

Estudio sobre metodologías aplicadas para la síntesis de nanopartículas de cobre (NPsCu) y plata (NPsAg) en diferentes formas y tamaños

Review of methodologies for the synthesis of copper (NPsCu) and silver (NPsAg) nanoparticles with different shapes and sizes

Gabriel A. Lopez R.¹, Juan C. Ataucuri S¹.

¹Laboratorio de Química Cuántica y Nuevos Materiales para la Innovación Tecnológica, Dpto. de Fisicoquímica, Facultad de Química, Ingeniería Química e Ingeniería Agroindustrial UNMSM, Ciudad Universitaria, Av Venezuela s/n Cdra. 34, Lima 1- Perú

RESUMEN

Actualmente las nanopartículas (NPs) son un área de intensa investigación científica, debido a una amplia variedad de aplicaciones potenciales en campos tales como biomédicos, ópticos, electrónicos, nano química o agricultura. Las propiedades de estas nanoestructuras están en función de su tamaño y forma, obteniendo propiedades específicas de acuerdo a la variedad de dichas características mencionadas. Por ello se realiza un análisis bibliográfico de diferentes investigadores que realizaron un estudio riguroso acerca de los diferentes métodos de síntesis de nanopartículas de cobre (NPsCu) y nanopartículas plata (NPsAg), así como también los factores que modifican la forma y tamaño de partícula. Como conclusión principal podemos señalar que el control de la forma y tamaño de las nanopartículas se debe a factores que puedan ser controlables.

Palabras clave: síntesis de nanopartículas, nanopartículas de cobre, nanopartículas de plata

ABSTRACT

Nanoparticles (NPs) are currently the subject of intense scientific research due to a wide variety of potential applications in various fields such as medicine, optics, electronics, nano-chemistry and agriculture. The properties of these nanostructures depend on their size and shape, and specific properties can be obtained by varying these characteristics. For this reason, a bibliographical analysis was carried out covering different investigators who studied the various methods of synthesis of copper (NPsCu) and silver (NPsAg) nanoparticles, as well as the factors that modify the shape and size of these particles. A main conclusion of this study is that the shape and size of the nanoparticles depend upon factors that can be controlled.

Keywords: nanoparticle synthesis, copper nanoparticles, silver nanoparticles

I. INTRODUCCIÓN

La propagación de enfermedades infecciosas producidas por microorganismos se ha convertido en uno de los problemas más graves de salud pública a nivel mundial [1] esto sugiere interés científico e industrial en el desarrollo de alternativas efectivas para controlar e inhibir el desarrollo de estos patógenos lo que impulsa a desarrollar la síntesis de nanopartículas metálicas y sus diferentes estrategias para producirlo. Según Monge el interés sobre especies químicas de tamaño nanométrico es una de las áreas de trabajo más importantes de la investigación en química debido,

fundamentalmente, a la gran variedad de nuevas propiedades y potenciales aplicaciones que se pueden explotar en diversos campos. Así, en el contexto del gran desarrollo que ha experimentado la nanociencia y la nanotecnología en los últimos años se han desarrollado diferentes métodos físicos y químicos para la obtención de nanopartículas de plata. El gran número de partículas que se pueden hacer y la gran área superficial al volumen relación permite nanopartículas sean eficaces en cantidades muy pequeñas [2]. Las características de estas nanopartículas sugieren de una importante investigación ya que tiene propiedades diferentes a los átomos y moléculas individuales o

* Correspondencia:

E-mail: gabriellopez21s19@gmail.com, juanc12070081@gmail.com

agregados en tamaño micro. Foladori y col. sugiere que la nanotecnología son una variedad de técnicas que permiten manipular la materia a escala atómica y molecular. La importancia radica en que los materiales a escala de aproximadamente entre 1 y 100 nanómetros manifiestan propiedades físicas, químicas y biológicas diferentes a las que la misma materia presenta en escala mayor [3].

Se hicieron pruebas con nanopartículas de plata, cobre y las bimetalicas de las mismas que son utilizados ampliamente como bactericidas. Las nanopartículas de cobre son relativamente no tóxicas para los mamíferos, pero es tóxico para muchos microorganismos y esto ofrece nuevas perspectivas en los tratamientos antimicrobianos. Beatriz España menciona en su tesis el efecto antimicrobiano de NPsAg se encuentra directamente relacionado con la concentración de NPs y que la presencia de las mismas produce la formación de fosas en la membrana celular de bacterias Gram (-), por lo que se producen daños irreversibles en la permeabilidad de la membrana y en consecuencia la muerte celular. Apoyando esta teoría, Li y col. [4]. por otro lado, Ortiz y col. mencionan que se acepta que la plata y las NPsAg en una solución acuosa producen la liberación de iones de plata, los cuales son biológicamente activos y con efecto bactericida. Sin embargo, un estudio comparativo entre NPsAg, nitrato de plata y cloruro de plata, reveló que las NPsAg tienen mayor actividad antibacteriana que los iones de plata libre. [1]

