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

# Síntesis de nanopartículas de cobre (CuNPs) utilizando Sistemas Acuosos de Dos Fases

Synthesis of copper nanoparticles (CuNPs) using Aqueous Two-Phase Systems

Alexis Daniel Funes Pérez[1], María del Pilar González Muñoz[2], Rocío Paola Carrillo Gaytán[2], Guadalupe Falcón Millán[2]
[1]División de Ciencias Naturales y Exactas, PE Licenciatura en Química, Noria Alta S/N; C.P. 36050; Guanajuato, Gto.
[2]Departamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Cerro de la Venada S/N, C.P. 36033; Guanajuato, Gto.
Universidad de Guanajuato.
g.falcon@ugto.mx

## Resumen

La síntesis convencional de nanopartículas metálicas suele depender de solventes orgánicos y agentes reductores agresivos, cuyo uso conlleva riesgos ambientales y de salud, además de que su separación y recuperación suelen requerir diversas etapas. Por tal motivo, en este trabajo se sintetizaron y recuperaron nanopartículas de cobre (CuNPs) utilizando un sistema acuoso dos fases acuosas (ATPS) nunca trabajados, compuesto de polietilenglicol (PEG) y citrato de sodio, incorporando ácido ascórbico como agente reductor adicional; el sistema se ajustó a pH 11 mediante hidróxido de sodio para favorecer la desprotonación del ácido ascórbico y, con ello, su capacidad reductora. Las condiciones que se utilizaron para la formación del ATPS se determinaron a partir de la construcción de la curva binodal, y las CuNPs sintetizadas se recuperaron por centrifugación y lavado para su caracterización mediante espectroscopia UV-Vis y dispersión dinámica de luz (DLS). El espectro UV-Vis mostró la banda de plasmón de resonancia superficial compatible con una mezcla de óxidos de cobre ($Cu_2O$/CuO) en la superficie del material. El análisis por DLS reveló, por su parte, agregados de tamaño ~260 nm., atribuibles a remanentes de las fases del ATPS adheridos a su superficie. En conjunto, estos resultados constituyen un primer acercamiento al sistema propuesto e identifican áreas de oportunidad para una síntesis de CuNPs más amigable con el medio ambiente al reducir la cantidad de componentes, así como la reducción en la toxicidad de la síntesis. Particularmente, utilizando ATPS, las CuNPs se pueden separar y recuperar en la interfase, lo que no sucede en otros procesos de síntesis.

**Palabras clave**: nanopartículas de cobre; sistema acuoso de dos fases (ATPS); síntesis; recuperación.

## Introducción

Las nanopartículas metálicas han cobrado gran relevancia en la ciencia de materiales debido a los cambios abruptos que experimentan sus propiedades ópticas, térmicas y electromagnéticas al reducirse su tamaño a escala nanométrica, lo que las dota de una elevada relación superficie-volumen y de una reactividad superficial distintiva respecto al material que se obtiene en escala macro (Jamkhande *et al*., 2019). En comparación con los materiales metálicos convencionales, las nanopartículas metálicas, son de gran importancia y siguen siendo estudiadas por sus propiedades físicas y químicas. Cuando estos materiales alcanzan la escala nanométrica, sus propiedades ópticas, térmicas y electromagnéticas sufren grandes cambios que tienen efectos en su superficie y en su tamaño. Entre los metales empleados con este fin, el cobre destaca por su bajo costo y su amplia disponibilidad frente a metales nobles como la plata o el oro, además de exhibir propiedades catalíticas, antimicrobianas y fotocatalíticas que son de interés para sectores tan diversos como la medicina, la energía y la agricultura (Aggarwal *et al*., 2025). En particular, se ha reportado que las nanopartículas de cobre y de óxido de cobre presentan actividad antibacteriana y antifúngica relevante, así como aplicaciones potenciales como nanofertilizantes y nanoplaguicidas en el contexto de una agricultura más sostenible (Kasana *et al*., 2017).

A pesar de que la ruta de reducción química en fase acuosa es la preferida para la síntesis de nanopartículas metálicas por permitir un control preciso de su tamaño y forma a un costo relativamente bajo, su producción se ha limitado en gran medida a la escala de laboratorio (Kinhal *et al*., 2020). Kinhal y colaboradores señalan que llevar esta síntesis a gran escala continúa siendo un reto sin resolver, y que el principal inconveniente no es la reacción de reducción en sí, sino la separación continua de las nanopartículas conforme se van formando en la solución. A esto se suma que varios de los agentes reductores empleados convencionalmente

para estas síntesis son agresivos o poco amigables con el ambiente, como la hidracina o el hipofosfito de sodio, cuya manipulación conlleva riesgos para la salud humana y para los cuerpos de agua receptores de los efluentes de síntesis (Lu *et al*., 2023).

