

## Diseño y caracterización de materiales de silicio poroso y grafito para su posible aplicación en ánodos de baterías de ion-litio

### Design and characterization of porous silicon and graphite materials for potential application in lithium-ion battery anodes

Cesia D. Mena-Muñoz <sup>a</sup>, Francisco Morales-Morales <sup>b</sup>, Alfredo Benítez-Lara <sup>c</sup>, Fabian Ambríz-Vargas <sup>d</sup>

---

#### Abstract:

Developing lithium-ion batteries (LIBs) with high capacity and stability requires advanced materials that combine high specific capacity with good electrical conductivity. This work presents the design and characterization of materials based on porous silicon (PS) functionalized with graphite nanoparticles, aiming to evaluate their potential for future implementation in LIB anodes. PS was produced using controlled electrochemical etching, and graphite nanoparticles were synthesized from colloids stabilized by ultrasonic methods. The porosity of PS was determined via gravimetric methods, and its morphology and pore distribution were analyzed using scanning electron microscopy (SEM). Colloid stability and dispersion were evaluated in different solvents, and deposition onto substrates was carried out using the spin coating technique. The results showed a porosity range of 35 to 90 %, pore diameters between 6 and 10 nm, and an etching rate of up to 25 nm/s. The ethanol-based colloids with 100 mg of graphite demonstrated higher stability and more uniform coatings under spin coating conditions, thus establishing optimal parameters for future applications. These findings indicate that the materials possess suitable structural and colloidal stability properties for possible electrochemical evaluation in advanced LIB anodes.

#### Keywords:

*Lithium-ion batteries, anodes, porous silicon, graphite nanoparticle, gravimetric characterization.*

---

#### Resumen:

El desarrollo de baterías de iones de litio (LIBs) con alta capacidad y estabilidad requiere materiales avanzados que combinen alta capacidad específica con buena conductividad eléctrica. En este trabajo se presenta el diseño y la caracterización de materiales basados en silicio poroso (SP) funcionalizado con nanopartículas de grafito, con el objetivo de evaluar su potencial para su futura implementación en ánodos de LIBs. El SP se obtuvo mediante grabado electroquímico controlado, mientras que las nanopartículas de grafito fueron sintetizadas a partir de coloides estabilizados por ultrasonido. Se caracterizó la porosidad del SP por métodos gravimétricos, mientras que la morfología y distribución de poros se analizaron por microscopía electrónica de barrido (SEM). La estabilidad y dispersión de los coloides se evaluaron en diferentes solventes, y el depósito sobre sustratos se realizó mediante spin coating. Los resultados obtenidos mostraron una porosidad del silicio en un rango de 35 a 90 %, con poros de 6 a 7 nm de diámetro y una velocidad de ataque de hasta 25 nm/s. Los coloides en etanol con 100 mg de grafito demostraron mayor estabilidad y uniformidad en el recubrimiento mediante spin coating, estableciendo así condiciones óptimas para futuras aplicaciones en ánodos funcionales. Estos resultados indican que los materiales presentan propiedades estructurales y de estabilidad coloidal adecuadas para su posible evaluación electroquímica en ánodos avanzados para LIBs.

#### Palabras Clave:

*Baterías de ion litio, ánodos, silicio poroso, nanopartículas de grafito, caracterización gravimétrica.*

---

<sup>a</sup> Autor de Correspondencia, Centro de Investigaciones en Óptica, A. C. | Grupo de almacenamiento de energía del CIO | León-Guanajuato | México, <https://orcid.org/0009-0002-9867-7943>, Email: danielamm@cio.mx

<sup>b</sup> Centro de Investigaciones en Óptica, A. C. | Grupo de almacenamiento de energía del CIO | León-Guanajuato | México, <https://orcid.org/0000-0003-0019-5752>, Email: fcomm@cio.mx

<sup>c</sup> Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica | Microelectrónica | San Andrés Cholula-Puebla | México, <https://orcid.org/0000-0002-7206-2767>, Email: alfredbl@cio.mx

<sup>d</sup> Centro de Investigaciones en Óptica, A. C. | Grupo de almacenamiento de energía del CIO | León-Guanajuato | México, <https://orcid.org/0000-0003-3246-0549>, Email: fambriz@cio.mx

## Introducción

El desarrollo de baterías de ion-litio (LIBs) con alta capacidad y estabilidad a largo plazo es crucial para satisfacer la creciente demanda de almacenamiento de energía en aplicaciones como dispositivos electrónicos, vehículos eléctricos y energías renovables [1]. El grafito ha sido el material estándar para ánodos comerciales debido a su alta estabilidad y larga vida útil, lo que facilitó su implementación masiva en baterías recargables. No obstante, su capacidad teórica se limita a  $372 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ , lo que representa un problema para mejorar la densidad energética de nuevas generaciones de dispositivos. Se ha señalado que esta limitación impulsa la búsqueda de materiales alternativos con mayor capacidad [2,3].

