

Síntesis verde de nanopartículas de plata (AgNPs) con biomasa de la microalga *Nannochloropsis oculata*

Green synthesis of silver nanoparticles (AgNPs) using *Nannochloropsis oculata* biomass

Angulo-Espinoza, P.J.¹, Santos-Ballardo, D.U.^{2,3*}

¹Ingeniería en Nanotecnología, Universidad Politécnica de Sinaloa, Carr. Municipal Libre Mazatlán Higuera Km 3 Genaro Estrada, 82199. Mazatlán, Sinaloa

²Ingeniería en Energía, Maestría en Ciencias Aplicadas, Universidad Politécnica de Sinaloa, Carr. Municipal Libre Mazatlán Higuera Km 3 Genaro Estrada, 82199 Mazatlán, Sinaloa

³Laboratorio de ecotoxicología, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C. Unidad Mazatlán., Av. Sábalo Cerritos S/N, 82112. Mazatlán, Sinaloa

RESUMEN

Las nanopartículas de plata (AgNPs) son ampliamente estudiadas en nanotecnología, debido a sus numerosas aplicaciones en diversos campos, destacando por sus propiedades antimicrobianas y antioxidantes. Sin embargo, los métodos de síntesis tradicionales para AgNPs tienen importantes desventajas ambientales. Con el objetivo de abordar este problema, se han explorado métodos de síntesis verde como alternativas más eficientes, rentables y respetuosas con el medio ambiente. Las microalgas han surgido como agentes prometedores para la reducción de iones de plata en la síntesis verde de AgNPs, siendo *Nannochloropsis oculata* particularmente efectiva. Si bien, estudios anteriores se han centrado en el uso de la biomasa microalgal completa, el potencial de la biomasa desgrasada, un subproducto generado en la producción de biodiesel microalgal, permanece inexplorado. En el presente proyecto se analizó la síntesis de AgNPs utilizando la biomasa completa y la desgrasada de la microalga *N. oculata*; analizando también el efecto de dos métodos de calentamiento: calentamiento asistido por microondas y agitación. Los objetivos del estudio incluyen determinar la combinación más efectiva para la síntesis de AgNPs y proyectar sus posibles aplicaciones. Los resultados obtenidos revelaron que todas las condiciones analizadas condujeron a la formación de nanopartículas de diferentes formas y tamaños, como se evidenció a través de espectroscopia UV-visible (UV-Vis). Los hallazgos del presente trabajo pueden contribuir a la obtención sostenible de recursos nanotecnológicos, a la reducción de residuos en la síntesis de AgNPs, y el desarrollo de nanomateriales con potenciales propiedades antimicrobianas y antioxidantes.

Palabras clave: Nanotecnología, Nanopartículas metálicas, Biosíntesis, Microalgas, Biomasa residual

ABSTRACT

Silver Nanoparticles (AgNPs) are widely studied in nanotechnology due to their numerous applications in various fields. However, traditional synthesis methods for AgNPs have significant environmental disadvantages. In order to address this issue, green synthesis methods have been explored as more efficient, cost-effective, and environmentally friendly alternatives. Microalgae have emerged as promising agents for silver ion reduction in green synthesis, with *Nannochloropsis oculata* being particularly effective. While previous studies have focused on the use of whole microalgae, the potential of deoiled microalgal biomass, a byproduct of biofuel production, remains unexplored. This project aims to investigate the synthesis of AgNPs using complete and deoiled biomass of *N. oculata*, comparing two heating methods: microwave-assisted heating and agitation. The study's objectives include determining the most effective combination for AgNPs synthesis and assessing their potential applications. The results obtained revealed that all the analyzed conditions led to the formation of nanoparticles of various shapes and sizes, as evidenced through UV-vis spectroscopy. The findings of this study could contribute to the sustainable acquisition of nanotechnology resources, the reduction of waste in the synthesis of AgNPs, and the development of nanomaterials with potential antimicrobial and antioxidant properties.

Keywords: Nanotechnology, Metallic nanoparticles, Biosynthesis, Microalgae, Residual biomass.

*Autor de correspondencia: Dr. David Ulises Santos-Ballardo

E-mail: ulises.ballardo@ciad.mx

ORCID ID: [0000-0001-5058-8621](https://orcid.org/0000-0001-5058-8621)

Revista online: <https://revistas.uas.edu.mx/index.php/QBU/index>

INTRODUCCIÓN

La nanotecnología es la disciplina centrada en el estudio de la materia a escala atómica con fines de diseñar, sintetizar, manipular y aplicar estructuras, materiales y sistemas funcionales, mediante el control de ciertas sustancias a nanoescala, aprovechando las propiedades y los fenómenos físicos cuánticos presentes en esta dimensión (Gómez-Garzón, 2018).

