

Síntesis y caracterización de hidrogeles de PVA-Bórax con conductividad iónica

Andrea H. del Rio¹, J. Antonio Muñoz-Gómez², Daniel E. Ramírez-Arreola²

¹Estudiante Posgrado Ciencia e Ingeniería de Materiales, Departamento de Ingenierías, Universidad de Guadalajara, Av. Independencia Nacional 151, Autlán, Jalisco, México

²Departamento de Ingenierías, Universidad de Guadalajara, Av. Independencia Nacional 151, Autlán, Jalisco, México

Resumen: Los dispositivos electrónicos basados en silicio han sido la solución ideal para el desarrollo de circuitos y sensores electrónicos. Sin embargo, estos materiales son rígidos y frágiles, lo que ha impulsado el desarrollo de nuevos materiales con propiedades dúctiles y conductoras. Este trabajo aborda la síntesis de hidrogeles con propiedades conductoras iónicas como una propuesta de materiales conductivos para el área de la electrónica flexible. Los hidrogeles se obtuvieron a base de alcohol polivinílico (PVA) entrecruzados con tetraborato de sodio (Bórax) mediante la técnica de casting. Se evaluaron seis formulaciones con distintas proporciones de PVA (0.6 y 1.4 g) y Bórax (0.2, 0.6 y 1 g). Los hidrogeles se sumergieron en soluciones electrolíticas de cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de calcio (CaCl₂) para inducir la conductividad iónica. La caracterización de los hidrogeles PVA-Bórax se realizó con pruebas de hinchamiento, espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) y microscopía de barrido electrónico (SEM), lo que permitió una mejor comprensión de los mecanismos de absorción que mejoran su capacidad para retener líquido. Finalmente, se evaluó la conductividad iónica de los hidrogeles utilizando la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), otorgando datos experimentales que fueron explicados utilizando el modelo llamado Randles, mostrando un desempeño prometedor en la conductividad iónica detectada en los hidrogeles.

Palabras clave: hidrogeles conductivos, PVA-Bórax, conductividad iónica, electrónica flexible, espectroscopía de impedancia.

1. Introducción

La electrónica basada en silicio ha sido la solución *ad hoc* para el desarrollo de dispositivos electrónicos, sensores y circuitos. Sin embargo, el silicio como otros materiales semiconductores inorgánicos presentan limitaciones para ciertas aplicaciones como las altas temperaturas de fabricación, rigidez mecánica, fragilidad y baja sensibilidad [1]. Estas características han impulsado el desarrollo de nuevos materiales con propiedades dúctiles y conductoras. En las últimas décadas, se han desarrollado hidrogeles conductivos que constituyen una opción prometedora en la electrónica flexible. Estos nuevos materiales son blandos y flexibles, con propiedades comparables a las de los tejidos biológicos, adecuados para aplicaciones biomédicas [2,3].

Los hidrogeles son geles poliméricos hidrofílicos formados por una red tridimensional que tiene la capacidad de absorber agua sin disolverse [4]. Los hidrogeles han estado presentes desde los inicios de la vida en la Tierra. Las biopelículas bacterianas y las estructuras vegetales tienen la capacidad de absorber agua, por lo que presentan hinchamiento. Esto les proporciona un mecanismo de supervivencia que permite la dosificación controlada del agua en periodos de sequía. Este comportamiento ha motivado el desarrollo de materiales sintéticos con propiedades similares.

De 2013 a 2024, el número total de publicaciones sobre hidrogeles y electrónica flexible ha tenido un crecimiento exponencial como se muestra en, Figura 1. En una década, el número de trabajos relacionados con el diseño y las aplicaciones de los hidrogeles en distintos campos del conocimiento se ha cuadruplicado. Este crecimiento refleja el interés internacional en estos materiales, que presentan propiedades atractivas para el diseño de sensores [6-9].

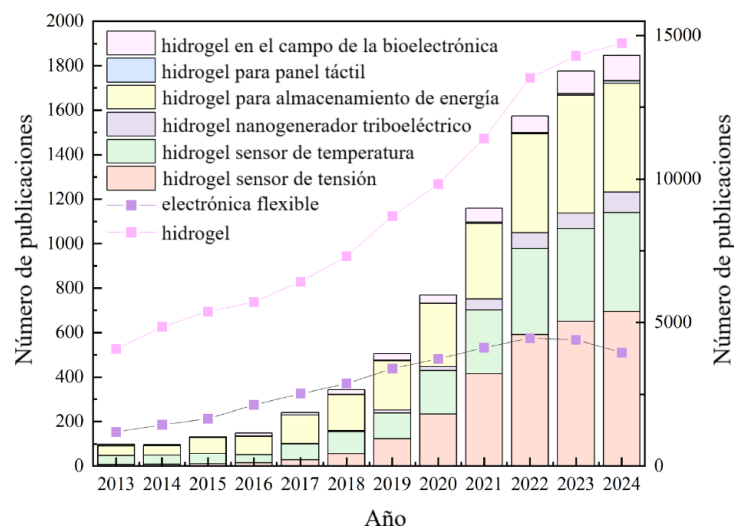


Figura 1. Número total de publicaciones en los últimos 10 años. Según Web of Science, consulta realizada el 17 de diciembre de 2024. Imagen original [9].

Los hidrogeles conductores se pueden clasificar según su mecanismo de conducción: iónicos o electrónicos [10]. La conducción electrónica se logra típicamente mediante la incorporación de nanomateriales, como nanotubos de carbono en la red tridimensional del hidrogel, o mediante la formación de hidrogeles directamente a partir de polímeros conductores [11]. Por su parte, la conducción iónica se obtiene generalmente por medio de soluciones electrolíticas, las cuales son absorbidas por el material o mediante la adición de iones metálicos [12].

Se han publicado diversos estudios que recopilan los avances en el campo de la electrónica flexible basada en hidrogeles. Entre ellos destaca el trabajo de Zhang et al., quien analiza las propiedades y aplicaciones de los hidrogeles conductivos y

proponen una clasificación según la estructura del polímero: hidrogeles de red única y de red dual [13].

