

Síntesis y Caracterización de Nanopartículas de Magnetita

Alvear D.¹; Galeas S.², Guerrero V.H.², Debut A.³

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, Quito, Ecuador

²Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Materiales, Laboratorio de Nuevos Materiales, Quito, Ecuador

³Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, Centro de Nanociencia y Nanotecnología, Quito, Ecuador

Resumen: La síntesis de nanopartículas de óxidos de hierro ha captado gran interés en las últimas décadas debido a sus interesantes aplicaciones, entre ellas la remoción de contaminantes. En este trabajo se sintetizaron nanopartículas de magnetita mediante el método de co-precipitación y se estudió el efecto de la velocidad de agitación y el tiempo de reacción sobre el rendimiento, el tamaño y la distribución de tamaños, además, se estudió la influencia del pH del medio de dispersión en la aglomeración de las nanopartículas. Las nanopartículas fueron caracterizadas mediante microscopía electrónica de transmisión (MET), dispersión dinámica de luz (DLS), difracción de rayos X (DRX) y espectroscopía Raman. Se observó que la velocidad de agitación y el tiempo de reacción influyen positivamente en el rendimiento de la reacción (85 a 94 %), tamaño (23 ± 13 a 7 ± 4 nm) y distribución de tamaño de las nanopartículas. Para las mejores condiciones de síntesis se obtuvieron nanopartículas de magnetita de 7 ± 4 nm, con un rendimiento del 94 % en la reacción y con un grado de aglomeración relativamente bajo. El pH del medio de dispersión influye en la aglomeración de las nanopartículas. Los resultados obtenidos indican que es factible obtener nanopartículas con un tamaño aceptable para aplicaciones medioambientales.

Palabras clave: nanopartículas, magnetita, co-precipitación, dispersión, DLS, Raman.

Synthesis and Characterization of Magnetite Nanoparticles

Abstract: Iron oxide nanoparticle synthesis has gained special attention during the last decades because of their interesting applications, such as contaminant removal from water. In this work, magnetite nanoparticles were synthesized using the co-precipitation method and we studied the effects of stirring speed and the reaction time on the yield, size and size distribution, also, was studied the influence dispersion medium pH, in the agglomeration of the nanoparticles. The nanoparticles were characterized using transmission electron microscopy (MET), dynamic light scattering (DLS), X ray diffraction (DRX) and Raman spectroscopy. It was observed that the stirring speed and reaction time have a positive influence on the reaction yield (85 to 94 %), nanoparticles size (23 ± 13 to 7 ± 4 nm) and size distribution. For the best synthesis conditions, magnetite nanoparticles of approximately 7 ± 4 nm were obtained, with a 94 % reaction yield, with a relatively low agglomeration degree. The dispersion medium pH has influence on the agglomeration of the nanoparticles. Results show that it is feasible to obtain magnetite nanoparticles with an acceptable size for environmental applications.

Keywords: nanoparticles, magnetite, dispersion, co-precipitation, DLS, Raman

1. INTRODUCCIÓN

La ingeniería a nanoescala ayuda a entender y a controlar la materia en su nivel más fundamental: a nivel atómico y molecular. En los últimos años, las partículas a nanoescala han atraído mucha atención debido a sus inusuales propiedades electrónicas, ópticas y magnéticas (Mahmoudi et al., 2010). Las partículas magnéticas de tamaño nanométrico (1-100 nm), entre ellas las de óxidos de hierro, han sido utilizadas en varias aplicaciones prometedoras como catálisis, dispositivos electrónicos, almacenamiento de información, sensores, biomedicina, dispositivos de almacenamiento magnético y

remediación ambiental. (Mahmoudi et al., 2010), (Mohmood et al., 2013).