En los últimos años la nanotecnología ha ganado especial interés en el mundo científico debido a su gran campo multidisciplinario. Esto ha ocasionado un gran desarrollo a escala mundial, provocando una revolución en un gran número de áreas y procesos relacionados con esta tecnología (Monge, 2009). Entre los productos más conocidos y estudiados de la nanotecnología se encuentran las nanopartículas (NPs), que son partículas extremadamente pequeñas, con un diámetro inferior a 100 nm ($1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$), y que pueden ser sintetizadas a partir de diversos metales, óxidos metálicos o de compuestos de naturaleza metálica (Gutierrez-Wing, S.F.; Monge, 2009)

Las NPs se caracterizan por poseer una relación superficie-volumen alta, que les otorga interesantes propiedades ópticas, magnéticas, electrónicas, catalíticas, biológicas, etc., que además se pueden aplicar en diversas áreas. Por ejemplo, en medicina se utilizan nanopartículas de oro (AuNPs) para la detección temprana de células cancerígenas, de virus de inmunodeficiencia humana (VIH) e incluso Alzheimer; por otro lado, en protección ambiental se adicionan nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2 NPs) en pinturas, las cuales, en presencia de la luz pueden descomponer algunos contaminantes atmosféricos; también, en electrónica se emplean nanopartículas de silicio (SiNPs) para la fabricación de memorias para computadoras, y nanotransistores. Sin embargo, uno de los metales más utilizados para la síntesis de nanopartículas es la plata, de donde se obtienen las nanopartículas de plata (AgNPs). Este elemento metálico es de gran interés ya que por más de 2000 años ha sido reconocido por sus propiedades benéficas en la salud (Gutierrez-Wing, S.F.; Monge, 2009).

Nanopartículas de plata

Las AgNPs son de gran interés para los investigadores, ya que se ha reportado que no presentan toxicidad hacia los humanos, e incluso a muy bajas concentraciones son muy efectivas para combatir bacterias, virus y otros microorganismos eucariotas, esto debido a que son capaces de destruir las membranas bacterianas a través del contacto directo sin producir efectos secundarios, lo que las convierte en excelentes candidatas para aplicarse en cosmética, medicina, agricultura, química y farmacéutica (Mohseniazar *et al.*, 2011; Fernández-Bueno *et al.*, 2017; De Silva *et al.*, 2021; Hanna *et al.*, 2022).

Por otra parte, estas nanopartículas metálicas poseen un alto valor terapéutico debido a su notable potencial antioxidante (Chokshi *et al.*, 2016). Esto se refiere a su capacidad para reducir el daño causado por el estrés oxidativo, el cual es generado por la producción de especies reactivas de oxígeno o nitrógeno que resultan en daño celular. No obstante, es importante resaltar que estas propiedades de las AgNPs dependen en gran medida de las características cristalográficas y morfológicas de la nanopartícula, como el tamaño y la forma, y que estos a su vez, pueden ser influenciados por diferentes métodos de síntesis (Castro *et al.*, 2013).

Para la generación de AgNPs, la síntesis química ha sido ampliamente estudiada y utilizada. Entre los métodos químicos disponibles se encuentran técnicas como la deposición química de soluciones, la ruta catalítica y el proceso sol-gel, por mencionar algunos (Hanna *et al.*, 2022). Estos procedimientos utilizan diferentes productos químicos y reactivos para reducir los iones de plata y estabilizar las nanopartículas. Sin embargo, es importante destacar que estos productos químicos pueden ser tóxicos, ya que se basan en el uso de solventes, reductores y agentes estabilizantes que se absorben en la superficie de las nanopartículas. Esto plantea preocupaciones tanto para la salud humana como para el medio ambiente, puesto que la mayoría de los residuos generados en el proceso son compuestos no biodegradables (Hanna *et al.*, 2022).

Debido a esto, en los últimos años se han buscado alternativas para la obtención de AgNPs que sean más amigables con el medio ambiente. Por lo tanto, ha surgido un enfoque conocido como síntesis verde, proceso que involucra el uso de agentes biológicos u organismos como bacterias, hongos, extractos de plantas y algas para producir NPs; dicha tecnología se caracteriza por aprovechar las capacidades antioxidantes de las plantas o compuestos orgánicos para transformar los iones inorgánicos metálicos en nanopartículas por medio de las capacidades reductoras de los metabolitos y proteínas de estos (De Silva *et al.*, 2020; De La Caridad Esquivel-Figueroa & Mas-Diego, 2021).

