a los líquidos iónicos, al ofrecer baja volatilidad y toxicidad, ventanas electroquímicas amplias, elevada solubilidad para monómeros y sales, y microambientes iónicos capaces de modular la nucleación, crecimiento y dopaje de películas poliméricas (Roda *et al.*, 2019; Brett, 2024; Urvika *et al.*, 2025). Dichas características permiten obtener recubrimientos con morfología y propiedades electroquímicas mejoradas,

incrementando sensibilidad y estabilidad en plataformas de sensado. En particular, se ha demostrado que la electropolimerización en DES favorece el control de espesor, rugosidad y conductividad de la película, con impactos directos en el límite de detección y la resolución voltamétrica frente a interferentes como ácido ascórbico y ácido úrico, típicamente presentes en matrices fisiológicas (Nahar *et al.*, 2021; Nam *et al.*, 2023; Brett, 2024).

Entre los monómeros de mayor interés, el 3,4-etilendioxitiofeno (EDOT) es un estándar de referencia para generar poli(3,4-etilendioxitiofeno) (PEDOT), un polímero tipo p con alta conductividad y biocompatibilidad. El uso de DES por ejemplo, etalina como medio de polimerización de EDOT ha permitido, desde los primeros reportes, fabricar electrodos PEDOT con mayor sensibilidad y respuesta analítica en comparación con medios acuosos u orgánicos convencionales, abriendo camino a sensores robustos de fenoles, catecoles y neurotransmisores (Prathish *et al.*, 2014). En la última década, PEDOT y sus híbridos (p. ej., PEDOT-PPy o PEDOT:PSS sobre carbones nanoestructurados) han mostrado detección de DA a niveles nano-/micromolares, con ventanas lineales amplias, buena reproducibilidad y selectividad frente a interferencias redox co-existentes (Kao *et al.*, 2024; Makaluza *et al.*, 2025; Sanmugam *et al.*, 2025). Estos avances se explican por la elevada densidad de sitios activos, la conductividad de la película dopada y la compatibilidad del polímero con estrategias de funcionalización superficial que facilitan la preconcentración y reconocimiento (Chen *et al.*, 2024; Khan *et al.*, 2024).

De forma complementaria, los polímeros derivados de 5-amino-1,10-fenantrolina (5Aphen) constituyen una familia menos explorada pero prometedora. La 5Aphen, ya sea libre o como ligando en complejos de Fe(II)/Ru(II), se electropolimeriza sobre sustratos de carbono y metales generando películas redox-activas y conductoras; su capacidad fenantrolínica aporta sitios quelantes y centros mediadores que pueden promover la transferencia electrónica, relevantes para la discriminación de catecolaminas (Bachas *et al.*, 1997; Cobos-Murcia *et al.*, 2005; Brown *et al.*, 2011; Brown *et al.*, 2020). Por lo tanto, la electropolimerización de 5Aphen en DES surge como una ruta viable que combina un microentorno iónico con la química de coordinación del polímero, con el objetivo de maximizar la sensibilidad y selectividad hacia la DA en presencia de ácido ascórbico y ácido úrico (Meng *et al.*, 2021; Sanmugam *et al.*, 2025).

Por ello, en este trabajo se modificó electroquímicamente un electrodo de carbono vítreo (GCE) con el polímero de la molécula 3,4 etilendioxinofeno (EDOT) para formar PEDOT y de la molécula 5-amino-1,10-fenantrolina (5Aphen) para formar Poly5Aphen a partir de un DES y su potencial aplicación como agentes modificantes de sensores electroquímicos en la detección de moléculas orgánicas de interés biológico como la dopamina.

Materiales y Métodos

Preparación del DES

La preparación del DES (Relina) consiste en una mezcla de Cloruro de Colina (Sigma-Aldrich, pureza $\geq 98\%$) y Urea (Sigma-Aldrich, pureza $\geq 98\%$) en una relación molar 1:2 para obtener un volumen final de 60 mL. La mezcla se mantiene en agitación constante durante 2 horas a 60 °C hasta obtener un líquido transparente y homogéneo. Finalmente, la mezcla se deja enfriar a temperatura ambiente.

Modificación del electrodo GCE con PEDOT (GCE/PEDOT)

La electropolimerización del EDOT (PEDOT) sobre la superficie del electrodo de carbón vítreo (GCE) se realizó siguiendo la metodología y condiciones experimentales propuestas por Prathish *et al.* (2014; 2016), la cual consiste en ciclar periódicamente el PC sobre un GCE utilizando una disolución 10 mM de EDOT a partir del DES en presencia de 4 M de HClO₄ mediante la técnica de voltamperometría cíclica (VC). Para ello, se empleó una celda convencional de tres electrodos: un alambre de plata como electrodo de pseudoreferencia (QRE), una barra de grafito como contraelectrodo (CE) y un electrodo de carbón vítreo (GCE) como electrodo de trabajo (WE). Las pruebas de VC se realizaron en un intervalo de potencial de -0.6 a 1.0 V a una velocidad de barrido de potencial de 50 mVs⁻¹ durante 15 ciclos. Se evaluó la sensibilidad del PEDOT como sustrato para la detección de ácido ascórbico (AA) a partir de la electropolimerización del EDOT en diferentes mezclas eutécticas, incluida la relina (Prathish *et al.*, 2014).