Hu et al. muestran una revisión exhaustiva de las aplicaciones más recientes de dispositivos electrónicos flexibles basados en hidrogeles, así como de las relaciones entre las propiedades del hidrogel y el desempeño de los dispositivos. Sin embargo, el uso de estos materiales sigue limitado por restricciones en sus propiedades mecánicas, su biocompatibilidad y su baja conductividad relativa [14].

En el trabajo de Peng et al., se resalta la viabilidad de desarrollar hidrogeles mediante la incorporación de componentes conductores de electrones, como nanopartículas metálicas y polímeros conductores. No obstante, las técnicas de síntesis empleadas y los costos de producción asociados suelen ser complejos y elevados. Asimismo, los autores subrayan que los hidrogeles con conductividad iónica presentan un menor costo de fabricación [12].

En un trabajo reciente, el grupo de Imani et al. investigó diversos métodos convencionales para la fabricación de hidrogeles conductores. Llegaron a la conclusión de que los principales desafíos en estos materiales residen en el desarrollo de un hidrogel conductivo de red única con propiedades combinadas como biocompatibilidad, alta resistencia mecánica, resistencia antimicrobiana, sensibilidad y alta conductividad [15].

En la literatura se describen diversas técnicas de síntesis para elaborar hidrogeles con matriz polimérica, donde se emplean principalmente soluciones iónicas para inducir la conductividad. En el trabajo de X. Di et al., se propone un hidrogel elaborado con alcohol polivinílico (PVA) mediante la técnica de congelamiento, el cual logra una alta conductividad (7.14 S/m) tanto a temperatura ambiente como a temperaturas por debajo de 0 °C [16]. Sin embargo, este método requiere el uso de un ultracongelador, lo que incrementa el costo energético.

En el trabajo de Y. Zhou et al., se emplea PVA como matriz y se agrega hidroxipropilcelulosa (HPC) -- fibras de biopolímero-- para posteriormente sumergir los hidrogeles en una solución salina e inducir la conductividad [17]. Esta propuesta requiere trabajo previo en la selección y preparación de la fibra, lo que incrementa el número de pasos en el proceso de obtención del hidrogel.

En otro artículo, C. Wang et al, resaltan que la elaboración de hidrogeles PVA-Bórax ha demostrado una mayor capacidad de absorción debido al entrecruzamiento químico [18]. Sin embargo, no sumergen los hidrogeles en soluciones electrolíticas y solo analizan su absorción utilizando agua.

A pesar de los avances logrados en esta área de estudio, los cuales se han centrado en analizar la sensibilidad [19], la flexibilidad [16], la capacidad de hinchamiento [20], u otras propiedades mecánicas o químicas [21], aún existe un campo de

desarrollo actual orientado a mejorar la elaboración de hidrogeles con conductividad iónica y a estudiar las variables que inducen el aumento de este tipo de conductividad. Por lo tanto, el desarrollo de nuevos hidrogeles mediante la combinación de polímeros naturales y sintéticos, así como la implementación de nuevas técnicas de síntesis, puede potenciar sus propiedades y mejorar su desempeño.

En este trabajo, se desarrollaron hidrogeles empleando PVA y Bórax mediante la técnica de casting. Para ello, se realizó un experimento con seis formulaciones, utilizando PVA (0.6, 1.4 g) combinadas con Bórax (0.2 g, 0.6 g, 1.0 g). La conductividad iónica fue inducida mediante la inmersión de electrólitos de cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de calcio (CaCl₂). Este trabajo propone un método práctico para la síntesis de hidrogeles con PVA y Bórax. La caracterización de los hidrogeles se realizó mediante pruebas de hinchamiento, espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), microscopía electrónica de barrido y espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS).

El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2, se describe la metodología para la creación de un hidrogel mediante la técnica de casting y entrecruzamiento químico. En la sección 3, se describe la formulación abstracta de las ecuaciones de impedancia para caracterizar la conductividad iónica. Posteriormente, en la Sección 4, se muestran los resultados principales del estudio. Finalmente, en la Sección 5, se exponen las principales conclusiones.

2. Metodología

En esta sección se describe el procedimiento para preparar hidrogeles de PVA-Bórax con conductividad iónica inducida mediante soluciones electrolíticas. El propósito es ofrecer al lector una explicación más clara y accesible del proceso de síntesis y caracterización de estos hidrogeles conductores.

2.1 Diseño experimental

Para llevar a cabo la síntesis de los hidrogeles se utilizó alcohol polivinílico (PVA) y tetraborato de sodio (Bórax) empleando la técnica de casting [20]. Las soluciones iónicas se prepararon con cloruro de calcio (CaCl₂, 95% de pureza) y con cloruro de sodio (NaCl, 96% de pureza).

En la Figura 2, se visualiza el diseño experimental para la determinación de la mejor formulación del hidrogel, siendo los parámetros de estudio la capacidad de hinchamiento y su conductividad iónica.

La matriz del hidrogel está conformada por PVA, el cual es un polímero que contiene una gran cantidad de grupos hidroxilo, por lo que es soluble en agua. El ácido bórico es el entrecruzante al reaccionar con el PVA para formar los enlaces de

éster bórico [18], siendo uno de los objetivos el dotar de propiedades mecánicas funcionales a la composición óptima.

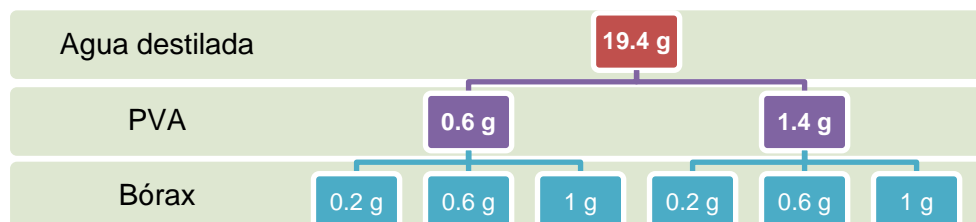


Figura 2. Diseño experimental para la formulación de hidrogeles PVA-Bórax.

El diseño experimental propuesto considera dos diferentes cantidades para PVA y tres para el Bórax, otorgando un total de seis combinaciones, de las cuales solo se reporta la combinación que obtuvo los mejores resultados durante las pruebas de caracterización.