En este contexto, el silicio (Si) es considerado uno de los materiales más prometedores para su uso en ánodos de baterías de litio y ha sido ampliamente estudiado debido a su alta capacidad teórica de aproximadamente  $4200 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ , valor que supera más de diez veces al del grafito, además de que tiene un alto rendimiento, el silicio se destaca por ser un material abundante y de bajo costo, lo que lo convierte en una opción atractiva para su implementación a gran escala [4]. No obstante, su aplicación práctica enfrenta serias limitaciones.

Estudios recientes han evidenciado que durante los procesos de litación y delitación, el silicio puede experimentar una expansión volumétrica superior al 300 %, lo que induce fractura del material, pérdida de contacto eléctrico con el colector de corriente y una acelerada degradación de la capacidad durante los ciclos de carga y descarga [5,6]. Así mismo, se presentan otros problemas como que el silicio tiene una baja conductividad eléctrica  $\sim 10^{-3} \text{ S/cm}$  y que, debido a la variación del volumen, la capa SEI (Interfaz de Electrolito Sólido) se genera continuamente en la superficie lo que causa una grave degradación en la capacidad del ánodo [7]. Estas dificultades han motivado el desarrollo de estrategias estructurales y composicionales para mitigar los efectos de la expansión y mejorar la estabilidad del ánodo.

Para abordar este problema, se han explorado diversas estrategias, incluyendo la reducción del tamaño de las partículas de silicio, la formación de compuestos con carbono y la generación de estructuras porosas que permitan acomodar la expansión volumétrica y tener más canales para la difusión de los iones de litio sin comprometer la integridad del ánodo [7].

En particular, la combinación de silicio poroso (SP) con nanopartículas de grafito ha demostrado ser una estrategia efectiva, ya que el grafito ayuda a mejorar la conductividad eléctrica y mecánica del ánodo, además de proporcionar un entorno estructural que minimiza la degradación del silicio durante los ciclos de carga y descarga [6].

Diferentes métodos han sido propuestos para la síntesis de ánodos de SP con carbono; un enfoque novedoso para la fabricación de ánodos de silicio de alto rendimiento consiste en un núcleo de SP encapsulado por una capa exterior de carbono [6], mientras que para los compuestos porosos de Si/C se sintetizaron dispersando nanopartículas de silicio en una solución acuosa que contenía el agente de acoplamiento de silano (KH-560) y añadiendo citrato de zinc, seguido de un proceso de carbonización en un solo paso [3]. Algunos otros métodos como el depósito químico en fase vapor (CVD), la molienda de alta energía y métodos de funcionalización superficial para mejorar la dispersión y estabilidad de los materiales compuestos han sido utilizados en múltiples investigaciones. Sin embargo, estos métodos suelen ser complejos y costosos, lo que limita su escalabilidad y repetibilidad.

En este proyecto, se plantea la preparación y caracterización de materiales funcionalizados de SP con nanopartículas de grafito como una etapa preliminar para el desarrollo de ánodos avanzados en baterías de ion-litio. La incorporación de grafito al SP busca combinar la alta capacidad específica del silicio con la estabilidad estructural y la conductividad eléctrica que aporta el grafito. El propósito de esta fase es establecer las condiciones óptimas para la obtención y depósito de estos materiales, sentando así las bases para su posible integración en ánodos y su posterior evaluación electroquímica.

El objetivo de este trabajo es diseñar y caracterizar materiales basados en SP funcionalizado con nanopartículas de grafito, con el fin de establecer las condiciones óptimas para su posible aplicación en ánodos de baterías de ion-litio. En este trabajo se presenta una etapa inicial del desarrollo de ánodos para baterías de ion-litio, los resultados obtenidos hasta el momento incluyen la obtención de SP mediante ataque electroquímico, su caracterización morfológica y gravimétrica, así como la síntesis de coloides de grafito estables y su evaluación preliminar mediante técnicas de spin coating. Esta fase experimental sienta las bases para estudios posteriores, donde se integrarán estos materiales en ánodos completos y se evaluará su comportamiento electroquímico en celdas ensambladas.

## Metodología

### Obtención del Silicio Poroso (SP) y caracterización gravimétrica.

El SP se obtuvo mediante un proceso de ataque electroquímico controlado mediante un reactor de teflón que utiliza un electrodo de wolframio y otro de cobre. Se utilizaron obleas de silicio tipo p, con orientación 100, con una resistividad de  $0.001\text{--}0.005 \text{ ohm}\cdot\text{cm}$ , sometidas a un grabado electroquímico en una solución de ácido

fluorhídrico y etanol en una proporción 1:1 en volumen (figura 1).