Por otro lado, la incorporación de las nanopartículas de metal en una matriz polimérica como en el caso del policloruro de vinilo (PVC), genera nuevos materiales llamados nanocompuestos. La combinación de las propiedades diferentes de estos componentes (polímero y nanopartículas) puede hacer que un material con una mejor óptica, electrónica, mecánica y propiedades antimicrobianas. Nanocompuestos con propiedades antibacterianas se pueden obtener ya sea mediante la incorporación de nanopartículas con actividad antibacteriana conocida, o mediante la mejora de las propiedades antibacterianas que la matriz polimérica ya tiene. En el último caso, la mejora sustancial de la capacidad biosida se ha asociado con un efecto sinérgico de los dos componentes presentes en el material compuesto. Los estudios del Ghorbani y col. han demostrado que el tamaño, la morfología, la estabilidad y las propiedades (químicas y físicas) de las nanopartículas metálicas están fuertemente influenciadas por las condiciones experimentales, la cinética de interacción de iones metálicos con agentes reductores y los procesos de adsorción del agente estabilizador con nanopartículas metálicas. [5]

2. DESARROLLO DE CONTENIDOS

Métodos para obtener diferentes formas de nanopartículas de cobre

2.1 Síntesis de nanopartículas esféricas de cobre

Jahangeer y col. (2011) [6] sintetizaron nanopartículas de cobre nanocristalino con morfología variable, nanocubos (w50 nm), nanobarras (diámetro de w3 nm y longitud de w50 nm) y nanoesferas (5 nm) utilizando el método de microemulsión y posterior tratamiento a 400°C en atmósfera de hidrógeno. Así mismo, indicaron que la concentración desempeña un papel importante en el control de la forma y el tamaño del cobre nanocristalino. Los estudios para la nucleación con respecto la reacción de reducción se ha incrementado con el aumento de concentración de la sal metálica. Los estudios mostraron que, a baja concentración, las partículas esféricas (10 nm) se ensamblan en 3 dimensiones (cubos de borde 50 nm). A concentración intermedia hay un conjunto en una dimensión ordenado de partículas esféricas (~3 nm) que conduce a nanobarras (3 nm de diámetro y 50 nm de longitud), mientras que a alta concentración hay aleatoria aglomeración de partículas esféricas (5 nm). A baja concentración iónica, las moléculas de surfactante impiden la agregación de las partículas debido a la presencia de su larga cadena de hidrocarburos y el proceso de nucleación dando como resultado estructuras de tipo cubo. Con el aumento de la concentración iónica, las estructuras de tipo cubo se vuelven inestables y se rompen en barras. Al aumentar adicionalmente la concentración de reactivos por micela, los tensioactivos tienden a formar más estructuras de agregado que podrían conducir a nanoestructuras agregadas aleatorias.

Rajesh y col. (2016) [7] sintetizaron CuNPs por un método simple de reducción química y estudiaron el efecto de la disparidad de pH en la variación del tamaño de partícula. La morfología de los CuNPs como se sintetizó fue examinada por medición por microscopía electrónica de barrido por emisión de campo (FESEM). Las imágenes típicas de FESEM muestra que el producto consiste principalmente en nanopartículas de forma esférica sin ninguna aglomeración. Se observa que se logra conseguir partículas de forma esférica con un aumento de pH de 6 a 10, respectivamente y esto sucede a que a estas condiciones de pH se evita la aglomeración de nanopartículas. El análisis de DRX confirmó la formación de CuNPs de estructuras cúbicas con la naturaleza altamente cristalino. Sreeju y col. (2016) [8] investigo los efectos de diferentes parámetros de síntesis (nanopartículas de cobre) como el pH precursor, la temperatura, la cantidad de agente estabilizante y reductor, el nivel de potencia y el tiempo de irradiación de microondas sobre la formación de nanopartículas, donde Las micrografías TEM y los patrones XRD muestran la formación de nanopartículas casi esféricas de tamaño alrededor de 15 nm con una estructura cúbica centrada en la cara. Yallappa y col. (2013) [9] sintetizaron nanopartículas de cobre biotapadas de forma casi esférica se sintetizaron

satisfactoriamente aquí mediante la irradiación con microondas utilizando el extracto de corteza de *T. arjuna* como agente reductor / estabilizador.

Chandra (2014) [10] en su artículo publica las nanopartículas de Cu se sintetizaron mediante un proceso de reducción de la solución con éxito donde se estudió la influencia de los parámetros en el tamaño de las nanopartículas de Cu y se obtuvieron los parámetros del proceso referencial. La morfología y estructura de las nanopartículas de Cu sintetizadas se caracterizaron por microscopía electrónica de transmisión (TEM), difracción de rayos X en polvo (XRD), espectroscopia infrarroja (IR) y estado sólido UV. El tamaño medio de las nanopartículas de forma esférica se encontró entre 15 ± 2 nm.