2.2 Preparación de los hidrogeles

Los componentes principales de cada formulación se pesaron utilizando una balanza analítica de alta precisión marca Sartorius, modelo ENTRIS 224I-1S siguiendo el diseño experimental presentado en la Figura 2. Posteriormente, se diluyó el PVA en un matraz de 200 ml utilizando una placa magnética configurada a 90°C y a 150 rpm para mantener una temperatura y una agitación constante durante 40 minutos. En un proceso paralelo se procedió a diluir el Bórax a 80°C y 150 rpm para después incorporarlo al PVA ya diluido. Posteriormente, se vertió la mezcla de PVA con Bórax en una caja de Petri para enfriarlo a una temperatura de 4 °C durante 12 horas. En la Figura 3 se presentan los pasos simplificados para preparar los hidrogeles.

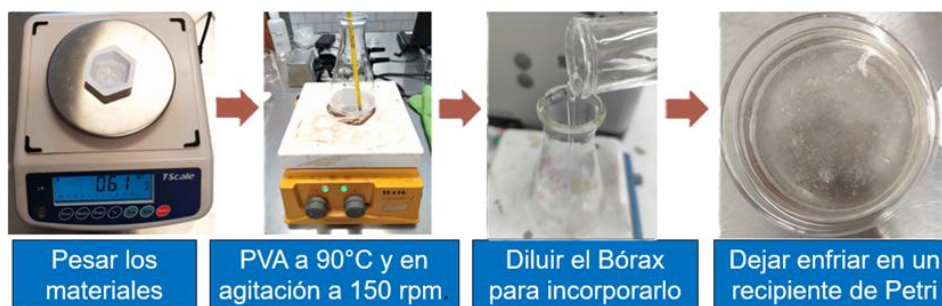


Figura 3. Proceso simplificado para la preparación de los hidrogeles PVA-Bórax.

Una vez que el hidrogel ya se encuentra conformado, se procede a secarlo en un horno a temperatura de 80°C durante 24 horas. El hidrogel al secarse recibe el nombre de xerogel y es este xerogel el que se sumerge en una solución iónica para

obtener el hidrogel conductivo. Las soluciones iónicas que se utilizaron fueron cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de calcio (CaCl₂).

2.3 Hinchamiento

Gibas y Janik [8] informaron que el hinchamiento de los hidrogeles es un proceso complejo que consta de varios pasos. En el primer paso, los grupos hidrófilos polares de la matriz del hidrogel se hidratan con agua formando la liga de agua primaria. En el segundo paso, el agua también interactúa con los grupos hidrófobos expuestos y aparecen en forma de agua ligada secundaria. Tanto el agua ligada primaria y la secundaria forman el agua ligada total. En el tercer paso, la fuerza osmótica impulsora de la red hacia la dilución infinita se ve resistida por el entrecruzamiento físico o químico, por lo que se absorbe agua adicional. La cantidad de agua absorbida por un hidrogel depende de la temperatura y de la interacción específica entre las moléculas de agua y las cadenas del polímero, lo que puede explicarse mediante la teoría de Flory-Huggins [9].

La parte sólida del hidrogel es una red de cadenas poliméricas reticuladas, una red tridimensional generalmente denominada malla. La malla retiene el fluido e imparte una fuerza elástica que puede completarse mediante la expansión y contracción del hidrogel y, por lo tanto, es responsable de su solidez. La fase iónica de los hidrogeles suele consistir en grupos ionizables unidos a las cadenas poliméricas y una serie de iones móviles, debido a la presencia del disolvente electrolítico que rodea al hidrogel.

Se estudiaron las propiedades de hinchamiento de los hidrogeles midiendo su cambio de peso durante la absorción de agua a través de una técnica gravimétrica utilizando la siguiente ecuación de saturación [20].

$$\%H = \frac{w - w_0}{w_0} \times 100\% \quad (1)$$

donde w representa el peso del hidrogel en cada medición y w_0 el peso del hidrogel al iniciar la prueba de hinchamiento. Los hidrogeles fueron sumergidos en agua destilada a temperatura ambiente (25 °C). Para determinar los cambios de peso del hidrogel en diferentes intervalos de tiempo, se procedió a pesar cada minuto durante los primeros 20 minutos y, después el intervalo se amplió a 5 minutos hasta alcanzar una hora. En cada medición, se eliminó el exceso de humedad en la superficie con papel filtro antes del pesaje.

2.4 FTIR

La espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) es una técnica utilizada comúnmente para estudiar y verificar la incorporación de monómeros a la

estructura de hidrogeles, la misma permite observar la presencia de los grupos funcionales característicos de cada monómero [22].

Las muestras de hidrogel fueron secadas para generar el xerogel durante 24 horas en un horno a 60 °C para remover la humedad de su interior. Posteriormente se procedió a moler el xerogel con un molino de aspas durante 5 minutos. Los espectros del polvo de xerogel se registraron utilizando un espectrómetro Jasco FT/IR-4X, con un rango de 4000 a 500 cm^{-1} .

2.5 SEM

La microscopía de barrido electrónico (SEM) es una técnica de obtención de imágenes utilizada en investigación de materiales debido a su alta resolución y capacidades de analizar características morfológicas, estructurales y químicas de las muestras bajo estudio [23].

Las muestras se colocaron bajo vacío, depositando una cantidad adecuada de xerogel sobre un adhesivo utilizando pinzas. Las micrografías se adquirieron con un microscopio JEOL JCM-6000 PLUS para caracterizar la microestructura de los hidrogeles.

2.6 EIS

La espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) ofrece datos cinéticos y mecánicos de diversos sistemas electroquímicos. Se utiliza ampliamente en estudios de corrosión, ciencia de semiconductores, tecnologías de conversión y almacenamiento de energía, diagnósticos no invasivos, biodetección, entre otros.

La EIS se basa en la perturbación de un sistema electroquímico en equilibrio o en estado estacionario, mediante la aplicación de una señal sinusoidal (tensión o corriente alterna) en un amplio rango de frecuencias y el monitoreo de la respuesta sinusoidal (corriente o tensión, respectivamente) del sistema ante la perturbación aplicada. Considerando que el sistema electroquímico en estudio es un sistema lineal e invariante en el tiempo (la señal de salida está relacionada linealmente con la señal de entrada y el comportamiento no cambia con el tiempo), la EIS es una técnica de "función de transferencia" que modela la señal de salida (corriente alterna o voltaje alterno) a la señal de entrada (voltaje alterno o corriente alterna) en un amplio rango de frecuencias [24].