Modificación del electrodo GCE con Poly5Aphen (GCE/Poly5Aphen)

La electropolimerización de la 5Aphen para formar Poly5Aphen sobre la superficie del GCE, consistió en aplicar una metodología similar a la empleada en la electropolimerización del EDOT. El método consistió en ciclar periódicamente la 5Aphen sobre el GCE mediante VC a 60 °C para el sistema GCE/5Aphen (1 mM) en DES. Para ello, se empleó una celda convencional de tres electrodos: un alambre de plata como electrodo de pseudoreferencia (QRE), una barra de grafito como contraelectrodo (CE) y un electrodo de carbón vítreo (GCE) como electrodo de trabajo (WE). La electropolimerización por VC se realizó en un intervalo de potencial de -1.5 a 1.8 V a una velocidad de barrido de potencial de 50 mVs⁻¹ durante 10 ciclos. Debido a la limitada investigación con respecto a la electropolimerización de la 5Aphen, las condiciones anteriores se eligieron tomando como referencia la investigación de Cobos-Murcia *et al.* (2005) para la electropolimerización de la 5Aphen sobre diferentes sustratos a partir de un medio acuoso.

Cálculo del Área Electroactiva

El cálculo del área real electroactiva del electrodo GCE desnudo y de los electrodos modificados con el PC (GCE/PEDOT y GCE/Poly5Aphen) empleando las técnicas de VC y cronoamperometría (CA) se llevó a cabo en una celda electroquímica de tres electrodos y 25 mL de una disolución 4 mM de Hexacianoferrato (III) de Potasio o Ferricianuro de Potasio (K₃Fe(CN)₆). En el estudio potenciodinámico se consideró una velocidad de barrido de potencial de 50 mVs⁻¹ en un intervalo de potencial de -1.0 a 1.2 mV en sentido catódico con un potencial de inicio de 1.2 mV, tanto para el electrodo GCE desnudo como para los electrodos modificados (GCE/PEDOT y GCE/Poly5Aphen). Mientras que para el estudio potencioestático se aplicó un potencial de 105 mV para el GCE desnudo, 194 mV para el electrodo GCE/Poly5Aphen y 106 mV para el electrodo GCE/PEDOT, con una duración de 60 segundos en todos los casos.

Resultados y Discusión

En la Figura 1 se muestra el voltamperograma del blanco, correspondiente al GCE desnudo de una muestra a 60 °C de DES puro o en ausencia del monómero. Como se puede observar, solo se registran las corrientes capacitivas del electrodo empleado. Por lo que se asegura que las señales obtenidas por VC tras la electrosíntesis del PC sobre la superficie del GCE corresponden únicamente a las señales conductoras del polímero y no a las del propio GCE y/o del medio electrolítico, como se muestra en las siguientes figuras.

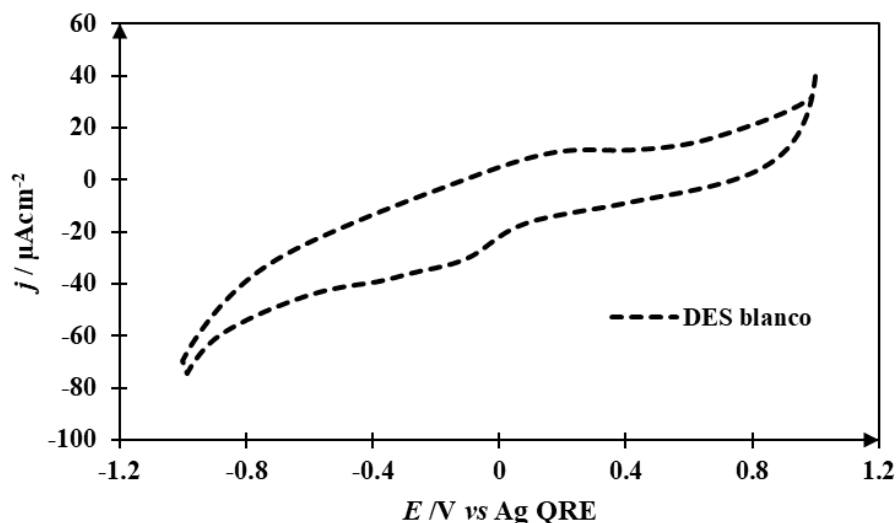


Figura 1. VC correspondiente al GCE desnudo en DES puro a 60 °C (blanco) en un intervalo de potencial de -1.0 a 1.0 V en sentido anódico a una velocidad de barrido de 50 mVs⁻¹.