Síntesis Verde de AgNPs

En los últimos años se ha reportado la obtención de AgNPs mediante síntesis verde, empleando diferentes organismos. Sin embargo, la síntesis de estos compuestos utilizando algas, microalgas y sus derivados muestra más ventajas sobre otras muestras biológicas como bacterias y hongos (Suja *et al.*, 2016). Las algas son un grupo de organismos autótrofos con importancia ecológica y económica que pueden vivir en diferentes hábitats como agua fresca, agua marina o en superficies de rocas. Existen dos categorías principales de algas:

macroalga (que incluye organismos a nivel macroscópico) y microalga (con microorganismos) (Deeksha-Chugh *et al.*, 2021). Estas últimas han generado mucho interés científico, ya que son consideradas como fábricas celulares a nivel microscópico, son impulsadas por la luz solar y se encuentran en medios acuáticos, además de producir grandes cantidades de lípidos y carbohidratos que pueden ser aprovechados en medicina, farmacéutica, acuicultura, cosmética y en la producción de biocombustibles, biodiesel o bioetanol (Chokshi *et al.*, 2016; Hanna *et al.*, 2022).

Actualmente, el uso de microalgas ha sido poco estudiado en el área de la nanotecnología, sin embargo, en los últimos años ha venido tomando relevancia, debido a su alta capacidad de acumular metales y reducir iones, su relativamente fácil manejo y cultivos económicos, su rápida tasa de crecimiento, una alta eficiencia fotosintética, pero principalmente, su capacidad para producir nanopartículas a gran escala de una manera más rápida y sin producir ninguna sustancia tóxica o dañina para el ambiente (Chokshi *et al.*, 2016). Debido a esto, especies como *Chlorella vulgaris*, *Isochrysis galbana* y *Nannochloropsis oculata* se han utilizado en la síntesis de AgNPs en los últimos años (Suja *et al.*, 2016; Hanna *et al.*, 2022).

Particularmente, se han realizado varios estudios que demuestran la efectividad de la microalga *Nannochloropsis oculata* en la síntesis verde de AgNPs, en ellos se comenta este comportamiento puede explicarse debido a la presencia de diversas biomoléculas en su estructura celular, tales como proteínas, enzimas y ácidos grasos poliinsaturados, mismos que pudieran actuar como agentes reductores y encapsulantes durante la síntesis de NPs (Deeksha-Chugh *et al.*, 2021). Sin embargo, estos estudios se han centrado exclusivamente en el uso de la microalga en su forma completa. La biomasa desgrasada de la microalga, que es el residuo obtenido después de extraer los aceites para la producción de biocombustibles, ha recibido menos atención en la investigación (Chokshi *et al.*, 2016).

Actualmente a nivel mundial se generan alrededor de 20,000 toneladas de biomasa microalgal cada año, y a partir de ella se generan grandes cantidades de un subproducto desgrasado, que usualmente no se aprovecha. Por lo tanto, se ha explorado el potencial de la biomasa residual para su utilización en diferentes aplicaciones y su mejor aprovechamiento (Chokshi *et al.*, 2016). Sin embargo, hasta donde se tiene conocimiento, no existen estudios o investigaciones que hayan examinado específicamente la eficacia de la biomasa desgrasada de *N. oculata* en la síntesis de AgNPs.

Por otro lado, durante la síntesis de NPs, son clave diversos factores que pueden alterar la forma, tamaño y estabilidad de las

nanopartículas, y por tanto sus propiedades, algunos de los más importantes son agitación del reactor y la temperatura a la que se realiza la síntesis, por lo que se han venido desarrollando diversas estrategias para el control de este tipo de proceso (Deeksha-Chugh *et al.*, 2021).

Entre las herramientas más utilizadas en la síntesis verde se encuentran el calentamiento asistido por microondas y la agitación/calentamiento directo (Deeksha-Chugh *et al.*, 2021). Si bien ambos enfoques han sido estudiados y reportados anteriormente, se ha observado que el calentamiento asistido por microondas presenta ventajas, como una mayor velocidad de reacción y la prevención de la aglomeración de las AgNPs. Por lo tanto, resulta interesante comparar ambos métodos de calentamiento y determinar cuál de ellos es más eficaz en la formación de las nanopartículas utilizando las diferentes presentaciones de *N. oculata*.