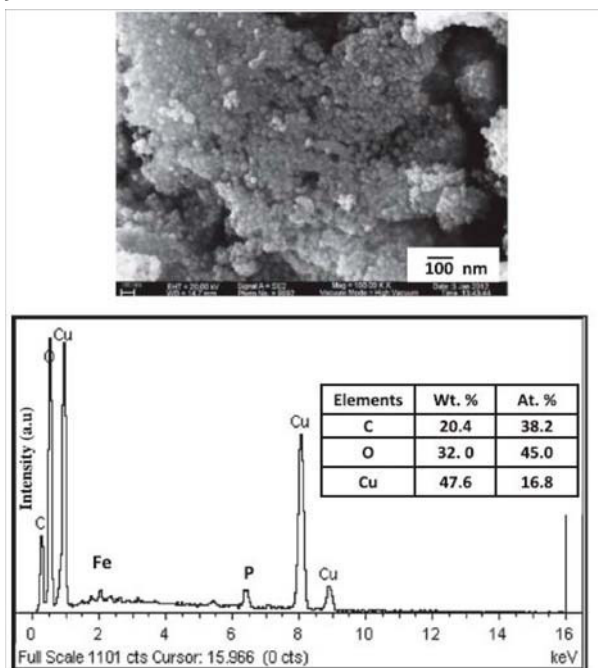


Figura 1. Imagen FE-SEM y espectros EDP de CuPs. [8]

2.2. Síntesis de nanopartículas cúbicas de cobre

Wen y col. (2012) [11] sintetizaron NPsCu por el método de reducción química bajo una atmósfera de nitrógeno gaseoso inerte, en el que se utilizó dietanolamina (DEA) como agente reductor, disolvente, modificador de superficie y controlador de forma. Los resultados mostraron que las partículas de nano-cobre son cúbicas y con tamaños de 15 nm. El nanocubo no se oxidó cuando se expuso al aire a temperatura ambiente durante un año. La concentración del precursor nitrato cúprico trihidratado ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) tuvo poco efecto sobre el tamaño y la morfología del producto. Los resultados confirmaron que la introducción de DEA en el proceso de preparación pudo permitir que el crecimiento de cristales de nanocopper donde DEA desempeña un papel clave en la formación de nanocubos, no sólo como reductor y estabilizante, sino también como un controlador de forma. Además,

obtuvo un recubrimiento protector amorfo, con un espesor de aproximadamente 1,0 nm, sobre las superficies de nanocubos de cobre. El recubrimiento protector puede atribuirse a compuestos modificados, evitando que los nanocubos de cobre se oxiden.

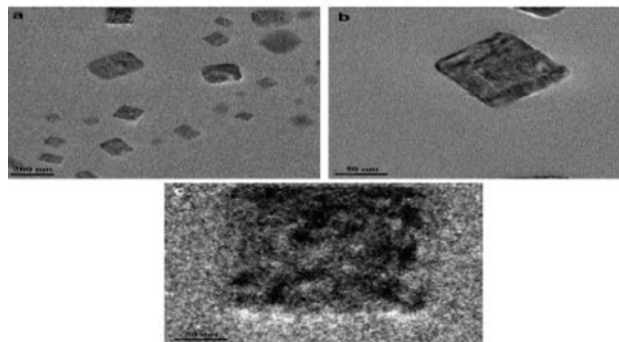


Figura 2. (a) TEM y (b) y (c) HRTEM de nanocubos de cobre obtenidos usando solución 0,1 M de Cu^{2+} [11]

2.3. Síntesis de nanovarillas de cobre

Swati De y col. (2013) [12] desarrollaron la síntesis de nanopartículas de cobre en forma de nanoesferas y nanovarillas con borohidruro de sodio como agente reductor y bromuro del cetiltrimetil amonio (CTAB) acuoso como surfactante. La síntesis se realizó a temperatura ambiente. Así mismo, estudiaron el efecto de la microestructura de los conjuntos de tensioactivos en el control del tamaño y particularmente la forma de los nanomateriales. Ellos sostuvieron, que las micelas de surfactante ayudan a detener el crecimiento de las nanopartículas y restringirlas a tamaños pequeños y esféricos. También encontraron que, a diferencia de los polímeros, las micelas de surfactante no actúan como plantillas para la formación de nanobarras de cobre, sino más bien participa de forma activa en el control de la formación de la estructura nanobarillas. Este resultado es único, ya que demostró por primera vez que la cadena larga de alquilo que contiene sales puede causar el crecimiento dirigido de las nanopartículas. Otro punto relevante de su trabajo fue la síntesis de nanobarras de cobre sin usar altas concentraciones de CTAB como lo demostraron trabajadores anteriores para la síntesis de nanobarras de oro y plata. Esta síntesis es considerada amigable con el medio ambiente debido al uso mínimo de surfactante. Además de preparar nanobarras de cobre, también preparo nodos de nanobarras de cobre, que pueden ser usadas como estructuras de unión en la fabricación de dispositivos optoelectrónicos.