Las Figuras 2 y 3 muestran la respuesta voltamperométrica registrada durante la electropolimerización de EDOT y 5Aphen sobre la superficie del GCE, respectivamente. Los voltamperogramas cíclicos de la Figura 2 y 3 en comparación con el voltamperograma correspondiente al GCE sin modificar en DES puro (ver Figura 1), demuestran que los máximos

y mínimos presentes en la Figura 2 y 3 son señales asociadas únicamente a la oxidación y reducción en el proceso de electropolimerización del EDOT y 5Aphen sobre la superficie del electrodo.

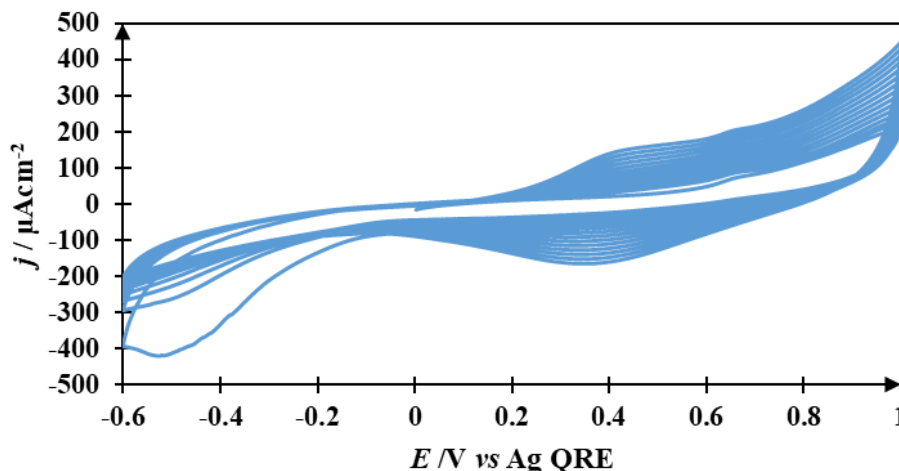


Figura 2. VCs (15 ciclos) obtenidos a 60 °C en el sistema GCE/10 mM de EDOT, 4 M de HClO₄ en DES. A una velocidad de barrido de potencial de 50 mVs⁻¹ y con un potencial de inicio de 0.0 V en sentido anódico.

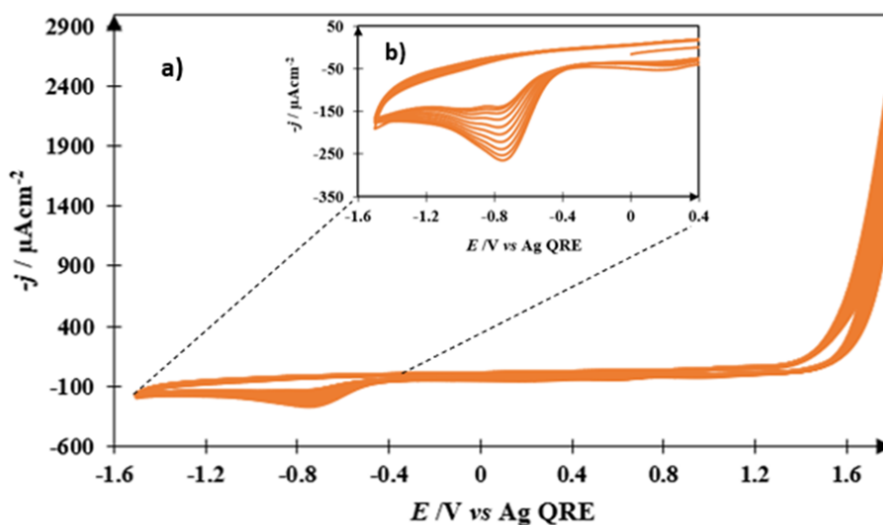


Figura 3. a) VCs (10 ciclos) obtenidos a 60 °C en el sistema GCE/ 1 mM de 5Aphen en DES. A una velocidad de barrido de potencial de 50 mVs⁻¹ y con un potencial de inicio de 0.0 V en sentido anódico. b) acercamiento de la zona de reducción del VC mostrado en el inciso a).

Asimismo, con la Figura 2 y 3 se puede observar que tanto en la electropolimerización de EDOT como de 5Aphen, la corriente de pico (i_p) incrementa conforme aumenta el número de ciclos, lo cual es un comportamiento típico en la formación de PCs (Prathish *et al.*, 2014; Brett, 2024), debido a que con cada ciclo de barrido de potencial aplicado se promueve la formación de nuevas capas del PC sobre las capas ya formadas en la superficie del GCE con los ciclos anteriores, lo que consecuentemente se verá reflejado en un incremento de la corriente y de la carga Q acumulada tanto en la zona anódica como en la zona catódica. Por otro lado, los resultados del área real electroactiva del electrodo GCE desnudo y de los electrodos modificados (GCE/PEDOT y GCE/Poly5Aphen) se obtuvieron mediante VC y CA en un sistema de Hexacianoferrato (III) de potasio a 25 °C. En el caso de la determinación por VC, se empleó la Ecuación 1 de Randles-Sevcik. Mientras que la determinación por CA, se empleó la Ecuación 2 o ecuación de Cottrell.

$$i_p = (2.39 \times 10^{-5}) n^{3/2} A D^{1/2} C^* v^{1/2} \quad (1)$$

$$i_p = ((z F A D^{1/2} C) / \pi^{1/2}) (t^{-1/2}) \quad (2)$$

Donde: A_r es el área real electroactiva (cm^2), Z o n es el número de electrones intercambiados, F es la Constante de Faraday (C/mol), D es el coeficiente de difusión (cm^2/s), C es concentración (mol/cm^3), t es el tiempo (s), i_p es la corriente de pico (A) y v es la velocidad de barrido de potencial (V/s).