El propósito de esta investigación fue realizar una comparación en la formación de AgNPs mediante un diseño experimental 2x2, analizando dos variables: 1- el tipo de biomasa de microalga (con los niveles de biomasa completa y desgrasada) y 2- el tipo de calentamiento (probando calentamiento/agitación y asistencia por microondas). El objetivo fue determinar cuál de las combinaciones resulta más efectiva y ofrece mejores resultados en la síntesis de nanopartículas de plata.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de biomasa microalgal

Para la obtención de la microalga se recolectó biomasa de *Nannochloropsis oculata* cultivada en un fotobiorreactor de 80 L, utilizando un medio de crecimiento F/2 a la que posteriormente se le realizó extracción de aceite para la obtención de biomasa desgrasada.

Síntesis de AgNPs

Para la obtención de las nanopartículas, primero se elaboró un extracto acuoso de biomasa (completa y desgrasada) mezclando 1 g de ésta con 50 mL de agua destilada, calentando a 70 °C por 5 min y después filtrándose con papel filtro de celulosa. Ambos tipos de extractos fueron recolectados y almacenados por separado a 4 °C para su posterior uso.

Síntesis verde por calentamiento con agitación

Para la síntesis de AgNPs, se mezclaron 12.5 mL del extracto de biomasa completa con 12.5 mL de AgNO₃ al 2 mM. Esta solución se agitó a temperatura ambiente durante 24 h. La reducción de los iones de Ag⁺ fue monitoreada por cambio de color (de verde a amarillo ámbar

o marrón) y espectroscopia UV-vis. La Figura 3 muestra los cambios de color que se presentaron en las primeras pruebas de calentamiento. Las AgNPs obtenidas se almacenaron en frascos color ámbar para protegerse de la luz y se mantuvieron a 4 °C para su posterior caracterización. El mismo procedimiento se repitió con el extracto de biomasa desgrasada.

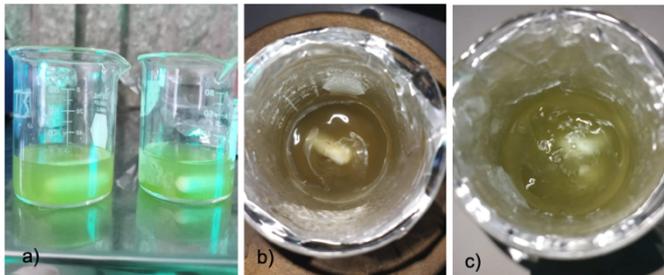


Figura 1. Esquema que muestra los cambios de color durante la síntesis. a) Color inicial de ambas soluciones b) Solución con agitación y calentamiento a 50 °C después de 6 horas c) Solución con agitación a temperatura ambiente después de 6 horas.

Síntesis verde con calentamiento asistido por microondas

Se utilizó un microondas (White Westinghouse®, Ohio, Estados Unidos) para calentar una solución de 12.5 mL de extracto de biomasa completa y 12.5 mL de AgNO₃ 2 mM, aplicando ciclos de 10 s a 40 W de potencia hasta observar cambio de color característico de la reducción de los iones de Ag⁺ (Figura 2). Al igual que las AgNPs obtenidas por agitación, las NPs obtenidas se almacenaron en frascos color ámbar para protegerse de la luz y se mantuvieron a 4°C para su posterior caracterización. El mismo procedimiento se repitió con el extracto de biomasa desgrasada.

Caracterización espectrofotométrica

Para la caracterización y estudio de las propiedades de las nanopartículas generadas, se realizó un análisis por espectrofotometría utilizando un Espectrofotómetro UV-Vis (Thermo-Scientific® Modelo GENESYS 10s, Madison, Wisconsin, EE. UU.) para evaluar la absorbancia de cada una de las muestras obtenidas, mediante un barrido en el rango de longitud de onda que osciló entre 350 y 800 nm. Se empleó el extracto de biomasa inicial como blanco de referencia. Este análisis desempeña un papel crucial al permitir la identificación de la presencia de NPs y proporciona un panorama general sobre su forma y distribución de manera sencilla y económica, se ha reportado que es recomendable realizar la caracterización por espectrofotometría, antes de llevar a cabo análisis más costosos, como la microscopía electrónica. De esta manera, dicho enfoque permite obtener información relacionada con las dimensiones,

configuración y distribución de las nanopartículas de plata (Morales et al., 2009; De Silva et al., 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización espectrofotométrica de las AgNPs

Se logró la generación de nanopartículas de plata mediante síntesis verde utilizando dos tipos de biomasa de la microalga *Nannochloropsis oculata*: completa y desgrasada; además, se emplearon dos métodos de calentamiento: agitación a temperatura ambiente y asistencia por microondas.