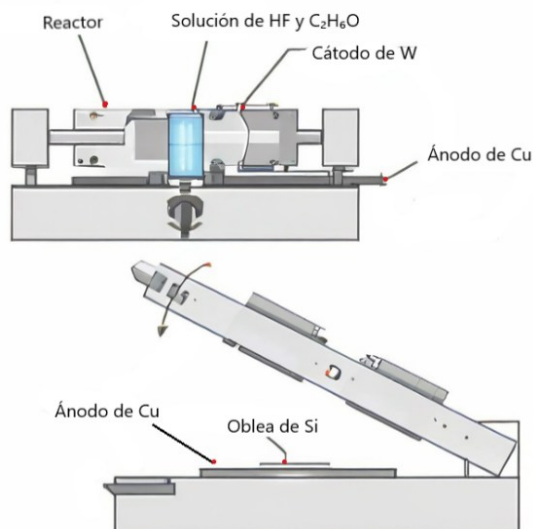


Figura 1. Esquema del reactor utilizado para hacer el ataque electroquímico para la obtención de SP.

El proceso se llevó a cabo bajo una corriente constante, monitoreando la uniformidad de la porosidad. Posteriormente, las muestras se enjuagaron con etanol y se secaron bajo flujo de nitrógeno.

Para la caracterización gravimétrica se utilizó una balanza analítica de la marca Ohaus, modelo PX323, y se pesó a la oblea en tres momentos diferentes, antes del ataque electroquímico, después del ataque electroquímico y posteriormente a la extracción de la capa porosa del sustrato de Si. Se registraron las masas de la oblea y mediante las siguientes fórmulas se logró obtener el porcentaje de porosidad (ecuación 1), y el espesor de la capa porosa (ecuación 2) para posteriormente calcular la velocidad de ataque al silicio.

$$P(\%) = (m_1 - m_2) / m_1 \cdot 100 \quad (1)$$

$$d = (m_1 - m_3) / (S \cdot \rho_{Si}) \quad (2)$$

Las mediciones de masa se realizaron por triplicado para cada muestra, y se calcularon promedios para la estimación de porosidad y espesor. El error asociado a cada medición se evaluó a partir de la desviación estándar entre los valores obtenidos.

### Análisis morfológico del SP.

La morfología del SP se analizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés) utilizando un equipo JEOL modelo JSM-7800F de emisión de campo (Field Emission Scanning Electron Microscope). Las micrografías obtenidas se utilizaron para evaluar cualitativamente la morfología de la superficie y la homogeneidad en la distribución de los poros. No se aplicaron métodos cuantitativos de procesamiento de imágenes en esta etapa, aunque el tamaño de los poros y

los espesores de cada muestra fueron obtenidos con ayuda del mismo equipo donde se tomaron las micrografías.

### Síntesis de Coloides de Nanopartículas de Grafito

Para la síntesis de los coloides se utilizó un baño ultrasónico, de la marca Cole Parmer, modelo 08895-57, para obtener una mejor dispersión de las soluciones. Las soluciones fueron sometidas durante 15 minutos en baño ultrasónico.

Para la selección del solvente se propusieron tres tipos; agua destilada (AD), etanol (E) y una combinación de las dos anteriores en una relación 1:1 en volumen (ADE). Una vez seleccionado el solvente que presentara una mejor estabilidad para el polvo, se eligió la cantidad de nanopulvo para lograr obtener un recubrimiento adecuado. Las cantidades fueron 100 mg, 200 mg y 300 mg. Se realizaron pruebas preliminares sobre sustratos de vidrio para evaluar el comportamiento de los coloides.

### Depósito de Coloides en el Silicio Poroso

El depósito de las nanopartículas de grafito sobre el SP se realizó mediante la técnica de spin coating utilizando un equipo de la marca Laurell, modelo C819-01 con una aceleración de 500 rpm/s, probando velocidades de rotación de 2000 rpm, 1500 rpm, 1000 rpm y 500 rpm para evaluar la uniformidad del recubrimiento.

### Resultados y discusión

#### Caracterización Gravimétrica del Silicio Poroso

Se determinaron los valores de porosidad y velocidad de ataque a partir de las mediciones de masa. Los valores obtenidos indicaron una porosidad en el rango de 35 a 90% aproximadamente (figura 2) y una velocidad de ataque de 1 a 25 nm/s (figura 3), lo que permitiera estimar los espesores de la capa porosa obtenidas.