La importancia de la EIS sobre otras técnicas electroquímicas radica en su capacidad de discriminar y, por tanto, proporcionar una gran cantidad de información sobre diversos procesos eléctricos, electroquímicos y físicos que tienen lugar en un sistema electroquímico real.

Las mediciones EIS en un sistema electroquímico se pueden simular en un circuito eléctrico equivalente, que consta de componentes pasivos comunes (como resistencias, capacitores e inductores) y otros elementos más complejos

(denominados elementos distribuidos), conectados entre sí de diferentes formas. En otras palabras, cada uno de los procesos analizados puede considerarse análogo a un circuito eléctrico equivalente, caracterizado por una constante de tiempo diferente. Para ello, la mayoría de los analizadores electroquímicos incorporan un software adecuado que permite simular los datos de impedancia en un circuito modelo. Un requisito previo para la simulación de los datos EIS en un circuito eléctrico equivalente es que se haya evaluado la validez de los datos obtenidos. Lo anterior se puede hacer ejecutando la prueba Kramers-Kroning, que está disponible en la mayoría del software que viene con los analizadores electroquímicos. Considerando que no existe un modelo de circuito único para un espectro de impedancia dado y la calidad del modelado aumenta con el número de componentes incluidos en el circuito, es importante que cada componente esté correlacionado con un proceso individual mediante lógica científica.

Al trabajar en el dominio de la frecuencia, en un amplio rango de frecuencias, la EIS simplifica un sistema electroquímico complejo deconvolucionándolo en procesos individuales con diferentes constantes de tiempo, que luego pueden analizarse de manera más precisa. Los procesos lentos pueden analizarse en frecuencias bajas, mientras que los procesos rápidos pueden analizarse en frecuencias altas.

En la práctica, el rango de frecuencia está determinado por las limitaciones asociadas con la instrumentación disponible, el cableado del sistema electroquímico con el instrumento de medición y la estabilidad del propio sistema electroquímico a lo largo del tiempo.

La medición de la impedancia de los hidrogeles PVA-Bórax con solución iónica utilizando la EIS se realizó con el potencióstato GAMRY 1010E con la configuración de tres electrodos que se observa en la Figura 4.

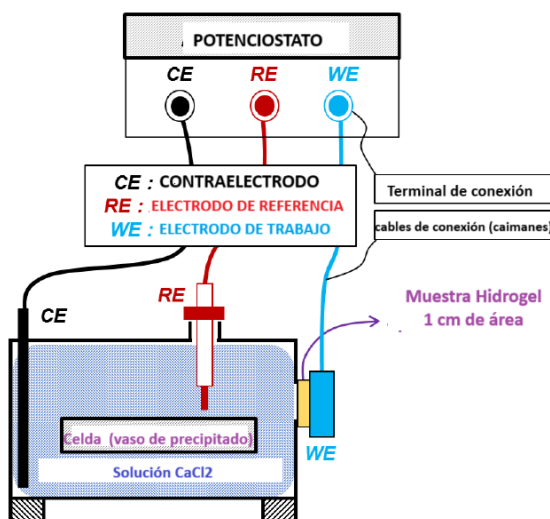


Figura 4. Conexiones de la celda electroquímica al potenciostato. Imagen original [25].

El electrodo de referencia (RE) y el contraelectrodo (CE) fueron electrodos de acero y la muestra de un centímetro cuadrado de área del hidrogel PVA-Bórax fue utilizado como electrodo de trabajo (WE) colocado en un material de acero donde el área de exposición fue de $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$. Los tres electrodos se distribuyeron de forma equidistante dentro de la celda electroquímica. Las soluciones iónicas utilizadas fueron NaCl y CaCl₂, pero para la medición de control se utilizó agua destilada. El rango de frecuencia considerado fue de 100 mHz a 1 MHz con 10 puntos por década.

3. Modelo matemático

La caracterización de los datos de impedancia son el punto de partida para modelar su dinámica. Para ello, se utiliza un modelo matemático que permita explicar el comportamiento observado durante la prueba EIS del hidrogel PVA-Bórax con conductividad iónica inducida.

Empleando la caracterización en frecuencia, se encontró que el circuito de Randles modela la impedancia electroquímica de una interfase y se ajusta a muchos sistemas electroquímicos. Utilizando la técnica EIS, se busca determinar los parámetros del modelo matemático del circuito Randles de la Figura 5.

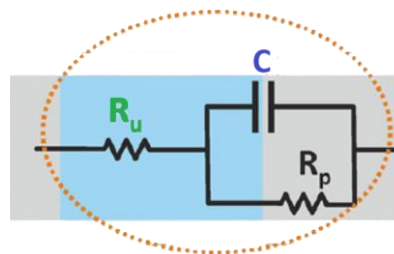


Figura 5. Circuito Randles. Imagen original [24].

El circuito Randles tiene tres elementos, una resistencia en serie R_u con la combinación en paralelo de un capacitor C y una resistencia R_p . En electroquímica, cada uno de los componentes representa una sección del fenómeno electroquímico, como se describe a continuación:

- R_u : resistencia de solución entre los electrodos de trabajo y de referencia.
- R_p : resistencia de polarización o una resistencia de transferencia de carga en la interfase electrodo-solución.
- C : capacitancia de doble capa en la interfase (modelo ideal o constante de fase).

La ecuación de impedancia del circuito de la Figura 5, queda expresada como:

$$Z = R_u + \frac{1}{\frac{1}{R_p} + j\omega C} \quad (2)$$

donde R_u corresponde a la resistencia en serie, R_p es la resistencia en paralelo con el capacitor C el cual varía su valor respecto a la frecuencia porque $\omega = 2\pi f$.

El circuito Randles es un modelo fundamental y el punto de partida para modelar sistemas más complejos de reacciones electroquímicas. Se utiliza en la técnica EIS para interpretar espectros de impedancia [24].

4. Resultados Experimentales

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para cada una de las caracterizaciones realizadas a los hidrogeles PVA-Bórax.