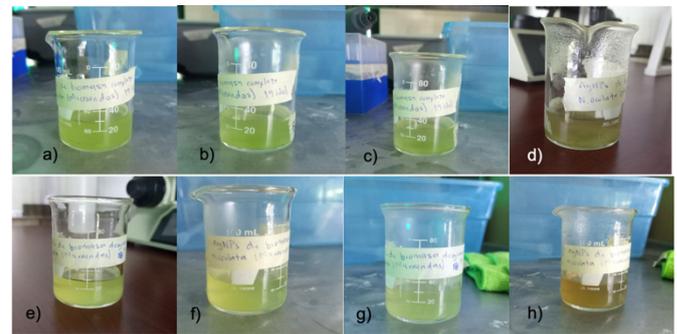


Figura 2. Evolución del color de la solución de biomasa a través de cada uno de los ciclos en el microondas. Biomasa completa: a) Color inicial. b) Primer ciclo. c) Segundo ciclo. d) Tercer ciclo. Biomasa desgrasada: e) Color inicial. f) Primer ciclo. g) Segundo ciclo. h) Tercer ciclo

AgNPs generadas con agitación a temperatura ambiente.

La Figura 3A muestra el patrón de absorbancia de las AgNPs obtenidas a partir de biomasa completa mediante calentamiento por agitación a temperatura ambiente, donde se puede confirmar la presencia de AgNPs. Se observa una curva de absorción en el rango de 350-500 nm. Por otro lado, la Figura 3b representa el espectro de absorción de las AgNPs obtenidas a partir de biomasa desgrasada bajo el mismo método de calentamiento que la muestra anterior, manifestando de la misma manera presencia de nanopartículas, evidenciada por la absorción entre 350-500 nm.

AgNPs generadas con calentamiento asistido por microondas

Siguiendo con el análisis, se analizó el patrón de absorbancia de las muestras de AgNPs obtenidas mediante calentamiento asistido por microondas que se caracteriza por acelerar el proceso de síntesis (Figura 4). Para la biomasa completa se confirmó la presencia de AgNPs dispersas de diversas formas y un tamaño considerable, evidenciado por el pico de alta absorbancia en el rango de 350-430 nm (Figura 4A).

Finalmente, la Figura 4B presenta los resultados del análisis de las AgNPs generadas a partir de biomasa desgrasada mediante la síntesis asistida con microondas, en la que también se evidencia la presencia de NPs de diversas formas y tamaños, las cuales se mantienen igualmente dispersas en la solución. Este hallazgo se confirma, en primer lugar, por la presencia de absorción entre 350-500 nm y un pico principal en 350 nm que, en este caso, se extiende hasta 430 nm.

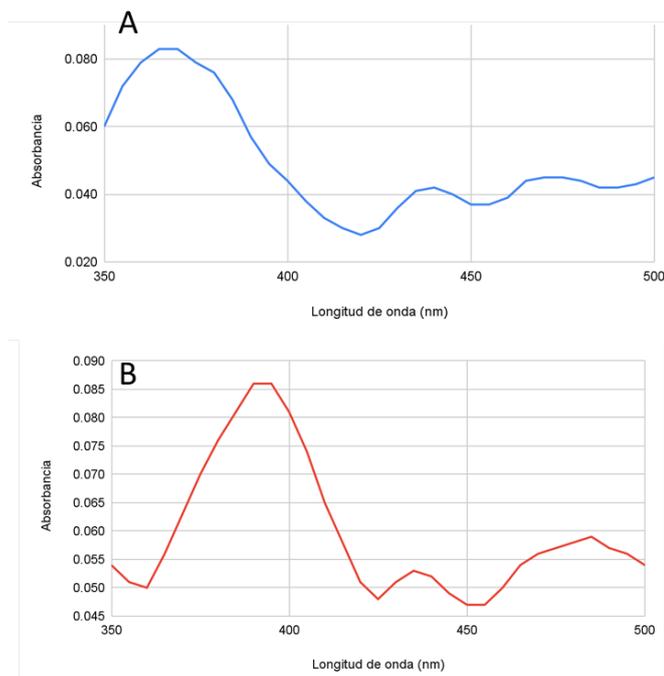


Figura 3: Espectro UV-vis de AgNPs sintetizadas por el método de agitación a temperatura ambiente. A: con biomasa completa; B: con biomasa desgrasada

DISCUSIÓN

AgNPs generadas con agitación a temperatura ambiente.