Dentro del rango extenso de nanopartículas magnéticas, la magnetita (Fe_3O_4), ha emergido como un candidato prometedor debido a su biocompatibilidad y sus excelentes propiedades magnéticas. Diferentes técnicas químicas han sido aplicadas para producir nanopartículas de magnetita con propiedades uniformes y una estrecha distribución de tamaños. Entre las técnicas de obtención se tiene: descomposición térmica, síntesis hidrotérmica, co-precipitación, oxidación de hidróxido férrico mediante KNO_3 , etc. (Palanisamy et al.,

2014).b Sin embargo, la co-precipitación es el procedimiento químico más comúnmente utilizado debido a su simplicidad, relación costo - efectividad y la facilidad de adaptación de las propiedades de las partículas, además que es un método fácilmente escalable. (Devaraj et al., 2008)

Una dificultad relacionada con la naturaleza de los ferrofluidos es que las nanopartículas, las cuales tienen una gran relación entre área superficial y volumen, tienden a aglomerarse para reducir su energía superficial mediante fuertes atracciones magnéticas dipolo-dipolo (Kim et al., 2001). Un proceso espontáneo, conocido como envejecimiento, tiene lugar en cualquier dispersión coloidal en el transcurso del tiempo, el cual involucra (i) un incremento en el tamaño primario debido a la solubilidad de las partículas sólidas en el líquido; (ii) la aglomeración debido a la adhesión de las partículas coloidales por medio de las fuerzas de Van der Waals en general y en especial la contribución magnética en el caso de la magnetita; (iii) la transformación química de la magnetita (Fe_3O_4) a maghemita (Fe_2O_3) debido a la adsorción de moléculas de oxígeno (Tombacz et al., 2006). Por lo tanto, recubrir la superficie de las nanopartículas puede prevenir efectivamente la adhesión de las partículas que se encuentran colisionando durante el movimiento térmico producido en la síntesis. En un medio acuoso, capas de estabilización electrostática estérica pueden evitar la aglomeración de las nanopartículas (Tombacz et al., 2006). Para esto se suele cargar positiva o negativamente a las partículas, mediante el tratamiento con soluciones ácidas o alcalinas; para obtener dispersiones estabilizadas mediante repulsiones electrostáticas (Lefebure et al., 1998). La repulsión electrostática ayudaría a que las nanopartículas posean una mayor superficie específica, debido a la menor aglomeración de las mismas, con lo cual, se beneficiaría la remoción de contaminantes de efluentes líquidos.

Devaraj et al. (2008), lograron mejorar el rendimiento de 69 a 81 % mediante el método de coprecipitación, al aumentar la velocidad de agitación de 500 a 1000 rpm, respectivamente.

En este trabajo se pretendió aumentar la cantidad de nanopartículas de magnetita obtenidas por el método de coprecipitación, disminuir el tamaño y distribución de tamaños de las partículas, mediante la variación de la velocidad de agitación y el tiempo de reacción. Además, se estudió la influencia del pH en la aglomeración de las nanopartículas de magnetita.

2. METODOLOGÍA

Para la síntesis utilizó el equipo presentado en la figura 1. Una dispersión acuosa de nanopartículas de magnetita fue preparada usando el método de co-precipitación, mediante la alcalinización de una mezcla acuosa de sales ferrosas y férricas con NaOH a 50 °C. Se agregó gota a gota 25 mL de una solución 1.28 M de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (99%), 0.64 M $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ y 0.4 M de HCl (37%) sobre 250 mL de la solución 0.9 M de NaOH (99%) bajo agitación magnética vigorosa (500 y 1000 rpm) por 30 y 45 min a 50 °C bajo un ambiente no oxidante de argón. El polvo negro precipitado se aisló aplicando un campo magnético externo y el sobrenadante se removió del

precipitado por decantación. El polvo fue lavado 4 veces con agua destilada. Posteriormente, una solución 0.01 M de HCl fue agregada para neutralizar la carga aniónica de la superficie de las partículas obtenidas.

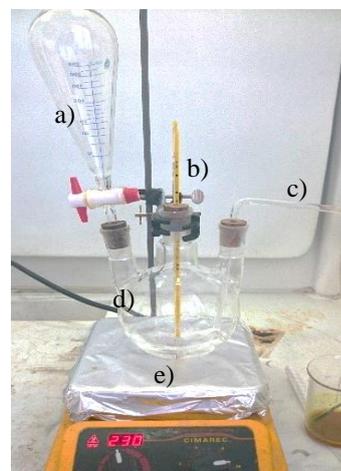


Figura 1. Esquema del equipo empleado a) Embudo de separación b) Termómetro c) Ingreso de argón d) Balón de tres vías e) Plancha de calentamiento (Marca: Thermo Fisher, Modelo: Cimarec)

Para la caracterización de las nanopartículas de magnetita obtenidas se empleó un equipo de difracción de rayos X (DRX) que permitió determinar la identidad de las muestras. Para obtener los patrones de difracción de rayos X, la muestra fue secada durante 12 horas a 80 °C.