Frente a esta doble problemática —reactivos poco sustentables y dificultad para escalar la separación—, los sistemas de dos fases acuosas (ATPS, por sus siglas en inglés *Aqueous Two-Phase Systems*), representan una alternativa interesante y novedosa para resolverla. Estos sistemas se fundamentan en la técnica de separación por extracción líquido-líquido y se caracterizan por estar formados de dos fases acuosas que bajo ciertas condiciones son inmiscibles entre sí.Los componentes que conforman estos sistemas pueden ser: una mezcla de polímeros, un polímero y una sal o un surfactante y una sal. Los ATPS se han propuesto como una alternativa amigable con el medio ambiente, ya que permiten prescindir de solventes orgánicos tóxicos, aprovechando además la adsorción espontánea de las nanopartículas en la interfase líquido-líquido que se forma entre dos soluciones acuosas inmiscibles (Kinhal *et al*., 2020), esto se explica, asimilando el mecanismo que ocurre en las emulsiones de Pickering, en las cuales se forma una capa rígida del sólido en la interfase de un sistema de dos fases inmiscibles que funge como una barrera mecánica que impide que dos gotas se fusionen, es decir, estabiliza las emulsiones. Los mismos autores demostraron que esta técnica de separación por atrapamiento interfacial sí es escalable, lo que la posiciona como una solución directa al problema de escalabilidad antes descrito (Kinhal *et al*., 2020). Sin embargo, en su implementación original el citrato funge como único agente reductor a la par del PEG, y su capacidad reductora es limitada a las concentraciones bajas en que suele emplearse, lo que restringe el control sobre el tamaño y la polidispersidad de las nanopartículas obtenidas. Por otro lado, Lu *et al*. (2023) mostraron que el uso de ácido ascórbico como agente reductor, en combinación con polivinilpirrolidona (PVP) como agente estabilizante, permite sintetizar nanopartículas de cobre esféricas, bien dispersas y estables durante al menos un mes, mediante un mecanismo de reducción en dos etapas basado en la deshidrogenación sucesiva del ácido ascórbico; no obstante, este trabajo no contempla ningún esquema de separación escalable como el ATPS en donde también esta presente la ventaja de que los componentes que forman las dos fases acuosas son capaces de funcionar como agentes reductores y estabilizadores de las nanopartículas.

En el presente trabajo se propone sintetizar nanopartículas de cobre a partir de una sal metálica precursora utilizando ácido ascórbico como agente reductor, dentro de un sistema ATPS de PEG-citrato, de modo que la separación interfacial escalable demostrada por Kinhal *et al*. (2020) se combine con la mayor eficiencia y el mejor control morfológico que aporta el ácido ascórbico como reductor (Lu *et al*., 2023). De esta manera, el objetivo del presente estudio es evaluar la eficiencia de síntesis y recuperación de nanopartículas de cobre utilizando un sistema ATPS PEG-citrato con ácido ascórbico como agente reductor.

## Parte Experimental

### Reactivos

Polietilenglicol (P.M. = 1000 g/mol), citrato de sodio dihidratado ($Na_3C_6H_6O_7.2H_2O$), ácido ascórbico ($C_6H_8O_6$), cloruro cúprico dihidratado ($CuCl_2.2H_2O$), hidróxido de sodio (NaOH) 1N, agua desionizada y etanol; todos adquiridos de la marca Karal S.A. de C.V.

### *Selección y diseño del sistema ATPS*

En la literatura se han reportado diversas combinaciones de sistemas de dos fases acuosas (ATPS) para la síntesis y separación de nanopartículas metálicas, entre ellas sistemas polímero-polímero (como PEG-dextrano) y polímero-sal (Kinhal *et al*., 2020). Para el presente trabajo se optó por un sistema polímero-sal compuesto por polietilenglicol (PEG) de peso molecular 1000 g/mol y citrato de sodio ($Na_3C_6H_6O_7$), se utilizaron ya que ambos componentes son capaces de formar dos fases inmiscibles a concentraciones suficientemente altas y, adicionalmente, el citrato tiene capacidad como agente reductor. Sin embargo, para que ocurra la reducción del ion metálico y su posterior formación como nanopartícula es indispensable la acción de un agente con mayor poder reductor que el citrato, por lo cual, se decidió incorporar ácido ascórbico ($C_6H_8O_6$) como agente reductor adicional, cuya capacidad reductora depende de su grado de disociación: a un pH cercano a 11, el ácido ascórbico se encuentra predominantemente desprotonado, lo que favorece la transferencia de electrones hacia el ion metálico y, en consecuencia, la reducción de este a su forma nanoparticulada. Con base en lo anterior, se ajustó el pH del sistema mediante la adición de hidróxido de sodio (NaOH).