En cuanto a las AgNPs obtenidas a partir de biomasa completa mediante calentamiento por agitación a temperatura ambiente (Figura 3A), al observarse una curva de absorción en el rango de 350-500 nm, se comprueba la presencia de AgNPs, como previamente se ha documentado en la literatura (Morales *et al.*, 2009; Chokshi *et al.*, 2016). Se puede sugerir la presencia de nanopartículas de diferentes formas y tamaños. Esto es representado por el pico que se encuentra entre los 350-400 nm. Además, por la amplitud de dicho pico, se infiere que estas nanopartículas están dispersas en la solución y no hay indicios de aglomeración. Por otro lado, la presencia de otras bandas de absorción antes de los 450 nm, indican la presencia de NPs esféricas. Las NPs esféricas exhiben una absorción máxima entre 420 y 440 nm, siendo la óptima en 420 nm (De Silva *et al.*, 2020), esto concuerda con lo reportado por Suber *et al.* (2005), donde reportaron

la presencia de nanopartículas con forma esférica con absorciones entre 390 y 440 nm. La presencia de un pequeño pico alrededor de 440 nm, puede sugerir la presencia de NPs esféricas estables y de gran tamaño. Sin embargo, estas NPs se encuentran en una proporción mucho más pequeña a las NPs de diferentes formas y tamaños explicadas con anterioridad. Por último, la presencia de absorción más allá de los 450 nm indica la presencia de nanopartículas significativamente más grandes que el resto. Esto coincide con lo reportado por De Silva *et al.* (2020), donde mediante análisis de UV-vis detectaron la presencia de nanopartículas de plata utilizando el microorganismo *Serratia sp.*, los autores reportan que picos arriba de 440 nm indican la presencia de nanopartículas de tamaño grande mientras que picos entre 380 y 440 nm se traduce en presencia de nanopartículas finas y redondas.

Por otro lado, para las AgNPs obtenidas a partir de biomasa desgrasada mediante el mismo método de calentamiento, el pico que se observa entre 360-430 nm tiene una absorción y amplitud similar al obtenido con la biomasa completa, lo que sugiere que se formaron cantidades similares de nanopartículas dispersas de diferentes formas y tamaños (Morales *et al.*, 2009; Suber *et al.*, 2005; De Silva *et al.*, 2020). Además, la presencia del pequeño pico alrededor de 440 nm indica la presencia de NPs esféricas estables de la misma manera que exhibía la biomasa completa. Sin embargo, la biomasa desgrasada presenta picos más definidos y estables que la biomasa completa lo que podría indicar que la biomasa desgrasada tiende a formar nanopartículas más estables. Se ha reportado que picos más definidos están relacionados con una tensión superficial más alta, lo que ocasiona una fuerza de cohesión mayor entre las nanopartículas lo que se traduce en una mayor estabilidad de estas (Morales *et al.*, 2009; Suber *et al.*, 2005).

AgNPs generadas con calentamiento asistido por microondas.

En cuanto al patrón de absorbancia de las AgNPs obtenidas mediante calentamiento asistido por microondas (Figura 4A) se observó un pico de absorbancia máxima en el rango de 350-430 nm. Es importante mencionar que la absorbancia de los picos está estrechamente relacionada con el tamaño de las NPs y que este tiende a ser mayor cuando la absorbancia aumenta (Suber *et al.*, 2005). Es posible que este incremento se deba al método de calentamiento y su tendencia a aumentar la temperatura de manera abrupta y a su vez, inducir la aglomeración de NPs. Esto se puede deber al aumento de la energía superficial y la interacción entre partículas, lo que lleva a la formación de grupos o aglomerados (De Silva *et al.*, 2020). Este comportamiento ha sido bien documentado por Suber *et al.* (2005), donde se

desarrollaron nanopartículas de plata y se reporta que su morfología y la estabilidad se relaciona con los métodos de síntesis de soluciones homogéneas de nanopartículas.