Para la caracterización estructural por difracción de rayos X (DRX) de las nanopartículas de magnetita obtenidas se empleó un difractómetro Empyrean de Panalytical. Para ello, las muestras fueron secadas durante 12 h a 80°C. Para observar el comportamiento de las partículas en solución se empleó el método de dispersión dinámica de luz (DLS) en un analizador Brookhaven 90 Plus. Para determinar el diámetro de las nanopartículas y observar su morfología se empleó microscopía electrónica de transmisión (TEM) con un microscopio Tecnai G2 Spirit Twin de FEI. Los análisis de espectroscopía Raman fueron realizados en un espectrofotómetro Horiba LabRAM HR Evolution. Para la caracterización mediante DDL se dispersó la muestra en agua a pH 1.

Las muestras se identificaron usando la siguiente nomenclatura mg-1 (1 000 rpm y 45 min), mg-2 (1 000 rpm y 30 min), mg-3 (500 rpm y 30 min) y mg-4 (500 rpm y 45 min).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Composición de fase de las nanopartículas

La figura 2 muestra el patrón de DRX para las nanopartículas de magnetita sintetizadas. Cabe señalar que la longitud de onda empleada fue Cu K-alpha, 0.15418 nm (Bragg-Brentano). Los ángulos de difracción 2θ aparecen en los valores 30; 35,22; 43,33; 53,45; 56,90 y 62,76 con sus correspondientes planos de reflexión 220, 311, 400, 422, 511 y 440, lo cual demuestra que se trata de un compuesto de magnetita, con una estructura cristalina de espinela con arreglo cúbico empaquetado (Kim et

al., 2001). Generalmente los picos de difracción en los planos de reflexión 113 y 210, 213 y 210 son característicos de la maghemita y hematita, respectivamente.

Para corroborar los resultados obtenidos en la difracción de rayos X se realizó el análisis de espectroscopía Raman de la muestra de nanopartículas obtenidas a 45 minutos y 1000 rpm. Este análisis consiste en hacer incidir un haz de luz láser sobre la muestra, una porción de la luz se dispersa inelásticamente y experimenta ligeros cambios de frecuencia característicos de cada material, que se presenta a manera de un espectrograma. En la figura 3 se presentan los espectrogramas correspondientes a la muestra y a la magnetita de acuerdo a la biblioteca Bio-Rad's HORIBA Edition KnowItAll.

Como se observa en la figura 3, los picos de la muestra mg-1 coinciden con los correspondientes al espectro RMX #265 Magnetite (heated). De esta manera se pudo confirmar la identidad de la muestra. La diferencia en los picos se debe a que la muestra es una mezcla de fases de los óxidos de hierro mencionados anteriormente. Estos resultados confirman que se puede emplear la espectroscopía Raman como una técnica de caracterización alternativa y complementaria a la difracción de rayos X (Faria et al., 1997), (Perez et al., 2009).

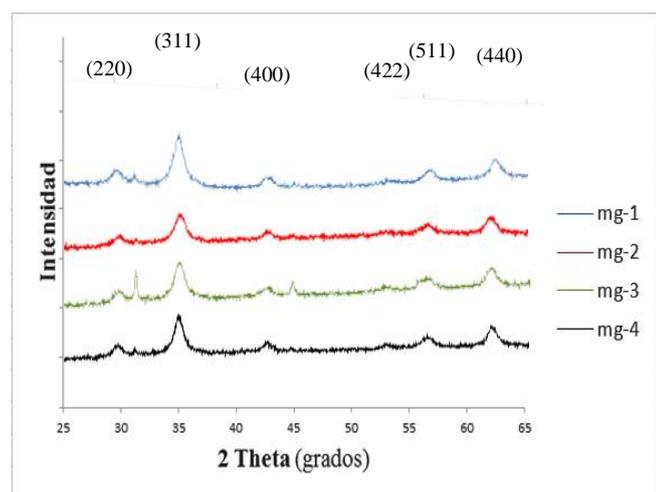


Figura 2. Patrón de difracción de rayos X de las muestras de magnetita mg-1 (1000 rpm; 45 min), mg-2 (1000 rpm; 30 min), mg-3 (500 rpm; 30 min) y mg-4 (500 rpm; 45 min)