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

El experimento se diseñó de manera que las condiciones de concentración, pH, temperatura y tiempo fueran fijas y controladas en cada etapa, con el fin de asegurar la reproducibilidad del sistema ATPS y de la síntesis de las nanopartículas de cobre.

***Formación del ATPS***

Para la formación del sistema ATPS se prepararon dos soluciones de manera independiente. En un primer vial se pesaron las cantidades correspondientes de PEG 1000 y de cloruro de cobre (II) ($CuCl_2$), con el fin de obtener una solución de PEG al 23% y una concentración de $CuCl_2$ de 0.05 M; una vez disueltos ambos componentes, la solución se aforó al volumen final, sin realizar ajuste alguno de pH. En un segundo vial se pesaron las cantidades correspondientes de citrato de sodio y de ácido ascórbico, con el fin de obtener una solución de citrato de sodio 1.8 M y ácido ascórbico 0.2 M; una vez disueltos los componentes, la solución se aforó al volumen final y, posteriormente, se ajustó su pH a 11 mediante la adición de NaOH.

## Síntesis de las nanopartículas de cobre

Una vez preparada la solución de PEG-$CuCl_2$ y ajustado el pH de la solución de citrato de sodio-ácido ascórbico, ambas se mezclaron para dar lugar a la formación del sistema ATPS y, simultáneamente, a la síntesis de las nanopartículas de cobre. Para favorecer la reacción, la mezcla se mantuvo en agitación constante a una temperatura de 65 °C durante 1 hora. Transcurrido este tiempo, la solución se dejó en reposo durante 24 horas. Cabe señalar que, tanto después del tiempo de reacción como tras la aplicación de la temperatura, el sistema ATPS se mantuvo estable sin perder su condición bifásica.

***Recuperación y lavado de las nanopartículas***

Transcurrido el tiempo de reposo, se observó la formación de un sólido correspondiente a las nanopartículas sintetizadas, el cual se aisló y recuperó a partir del sistema ATPS. Para ello, se retiró en primer lugar la fase superior del sistema (rica en PEG), cuidando de no alterar la interfase, y se transfirió a un recipiente distinto. Posteriormente, se dejó en el recipiente original únicamente la fase inferior del sistema (rica en citrato de sodio y ácido ascórbico). El contenido de la fase con mayor cantidad de sólido, así como el correspondiente a la interfase, se transfirió a tubos Eppendorf y cada uno se sometió de manera independiente a centrifugación a 10,000 rpm durante 10 minutos, con el fin de decantar y recuperar el sólido contenido en ellos. Se retiró el sobrenadante de cada tubo y el sólido se lavó, también de manera independiente, en dos ocasiones con aproximadamente 1 mL de una solución de etanol en cada lavado, llevando la muestra a vórtex y centrifugando entre cada uno de ellos, retirando el sobrenadante después de cada lavado. Finalmente, los sólidos recuperados de ambos tubos se reunieron en un mismo vial, obteniéndose así el sólido correspondiente a las nanopartículas de cobre, el cual se empleó para realizar los análisis de caracterización correspondientes.

***Caracterización por Espectroscopía UV-Visible***

Para obtener el plasmón de resonancia de las nanopartículas de cobre se empleó espectrómetro de UV-Vis de la marca Varian, modelo Cary 50; permitiendo corroborar la presencia de las nanopartículas en la solución recuperada del sistema ATPS. Para ello, se utilizó agua desionizada como dispersante para su análisis.

***Caracterización por Dispersión de luz dinámica (DLS)***

Para determinar el diámetro hidrodinámico de las nanopartículas en suspensión coloidal se empleó la técnica de dispersión dinámica de la luz (DLS), utilizando un equipo de la marca Malvern, modelo Zetasizer Nano series; el cual permite realizar una observación en tiempo real del proceso de aglomeración y con ello obtener una estimación del tamaño de las nanopartículas obtenidas.