4.1 Hinchamiento

La Figura 6 muestra la gráfica obtenida durante la prueba de hinchamiento al hidrogel con la formulación (PVA 0.6g, Bórax 1.4g). En el eje de las abscisas se encuentra el tiempo que registra de 0 a 35 minutos y en el eje de las ordenadas se encuentra el porcentaje obtenido del hidrogel siguiendo el proceso descrito en la sección 2.3 y mediante la ecuación (1). En la gráfica se observa un incremento pronunciado del porcentaje de hinchamiento en los primeros 10 minutos, indicando que existe una rápida absorción de líquidos. Después de los 10 minutos se detecta que el proceso de hinchamiento continua, pero empieza a desacelerarse. A partir de los 20 minutos se alcanza una meseta, lo que indica que alcanzó la saturación del hidrogel, es decir, a su límite de capacidad de hinchamiento.

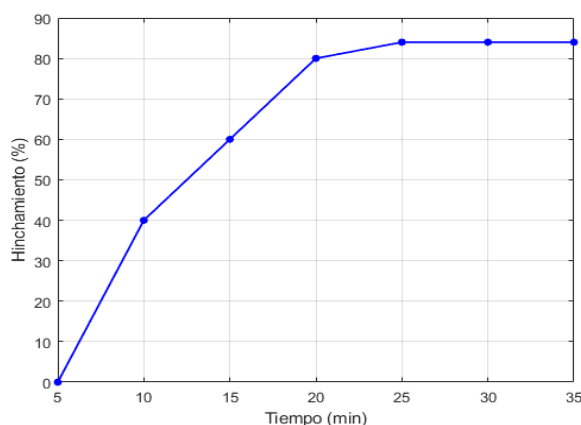


Figura 6. Gráfica de hinchamiento del hidrogel con formulación 0.6 g PVA y 1 g Bórax.

El sistema alcanza el máximo porcentaje de hinchamiento en 20 minutos, y no mejora significativamente después de eso, principalmente porque el hidrogel comienza a desmoronarse en el líquido.

4.2 Caracterización FTIR

La Figura 7, permite visualizar los espectros FTIR de los materiales PVA y Bórax en su estado inicial, en conjunto con el espectro FTIR del xerogel PVA-Bórax. Además, en la misma Figura 7, se incluye una tabla con los rangos de los números de onda detectados en los picos de los tres espectros FTIR. Los espectros se obtuvieron siguiendo el proceso de la sección 2.4 que se encuentra en este escrito. En el espectro del PVA se detecta la banda del grupo O-H (alcohol) entre la longitud típica de 3000-3600 y los grupos metileno C-H al detectar el pico 2909 cm^{-1} . Estas señales son consistentes con la estructura del PVA, un polímero lineal con grupos hidroxilo disponibles para interacción química. En el espectro del Bórax se detectan los picos 1339 cm^{-1} y 999 cm^{-1} , los cuales se asocian al estiramiento del enlace B-O y B-O-B, respectivamente, confirmando la presencia de unidades estructurales de borato.

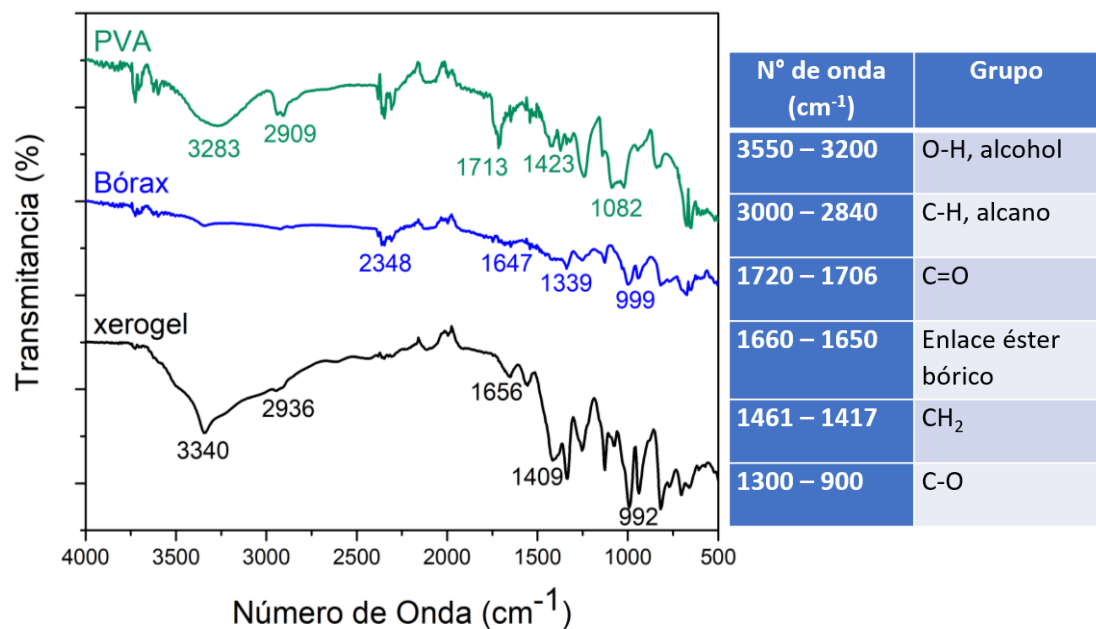


Figura 7. Comparación de los espectros FTIR del PVA, Bórax y el xerogel (derecha). Tabla de los rangos de número de onda obtenidos en los espectros FTIR analizados.

El xerogel muestra bandas que provienen tanto del PVA como del Bórax, confirmando la interacción de ambos compuestos. El desplazamiento del pico O-H de 3283 cm^{-1} (PVA) a 3340 cm^{-1} (xerogel) sugiere la formación de nuevos enlaces químicos, típicamente debidos a la reticulación con el Bórax. El pico en 992 cm^{-1} aparece tanto en el espectro del Bórax como en el del xerogel, lo que indica la preservación de la estructura del boro en la red final.

4.3 Micrografía obtenida por SEM

El hidrogel sintetizado tiene una estructura porosa en su concepción. Esto se puede apreciar por la presencia de orificios (poros) que se asemejan a la superficie

de una esponja comercial. En la Figura 8, se muestra la morfología del xerogel con una micrografía con 400 aumentos. Lo anterior permite confirmar la red tridimensional característica de los hidrogeles, garantizando su propiedad de hinchamiento.