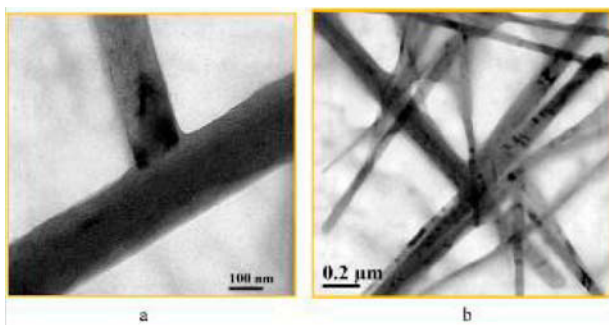


Figura 3. TEM de nanovarillas de Cu, CTAB = 5×10^{-3} M (a) TEM a escala de 100 nm; (B) TEM en escala de 0,2 micras [12]

2.4. Síntesis de nanoalambres de cobre

Wang y col. (2015) [13] sintetizaron nanopartículas de Cu en forma de nanoalambres (NWs Cu) mediante un método hidrotérmico y reducción química, utilizando glucosa como agente reductor. Las dimensiones de estos NWsCu fueron de 70 μm de longitud y 65 nm de diámetro, estas estructuras son materiales adecuados para electrodos de nano-red. Es por ello que a continuación, prepararon el electrodo de nano-red basado en NWsCu mediante filtración y un proceso de tratamiento en húmedo. Las películas iniciales de NWsCu no eran casi conductivas. Posterior tratamiento con ácido acético durante 30s a temperatura ambiente, se formaron películas NWsCu con excelentes rendimientos de transmitancia y conductividad. Además, las películas de NWsCu también poseen una buena flexibilidad, no se observó degradación evidente de la conductividad para las películas durante 1000 ciclos de prueba de flexión. Así mismo, investigaron el papel de la oleilamina (OM) como un agente de taponamiento, cuyo proceso se llevó a cabo mientras se modulaba la cantidad de OM y se mantenía todos los demás parámetros fijos. Cuando no se añadió OM, sólo se formaron nanopartículas de Cu irregulares con un diámetro de 120-230 nm. Cuando la cantidad de OM fue mantenida en 4 ml, NWsCu entraron en coexistencia con muchas nanopartículas. Entonces parte de las semillas de cobre fueron cubiertas debido a una OM insuficiente. Cuando la cantidad de OM fue fijada en 8ml, NWsCu se formaron debido al hecho de que las caras de la mayoría de las semillas de cobre han sido efectivamente y selectivamente adherido por la cantidad adecuada de OM. Es por ello que se produjo un crecimiento preferencial a lo largo de la dirección del alambre.

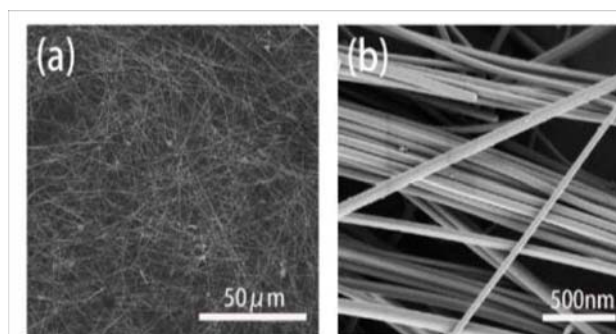


Figura 4. (a-b) Imágenes SEM de nanoalambres de cobre a diferentes aumentos [13]

2.5. Factores efectivos que controlan la forma de NPs de cobre

Se sostiene que la variación de concentración de la sal del precursor respectivo para la síntesis de NPsCu influye en la forma final de la nanoestructura. Los estudios TEM de las NPsCu obtenidas con 0,1 M de Cu (2^{+}) en solución mostraron partículas en forma de cubo. Específicamente se mostraron los tamaños de los cubos que varían entre 50 y 100 nm. Los cubos estaban formados a partir de nanopartículas muy pequeñas cuyo tamaño promedio se encontró que era 10 nm. Los resultados mostraron imágenes TEM de barras nanocrystalinas de cobre obtenidas después de la reacción con solución 0,5 M de Cu (2^{+}). La longitud media y el diámetro medio de las nanobarras de cobre fueron 50 nm y 3 nm, respectivamente. Por otro lado, la dietanolamina (DEA) no solo puede actuar como agente reductor, sino como controlador de forma para la síntesis de nanocubos de cobre. El uso de surfactantes como bromuro del cetiltrimetilamonio (CTAB) es importante en la síntesis de nanobarras de cobre; ya que la cadena larga de alquilo que contiene sales puede causar el crecimiento dirigido de las nanopartículas hacia la formación de nanobarras. En la formación de nanoalambre de cobre el uso de oleilamina (OM) es un factor fundamental ya que mediante el control de la cantidad de dicho agente añadido; se puede controlar el crecimiento direccionado y orientado hacia la formación de una estructura nanoalambre. Como ejemplo de reducción de cobre L. Verde (2016) [21] menciona particularmente un rol importante del ácido ascórbico en la formación de las nanopartículas de cobre; como agente reductor del CuAc_2 , el exceso del mismo, es fundamental para reducir la oxidación de las NPsCu donde hace hincapié a la propiedad antioxidante del AA proviene de su capacidad para capturar radicales libres por medio de la donación de electrones.