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

## Resultados y discusión

### Curva binodal del sistema ATPS PEG 1000 – citrato de sodio.

Con el fin de analizar y comprobar la formación del sistema ATPS empleado, es necesario determinar las condiciones de composición adecuadas para la síntesis y separación de las CuNPs, por ello, en el grupo de trabajo, se construyó experimentalmente la curva binodal del sistema PEG 1000 – citrato de sodio *(Figura 1).* La curva binodal es la huella digital de un sistema bifásico, en donde se puede obtener información de la composición al equilibrio de este tipo de sistemas acuosos de dos fases. En la curva binodal obtenida se muestran las concentraciones de ambos componentes, los valores ubicados por encima de la curva corresponden a la región bifásica del sistema, mientras que las combinaciones por debajo de ella permanecen como una solución homogénea de una sola fase. Este comportamiento es consistente con lo reportado previamente para sistemas ATPS de tipo polímero-sal (Kinhal *et al*., 2020).

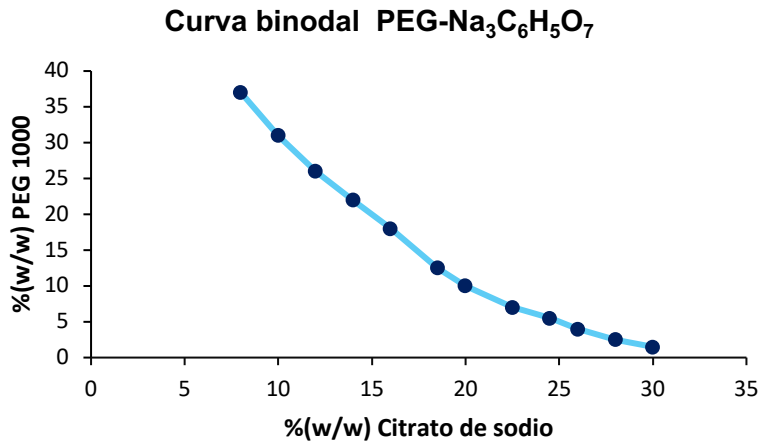


*Figura 1. Curva binodal del sistema PEG 1000-citrato de sodio. Se muestran los puntos obtenidos experimentalmente donde se favorece la formación del ATPS con los compuestos mencionados y en las concentraciones utilizadas.*

A partir de la curva binodal obtenida, se realizaron una serie de pruebas variando concentraciones de PEG 1000 y de citrato de sodio para determinar las condiciones adecuadas en las que se forman los sistemas bifásicos. Se determinó que utilizando una concentración del 23% de PEG 1000 y 1.8 M de citrato de sodio, mezclando volúmenes iguales de disoluciones (10 mL), se obtienen ATPS estables, viables para la síntesis de las nanopartículas de cobre.

### Síntesis de nanopartículas de cobre

Al poner en contacto la solución de PEG-$CuCl_2$ con la solución de citrato de sodio-ácido ascórbico previamente ajustada a pH 11, se observó de manera inmediata la formación de un sistema de coloración verde-turquesa homogénea *(Figura 2A).* Esta tonalidad resulta de la combinación del color azul característico de los complejos acuosos del ion $Cu^{2+}$ con la coloración amarilla de la solución de citrato-ácido ascórbico, un comportamiento cromático similar al reportado en sistemas donde coexisten complejos de cobre en solución acuosa (Lu *et al*., 2023). Al iniciar el calentamiento del sistema, se comenzó a observar la separación de fases, evidenciada por la aparición de un gradiente de color: la fase superior conservó la tonalidad verde-turquesa inicial, mientras que en la fase inferior comenzó a observarse una coloración amarilla (*Figura 1B*), lo cual sugirió el inicio de la reacción de reducción del cobre por acción del ácido ascórbico.