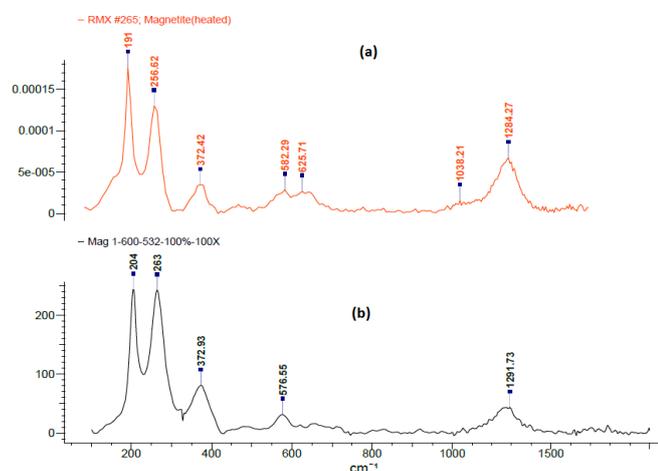


Figura 3. Comparación de espectros Raman (a) Magnetita (b) Muestra sintetizada

3.2 Efecto de tiempo de reacción en el rendimiento de las nanopartículas.

En la Tabla 1 se presenta el porcentaje de rendimiento de la síntesis de nanopartículas de magnetita a diferentes condiciones de trabajo. Se aprecia que el porcentaje de rendimiento de la reacción aumenta al incrementar la velocidad de agitación y el tiempo de reacción. Es decir, la velocidad no solo distribuye mejor las especies reactantes en el medio, sino que además acelera el proceso de precipitación. Se puede pensar que el aumento de la velocidad de agitación ayuda a una mejor formación de núcleos en la solución supersaturada debido a que más moléculas de las sales ferrosas y férricas se distribuyen de mejor manera en la solución alcalina. Por lo tanto, se observa un aumento de la formación de Fe_3O_4 en el medio de reacción. También se aprecia que, al aumentar el tiempo de reacción, aumenta el rendimiento de la reacción, por lo que es indispensable que las especies reactantes permanezcan en el licor madre el tiempo suficiente para la formación de nanopartículas de Fe_3O_4 . Este fenómeno va de acuerdo con la teoría de nucleación y crecimiento de cristales, en la cual, al aumentar la velocidad de agitación y el tiempo de reacción, también se incrementa la velocidad de nucleación, por ende, el rendimiento de la reacción.

Existen tres regímenes de la generación de partículas durante el proceso de precipitación:

- i. Tiempo de inducción: Se forman unidades de construcción de sólidos (todavía en la solución)
- ii. Periodo de nucleación: La nucleación ocurre cuando la concentración de las unidades de construcción alcanza el nivel de saturación
- iii. Fase de crecimiento: El crecimiento se da luego del periodo de nucleación hasta que las especies en reacción en la solución alcanzan el equilibrio.

El núcleo generado tiene que alcanzar el radio crítico (R) después del cual es estable y continúa con el subsecuente crecimiento. Las partículas con un radio inferior a R se disolverán dentro del medio de reacción. Se puede decir que, dada cierta concentración de los reactantes, un número máximo de los núcleos van a ser formados si se deja reaccionar el tiempo suficiente en el cual se formen núcleos estables. A cortos tiempos de reacción, no muchos núcleos estables son generados dado que el tiempo de residencia de los núcleos en el licor madre es probablemente muy corto. Así, a bajos tiempos de reacción, el rendimiento de las partículas va a ser corto. Incrementar el tiempo de reacción debería tener un efecto positivo en el rendimiento además que nanopartículas más estables podrían ser generadas. Sin embargo, esto podría ser cierto dentro de un intervalo de tiempo de reacción, ya que procesos secundarios como la maduración de Ostwald podría dominar, causando que partículas más grandes crezcan a expensas de partículas más pequeñas. Esto podría afectar adversamente el rendimiento de la reacción (Devaraj et al., 2008).