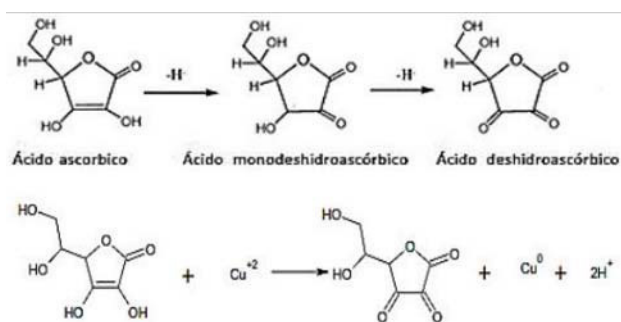


Figura 5. mecanismo de reacción del ácido ascórbico para la reducción del cobre (Liz Varde)

Tabla 1. Síntesis de nanopartículas de cobre con diferentes formas a través de método de reducción química, microemulsión e Hidrotérmico

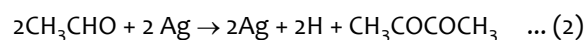
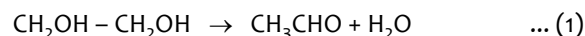
Método	Agente reductor	Estabilizante o surfactante	Tamaño de partícula	Forma	Ref.
Reducción química/microemulsión	Hidrazina hidratada	Bromuro de cetil trimetilamonio (CTAB)	~5 nm	esférica	Jahan geer et al. (2011)
Reducción química/microemulsión	Hidrazina hidratada	Bromuro de cetil trimetilamonio (CTAB)	En diámetro 3 nm-en longitud 50 nm	cable	Jahan geer et al. (2011)
Reducción química/microemulsión	Hidrazina hidratada	Bromuro de cetil trimetilamonio (CTAB)	~50 nm	cúbica	Jahan geer et al. (2011)
Reducción química	Dietanolamina (DEA)	Dietanolamina (DEA)	15 nm	cúbica	Wen et al. (2012)
Reducción química	Borohidruro de sodio	(CTAB)	-	nanobarras	Swati De et al. (2012)
Hidrotérmico /Reducción química	Glucosa	(PVP)	En diámetro 65 nm-en longitud 70 nm	nanoalambre	Wang et al. (2015)

3. Métodos para obtener diferentes formas de nanopartículas de plata

3.1. Síntesis de nanopartículas esféricas de plata

Morales y col. (2009) [14] sintetizaron coloides nanoparticulados de plata de forma esférica por el método sol-gel, a partir de la reducción de nitrato de plata por etilenglicol en un proceso denominado poliol. Las NPsAg obtenidas varían en tamaño y estructura dependiendo del control de parámetros tales como la relación de concentraciones molares entre el nitrato de plata y el PVP, la temperatura de la reacción y el tiempo de reflujo. El tamaño de las NPs se encontró en el rango de 20 a 40 nm. El mecanismo general de reducción del

etilenglicol (EG) puede ser representado por las reacciones siguientes:



Se puede obtener una estructura cristalina y un mejor control del crecimiento a partir de los parámetros de temperaturas entre 125 °C y 140 °C con una relación molar PVP/Ag = 1,5.

Yaqiong y col. (2010) [15] Las NPsAg cuasi esféricas se sintetizaron usando ácido ascórbico como reductor y citrato como estabilizante en un baño de agua a 30 °C. El tamaño medio de las NPsAg disminuyó de 73 nm a 31 nm a medida que el pH del sistema de reacción aumentó de 6,0 a 10,5. Los análisis cuantitativos indicaron que la reducción del precursor de plata se promovió a un pH elevado atribuido al aumento de la actividad del ácido ascórbico (AA).

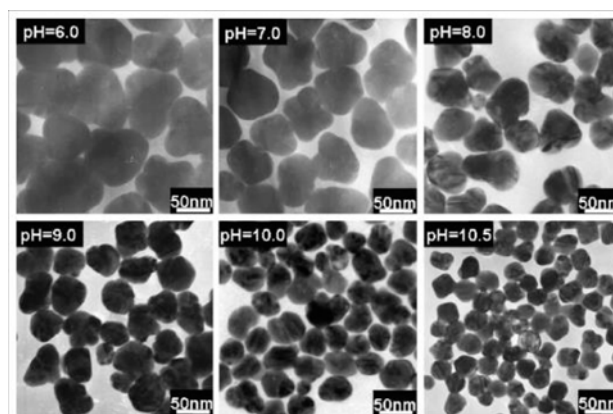


Figura 6. TEM de las NPsAg preparadas a pH 6,0, 7,0, 8,0, 9,0, 10,0 y 10,5 después de 15 minutos de las reacciones a 30 °C [15]

Guzman y col. (2011) [16] en su artículo presenta la síntesis de NPsAg esféricas preparado por reducción química a partir de soluciones acuosas de nitrato de plata, que contiene una mezcla de hidrato de hidracina (HC) y citrato sódico (CS) como reductores y sulfato de sodio como estabilizador.