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

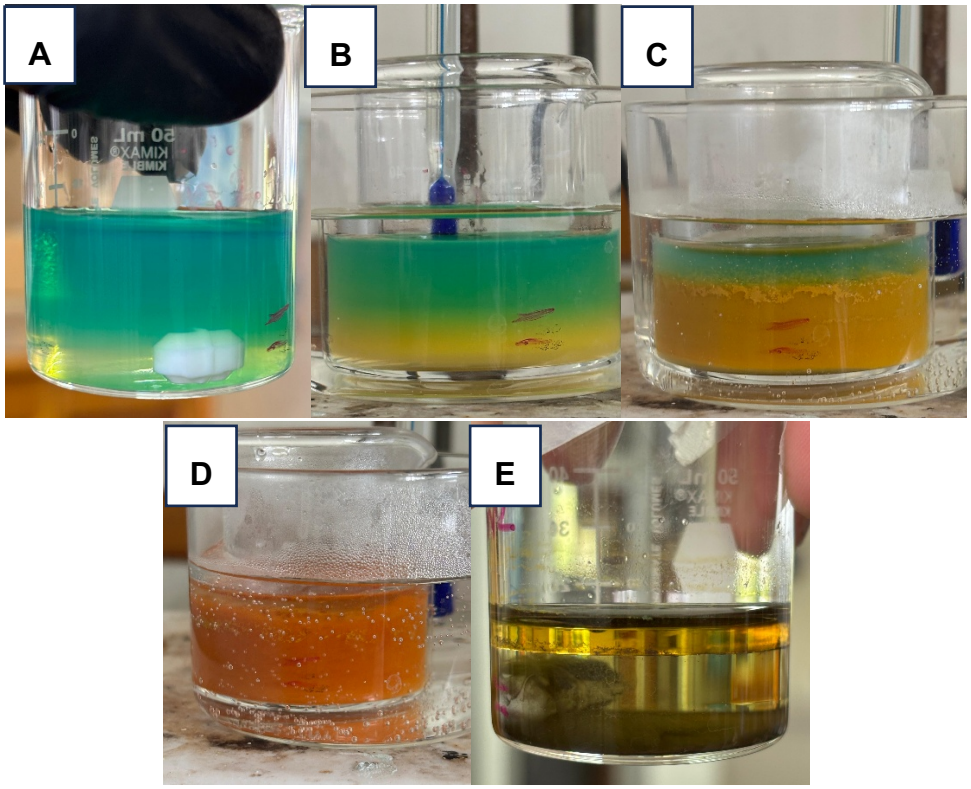


*Figura 2. Cambios del ATPS durante la síntesis de las nanopartículas de cobre: (A) mezcla inicial de las fases PEG-$CuCl_2$ y citrato-ácido ascórbico; (B) sistema al inicio del calentamiento; (C) sistema al alcanzar la temperatura de reacción de 65 °C; (D) sistema después de 1 h de reacción a 65 °C; (E) sistema después de 24 h de reposo, mostrando la separación bifásica final.*

Una vez que el sistema alcanzó la temperatura de reacción de 65 °C, la separación de fases se hizo claramente evidente (*Figura 1C)*: se distinguió una fase superior de tonalidad verde-turquesa y una fase inferior de mayor volumen con coloración naranja, lo que indicó un avance más marcado de la reacción. Transcurrida una hora de reacción, manteniendo la temperatura constante a 65 °C, el sistema presentó una coloración naranja intensa y homogénea en la totalidad del volumen *(Figura 1D)*. Este cambio progresivo de color, de verde-turquesa a naranja, resulta consistente con el avance de la reacción de reducción del ion cúprico. Finalmente, después de un periodo de reposo de 24 horas, el sistema mantuvo su condición bifásica *(Figura 1E*), observándose una fase superior de coloración amarilla clara y una fase inferior de tonalidad verde oscuro, en la que se puede notar la presencia del sólido formado correspondiente a las nanopartículas de cobre sintetizadas, mismo que fue posteriormente aislado y recuperado tal como se describió en la parte experimental.

## Lavado y recuperación de nanopartículas

Una vez transcurrido el periodo de reposo de 24 horas, se procedió a aislar cada una de las fases del sistema ATPS en viales independientes, con el fin de recuperar el sólido de coloración café observado tanto en la fase inferior —donde se concentró la mayor cantidad de sólido— como en la interfase del sistema. Esta coloración es consistente con lo reportado en la literatura para nanopartículas de cobre, en las que tonalidades que van del café al oscuro suelen asociarse con la formación de cobre metálico ($Cu^0$) o, en caso de encontrarse parcialmente oxidado, con óxidos de cobre como $Cu_2O$ o CuO (Lu *et al*., 2023). El contenido

de la fase con mayor cantidad de sólido, así como el correspondiente a la interfase, se transfirió a tubos Eppendorf *(Figura 3).* Tras retirar el sobrenadante, el sólido se lavó en dos ocasiones con una solución de etanol, centrifugando y retirando el sobrenadante entre cada lavado, con el fin de eliminar los remanentes de PEG, citrato de sodio y ácido ascórbico adheridos a la superficie del sólido. Finalmente, los sólidos recuperados de ambas fases se reunieron en un mismo vial para dar paso a los análisis de caracterización correspondientes.