Tabla 1. Porcentaje de rendimiento de la reacción para las muestras mg-1, mg-2, mg-3 y mg-4

Muestra	Tiempo de reacción (min)	Velocidad de agitación (rpm)	Rendimiento de la reacción (%)
mg-1	45	1000	94
mg-2	30	1000	86
mg-3	30	500	79
mg-4	45	500	85

3.3 Efecto de la velocidad de agitación en el tamaño y distribución de tamaños de las partículas

Las micrografías MET de las nanopartículas de Fe_3O_4 mg-1, mg-2, mg-3 y mg-4 se muestran en la figura 4. Los diámetros promedio obtenidos por MET de las muestras fueron 7 ± 4 ; 8 ± 3 ; 9 ± 6 y 23 ± 13 nm, para mg-1, mg-2, mg-3 y mg-4, respectivamente. En las micrografías de la figura 4 se observa que las nanopartículas forman agregados. Además, en las nanopartículas sintetizadas al mismo tiempo de reacción, se puede observar una mayor aglomeración en las muestras mg-3 y mg-4, además de una amplia distribución de tamaños. Esto mejora sustancialmente al aumentar la velocidad de agitación en la reacción, como se puede observar en los casos de las muestras mg-1 y mg-2 pero a diferentes velocidades de agitación figura 4 a), 4 d) y figura 4 b), 2 c), el tamaño disminuye en 70 % y 10 %, respectivamente, al aumentar la velocidad de agitación de 500 a 1 000 rpm.

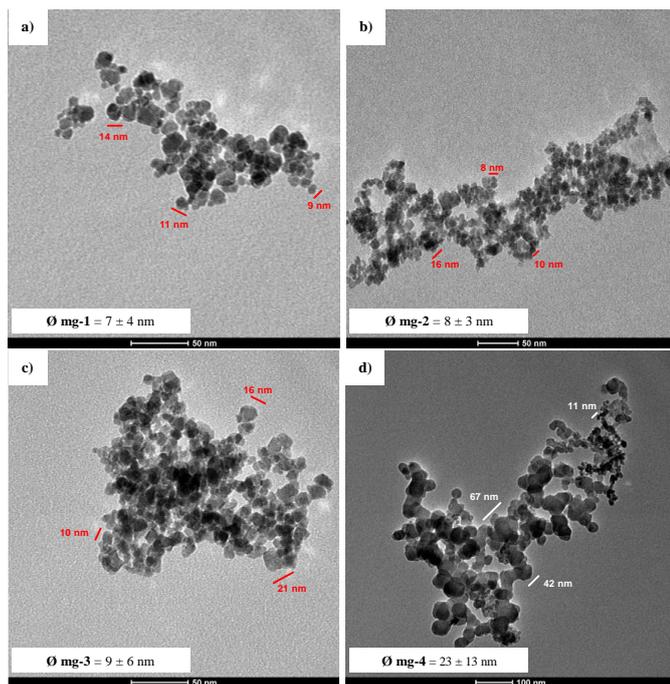


Figura 4. Imágenes TEM de Fe_3O_4 sintetizada bajo las siguientes condiciones experimentales (a) mg-1, 1 000 rpm, 45 min de agitación, (b) mg-2, 1 000 rpm, 30 min de agitación, (c) mg-3, 500 rpm, 30 min de agitación y (d) mg-4, 500 rpm, 45 min de agitación

Por otra parte, en las partículas obtenidas a 1000 rpm y diferente tiempo de reacción Figura 4 a) y 4 b) no se aprecia cambios significativos en el tamaño y la distribución de tamaños de las partículas, a diferencia de las partículas obtenidas a 500 rpm Figura 4 c) y 4 d), en las cuales se observa una distribución de tamaños menos homogénea y un aumento

del 250 % del tamaño de partícula al incrementar el tiempo de reacción de 30 a 45 min.

Probablemente la velocidad de agitación tiene una mayor influencia sobre el tamaño y distribución de tamaños de las nanopartículas que el tiempo de reacción. Esto sería atribuido a que se evita el crecimiento de cristales en la etapa de síntesis al momento de aumentar la velocidad de agitación. Samarghandi et al. (2015) obtuvieron nanopartículas de magnetita con un diámetro de 13 nm mediante el método de coprecipitación a $1\ 000\ min^{-1}$ y $80\ ^\circ C$. Dicho diámetro es mayor al obtenido para mg-1 (7,45 nm). Esta diferencia puede ser atribuida a la temperatura de reacción empleada por los autores en la síntesis de las nanopartículas.