La Ecuación 1 puede resolverse por diferentes métodos en donde finalmente se obtiene una relación en la corriente máxima alcanzada anódica o catódica, (i_p) es proporcional a C^* y $v^{1/2}$. Y de la cual podemos despejar la A_r como se muestra en la Ecuación 3, que también se le conoce como la ecuación de Randles-Sevcik.

$$A_r = i_p / ((2.69 \times 10^5) * n^{\frac{3}{2}} * D^{\frac{1}{2}} * C * v^{1/2}) \quad (3)$$

Para la determinación del A_r electroactiva por CA se fijó el potencial inicial con el valor de potencial al cual se obtuvo toda la reducción del Hexacianoferrato (III) de Potasio en la prueba de VC, es decir, el potencial asociado a la corriente de pico (i_p) catódico. A partir de los resultados del CA, se graficó la corriente en función de $t^{1/2}$ y se obtuvieron líneas rectas que se ajustan a la ecuación de Cottrell (Ecuación 2) de cuya pendiente se puede despejar el área real electroactiva, tal y como se muestra en la Ecuación 4.

$$A_r = (m * \pi^{\frac{1}{2}}) / (zFD^{1/2}C) \quad (4)$$

Por lo tanto, a partir de la Ecuación 3 y 4 se obtuvo el área real electroactiva (A_r) para cada uno de los electrodos estudiados los cuales se resumen en la Tabla 1 considerando un área geométrica (A_g) de 0.1963 cm^2 , número de electrones intercambiados $Z=1$, un coeficiente de difusión del hexacianoferrato (III) de potasio $D=7.6\text{E-}6 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ y una velocidad de barrido de potencial de 0.05 Vs^{-1} .

La Tabla 1 muestra los resultados del área real electroactiva del electrodo GCE desnudo y de los electrodos modificados (GCE/PEDOT y GCE/Poly5Aphen). En donde se puede ver que el área electroactiva incremento ligeramente en ambos electrodos modificados con respecto al electrodo GCE desnudo. Sin embargo, esto abre la oportunidad de explorar en estudios futuros la integración de la electropolimerización de PCs y electrodeósitos de nanopartículas metálicas (MNPs) para mejorar el área electroactiva de los sensores electroquímicos.

Tabla 1. Comparación de los Valores del Área Real Electroactiva, A_r

Electrodo/Sustrato	Método Aplicado	A_r reportada (cm^2)	Referencia
GCE modificado con PEDOT	Ecuación de Randles–Sevcik (VC) y Cottrell (CA) en una solución de $(\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6)$.	GCE desnudo: 520 (VC) y 0.549 (CA) & CGE/PEDOT: 533 (VC) y 0.553 (CA)	Este trabajo
GCE modificado con Poly5Aphen	Ecuación de Randles–Sevcik (VC) y Cottrell (CA) en una solución de $(\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6)$.	GCE desnudo: 520 (VC) y 0.549 (CA) & CGE/Poly5Aphen: 654 (VC) y 0.554 (CA)	Este trabajo
GCE modificado con Gr-PEDOT: PSS nanocomposite	Ecuación de Randles–Sevcik con par ferro/ferricianuro; escaneos de VC a varios scan rates.	GCE desnudo: 0.1008 & GCE/Gr-PEDOT: PSS: 0.675	Makaluza <i>et al.</i> , 2025
GCE modificado con PEDOT + esferas de carbón	Ecuación de Randles–Sevcik con par ferro/ferricianuro; relación i_p vs. $v^{1/2}$	PEDOT/carbon sphere/GCE: 0.470	Ma <i>et al.</i> , 2025
GCE vs GCE/PEDOT: PSS	Randles–Sevcik; VC en solución de $\text{Fe}(\text{CN})_6$ en KCl; diferentes scan rates.	GCE: 0.106 & GCE/PEDOT: PSS: 0.250	Hossain <i>et al.</i> , 2023

Finalmente, con el fin de comprobar que el GCE desnudo fue modificado con los PCs a partir del DES, se realizó un análisis microestructural y morfológico, así como un análisis elemental del electrodo GCE desnudo (ver Figura 4), en la Figura 5 se presenta el electrodo GCE después del proceso de electropolimerización de EDOT y en la Figura 6 el respectivo al GCE con la película de Poly5Aphen.