Sin embargo, es posible observar que al momento de secar el hidrogel para obtener el xerogel, los poros del hidrogel colapsan y solo es posible observar poros del tamaño de micrómetros.

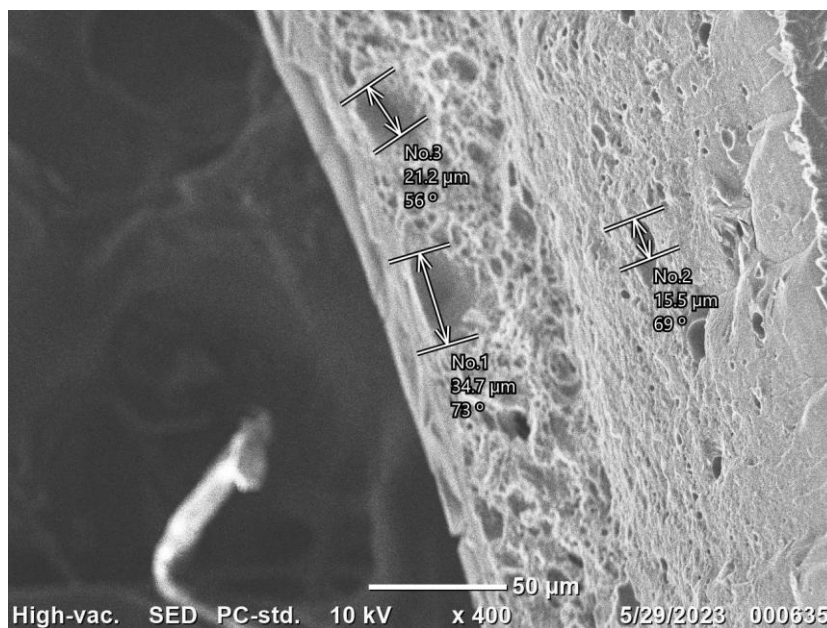


Figura 8. Micrografía del xerogel, aumento 400x.

Otra alternativa para mejorar las micrografías es realizar el proceso de liofilización a los hidrogeles PVA-Bórxax con el fin de observar los poros sin colapsar. Sin embargo, la Figura 8 permite dar un indicio de la porosidad del material, que es lo importante de resaltar en esta caracterización.

4.4 Diagramas de Bode

En las Figuras 9 y 10 se presentan los diagramas de Bode obtenidos mediante la técnica EIS, descrita en la sección 2.6. Para su obtención se utilizaron las soluciones iónicas con NaCl y el CaCl₂, respectivamente.

En ambos diagramas de Bode, en el eje horizontal se representa la frecuencia expresada en escala logarítmica (Hz), en un rango de 10⁻¹ Hz hasta 10⁵ Hz. En el eje vertical se muestra el módulo de la impedancia |Z|, también en escala logarítmica, que abarca desde 10² a 10⁴ Ω. La curva representada por los puntos azules

corresponden a los datos experimentales de impedancia. El ajuste teórico, basado en el modelo matemático Randles, se despliega con una línea continua de color rojo.

En la Figura 9 se puede apreciar que a frecuencias bajas (< 1 Hz), el módulo de la impedancia es alto ($10^4 \Omega$), indicando que domina la resistencia de transferencia de carga y el comportamiento capacitivo. A medida que la frecuencia aumenta, la impedancia disminuye de forma continua y en el rango de 1 Hz a 10^3 Hz, se observa una transición típica del cambio de dominancia entre elementos resistivos y capacitivos del sistema. A frecuencias altas ($> 10^4$ Hz), la impedancia tiende a estabilizarse alrededor de $10^0 \Omega$, lo que representa la resistencia del electrolito (R_u).

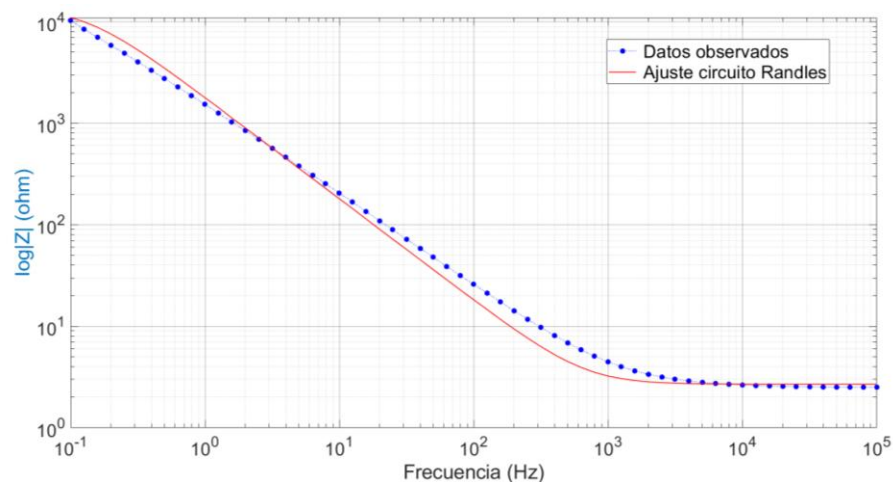


Figura 9. Diagrama de Bode de Impedancia Electroquímica utilizando la solución NaCl.

El diagrama muestra un buen ajuste del modelo de Randles a los datos de impedancia obtenidos al sumergir el hidrogel PVA-Bórax en solución de NaCl. Sin embargo, el pequeño desajuste en la zona media puede indicar la necesidad de modelos más complejos, dependiendo de la precisión deseada.

En la Figura 10, se observa que a baja frecuencia (izquierda del diagrama de Bode) la impedancia es alta ($> 10^3 \Omega$), y lo anterior, sugiere un dominio capacitivo, donde la resistencia de polarización o transferencia de carga y la capacitancia tienen un efecto significativo. En la frecuencia media (10 – 1000 Hz) se observa una caída rápida en $|Z|$, lo que indica una transición de comportamiento capacitivo a resistivo. La impedancia a alta frecuencia ($> 10^4$ Hz) se estabiliza en torno a 10Ω , lo que sugiere que la contribución resistiva está bien definida.