Por otra parte, a bajas velocidades de reacción, las partículas tienden a aglomerarse. Una dispersión uniforme completa en todas las partículas no es posible cuando la velocidad de agitación es baja, porque una movilidad acelerada de las partículas en el medio y una dispersión uniforme de las especies nucleadas ocurre cuando existe una alta velocidad que favorece la obtención de partículas más pequeñas y con una estrecha distribución de partículas (Samarghandi et al., 2015). Esto también puede ser corroborado con los diámetros efectivos de cada una de las muestras analizadas. Estos diámetros fueron obtenidos mediante DLS y se resumen en la Tabla 2.

Los diámetros efectivos, índices de polidispersión y porcentajes de partículas mayores y menores a 100 nm, obtenidos mediante DLS para las muestras mg-1, mg-2, mg-3 y mg-4, se presentan en la Tabla 2. En todas las muestras se observa un diámetro efectivo mayor a los 100 nm, lo que confirma lo hallado en las micrografías de la Figura 2, es decir, que las nanopartículas se encuentran aglomeradas, sin embargo, en los histogramas obtenidos mediante DLS se determinó que existen grupos de aglomerados de nanopartículas que superan el rango nanométrico (mayores a 100 nm) y otros que se encuentran dentro del mismo. En la Tabla 2 se nota que, a mayor velocidad de agitación, incrementa la cantidad de agregados que se encuentran dentro del rango nanométrico. Por otra parte, a 1 000 rpm, a mayor tiempo de reacción incrementa la cantidad de aglomerados dentro del rango nanométrico, a diferencia de 500 rpm, que disminuye la cantidad de aglomerados dentro del rango, al incrementar el tiempo de reacción. Se podría decir que, las nanopartículas que poseen mayor diámetro tienden a formar agregados más grandes. Además, el índice de polidispersión en todas las muestras es menor a 0,4, por lo que se trata de una muestra moderadamente polidispersa, es decir, los aglomerados poseen una moderada distribución de tamaños.

Tabla 2. Diámetros efectivos de las muestras obtenidos mediante DLS.

Muestra	Diámetro efectivo (nm)	Partículas < 100 nm (%)	Partículas > 100 nm (%)	Índice de Polidispersión
mg-1	162,3	43,86	56,14	0,283
mg-2	125,8	26,95	73,05	0,309
mg-3	162,9	19,02	80,98	0,207
mg-4	161,1	12,57	87,43	0,245

Tabla 3. Comparación de los diámetros obtenidos por TEM y DLS para las muestras mg-1, mg-2, mg-3 y mg-4.

Muestra	mg-1	mg-2	mg-3	mg-4
Diámetro TEM (nm)	7 ± 3	8 ± 3	9 ± 6	23 ± 13
Diámetro efectivo DLS (nm)	162,3	128,8	162,9	161,1

En la tabla 3 se presenta los diámetros obtenidos por TEM y DLS, de las muestras mg-1, mg-2, mg-3 y mg-4. De acuerdo a los datos de la tabla 3 se puede evidenciar que existe una gran diferencia entre los diámetros obtenidos mediante TEM y DLS para todas las muestras, debido a que mediante DLS se observa el comportamiento de las nanopartículas cuando estas se encuentran en solución, a diferencia de TEM que nos enseña una micrografía de los aglomerados obtenidos de las nanopartículas. Además, se evidencia que todas las muestras se encuentran aglomeradas.

3.4 Influencia del pH del medio de dispersión en la aglomeración de las nanopartículas

En la tabla 4 se muestran los diámetros efectivos a diferentes pH del medio de dispersión para la muestra mg-1. En la tabla 3 se puede observar que al disminuir el pH de 7 a 1, se reduce el diámetro efectivo en un 60,5 %, demostrando la clara influencia del pH sobre la aglomeración de las nanopartículas.