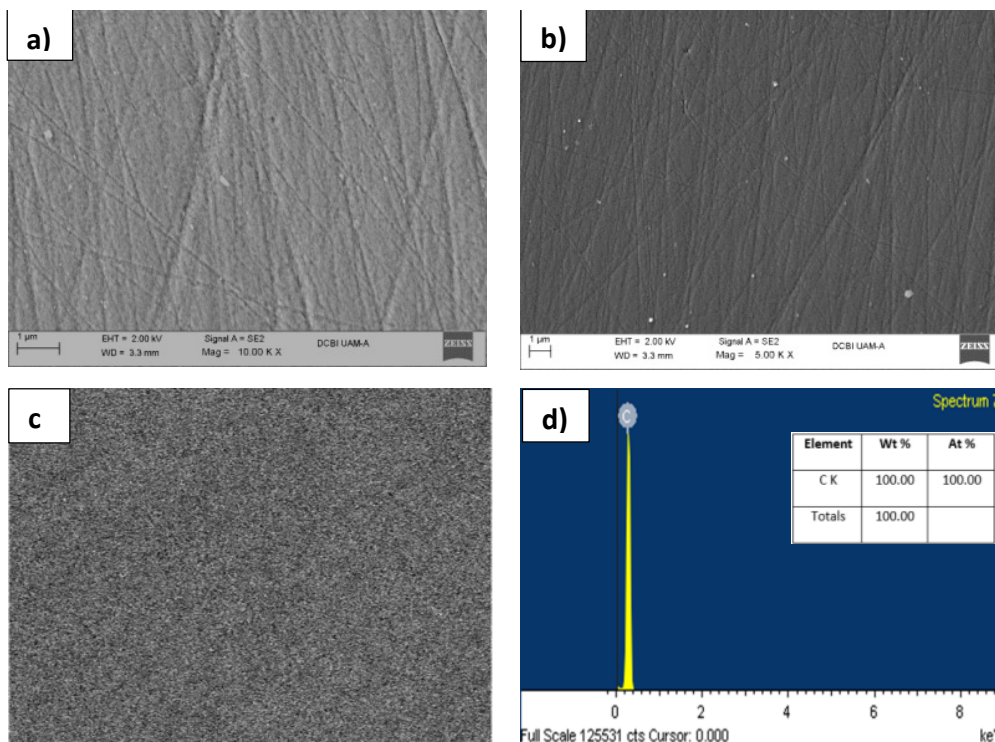


Figura 4. Micrografía obtenida por MEB a: a) 10.0 kX y b) 5.0 kX, c) Distribución elemental por mapeo y d) Espectro del análisis elemental mediante EDS correspondiente al electrodo GCE desnudo