3.2. Síntesis de nanopartículas cúbicas de plata

Raghavendra y col. (2016) [17] en su experimento con la ultrasonificación a una solución de $AgNO_3$ de quitosano (10mM), identificaron estructuras cúbicas de plata (diámetro 120 a 450nm) junto con otras NPsAg dispersas. La temperatura influyó en la formación de las estructuras cúbicas. La formación de las estructuras cúbicas de plata se produjo por la formación inicial de una estructura de "cuatro pétalos flor-como" sufrió transformación a la "morfología cúbica" en las últimas etapas. Después de repetir el experimento con almidón en lugar de quitosano, las estructuras cúbicas de plata identificadas estaban completamente ausentes, lo que

indica que la formación de las "estructuras cúbicas de plata" depende del polisacárido utilizado. Se cree que las características estructurales del quitosano facilitan la formación de "estructuras cúbicas de plata" bajo condiciones ultrasónicas.

Shi Yu y col. (2015) [18] propuso el mecanismo de crecimiento de NPsAg de forma cubica y con un tamaño 50 ± 20 nm. En primer lugar, las micelas formadas por la interacción de metabolitos del hongo y $Ag(1+)$ dirigieron al metal de plata a nuclearse para formar una forma intermedia con caras cristalinas $\{111\}$. Entonces, el crecimiento anisotrópico de estos cristales de caras $\{111\}$ condujo a la evolución de los nanopartículas cúbicos (200). Es bien sabido, que los lípidos pueden actuar como un agente reductor para $Ag(1+)$ a plata(0) cubica. En este estudio, se supone que los lípidos y los metabolitos secretados por el hongo (*M. circinelloides*) en el caldo podrían haber inducido la reducción de $Ag(1+)$ en NPsAg cúbica.

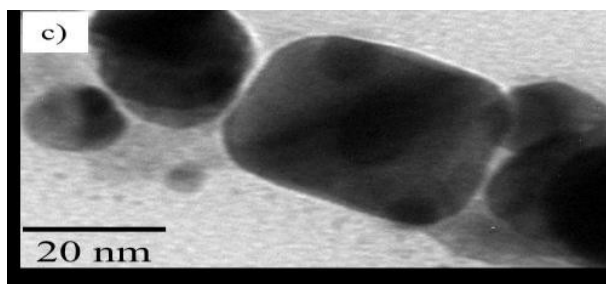


Figura 7. TEM morfología cúbica de AgNCs. [18]

3.3. Síntesis de nanobarras de plata

G. Hu y col. (2014) [19] sintetizaron nanobarras de plata que fueron preparadas por el método de crecimiento mediado por semillas en una solución con mezcla de bromuro de cetiltrimetil amonio (CTAB), nitrato de plata, ácido ascórbico y las semillas de la plata. Asimismo, sostuvieron que un volumen adecuado de CTAB (es decir, 15,0 ml de CTAB 0,1 M) es beneficioso para obtener nanobarras de plata (NBsAg) de alta calidad en el sistema de reacción dado. Es decir, el volumen de CTAB añadido es un factor clave para determinar la polidispersidad de los NBsAg formados. Los resultados mostraron que hay muchas nanopartículas cuasi-esféricas formadas junto a nanopartículas de NBsAg de plata. La longitud del NBsAg más largo alcanzó aproximadamente 100 nm, mientras que la longitud del NBsAg más corto fue menos de 20 nm. Los NBsAg obtenidos tuvieron un diámetro medio de aproximadamente 14 nm y relación de aspecto de aproximadamente 2,3. Asimismo, sostuvo que el volumen de agregado CTAB, determina la polidispersidad de las NBsAg formadas, siendo un factor clave para la formación de NBsAg. Un volumen adecuado de CTAB es beneficioso para obtener nanobarras de plata de alta calidad en el sistema de reacción determinado.

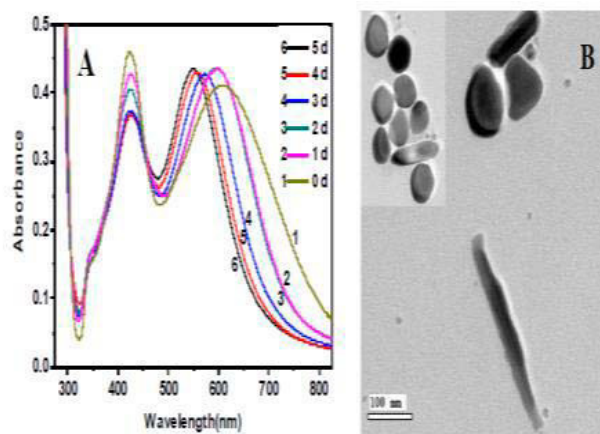


Figura 8. (A) Cambios espectrales UV-Vis de nanorods de plata que muestran el efecto del tiempo de envejecimiento y (B) imágenes TEM de nanorods de plata en las muestras envejecidas. [19]