Las nanopartículas están dispersas en un medio a pH 7, el cual se encuentra cercano al punto cero de carga de la magnetita igual a 7.2. En este punto la partícula, al no tener carga alrededor, tiende a agregarse debido a las interacciones que existen entre las partículas ya sean de carácter magnético o a las fuerzas de Van der Waals. El ajuste del pH ayuda a que las partículas de magnetita, las cuales son sólidos anfóteros, puedan desarrollar cargas en las reacciones de protonación ($\text{Fe-OH} + \text{H}^+ \rightarrow \text{Fe-OH}_2^+$) o deprotonación ($\text{Fe-OH} \rightarrow \text{Fe-O}^- + \text{H}^+$) en los sitios del Fe de la superficie de la partícula. Estas reacciones en la superficie pueden ser interpretadas como la adsorción específica de iones H^+ y OH^- en la interfaz sólido/agua. El campo electrostático desarrollado alrededor de las partículas de magnetita en condiciones de pH ácidas o alcalinas alejadas del pH del punto cero de carga, puede prevenir la agregación de las partículas próximas debido a la repulsión de las partículas que presentan una misma carga en su superficie. Por ello, una estabilización electrostática puede proveer una estabilidad coloidal en soluciones de magnetita

Las nanopartículas de magnetita al poseer una gran relación área/volumen, tienen una alta tendencia a agregarse con el objeto de minimizar la alta energía que estas poseen en su superficie. Por ello, la estabilización electrostática no soluciona definitivamente el problema de aglomeración entre nanopartículas. Para esto se podría recubrir la superficie de las nanopartículas para evitar dicho fenómeno.

El tamaño de las partículas también se ve influenciado por las condiciones de síntesis a las que se trabajó, ya que parámetros tales como: la velocidad de agitación, los precursores de hierro usados, concentración de la solución alcalina y la temperatura, pueden afectar al tamaño de las partículas producidas.

Tabla 4. Diámetros efectivos obtenidos mediante DLS para la muestra mg-1 a diferentes pH.

Muestra	pH	Diámetro efectivo (nm)
mg-1	7	411,2
	1	162,3

Cabe señalar que en este trabajo se obtuvieron nanopartículas empleando una temperatura de síntesis inferior a la empleada por otros autores (Devaraj et al., 2008), lo cual representa un ahorro energético que se vería reflejado en el costo de obtención del material a nivel industrial.

4. CONCLUSIONES

Mediante el aumento de la velocidad de agitación y el tiempo de reacción en la síntesis de nanopartículas de magnetita por coprecipitación fue posible mejorar el rendimiento de la reacción, disminuir el tamaño de partícula y obtener una distribución de tamaños más estrecha. Además, el incremento del tiempo de reacción aumentó el rendimiento de la reacción. Se obtuvieron nanopartículas de magnetita de 7 nm de diámetro promedio a 50 °C, 1 000 min^{-1} y se consiguió un rendimiento de la reacción del 94%. Además, se pudo observar la clara influencia del pH del medio de dispersión, en la aglomeración de las nanopartículas de magnetita, el diámetro efectivo disminuyó en un 60,5 % al disminuir el pH de 1 a 7.

Las nanopartículas de magnetita sintetizadas serán utilizadas en trabajos posteriores para la remoción de metales pesados de aguas contaminadas. Adicionalmente, se formularán materiales compuestos magnéticos a partir de residuos lignocelulósicos para aplicaciones medioambientales.

REFERENCIAS

- Devaraj, N. K., Ong, B. H. & Matsumoto, M. (2008). Yield Control of Chemically-Synthesized Magnetite Nanoparticles. *Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry*, 38 (2), 208-211. <http://dx.doi.org/10.1080/15533170801926374>
- Faria, D., Venancio Silva, S. & Oliveira, M. (1997). Raman Microspectroscopy of Some Iron Oxides and Oxyhydroxides. *Journal of Raman Spectroscopy*, (28), 873-878. [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4555\(199711\)28:11<873::AID-JRS177>3.0.CO;2-B](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1097-4555(199711)28:11<873::AID-JRS177>3.0.CO;2-B)
- Kim, D., Zhang, Y., Voit, W. & Muhammed, M. (2001). Synthesis and characterization of surfactant-coated superparamagnetic monodispersed iron oxide nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 225 (1-2), 30-36. [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-8853\(00\)01224-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-8853(00)01224-5)
- Lefebvre, S., Dubois, V., Cabuil, A., Neveu, S. & Massart, R. (1998). Monodisperse magnetic nanoparticles: Preparation and dispersion in water and oils. *Journal of Materials research*, 13, (10), 2975-2981. <http://dx.doi.org/10.1557/JMR.1998.0407>
- Mahmoudi, M., Sant, S., Wang, B., Laurent, S. & Sen, T. (2010). Superparamagnetic iron oxide nanoparticles (SPIONs): Develop modification and applications in chemotherapy. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 63 (1), 24-26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addr.2010.05.006>
- Mohmood, I., Batista, C., Lopes, I., Ahmad, I., Duarte, A. & Pereira, E. (2013). Nanoscale materials and their use in water contaminants removal - a review. *Environmental science and pollution research*

international, 20 (1), 1239–1260. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-012-1415-x>