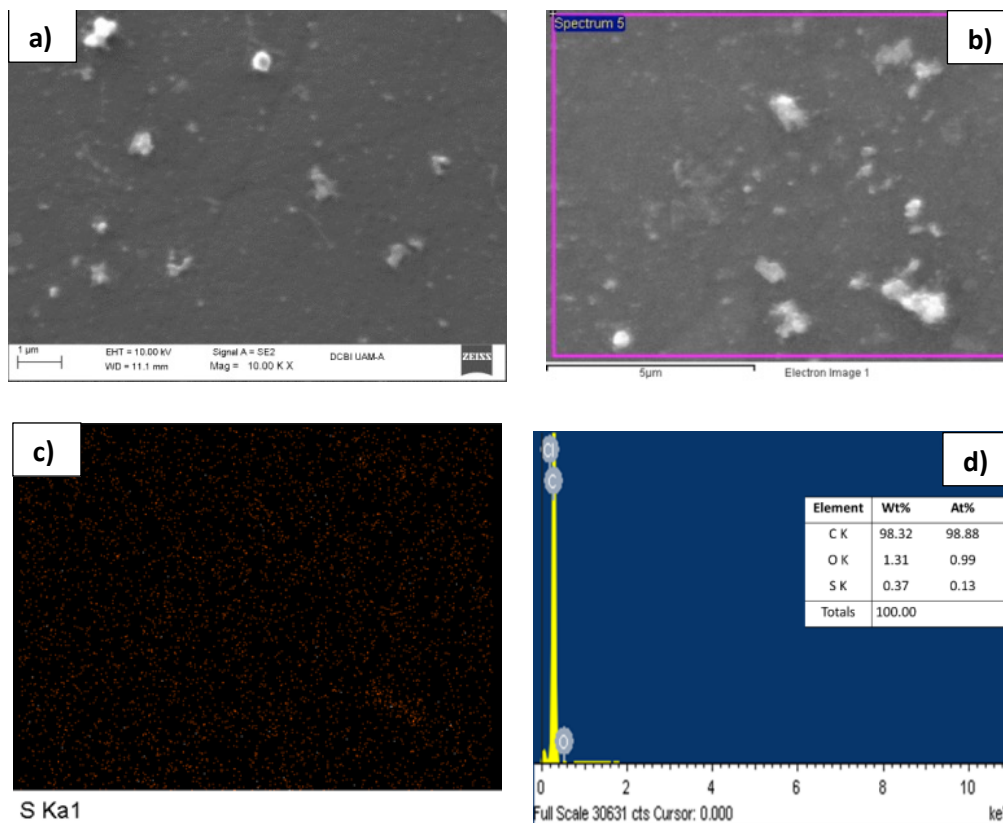


Figura 5. Micrografía obtenida por MEB a) 10.0 kX, b) Análisis por EDS sobre la superficie del electrodo GCE/PEDOT, c) distribución elemental por mapeo resaltando en color verde la distribución de S presente en el compuesto organosulfurado (tiofeno) presente en la cadena polimérica del PEDOT y d) Espectro del análisis elemental mediante EDS correspondiente al electrodo GCE/PEDOT

Los resultados mostrados en la Figura 5 correspondientes a la caracterización microestructural y análisis elemental por EDS y por mapeo sobre la superficie del electrodo GCE/PEDOT, se demostró la presencia de azufre (S), el cual forma parte del compuesto organosulfurado (tiofeno) presente en la cadena polimérica del PEDOT (ver Figura 5c y Figura 5d). Es importante resaltar que el análisis elemental por mapeo demostró también una distribución homogénea de S, lo cual podría sugerir una electrodeposición homogénea de PEDOT sobre la superficie del electrodo GCE/PEDOT (ver Figura 5d). Al comparar estos resultados con los obtenidos para el electrodo GCE desnudo (ver Figura 4) se puede demostrar que fue posible modificar la superficie del GCE con PEDOT utilizando un disolvente eutéctico.

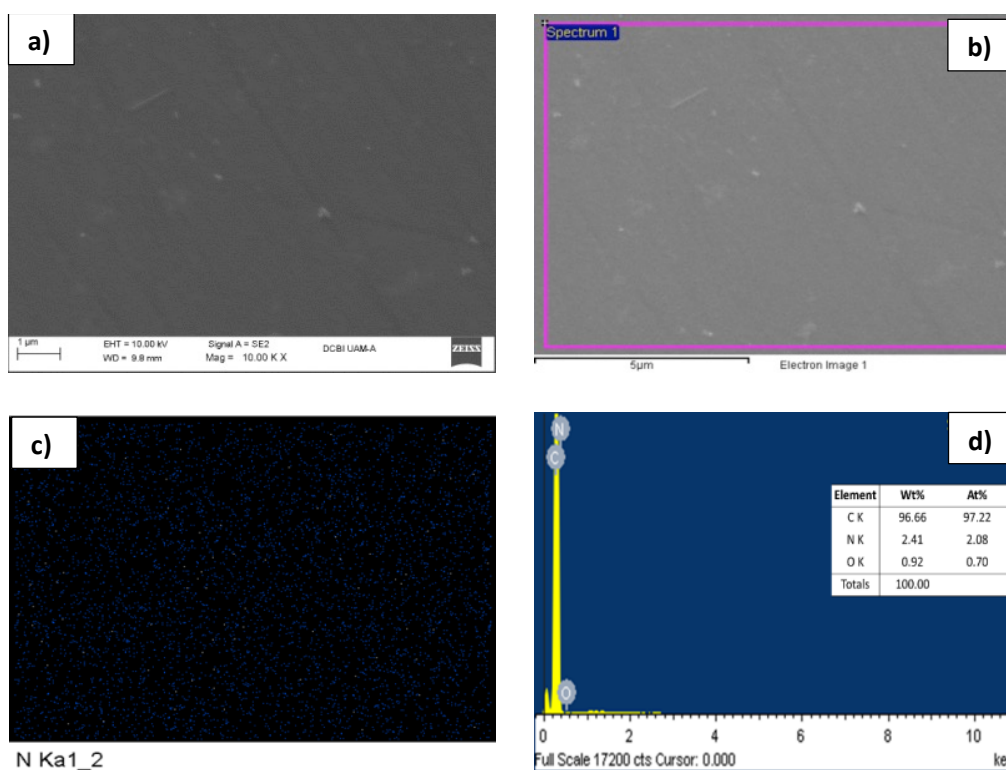


Figura 6. Micrografía obtenida por MEB a) 10.0 kX, b) Análisis por EDS sobre la superficie del electrodo GCE/Poly5Aphen, c) distribución elemental por mapeo resaltando en color azul la distribución de N de los grupos amino presentes en la cadena polimérica de la Poly5Aphen y d) Espectro del análisis elemental mediante EDS correspondiente al electrodo GCE/Poly5Aphen

Por otro lado, el análisis elemental por EDS y por mapeo sobre la superficie del electrodo GCE/Poly5Aphen, reveló la presencia de nitrógeno (N), el cual forma parte de los grupos amino presentes en la cadena polimérica de la Poly5Aphen (ver Figura 6c y Figura 6d). Es importante resaltar que el análisis elemental por mapeo demostró también una distribución homogénea de N, lo cual podría sugerir una electrodeposición homogénea de la Poly5Aphen sobre la superficie del electrodo GCE/Poly5Aphen (ver Figura 6d). Al comparar estos resultados con los obtenidos para el electrodo GCE desnudo (ver Figura 4), se puede demostrar que al igual que con el PEDOT, fue posible modificar la superficie del electrodo GCE con Poly5Aphen utilizando un DES.