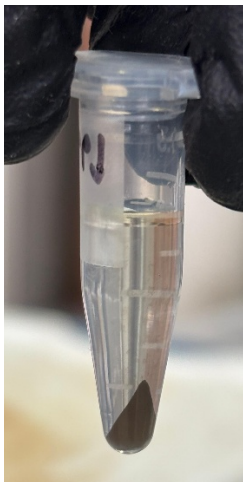

*Figura 3. Sólido de coloración café obtenido tras la centrifugación y lavado del material recuperado del sistema ATPS, correspondiente a las nanopartículas de cobre sintetizadas.*

## Caracterización por UV-Visible

El sólido recuperado del sistema ATPS se dispersó en agua desionizada y se analizó mediante espectroscopia UV-Vis en la ventana espectral de 200 a 900 nm, empleando agua desionizada como blanco. El espectro obtenido (Figura 4) mostró tres regiones características: una caída pronunciada de la absorbancia en la región ultravioleta (< 360 nm), con un hombro hacia ~280-300 nm; una banda ancha centrada alrededor de 500-520 nm; y una meseta amplia y relativamente plana que se extendió desde ~550 nm hasta el borde de la ventana espectral analizada, sin un máximo claramente definido.

Es importante notar que el perfil obtenido no corresponde al comportamiento típicamente reportado para nanopartículas de cobre metálico ($Cu^0$), cuya banda de plasmón de resonancia superficial (SPR por sus siglás en inglés Surface Resonance Plasmon) se ha documentado entre 570 y 620 nm, ya sea como una banda relativamente angosta (Khanna *et al*., 2007) o como una banda ancha con límites entre 550 y 700 nm cuando la distribución de tamaño de partícula es amplia (Dhas *et al*., 1998). En cambio, la banda observada en ~500-520 nm en el presente trabajo se aproxima más a la energía de transición característica del óxido cuproso ($Cu_2O$), mientras que la meseta amplia y creciente hacia el infrarrojo cercano, en lugar de un pico definido, es consistente con el comportamiento de absorción característico del óxido cúprico (CuO), atribuible a su menor band gap óptico en comparación con el $Cu_2O$ (Balık *et al*., 2019).

Esta lectura del espectro es congruente con la observación reportada por Khanna *et al*. (2007), quienes documentaron la supresión de la banda de SPR del $Cu^0$ como consecuencia de su oxidación superficial a $Cu_2O$. Considerando en conjunto la coloración café del sólido recuperado y el perfil espectral obtenido, estos resultados constituyen un primer indicio —aunque no concluyente— de que el material sintetizado podría corresponder a una mezcla de cobre metálico parcialmente oxidado, más que a nanopartículas de $Cu^0$ metálico.

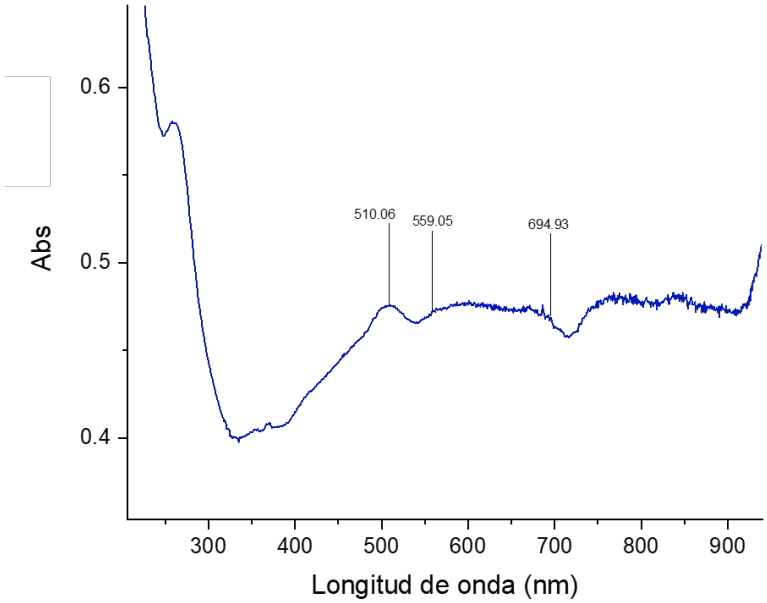


*Figura 4. Espectro UV-Vis de la muestra del sólido obtenido en la síntesis con ATPS PEG-citrato. Se realizó con una ventana espectral de 200-900 nm. El ruido se puede considerar como artefactos instrumentales del análisis.*