Palanisamy, K., Devabharath, V. & Meenakshisundaram, N. (2014). The utility of magnetic iron oxide nanoparticles stabilized by carrier oils in removal of heavy metals from waste water. *International Journal of Research in Applied, Natural and Social Sciences*, 1 (1), 15-22. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/259560673_The_Utility_of_Magnetic_Iron_Oxide_Nanoparticles_Stabilized_by_Carrier_Oils_in_Removal_of_Heavy_Metals_From_Waste_Water (junio, 2017)

Pérez, F.R., Barrero, C., Arnache, O. y Hight Walker, A. (2009). Structural properties of iron phases formed on low alloy steels immersed in sodium chloride-rich solutions. *Physica B Condensed Matter*, 404(8-11), 1347-1353. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physb.2008.12.020>

Samarghandi, M., Asgari, G., y Ahmadzadeh, A. (2015). Fe₃O₄ magnetite nanoparticles synthesis and modified with chitosan biopolymers for removal of hexavalent chromium from aqueous solutions. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 7(4), 933–941. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/277776707_Fe_3_O_4_magnetite_nanoparticles_synthesis_and_modified_with_chitosan_biopolymers_for_removal_of_hexavalent_chromium_from_aqueous_solutions (Marzo, 2016).

Tombacz, E., Majzik, A., Horvat, Z. y Illes, E. (2006). Magnetite in aqueous medium: coating its surface and surface coated with it. *Romanian reports in physics*, 58(1), 281-286. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/230806104_Magnetite_in_aqueous_medium_Coating_its_surface_and_surface_coated_with_it



Franklin David Alvear Ortiz.

Ingeniero Químico de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), 2017. Realizó su proyecto de titulación en el Laboratorio de Nuevos Materiales de la EPN en el área de síntesis de nanopartículas y su aplicación en remediación ambiental. Experiencia en la síntesis y caracterización de nano compuestos, además, en el manejo de equipos para la caracterización de materiales nanoestructurados y equipo de laboratorio.



Salomé Gabriela Galeas Hurtado.

Ingeniera Química graduada en la Escuela Politécnica Nacional (EPN), 2008. Especialista de Caracterización de Materiales en el Laboratorio de Nuevos Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN desde Marzo de 2010. Experiencia en la síntesis y caracterización de nanopartículas, nanocompuestos y compuestos lignocelulósicos. Experiencia en la operación de equipos especializados para: extrusión, inyección, microscopía electrónica de barrido (SEM), caracterización de partículas mediante luz láser, espectroscopía FT-IR, análisis termomecánico (TGA, DSC, TMA), entre otros. Participación en proyectos de investigación relacionados al desarrollo de nuevos materiales que incluyen compuestos de matriz polimérica y materiales nanoestructurados con propiedades multifuncionales.



Víctor Hugo Guerrero Barragán.

Doctor en Ingeniería Mecánica (Ph.D.) graduado en la University at Buffalo, SUNY, Nueva York, E.E.U.U. Actualmente se desempeña como Decano de la Facultad de Ingeniería Mecánica, como Profesor Principal con dedicación a tiempo completo en el Departamento de Materiales y Jefe del Laboratorio de Nuevos Materiales de la EPN. Como docente, ha impartido varios cursos a nivel de pregrado y postgrado. Tiene una experiencia significativa en la dirección, ejecución y evaluación de proyectos de investigación en torno a la ciencia e ingeniería de materiales y a la mecánica de materiales, aplicados en particular a materiales compuestos y nanoestructurados.



Alexis Patrice Debut.

Dr. Alexis Debut terminó su doctorado en física a la edad de 25 años en la Université des Sciences et Technologies de Lille, France. Actualmente es el responsable del Laboratorio de Caracterización de Nanomateriales del Centro de Nanociencia y Nanotecnología de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Ha publicado más de 70 artículos en revistas de alto impacto, conferencias y patentes, a nivel nacional como internacional.