En comparación con estudios previos de la electrosíntesis de PCs en medios acuosos (Cobos-Murcia *et al.*, 2005; Kao *et al.*, 2024; Makaluza *et al.*, 2025), los polímeros sintetizados en este trabajo a partir de un DES mostraron una electrodeposición más homogénea y un incremento moderado del área electroactiva con respecto al GCE desnudo. Asimismo, la obtención de Poly5Aphen sobre GCE se había estudiado únicamente en medio acuoso o solventes orgánicos (Bachas *et al.*, 1997; Cobos-Murcia *et al.*, 2005; Brown *et al.*, 2011), por lo que la electropolimerización de la 5Aphen en un DES no había sido reportada previamente, así como tampoco se había reportado el área electroactiva obtenida tras la modificación de un GCE con Poly5Aphen, demostrando que estos medios pueden favorecer la nucleación y dopaje uniforme de polímeros nitrogenados, lo que abre nuevas rutas para el diseño de sensores sustentables.

Además, los resultados del área electroactiva determinados en este trabajo tras la modificación del GCE con PEDOT o Poly5Aphen son consistentes con la literatura que emplea la ecuación de Randles–Sevcik para estimar el área a partir de VC en el par $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}/4-$. Por ejemplo, en un estudio sobre Gr-PEDOT:PSS nanocomposite, el área electroactiva subió desde 0.1008 cm^2 para el GCE desnudo hasta 0.6750 cm^2 tras la modificación (Makaluza *et al.*, 2025). En otro ejemplo con PEDOT-esferas de carbono, el área electroactiva reportado fue 0.478 cm^2 en GCE modificado, lo cual resalta el efecto de materiales carbonosos para aumentar la superficie activa (Ma *et al.*, 2025). También, un estudio clásico con GCE/PEDOT:PSS mostró un aumento desde 0.106 cm^2 hasta 0.257 cm^2 tras la modificación (Hossain *et al.*, 2023). Estos ejemplos indican que la magnitud del incremento depende fuertemente de la morfología de la película formada, la presencia de materiales con alta superficie (carbono, grafeno, etc.), la porosidad y los parámetros de electrodeposición. En este sentido, nuestro aporte específico incluye: (i) la electropolimerización homogénea de PEDOT y Poly5Aphen empleando un DES como la relina, lo cual puede favorecer uniformidad de recubrimiento; y (ii) aun cuando el incremento absoluto del área electroactiva en nuestro sistema sea moderado, la uniformidad de la electrodeposición en DES y la presencia del grupo amino en la Poly5Aphen constituyen aportes novedosos que pueden favorecer reproducibilidad y funcionalidad electroquímica del recubrimiento en aplicaciones de sensado. Además, subrayamos la importancia de reportar parámetros críticos (coeficiente de difusión usado, condiciones experimentales y método de cálculo) para permitir comparaciones cuantitativas entre trabajos.

Conclusiones

En este trabajo se demostró que es posible electropolimerizar de manera homogénea un PC como el PEDOT y la Poly5Aphen sobre un GCE mediante el uso de un DES. Además, se comprobó tanto por la ecuación de Randles–Sevcik y Cottrell que es posible incrementar el área electroactiva del electrodo GCE desnudo al modificarlo con los polímeros conductores (GCE/PEDOT y GCE/Poly5Aphen), lo cual abre una vía prometedora para estudios futuros en la fabricación de sensores electroquímicos de alto rendimiento para la detección de dopamina.

Limitaciones: en este trabajo no se realizaron pruebas para la detección de un analito de interés biológico como la dopamina (DA). Sin embargo, los resultados encontrados en este trabajo abren camino para nuevas investigaciones con respecto a la evaluación de la sensibilidad de los electrodos modificados (GCE/PEDOT y GCE/Poly5Aphen) en la detección de moléculas de interés biológico como neurotransmisores o inclusive fármacos. Así como en el uso de los DES como una alternativa sustentable de medio electrolítico en la modificación de sensores electroquímicos.

Agradecimientos y financiamiento: EGC agradece al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por el apoyo otorgado para la realización de una cátedra de investigación mediante el programa de Investigadoras e Investigadores COMECYT, al Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE) y a la UAM-Azcapotzalco y al posgrado en Ciencias e Ingeniería de Materiales.