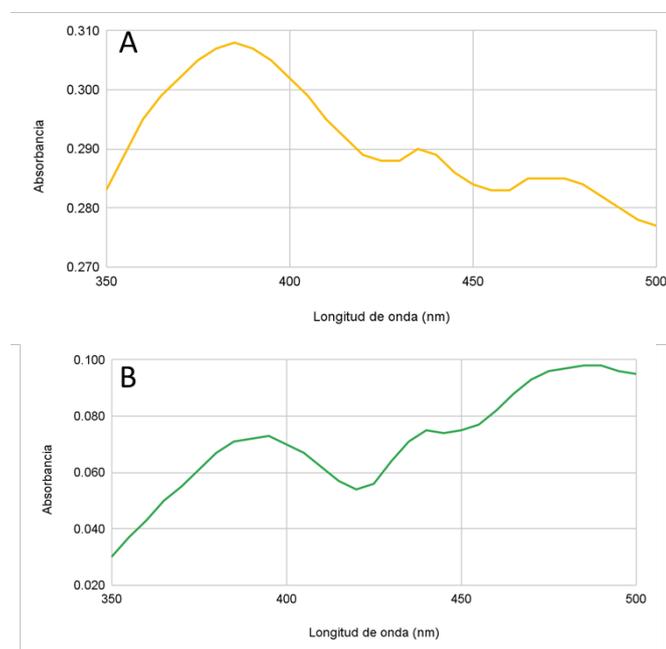


Figura 4: Espectro UV-vis de AgNPs sintetizadas por el método de calentamiento asistido por microondas. A: con biomasa completa; B: con biomasa desgrasada.

Finalmente, en cuanto a las AgNPs generadas a partir de biomasa desgrasada mediante la síntesis asistida con microondas (Figura 4B), su patrón de absorbancia refleja una variabilidad en la que también se evidencia la presencia de NPs de formas y tamaños heterogéneos. No obstante, este último pico observado presenta una absorbancia menor, lo que sugiere que las nanopartículas son de un tamaño más reducido en comparación con las obtenidas a partir de biomasa completa. Además, se detectan NPs esféricas, como se evidencia en el pico de 440 nm, el cual es ligeramente más grande que el primero. Esto podría indicar que la presencia de nanopartículas esféricas y otras NPs de mayor tamaño (pico más allá de los 450 nm) se encuentran aproximadamente en mayor proporción que las NPs de diferentes formas y tamaños, estos resultados coinciden con lo reportado por otros autores (Morales *et al.*, 2009; Suber *et al.*, 2005; De Silva *et al.*, 2020).

CONCLUSIONES

El uso de biomasa de *Nannochloropsis oculata* en ambas de sus presentaciones demuestra un buen potencial en la síntesis verde de AgNPs. En cuanto al método de calentamiento, se observó que la agitación a temperatura ambiente resultó ser el método más adecuado

para obtener AgNPs de mayor uniformidad, mejor distribución y mayor dispersión en contraste con el calentamiento asistido por microondas, que condujo a la formación de nanopartículas más grandes y aglomerados.

Por otra parte, se encontró que los diferentes tipos de biomasa utilizada presentan resultados similares durante la síntesis. Sin embargo, la extracción de los aceites para la obtención de la biomasa desgrasada pudiera eliminar algunos componentes celulares, concentrando el contenido de polifenoles o algunas proteínas, compuestos que pudieran facilitar la reducción de los iones de Ag, así como el encapsulamiento de las NPs.

Además, se encontró que la combinación más adecuada para la síntesis de AgNPs a partir de la microalga *Nannochloropsis oculata* fue la biomasa desgrasada con agitación a temperatura ambiente, ya que en el análisis espectrofotométrico se observaron picos más definidos y estables. Esto pudo ser debido al control más preciso del incremento en la temperatura, lo que llevó a una reacción más uniforme de los reactivos involucrados en la síntesis, así como a la remoción de ciertos componentes encontrados en la biomasa completa (como los aceites). Es importante mencionar que estos resultados son convenientes como una manera de aprovechar la biomasa residual de microalgas que se genera en la producción de biocombustibles (biomasa desgrasada), además, los estudios espectrofotométricos realizados generan un panorama inicial de la forma y tamaño de las nanopartículas generadas, se recomienda realizar análisis microscópicos más finos, como microscopía electrónica de transmisión, microscopía electrónica de barrido, espectroscopia infrarroja transformada de Fourier, entre otras, para realizar una caracterización más precisa de las AgNPs.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a la Dra. Karla Paola Valdez Nuñez, a la Dra. Gissel Rios y al laboratorio de compuestos bioactivos de UPSIN por el apoyo con equipamiento para la realización de los experimentos, así como a la MC Andrea de Jesús Gárate Osuna que aportó la biomasa utilizada en el trabajo.

Declaración de conflicto de interés

Los autores declaran que no existe conflicto de interés con el contenido del presente trabajo.