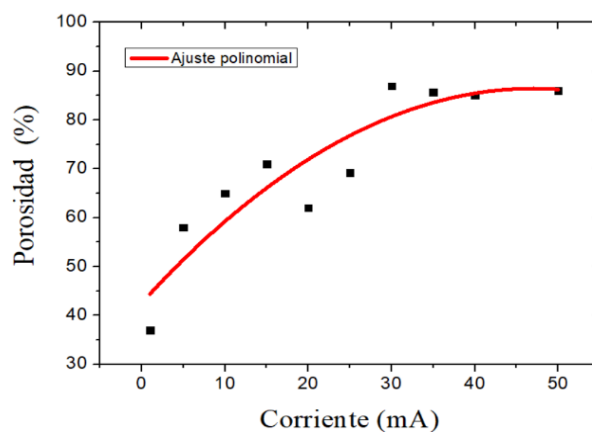


Figura 2. Porcentajes de porosidad estimados

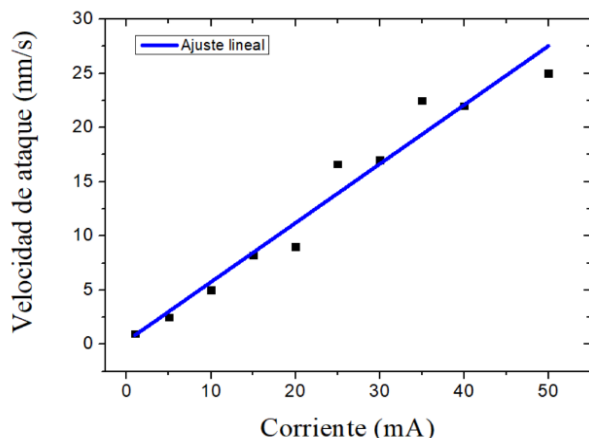


Figura 3. Velocidad de ataque para estimar espesores.

Estas gráficas permiten estimar y diseñar las capas porosas de acuerdo con lo que se requiere.

Las mediciones para la obtención de cada punto de las gráficas tuvieron una desviación estándar de  $3.1502 \times 10^{-4}$ .

Se diseñaron dos muestras para poder observar su morfología en el SEM y de esta manera corroborar si los resultados obtenidos de la gráfica son verdaderos.

En la tabla 1, se muestran las condiciones de estas muestras.

Tabla 1. Condiciones de las muestras diseñadas.

Muestra	Tiempo de ataque (min)	Corriente (mA)	Porosidad (%)	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Velocidad de ataque (nm/s)
1	20	5	58	3	2.5
2	62.5	30	87	60	17

En las figuras 4 a 8 se muestran las micrografías obtenidas en SEM de estas muestras.

Es importante mencionar que el porcentaje de porosidad está ligado a la corriente mientras que el espesor lo está con la velocidad de ataque, de este modo, este análisis gravimétrico permite diseñar capas porosas autosostenidas para la fabricación de ánodos de baterías de litio con diferentes características.

### Análisis Morfológico del SP

Las micrografías obtenidas mediante SEM (figura 4, 5, 6 y 7) mostraron una estructura porosa homogénea con poros bien distribuidos y diámetros en el rango de 6 a 7 nm que fueron medidos con el software del equipo. La uniformidad de la porosidad sugiere que el ataque electroquímico fue controlado y que las condiciones experimentales fueron adecuadas para la formación del SP.

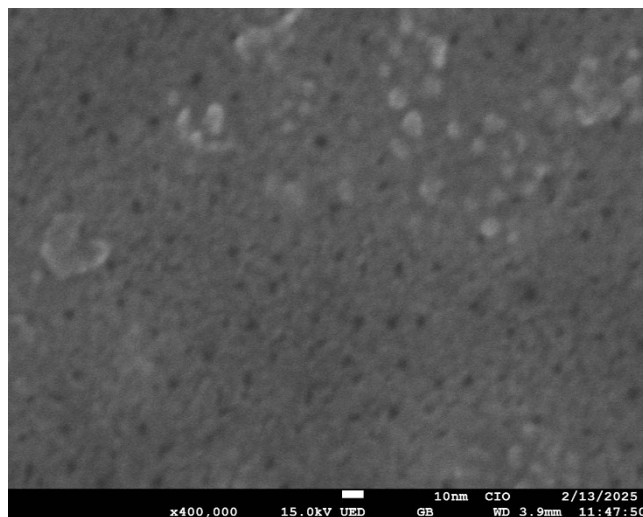


Figura 4. Micrografía en SEM de la muestra 1. Porcentaje de porosidad 58%.

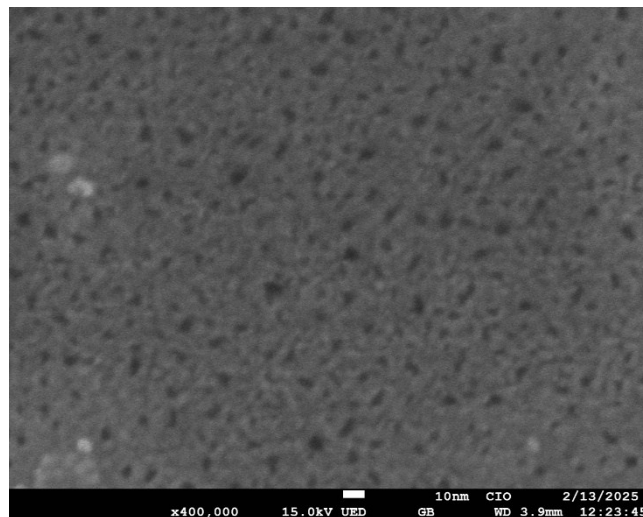


Figura 5. Micrografía en SEM de la muestra 2. Porcentaje de porosidad 87%.