## Caracterización con Dispersión de Luz Dinámica (DLS)

El tamaño de las nanopartículas de cobre recuperadas se evaluó mediante dispersión dinámica de luz (DLS), a partir del promedio de tres mediciones consecutivas de la misma dispersión. La distribución de tamaños por intensidad obtenida (Figura 5) muestra las mediciones de media hora de calentamiento (gráfico en verde) y de una hora de calentamiento (gráfico rojo) de los ATPS con cobre, dando información de un comportamiento unimodal, con un único pico centrado aproximadamente entre 260 y 320 nm para las nanopartículas de 1 hora de calentamiento y de ~460 nm para las de media hora de calentamiento.

Es importante señalar que, si bien el promedio de las tres mediciones arrojó una distribución bien definida, las mediciones individuales presentaron variabilidad entre sí, lo cual se reflejó en un índice de polidispersidad (PDI) que indicó que la muestra no es monodispersa. Esta observación no es necesariamente contradictoria con la distribución unimodal del promedio: como señalan Farkas y Kramar (2021), el PDI derivado del método de aglomerados que tiende a sobreestimar la varianza real de la distribución, por lo que ambos resultados son congruentes con el comportamiento de esta técnica en muestras con distribuciones amplias.

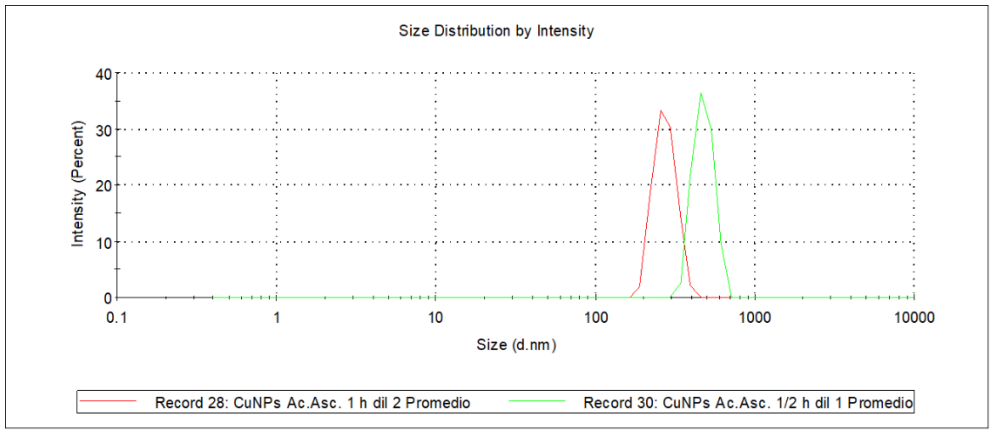


*Figura 5. Gráfico de distribución de tamaños en lecturas realizadas en el equipo de dispersión de luz dinámica (DLS).*

El tamaño obtenido por DLS debe interpretarse considerando las particularidades de la técnica. El equipo determina el coeficiente de difusión traslacional de las partículas a partir de las fluctuaciones en la intensidad de luz dispersada, y lo convierte a un diámetro hidrodinámico asumiendo que la partícula se comporta como una esfera equivalente (Ramos, 2017); este diámetro no corresponde únicamente al núcleo metálico, sino a la partícula en conjunto con cualquier capa de material adsorbida en su superficie que se desplace junto con ella en el medio. Sin embargo, el tamaño obtenido (260-320 nm) resulta mayor al que se esperaría únicamente por la presencia de una capa superficial de agentes estabilizantes como PEG, citrato o el agente reductor. Por lo anterior, se considera que la señal registrada por DLS corresponde principalmente a cúmulos o agregados de nanopartículas, posiblemente en conjunto con remanentes de las fases del sistema ATPS adheridos a su superficie, más que a partículas individuales dispersas. Esta interpretación es consistente con la naturaleza del sólido recuperado el cual se obtuvo como un precipitado y no como una dispersión coloidal estable, así como con el uso de etanol durante los lavados, que pudo favorecer la agregación irreversible del material al reducir la solvatación de los agentes estabilizantes presentes en la superficie de las nanopartículas.

Cabe destacar que, debido a que la intensidad de la luz dispersada es proporcional a la sexta potencia del diámetro de la partícula, la distribución por intensidad obtenida mediante DLS está sesgada hacia las partículas o agregados de mayor tamaño (Farkas y Kramar, 2021). Por lo tanto, la ausencia de un pico adicional en la región de decenas de nanómetros no permite descartar la presencia de una población de nanopartículas individuales de menor tamaño, cuya contribución a la señal total podría ser despreciable frente a la de los agregados de mayor tamaño detectados.