3.4. Síntesis de nanoalambres de plata.

Gu y col. (2006) [20] describe una síntesis de semilla propia y de fase acuosa de NBsAg y nanoalambres de plata y mediante el uso de tartrato de potasio como reductor para reducir el nitrato de plata ($AgNO_3$) en presencia de poli (vinilpirrolidona) (PVP). Controlaron la forma de las NPs mediante el cambio de la relación en concentración de $AgNO_3$ y PVP; así como el diámetro y la longitud de NBsAg y nanoalambres de plata. Asimismo, para examinar los efectos de la PVP, las nanopartículas de plata fueron sintetizadas en las mismas condiciones que la síntesis típica excepto la adición de diferentes concentraciones de PVP. Sólo obtuvieron nanopartículas de plata altamente irregulares con diámetros de 150-250 nm en solución, estas partículas de plata grandes irregulares deben ser formadas por la agregación de partículas pequeñas debido a la falta de PVP. Por otro lado, obtuvieron nanobarras con diámetros de 160-200 nm y longitud de 0,7-1,2 μm cuando la concentración de PVP fue 2,4 mM en la solución, con una concentración de 1,8mM de PVP en la solución se formaron nanobarras con diámetros de 180-240 nm y longitud de 2-4 μm . Y posteriormente cuando la concentración de PVP disminuyó a 1,2 mM, se produjeron nanoalambres más grandes y más largos en la solución, algunos de ellos se ensamblaron de extremo a extremo. Además, señalaron que obtuvieron nanocables en zigzag con una longitud de hasta 10 μm a una concentración de PVP de 0,6 mM. Estos resultados indicaron que el diámetro y la longitud de nanobarras y nanoalambres aumentaron generalmente con la disminución de la concentración de PVP en la solución. Asimismo, indico que en una síntesis típica se pueden producir a gran escala nanoalambres rectos con diámetros de 150-200 nm y longitud de 3-6 μm .

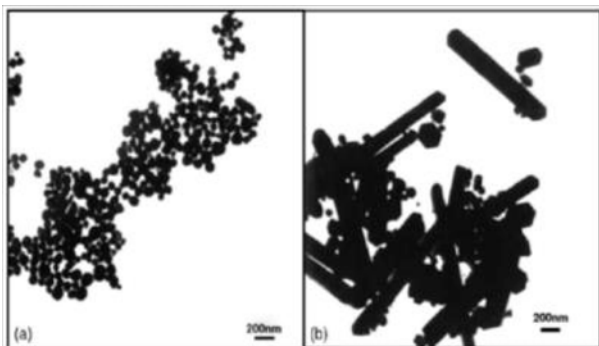


Figura 9. Imágenes TEM de nanoestructura de plata en diferentes etapas de crecimiento. (a) nanoesferas de cobre, (b) nanoalambres de cobre [20]

3.5. Factores efectivos sobre la forma de los NPs de plata producidas

Un factor a señalar es el control de la relación molar entre el precursor del metal y el estabilizante por el cual se obtiene nanopartículas con forma esférica. Otro factor a señalar es el uso de quitosano ya que, debido sus características estructurales, el control de la temperatura y el uso de técnicas ultrasónicas es posible obtener nanopartículas cubicas de plata. Por otro lado el control del volumen de surfactante añadido de bromuro de cetiltrimetil amonio (CTAB) es clave para la formación orientada hacia la estructura de nanobarras de plata. Finalmente se sostiene que mediante la variación de la concentración de PVP se controla la forma, ya que a media que disminuye la concentración de PVP se observa la transición de forma de nanobarras a nanoalambres de plata.

Tabla 2. Síntesis de nanopartículas de plata con diferentes formas a través del método de Sol-Gel, Reducción química

Método	Agente reductor	Estabilizante o surfactante	Tamaño de partícula	Forma	Ref.
Sol-Gel/ Reducción química	Etilenglicol	Polivinilpirrolidona (PVP)	20–40 nm	Esférica	Moral es y col. (2009)
Reducción química	Ácido ascórbico	Citrato trisodico ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$)	31-71 nm	Esférica	Guzmán y col. (2011)
Reducción Química	Quitosano	—	120-450 nm	Cúbica	Raghavendra y col. (2016)
Reducción química	Ácido ascórbico	Bromuro de cetil trimetilamonio (CTAB)	En diámetro 14 nm-en longitud 20-100 nm	Nanobarra	Zhang y col. (2014)
Reducción química	Tartrato de potasio	Polivinilpirrolidona (PVP)	En diámetro 150-200 nm-en longitud 10 μm	Nanoalambre	Xin Gu y col. (2006)

4. CONCLUSIONES

En este artículo tuvo específicamente como objetivo principal mencionar las diferentes metodologías de síntesis de nanopartículas de plata y cobre, así como los diferentes factores que modifican su morfología y tamaño. Con esta recopilación de datos se proporciona información valiosa para la realización de síntesis de nanoestructuras de los metales mencionados a través de diversos métodos como reducción química, microemulsión, método hidrotermal y sol-gel. Con lo cual se direcciona la formación de nanoestructuras con una determinada forma y tamaño. Nanoestructuras como nanobarras, nanoesferas, nanoalambres y nanocubos de ambos metales se pueden obtener controlando variables y parámetros de reacción como cantidad o concentración de precursores de metales, cantidad o concentración de estabilizante o surfactante, pH o relación molar entre el precursor y el agente reductor.

RECONOCIMIENTOS

El desarrollo de este trabajo tuvo el apoyo de los profesores Aldo Javier Guzmán Duxtan y Juan Ladislao Arroyo Cuyubamba, que nos brindaron su asesoría para la realización del mismo.