Bibliografía

- Bachas, L. G., Cullen, L., Hutchins, R. S., & Scott, D. L. (1997). Synthesis, characterization and electrochemical polymerization of eight transition-metal complexes of 5-amino-1,10-phenanthroline. *Journal of the Chemical Society, Dalton Transactions*, (9), 1571–1578. <https://doi.org/10.1039/A608468K>
- Brett, C. M. A. (2024). Perspectives for the use of deep eutectic solvents in the preparation of electrochemical sensors and biosensors. *Current Opinion in Electrochemistry*, 45, 101465. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2024.101465>
- Brown, K. L., Hou, X., Banks, O., Krueger, K. A., Hinson, J., Peaslee, G. F., DeYoung, P. A., Alger, S. M., Benzer, J., & Neils, T. L. (2011). Characterization of tris(5-amino-1,10-phenanthroline) ruthenium (II/III) polymer films using cyclic voltammetry and Rutherford backscattering spectrometry. *International Journal of Chemistry*, 3(4), 12–23. <https://doi.org/10.5539/ijc.v3n4p12>
- Brown, K. L., Danforth, R., Bleitz, E., Hwang, Y., & Rens, D. (2020). Cyclic voltammetric and spectroelectrochemical studies of tris(5-amino-1,10-phenanthroline) iron (II) polymer films. *International Journal of Electrochemical Science*, 15(11), 10707–10721. <https://doi.org/10.20964/2020.11.66>
- Cobos-Murcia, J. A., Galicia, L., Rojas-Hernández, A., Ramírez-Silva, M. T., Álvarez-Bustamante, R. A., Romero-Romo, M., Rosquete-Pina, G., & Palomar-Pardavé, M. (2005). Electrochemical polymerisation of 5-amino-1,10-phenanthroline onto different substrates: Experimental and theoretical study. *Polymer*, 46(21), 9053–9063. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.07.026>
- Hossain, M. S., Khaleque, M. A., Ali, M. R., Bacchu, M. S., Hossain, M. I., Aly, S. A. M., & Khan, M. Z. H. (2023). Poly(3,4-ethylenedioxythiophene): Polystyrene sulfonate-modified electrode for the detection of furosemide in pharmaceutical products. *ACS Omega*, 8(19), 16851–16858. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00463>
- Kao, T. Y., Kuo, C. H., Wu, Y. W., & Luo, S. C. (2024). Enhanced electrochemiluminescence detection of dopamine using antifouling PEDOT-modified SPEs for complex biological samples. *ACS Measurement Science Au*, 4(6), 712–720. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00053>

- Ma, L., Wang, Z., Liu, X., Xu, F., & Abdiryim, T. (2025). High sensitivity and selectivity of PEDOT/carbon sphere composites for Pb²⁺ detection. *Molecules*, 30(4), 798. <https://doi.org/10.3390/molecules30040798>
- Makaluza, S., Midzi, N., Olorundare, F. O. G., Zwane, B. N., Nkosi, D., & Arotiba, O. A. (2025). An electrochemical sensor for dopamine on a graphene–PEDOT:PSS hybrid ink nanoplatform. *SN Discover Applied Sciences*, 7, 694. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06694-y>
- Meng, S., Liu, Y., Wang, L., Ji, X., Chen, Y., Zheng, T., Yu, J., & Feng, H. (2021). Graphene-based flexible sensors for simultaneous detection of ascorbic acid, dopamine, and uric acid. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 726071. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.726071>
- Nahar, Y., & Thickett, S. C. (2021). Greener, faster, stronger: The benefits of deep eutectic solvents in polymer and materials science. *Polymers*, 13(3), 447. <https://doi.org/10.3390/polym13030447>
- Nam, N. N., Do, H. D. K., Trinh, K. T. L., & Lee, N. Y. (2023). Design strategy and application of deep eutectic solvents for green synthesis of nanomaterials. *Nanomaterials*, 13(7), 1164. <https://doi.org/10.3390/nano13071164>
- Prathish, K. P., Carvalho, R. C., & Brett, C. M. A. (2014). Highly sensitive poly(3,4-ethylenedioxythiophene) modified electrodes by electropolymerisation in deep eutectic solvents. *Surface and Coatings Technology*, 251, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2014.03.026>
- Prathish, K. P., Carvalho, R. C., & Brett, C. M. A. (2016). Electrochemical characterisation of poly(3,4-ethylenedioxythiophene) film modified glassy carbon electrodes prepared in deep eutectic solvents for simultaneous sensing of biomarkers. *Electrochimica Acta*, 187, 704–713. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.11.092>
- Roda, A., Matias, A. A., Paiva, A., & Duarte, A. R. C. (2019). Polymer science and engineering using deep eutectic solvents. *Polymers*, 11(5), 912. <https://doi.org/10.3390/polym11050912>
- Sanmugam, A., Vanitha, C., Almansour, A. I., Karuppasamy, K., Maiyalagan, T., Kim, H.-S., Vikraman, D., & Alfantazi, A. (2025). Unveiling the PEDOT–polypyrrole hybrid electrode for the electrochemical sensing of dopamine. *Scientific Reports*, 14, 10989. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82355-1>
- Urvika, Gaba, R., & Kataria, R. (2025). Deep eutectic solvents: Fundamentals and applications. En *Deep Eutectic Solvents* (ACS Symposium Series, Vol. 1504, Cap. 1, pp. 1–29). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-2025-1504.ch001>