Se puede concluir que el sistema electroquímico de CaCl_2 muestra un comportamiento típico de un electrodo con transferencia de cara controlada, siendo el modelo de Randles adecuado para describir el sistema, aunque reconociendo que a bajas frecuencias puede faltar un componente de difusión. El buen ajuste a frecuencias altas sugiere una conductividad iónica adecuada de la solución de CaCl_2 .

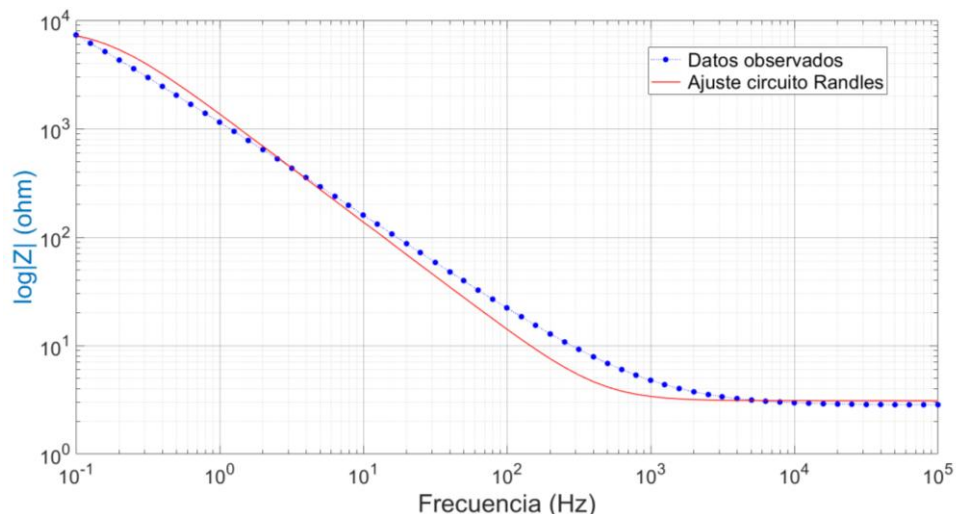


Figura 10. Diagrama de Bode de Impedancia Electroquímica utilizando la solución CaCl_2 .

Cabe mencionar que el ajuste de los datos al modelo Randles se realizó mediante el software nativo del potencióstato. Actualmente, se trabaja en el desarrollo de una herramienta de software de código libre que permitirá realizar el ajuste numérico de los datos sensados empleando distintos esquemas de aproximación numérica.

4.5 Simulación Numérica

En la Tabla 1 se muestran los valores de los componentes del circuito Randles, Figura 5, obtenidos mediante la prueba EIS a los hidrogeles PVA-Bórax.

Tabla 1. Resultados obtenidos de los componentes del circuito de Randles mediante el ajuste no lineal del modelo matemático.

Componentes	R_p	R_u	C_f
Unidades	Ohm Ω	Ohm Ω	Faradios F
CaCl_2	8.523×10^3	3.101	115.2×10^{-6}
NaCl	13.85×10^3	2.682	88.29×10^{-6}

Al sumergir los hidrogeles en las dos diferentes soluciones iónicas, se detectaron valores menores de resistencia a la conductividad iónica usando el CaCl_2 . Sin embargo, será necesario realizar otras mediciones con diferentes configuraciones de electrodos para corroborar esta medición.

4.6 Pruebas mecánicas

El hidrogel PVA-Bórax está basado en enlaces físicos reversibles, principalmente puentes de hidrógeno y enlaces entre grupos hidroxilo del PVA y los iones borato. Estos enlaces son relativamente débiles comparados con enlaces covalentes, lo que otorga al hidrogel propiedades viscoelásticas, pero también una baja resistencia mecánica. Además, al hincharse el hidrogel, su contenido de agua lo hace blando y fácilmente deformable, dificultando la aplicación de cargas mayores a 5 MPa.

Cabe señalar que el presente trabajo se centra en la caracterización de hidrogeles obtenidos de forma experimental mediante la técnica de casting. Durante la manipulación, las muestras exhibieron una alta fragilidad estructural y falta de cohesión mecánica, lo que impidió su correcta sujeción y posterior estiramiento. Esto imposibilitó el estudio de las propiedades mecánicas del hidrogel PVA-Bórax conforme a la Norma ASTM-D882-00.

5. Conclusiones

En este trabajo se aborda la síntesis de hidrogeles a base de alcohol polivinílico (PVA) entrecruzado con tetraborato de sodio (Bórax) mediante la técnica de casting. Se evaluaron seis formulaciones con distintas proporciones de PVA (0.6 y 1.4 g) y Bórax (0.2, 0.6 y 1 g). Los hidrogeles se sumergieron en soluciones electrolíticas de NaCl y CaCl₂, para inducir la conductividad iónica. Los hidrogeles sumergidos en CaCl₂ presentaron una menor resistencia iónica en comparación con los tratados con NaCl, lo que indica una mayor conductividad en presencia de Ca²⁺. Se observó un hinchamiento máximo del 84 % en los hidrogeles de PVA-Bórax preparados con 0.6 g de PVA y 1 g de Bórax, indicando una adecuada absorción de líquido por la red polimérica. El ajuste no lineal del modelo Randles permitió determinar el estado estacionario, el cual es modelado mediante la resistencia R_p, la cual describe la polarización entre el electrodo y la solución.

Como trabajo futuro, se contempla la determinación de nuevas formulaciones de PVA-Bórax para mejorar las propiedades mecánicas y de absorción de los hidrogeles. Asimismo, se propone la incorporación de doble reticulación con el fin de prolongar la cohesión mecánica del hidrogel.

Agradecimientos

El autor expresa su gratitud a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SEICHTI), por el apoyo recibido para el desarrollo del trabajo de investigación a través de la beca de doctorado (2022-000002-01NACF-07717).