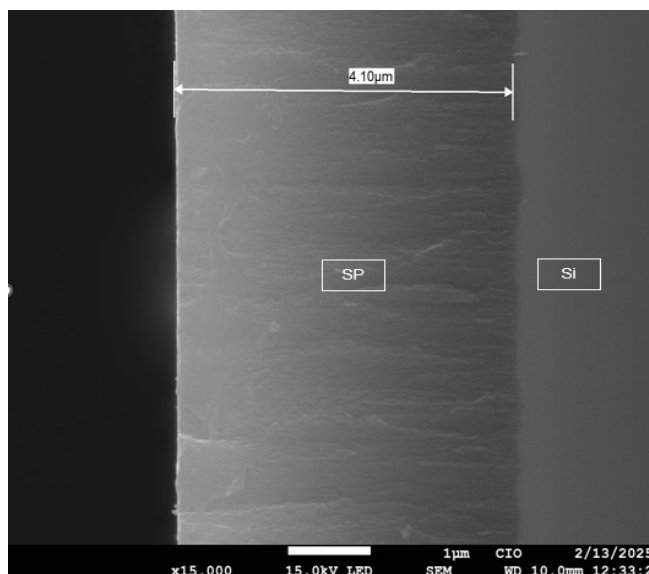


Figura 6. Espesor de la capa porosa de la muestra 1.



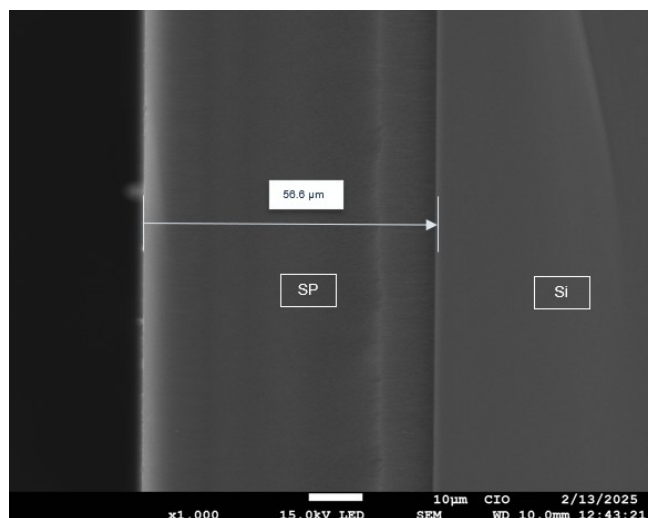


Figura 7. Espesor de la capa porosa de la muestra 2.

Como se pudo observar en las micrografías obtenidas de las muestras fabricadas, los espesores fueron de 4.10 y 56.6  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Estos valores fueron comparados con los espesores teóricos esperados, que eran 3 y 60  $\mu\text{m}$ . La desviación relativa respecto a los valores esperados fue de:

- Para la muestra de 3  $\mu\text{m}$ :  $(4.10-3.00)/3.00 \times 100 = 36.7\%$  por encima del valor teórico.
- Para la muestra de 60  $\mu\text{m}$ :  $(60-56.6)/60 \times 100 = 5.7\%$  por debajo del valor teórico.

Estos resultados indican una buena concordancia general con los valores teóricos, especialmente en la muestra más gruesa, que presenta una desviación menor al 6 %. La discrepancia más significativa (36.7 %) se observó en la muestra más delgada, lo cual podría atribuirse a variaciones en la densidad de corriente, concentración local del electrolito o tiempos de estabilización del sistema al inicio del proceso de grabado.

En ambos casos, los espesores obtenidos se consideran aceptables para las condiciones experimentales, y validan la eficacia del método de grabado electroquímico empleado.

### Estabilidad de los Coloides

Los resultados de estabilidad para las distintas combinaciones de solvente y concentración de grafito se resumen en la Tabla 2. Se observa que las soluciones preparadas en etanol presentaron mayor estabilidad y dispersión, lo cual favoreció la calidad de los recubrimientos obtenidos mediante spin coating.

Tabla 2. Estabilidad de coloides de grafito en diferentes solventes y concentraciones

Coloide	Solvente	Concentración de grafito (mg)	Evaluación visual del recubrimiento	Observaciones
C1	AD	100	Irregular, acumulación	Sedimentación rápida
C2	ADE	100	Parcialmente uniforme	Sedimentación media
C3	E	100	Uniforme	Mayor dispersión
C4	E	200	Uniforme, más denso	Aglomeración
C5	E	300	Acumulación de material	Exceso de concentración