Al Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad (Innovate Perú), por los financiamientos otorgados al Laboratorio de Química Cuántica y Nuevos Materiales para la Innovación Tecnológica (LQCNMIT) a través de los Proyectos N°135-FINCYT-IB-2013, Proyecto N° 357-PNICP-PIBA-2014 y al Vicerrectorado de Investigación de la UNMSM a través del Proyecto CON-CON 160701031.

REFERENCIAS

- [1] D. Paredes, "Estudio del efecto antibacteriano de nanopartículas de plata sobre *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus*. Químico", Tesis, Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, Nov, 2011.
- [2] M. Monge, "Nanopartículas de plata: métodos de síntesis en disolución y propiedades bactericidas", Real Sociedad Española de Química 105, 33-41, Set 2008.
- [3] G. Foladori, "Políticas públicas en nanotecnología en América Latina", Problemas del desarrollo 186, 47, Mar 2016.
- [4] B. España, "Actividad antimicrobiana y mecanismo de acción de nanopartículas de plata y cobre incorporadas en polipropileno", tesis, Centro de investigación en química aplicada, Saltillo, Ago 2014.
- [5] H. Ghorbani, A. Safekordi, H. Attar, "Biological and non-biological methods for silver nanoparticles synthesis." Chem. Biochem 25, 317-326 Mar 2011.
- [6] J. Ahmed, P. Trinh, A. M. Mugweru, and A. K. Ganguli, "Self-assembly of copper nanoparticles (cubes, rods and spherical nanostructures): Significant role of morphology on hydrogen and oxygen evolution efficiencies," Solid State Sci., vol. 13, no. 5, pp. 855–861, Mar.2011.
- [7] K. Rajesh, B. Ajitha, Y. Reddy, Y. Suneetha, P. Sreedhara, "Synthesis of copper nanoparticles and role of pH on particle size control" Materialstoday 3, 1985-1991, 2016
- [8] N. Sreeju, A. Rufus, D. Philip, N. Sreeju, "Microwave-assisted rapid synthesis of copper nanoparticles with exceptional

- stability and their multifaceted applications” *Journal of Molecular Liquids* 221, 1008-1021, Jun 2016.
- [9] S. Yallapa, “Microwave assisted rapid synthesis and biological evaluation of stable copper nanoparticles using *T. arjuna* bark extract”, *Spectrochimica Acta*, 110, 108-115, Mar 2013.
- [10] S. Chandra, “Synthesis and characterization of copper nanoparticles by reducing agent” *Journal of Saudi Chemical Society* 18, 149-153, Jun 2014.
- [11] Y. Wen, W. Huang, B. Wang, J. Fan, Z. Gao, and L. Yin, “Synthesis of Cu nanoparticles for large-scale preparation,” *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.*, vol. 177, no. 8, pp. 619–624, Febr. 2012.
- [12] S. De and S. Mandal, “Surfactant-assisted shape control of copper nanostructures,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 421, pp. 72–83, Dic. 2013.
- [13] R. Wang and H. Ruan, “Synthesis of copper nanowires and its application to flexible transparent electrode,” *J. Alloys Compd.*, vol. 656, pp. 936–943, Set. 2016.
- [14] J. Morales, J. Morán, M. Quintana, W. Estrada, “síntesis y caracterización de nanopartículas de plata por la ruta sol-gel a partir de nitrato de plata”, *Sociedad Química Perú*, 75, 2, 2009.
- [15] Q. Yaqiong, L. Xiaohui, Jing, L. Hong, W. Hongli, “Size control over spherical silver nanoparticles by ascorbic acid reduction” *Colloids and Surfaces A*, 372, 172-176, Sep 2010.
- [16] M. Guzman, J. Dille, S. Godet, “Synthesis and antibacterial activity of silver nanoparticles against gram-positive and gram-negative bacteria” *Nanomedicine* 8, 37-45, May 2011.
- [17] G. Malegowd, J. Jung, D. Kim, K. Varaprasad, “Identification of silver cubic structures during ultrasonication of chitosan AgNO₃ solution” *Carbohydrate Polymers* 152, 558- 565, Jul 2016.
- [18] S. Yu, Y. Sathishkumar, K. Devarayan, C. Sun, G. Chow, “Shape-controlled extracellular synthesis of silver nanocubes by *Mucor circinelloides*” *Materials Letters* 3-46, Jun 2015.
- [19] G. Hu et al., “Surfactant-directed synthesis of silver nanorods and characteristic spectral changes occurred by their morphology evolution,” *Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures*, vol. 64, pp. 211–217, Jul.2014.
- [20] X. Gu, C. Nie, Y. Lai, and C. Lin, “Synthesis of silver nanorods and nanowires by tartrate- reduced route in aqueous solutions,” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 96, no. 2–3, pp. 217–222, Jul. 2006.
- [21] E. Verde, “Desarrollo y caracterización de laminados vinílicos reforzados con nanopartículas de cobre y fibra de cuero”, Tesis, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima 2016.