Referencias

1. N. Lu, D. H. Kim, "Flexible and Stretchable Electronics Paving the Way for Soft Robotics," *Soft Robotics*, vol. 1, no. 1, pp. 53–62, 2013. <https://doi.org/10.1089/soro.2013.0005>
2. L. Ionov, "Hydrogel-based actuators: Possibilities and limitations," *Materials Today*, vol. 17, no. 10, pp. 494–503, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.07.002>

3. F. Mo, Y. Lin, Y. Liu, P. Zhou, J. Yang, Z. Ji and Y. Wang, "Advances in ionic conductive hydrogels for skin sensor applications," *Materials Science & Engineering: R: Reports*, vol. 165, pp. 100989, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2025.100989>
4. L. Liu, G. Pan, L. Wang, et al. "Hybrid Hydrogels Toughened by Chemical Covalent Bonding and Physical Electrostatic Interactions," *Chemical Research in Chinese Universities*, vol. 34, pp. 500-505, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40242-018-7375-z>
5. F. Ullah, M. B. Hafi Othman, F. Javed, Z. Ahmad, H. Md. Akil, "Classification, processing and application of hydrogels: A review," *Material Science and Engineering: C*, vol. 57, pp. 414-433, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.07.053>
6. J. Chen, Y. Zhu, X. Chang, D. Pan, G. Song, Z. Guo, N. Naik, "Recent Progress in Essential Functions of Soft Electronic Skin", *Advanced Functional Materials*, vol. 31, no. 42, pp. 2104686, 2021. <https://doi.org/10.1002/adfm.202104686>
7. O. Wichterle, D. Lim, "Hydrophilic Gels for Biological Use," *Nature*, vol. 185, pp. 117-118, 1960. <https://doi.org/10.1038/185117a0>
8. I. Gibas and H. Janik, "Review: Synthetic Polymer Hydrogels for Biomedical Applications," *Chemistry & Chemical Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 297-304, 2010. <https://doi.org/10.23939/chcht04.04.297>
9. F. Ganji, S. Vasheghani-Farahani, E. Vasheghani-Farahani, "Theoretical Description of Hydrogel Swelling: A Review," *Iranian Polymer Journal*, vol. 19, no. 5, pp. 375-398, 2010. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:139000502>
10. T. Zhu, Y. Ni, G.M. Biesold, Y. Cheng, M. Ge, H. Li, J. Huang, Z. Lin, Y. Lai, "Recent advances in conductive hydrogels: classifications, properties, and applications", *Chemical Society Reviews*, vol. 52, no. 2, pp. 473-509, 2022. <https://doi.org/10.1039/D2CS00173J>
11. Y. Shi, C. Ma, L. Peng, G. Yu, "Conductive "Smart" Hybrid Hydrogels with PNIPAM and Nanostructured Conductive Polymers", *Advance Function Materials*, vol. 25, pp. 1219-1225, 2015. <https://doi.org/10.1002/adfm.201404247>
12. Q. Peng, J. Chen, T. Wang, X. Peng, J. Liu, X. Wang, et al. "Recent advances in designing conductive hydrogels for flexible electronics," *InfoMat*, vol. 2, no. 5, pp. 843-865, 2020. <https://doi.org/10.1002/inf2.12113>
13. W. Zhang, H. Zhang, H. Kim, Pooi See Lee, et al. "Ways forward with conductive hydrogels: Classifications, properties, and applications in flexible electronic and energy gadgets," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 163, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2024.100923>
14. L. Hu, P. Chee, S. Sugiarto, Y. Yu, C. Shi, R. Yan, et al. "Hydrogel-based flexible electronics," *Advanced Materials*, vol 35, no. 14, 2023. <https://doi.org/10.1002/adma.202205326>
15. K. Imani, J. Dodda, J. Yoon, F. Torres, A. Imran, G. Deen, et al. "Seamless integration of conducting hydrogels in daily life: from preparation to wearable application," *Advance science*, vol. 11, no. 13, 2024. <https://doi.org/10.1002/advs.202306784>
16. X. Di, Q. Ma, Y. Xu, M. Yang, G. Wu, and P. Sun, "High-performance ionic conductive poly (vinyl alcohol) hydrogels for flexible strain sensors based on a universal soaking strategy," *Materials Chemistry Frontiers*, vol. 5, no. 1, pp. 315-323, 2021. <https://doi.org/10.1039/D0QM00625D>
17. Y. Zhou et al. "Highly Stretchable, Elastic, and Ionic Conductive Hydrogel for Artificial Soft Electronics," *Advance Functional Materials*, vol. 29, no. 1, pp. 1-8, 2019. <https://doi.org/10.1002/adfm.201806220>

18. C. Wang, Z. Shen, P. Hu, et al. "Facile fabrication and characterization of high-performance Borax-PVA hidrogel," *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 101, pp. 103-113, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10971-021-05584-0>
19. V. Ugrinovic, V. Panic, P. Spasojevic, et al. "Strong and tough, pH sensible, interpenetrating network hydrogels based on gelatin and poly (methacrylic acid)," *Polymer Engineering & Science*, vol. 62, no. 3, pp. 622-636, 2022. <https://doi.org/10.1002/pen.25870>
20. J. Li, Y. Wu, J. He, et al. "A new insight to the effect of calcium concentration on gelation process and physical properties of alginate films," *Journal of Materials Science*, vol. 51, pp. 5791-5801, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-9880-0>
21. M. J. Lee, D. R. Shrotriya, and R. M. Espinosa-Marzal, "Responsiveness of charged double network hydrogels to ionic environment," *Advanced Functional Materials*, vol. 34, no. 37, pp. 2402279, 2024. <https://doi.org/10.1002/adfm.202402279>
22. M. A. Mohamed, J. Jaafar, A. F. Ismail, M. H. D. Othman, M.A. Rahman, "Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy," *Membrane characterization*, pp. 3-29, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63776-5.00001-2>
23. A. Mohamed, A. Abdullah, "Scanning electron microscopy (SEM): A review," *Proceedings of the 2018 international conference on hydraulics and pneumatics—HERVEX, Băile Govora, Romania, 2018*, pp. 7-9.
24. A. Ch. Lazanas and M. I. Prodromidis, "Electrochemical Impedance Spectroscopy—A Tutorial," *ACS Measurement Science Au*, vol. 3, no. 3, pp. 162-193, 2023. <https://doi.org/10.1021/acsmeasuresciau.2c00070>
25. H. B. Choe, H. S. Lee, M. A. Ismail and M. W. Hussin, "Evaluation of Electrochemical Impedance Properties of Anticorrosion Films by Arc Thermal Metal Spraying Method," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 10, no. 11, pp. 9775-9789, 2015. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)11219-3](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)11219-3)