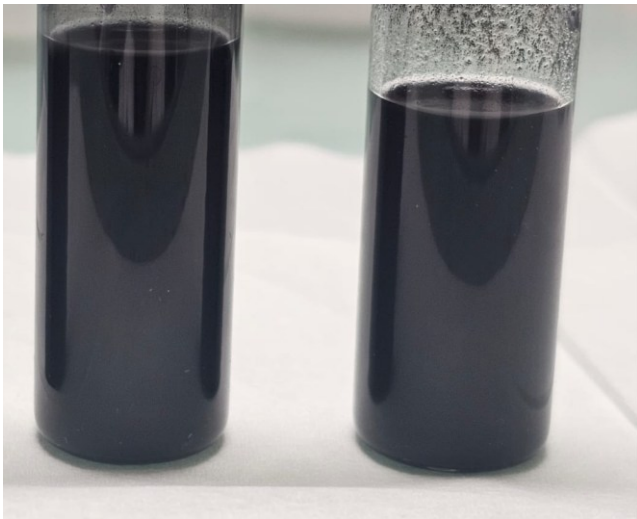
Las pruebas preliminares mostraron que los coloides preparados en agua destilada y agua destilada con etanol presentaron una sedimentación rápida (figura 8), mientras que los formulados en etanol mostraron una estabilidad mejorada a lo largo del tiempo (figura 9), así como un exceso de concentración y aglomeración para los coloides a diferentes concentraciones; 200 y 300 mg (figura 10). Este comportamiento sugiere que la dispersión del nanopulvo de carbono es más eficiente en medios con menor polaridad, lo que puede atribuirse a la mejor afinidad del grafito con solventes orgánicos [8].



Figura 8. Soluciones de Agua destilada con etanol a 1:1 (izquierda) y agua destilada (derecha).



*Figura 9. Coloide de etanol.*



*Figura 10. Coloide de etanol con 200 mg (izquierda) y 300 mg (derecha).*

### **Evaluación de los Recubrimientos por *Spin Coating***

Una vez seleccionado el coloide con mayor estabilidad (Coloide C3, preparado con etanol), se procedió a realizar recubrimientos sobre sustratos de vidrio mediante la técnica de spin coating a distintas velocidades de rotación: 500, 1000, 1500 y 2000 rpm.

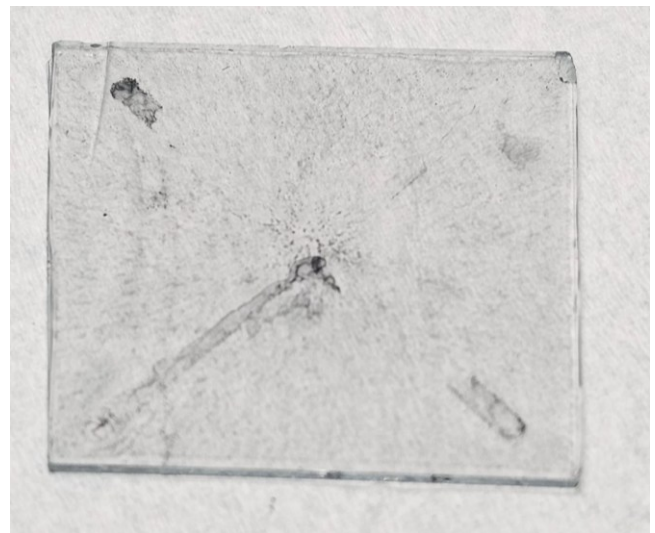
Las figuras 11 a 14 muestran el efecto de la velocidad sobre la uniformidad y adherencia del recubrimiento. Se observó que:

A 2000 rpm (Figura 11), el recubrimiento es visualmente más delgado y homogéneo, con una distribución uniforme del material sobre toda la superficie.

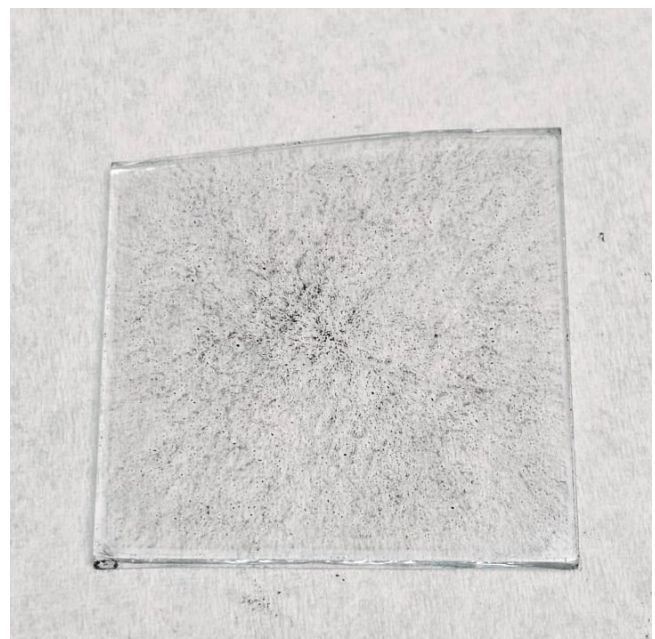
A 1500 rpm (Figura 12), también se mantiene una buena uniformidad, aunque se aprecian algunas áreas con ligera acumulación radial, posiblemente por gradientes de evaporación durante el giro.