REFERENCIAS

- Castro, L., Blázquez, M., Muñoz, J., González, F. and Ballester, A. (2013). Biological synthesis of metallic nanoparticles using algae. *Int J Nanobiotechnology*, 7(3), 109-116. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2012.0041>
- Chokshi, K., Pancha, I., Ghosh, T., Paliwal, C., Maurya, R., Ghosh, A. and Mishra, S. (2016). Green synthesis, characterization and antioxidant potential of silver nanoparticles biosynthesized from de-oiled biomass of thermotolerant oleaginous microalgae *Acutodesmus dimorphus*. *RSC Advances*, 6(76), 72269-72274. <https://doi.org/10.1039/c6ra15322d>
- De Silva, C., Noor, A. A. M., Karim, M., Gunasekaran, B., Gani, S. A., Cabrera, M. and Ahmad, S. A. (2020). The green synthesis and characterisation of silver nanoparticles from *Serratia* SPP. *Revista Mexicana De Ingeniería Química*, 19(3), 1327-1339. <https://doi.org/10.24275/rmiq/bio1059>.
- Deeksha-Chugh, V.S. Viswamalya, Bannhi Das. (2021) Green synthesis of silver nanoparticles with algae and the importance of capping agents in the process, *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 19 (1), 1-21. <https://doi.org/10.1186/s43141-021-00228-w>.
- De La Caridad Esquivel-Figueroa, R. and Mas-Diego, S. M. (2021). Síntesis biológica de nanopartículas de plata: revisión del uso potencial de la especie *Trichoderma*. *Revista Cubana de Química*, 33(2), 23-45. <http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v33n2/2224-5421-ind-33-02-23.pdf>
- Fernández-Bueno, T. (2017). Estudio de las aplicaciones biomédicas de las nanopartículas de plata [Trabajo de Fin de Grado Farmacología]. Universidad de Sevilla.
- Gómez-Garzón, M. (2018). Nanomateriales, nanopartículas y síntesis verde. *Revista Repertorio de Medicina y Cirugía*. Fundación Universitaria de Ciencias de la Salud – FUCS. Disponible en: <https://revistas.fucsalud.edu.co/index.php/repertorio/articloe/view/191/209#info>. Accesado 23 de Enero de 2024.
- Gutiérrez-Wing, C. E. (s. f.). Las nanopartículas: pequeñas estructuras con gran potencial ¿Por qué el interés en estos materiales? ¿Qué aplicaciones tienen? EL INNIN hoy. Disponible en <https://docplayer.es/14743940-Las-nanopartículas-pequeñas-estructuras-con-gran-potencial.html>. Accesado: 23 de enero, 2023.
- Hanna, A. L., Hamouda, H. M., Goda, H. A., Sadik, M. W., Moghanm, F. S., Ghoneim, A., Alenezi, M. A., Alhomasy, S. F., Alam, P. and Elsayed, T. A. (2022). Biosynthesis and characterization of silver nanoparticles produced by *Phormidium ambiguum* and *Desertifilum tharense* Cyanobacteria. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 2022, 1-14. <https://doi.org/10.1155/2022/9072508>
- Mohseniazar, M., Barin, M., Farajnia, S., Alizadeh, S. and Shanehbandi, D. (2011). Potential of microalgae and lactobacilli in biosynthesis of silver nanoparticles. DOAJ (DOAJ: Directory of Open Access Journals). <https://doi.org/10.5681/bi.2011.02>
- Monge, M. (2009). Nanopartículas de plata: métodos de síntesis en disolución y propiedades bactericidas. *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, 105(1), 33-41. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2931286.pdf>
- Morales, J., Moran, J., Quintana, M. and Estrada, W. (2009). Synthesis and characterization of silver nanoparticles by sol-gel route from silver nitrate; Síntesis y caracterización de nanopartículas de plata por la ruta sol-gel a partir de nitrato de plata. *Rev. Soc. Quím. Perú*. 75(2):177-184. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2009000200004
- Suber, L., Sondi, I., Matijević, E. and Goia, D.V. (2005). Preparation and the of formation of silver particles of different morphologies in homogeneous solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*. 288: 489-495. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.03.017>
- Suja, C. P., Senthil, S. L., Anu Priya, S., Shiny Preethi, M. and Renu, A. (2016). Optimization and characterization of silver nanoparticle synthesis from the microalgae, *Isochrysis galbana*. *Bioscience Biotechnology Research Communications*. 9(2):195-200. ISSN: 2321-4007. http://eprints.cmfri.org.in/12858/1/C%20P%20Suja_2016_Bioscience%20Biotechnology%20Research%20Communications_Optimization%20and%20characterization%20of%20silver%20nanoparticle%20synthesis.pdf.