## Conclusiones

En este trabajo se evaluó la síntesis y recuperación simultánea de nanopartículas de cobre mediante un sistema ATPS de PEG 1000-citrato de sodio, empleando ácido ascórbico como agente reductor a pH 11, durante una hora de calentamiento a 65°C. La curva binodal experimental confirmó la formación del sistema bifásico bajo las condiciones empleadas, y la evolución visual del proceso, junto con la recuperación de un sólido de coloración café, constituyeron un primer indicio de la síntesis del material, que se localizó en la interfase y en la fase inferior salina del ATPS. La caracterización por UV-Vis mostró la banda de plasmón de resonancia superficial característica de una mezcla de óxidos de cobre, mientras que el análisis por DLS evidenció la presencia de agregados de tamaño superior al esperado para nanopartículas individuales. En conjunto, estos resultados sugieren que el material obtenido corresponde a aglomerados de nanopartículas de óxidos de cobre.

## Perspectivas

El trabajo a futuro se enfocará en optimizar las condiciones de dispersión y estabilización de las nanopartículas, así como confirmar mediante microscopía electrónica de barrido la naturaleza morfológica y el tamaño real de las nanopartículas. Y finalmente mediante espectroscopía Raman se puede determinar la presencia de los óxidos de cobre y sí éstos están interaccionando con alguno de los componentes de los ATPS.

## Referencias

Aggarwal, K., Brahma, A., Nisha, Sharma, Y., Rajput, P., Sachdeva, B., Singh, A., Chandra, R., & Singh, S. (2025). Recent progress in copper nanomaterials: Catalysis, energy, biomedicine, and environmental applications. *Materials Advances*, *6*(24), 9296–9339. https://doi.org/10.1039/D5MA00484E

Balık, M., Bulut, V., & Erdogan, I. Y. (2019). Optical, structural and phase transition properties of $Cu_2O$, CuO and $Cu_2O$/CuO: Their photoelectrochemical sensor applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, *44*(34), 18744–18755. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.159

Dhas, N. A., Raj, C. P., & Gedanken, A. (1998). Synthesis, characterization, and properties of metallic copper nanoparticles. *Chemistry of Materials*, *10*(5), 1446–1452. https://doi.org/10.1021/cm9708269

Farkas, N., & Kramar, J. A. (2021). Dynamic light scattering distributions by any means. *Journal of Nanoparticle Research*, *23*, 120. https://doi.org/10.1007/s11051-021-05220-6

Jamkhande, P. G., Ghule, N. W., Bamer, A. H., & Kalaskar, M. G. (2019). Metal nanoparticles synthesis: An overview on methods of preparation, advantages and disadvantages, and applications. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, *53*, 101174. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2019.101174

Kasana, R. C., Panwar, N. R., Kaul, R. K., & Kumar, P. (2017). Biosynthesis and effects of copper nanoparticles on plants. *Environmental Chemistry Letters*, *15*(2), 233–240. https://doi.org/10.1007/s10311-017-0615-5

Khanna, P. K., Gaikwad, S., Adhyapak, P. V., Singh, N., & Marimuthu, R. (2007). Synthesis and characterization of copper nanoparticles. *Materials Letters*, *61*(18–19), 4711–4714. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.03.014

Kinhal, K. V., Sinha, S., Ravisankar, A., Bhatt, N. P., & Pushpavanam, S. (2020). Simultaneous synthesis and separation of nanoparticles using aqueous two-phase systems. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *8*(8), 3013–3025. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c00032

Kumar, P., Nene, A. G., Punia, S., Kumar, M., Abbas, Z., Thakral, F., & Tuli, H. S. (2020). Synthesis, characterization and antibacterial activity of CuO nanoparticles. *International Journal of Applied Pharmaceutics*, *12*(1), 17–20. https://doi.org/10.22159/ijap.2020v12i1.36271

Lu, R., Hao, W., Kong, L., Zhao, K., Bai, H., & Liu, Z. (2023). A simple method for the synthesis of copper nanoparticles from metastable intermediates. *RSC Advances*, *13*(21), 14361–14369.

https://doi.org/10.1039/D3RA01082A

Ramos, A. P. (2017). Dynamic light scattering applied to nanoparticle characterization. In *Nanocharacterization Techniques* (pp. 99–110). Elsevier.