A 1000 rpm (Figura 13), el recubrimiento comienza a mostrar zonas de mayor densidad de partículas, especialmente hacia el centro del sustrato, lo que sugiere que la fuerza centrífuga no fue suficiente para distribuir completamente el coloide.

A 500 rpm (Figura 14), se evidencian acumulaciones significativas y patrones irregulares, indicando una dispersión deficiente y posible formación de grumos o zonas de secado no controlado.



*Figura 11. Recubrimiento a 2000 rpm con el coloide C3*



*Figura 12. Recubrimiento a 1500 rpm con el coloide C3*



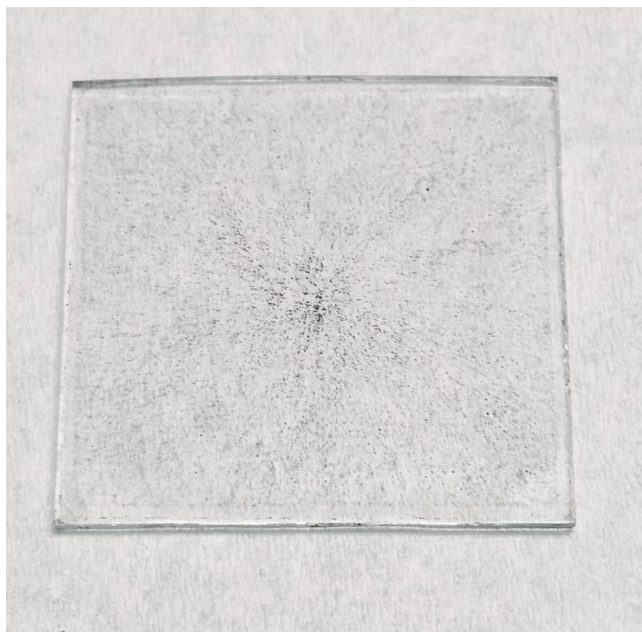


Figura 13. Recubrimiento a 1000 rpm con el coloide C3

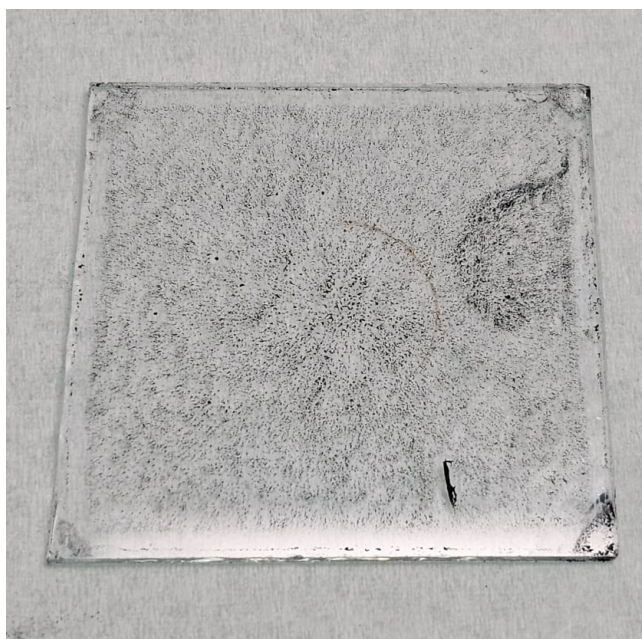


Figura 14. Recubrimiento a 500 rpm con el coloide C3

Estos resultados confirman que la velocidad de rotación tiene un impacto crítico en la calidad del recubrimiento. Las velocidades más altas favorecen la formación de películas más delgadas, uniformes y adherentes, mientras que las velocidades bajas tienden a generar irregularidades y acumulaciones que comprometen la calidad del recubrimiento.

Por tanto, para este tipo de coloides, las condiciones óptimas de spin coating se encuentran entre 1500 y 2000 rpm.

Este estudio aporta una contribución original al combinar la preparación de SP mediante grabado electroquímico con la aplicación de nanopartículas de grafito a través de la técnica de spin coating, en un contexto de bajo costo y alta accesibilidad. Si bien existen trabajos previos que emplean recubrimientos de grafito sobre sustratos de silicio, la mayoría utiliza técnicas de mayor complejidad como CVD o métodos asistidos por plasma, mientras que el presente enfoque propone una vía más directa, escalable y adaptable a laboratorios. Además, se parte de la idea de usar el grafito en su forma coloidal sin necesidad de surfactantes, lo cual disminuye los pasos de síntesis y reduce el riesgo de contaminación del ánodo final.

Sin embargo, se reconocen varias limitaciones metodológicas propias de esta etapa exploratoria. Entre ellas, la sedimentación parcial del coloide en ciertas formulaciones, la dificultad para asegurar la infiltración de las nanopartículas en los poros del silicio, y la variabilidad en la adherencia de los recubrimientos obtenidos a bajas velocidades de spin coating. Asimismo, no se ha realizado aún una replicación estadística completa para validar la reproducibilidad de los resultados. Estas cuestiones forman parte del desarrollo en curso y se consideran prioritarias para fases posteriores del proyecto.

## Conclusiones

En el presente trabajo se prepararon y caracterizaron materiales funcionales basados en silicio poroso (SP) y nanopartículas de grafito, como parte de una etapa inicial para el posible desarrollo de ánodos avanzados destinados a baterías de ion-litio. A través del grabado electroquímico, se obtuvieron capas de SP con diámetros de poro en el rango de 6 a 7 nm, y espesores de 4.10  $\mu\text{m}$  y 56.6  $\mu\text{m}$ , cercanos a los valores teóricos estimados de 3  $\mu\text{m}$  y 60  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Estos resultados demuestran un buen control sobre el proceso de síntesis y validan la metodología empleada, en concordancia con estudios previos [7], en donde se reportaron estructuras porosas similares con tamaños de poro que rondan entre los 3.5 y 6.4 nm y espesores de entre 2 y 30  $\mu\text{m}$ .

En cuanto a la preparación de los coloides de grafito, se observó que el sistema más estable correspondió a etanol con 100 mg de grafito (coloide C3), el cual mostró buena dispersión y facilidad de manipulación. Esto coincide con lo reportado donde se destaca que las mezclas binarias de solventes contribuyen a mejorar la afinidad entre el grafito y la fase líquida, favoreciendo la estabilización coloidal sin requerir surfactantes adicionales [2,9].

Los recubrimientos realizados sobre sustratos de vidrio mediante spin coating mostraron una clara dependencia respecto a la velocidad de rotación. Las películas obtenidas a 1500 y 2000 rpm presentaron mayor homogeneidad, mejor distribución del material y menor

presencia de acumulaciones, mientras que aquellas realizadas a 1000 y 500 rpm evidenciaron patrones irregulares y zonas densas. Estos resultados coinciden con observaciones previas en la literatura, donde se ha documentado que la velocidad de giro influye directamente en el espesor y la calidad final del recubrimiento [8].

Cabe destacar que este trabajo forma parte de un proyecto más amplio que continúa en desarrollo. Las actividades futuras incluyen la integración completa de los materiales obtenidos en configuraciones tipo celda, su caracterización electroquímica y la evaluación de su ciclabilidad y eficiencia en condiciones reales de operación.

En conclusión, los resultados presentados constituyen una base sólida para continuar con el diseño racional de ánodos basados en materiales híbridos SP-grafito, con potencial para superar las limitaciones del grafito convencional en baterías de ion-litio. Además, este enfoque se alinea con las tendencias actuales en la literatura científica que buscan soluciones más sostenibles, accesibles y de mayor capacidad, sin depender exclusivamente de técnicas de síntesis complejas o costosas.

## Referencias

- [1] Mishra AK, Monika, Patial BS. A review on recent advances in anode materials in lithium ion batteries. *Materials Today Electronics*, 7, (2024). <https://doi.org/10.1016/j.mtelec.2024.100089>
- [2] Li Z, Shi C, Liu P, Di Y, Zhang D, Wang Q, et al. Homogeneously dispersed silicon/graphite composite toward enhanced lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 88, (2024). <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111673>
- [3] Wang D, Kong L, Zhang F, Liu A, Huang H, Liu Y, et al. Porous carbon-coated silicon composites for high performance lithium-ion batterie anode. *Applied Surface Science*, 661, (2024). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.160076>
- [4] Ambrock, K., Rutttert, M., Vinograd, A., Billmann, B., Yang, X., Placke, T., Winter, M., & Börner, M. Optimization of graphite/silicon-based composite electrodes for lithium ion batteries regarding the interdependencies of active and inactive materials. *Journal of Power Sources*, 552, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232252>
- [5] Yu Y, Li Z, Zhang R, Shen X, Yu P, Yu J. Balancing pore development and mechanical strength for high-performance silicon-porous carbon anodes in lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 512, (2025). <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.145468>
- [6] Tian ZY, Wang YF, Qin X, Shaislamov U, Hojamberdiev M, Zheng TH. Porous silicon/carbon composites as anodes for high-performance lithium-ion batteries. *New Carbon Materials*, 39(5):992–1002, (2024). [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(24\)60850-4](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(24)60850-4)
- [7] Luo Y, Huang L, Liu J, Wang Z, Chen Q, Chen Y. The optimization of porosity and particle size for micron-size porous silicon in high energy pre-lithiated silicon-graphite composite for Li-ion batteries. *Microporous and Mesoporous Materials*, 331, (2024). <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111672>
- [8] Walker J, Koutsos V. Spin Coating of Silica Nanocolloids on Mica: Self-Assembly of Two-Dimensional Colloid Crystal Structures and Thin Films. *Coatings*, 13(9), (2023). <https://doi.org/10.3390/coatings13091488>
- [9] Liu L, Gonzalez-Olivares MA, Bai H, Yi H, Song S. Colloidal stability of silica and graphite in aqueous suspensions. *Chemical Physics*, 525, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2019.110405>