



Propuesta experimental docente para la síntesis de nanomateriales magnéticos. Nanopartículas magnéticas en montmorillonita

Teaching experimental proposal for the synthesis of magnetic nanomaterials. Magnetic nanoparticles in montmorillonite

María de Lourdes Chávez García¹, Abigail Rodríguez González², Aurora Ramos Mejía³ y Tania Ariadna García Mejía⁴

Resumen

En este trabajo se desarrolló una propuesta experimental para estudiantes universitarios por medio del Aprendizaje con Base en Problemas. A quienes se les proporcionó el reto de preparar un nanomaterial cerámico para la descontaminación de suelos; actividades enmarcadas en las áreas de la química de sólidos y de materiales cerámicos. Los estudiantes mostraron su capacidad al proponer el diseño de nanopartículas magnéticas de hierro insertadas en una arcilla montmorillonítica para la resolución del problema; a través de sus habilidades de investigación en literatura confiable, plantearon sus objetivos, hipótesis y metodología para la síntesis in situ de las nanopartículas magnéticas, en una montmorillonita acondicionada; desarrollaron e interpretaron los experimentos; realizaron la caracterización estructural de sus nanomateriales por las técnicas de difracción de rayos X de polvos y espectroscopía de absorción infrarroja; finalmente, concluyeron sus resultados. De forma paralela, desarrollaron sus habilidades de reflexión, toma de decisiones, de intercambio y comunicación de opiniones e información, argumentaron, memorizaron y formularon sus ideas. Los estudiantes expusieron sus avances en los seminarios semanales; redactaron el informe final en forma de artículo de investigación y efectuaron una muestra experimental en la Feria de Química de la Facultad de Química, UNAM.

Palabras clave

Enseñanza de la química, Aprendizaje con Base en Problemas, nanomaterial, nanopartículas magnéticas, montmorillonita.

Abstract

This work exposes an experimental proposal for university students using Base Learning on Problems. Such students were challenged to prepare a ceramic nanomaterial for soil decontamination; activities framed by the chemistry on solids and ceramic materials areas. The students showed their ability to propose a design of magnetic iron nanoparticles inserted in a clay montmorillonitic for the problem solution; through their abilities of investigation trustworthy literature; they stated their objectives, hypothesis and methodology for the synthesis of magnetic nanoparticles in situ, a conditioned montmorillonite; developed and interpreted the experiments; performed the structural characterization of their nanomaterials by the X-ray powder diffraction and infrared absorption spectroscopy techniques; finally, they concluded their outcome. In parallel, they developed their reflection skills, decision-making, information opinion exchange and communication; they argued, memorized and formulated their ideas. The students exposed their advances in the weekly seminars; wrote the final report in a research article format and performed an experimental sample at the Chemistry Fair at the Chemistry Faculty, UNAM.

Keywords

Chemistry teaching, Problem Based Learning, nanomaterial, magnetic nanoparticles, montmorillonite.

¹ Facultad de Química, UNAM. Lab. de Materiales Cerámicos. Química Inorgánica y Nuclear. marilulilith1307@quimica.unam.mx. <https://orcid.org/0000-0001-7895-4056>

² Facultad de Química, UNAM. Lab. de Materiales Cerámicos. Química Inorgánica y Nuclear. abigail.rg7@comunidad.unam.mx.

³ Facultad de Química, UNAM, México. <https://orcid.org/0000-0002-8956-8289>.

⁴ Instituto de Ingeniería. Coordinación de Ingeniería Ambiental, UNAM. <https://orcid.org/0000-0001-9701-844X>

Introducción

El Aprendizaje con Base en Problemas (ABP), en algunos grupos, de las asignaturas de Química de Estado Sólido, Química y Síntesis de Materiales y, Síntesis de Cerámicos, de la Facultad de Química de la UNAM, es una herramienta útil para los estudiantes al aumentar su capacidad de análisis, riqueza conceptual y resolución de ejercicios; en donde, los estudiantes desarrollan, aprenden y profundizan conocimientos con relación a la estructura de los sólidos y de materiales nuevos (Chávez et al., 2020). Dentro de los que están, la preparación de nanomateriales compuestos; de biomateriales con ácido poliláctico y bifosfato de calcio para la regeneración ósea (Reyes, 2019) y materiales de $Al-Al_4C_3$ con resistencia a la compresión mayor a temperaturas de operación altas, en comparación con las aleaciones comerciales de aluminio fundido, entre otras (Vorozhtsov, 2016). Lo cual, evoluciona el mundo de la medicina, la industria de la construcción, la ingeniería espacial, la automotriz y el medio ambiente, entre otras.

El aprendizaje de la química de sólidos y de materiales requiere de conocimientos de la estructura de sólidos ideales y no ideales, métodos de síntesis y caracterización y, las transiciones de fases para consolidar la relación estructura – síntesis – propiedades - aplicaciones. Lo que permitirá al futuro profesional de la química y las áreas afines desenvolverse en el mundo laboral, académico o empresarial cada vez más especializado en sectores como son, el manejo de residuos sólidos peligrosos; control de partículas sólidas ambientales y cambio climático; inteligencia artificial y robótica; reciclaje y reutilización, entre otras (Causil y Rodríguez, 2021; Moliner, et al., 2018; Carretero, et al., 2017).

El estudio de los materiales es una ciencia moderna integrada, implica la generación y aplicación de conocimientos; relaciona la composición, la estructura y las interacciones de un sistema, a través del proceso de síntesis, las que dan lugar al funcionamiento y el rendimiento en la aplicación de un producto final. El tetraedro tradicional de la ciencia de los materiales cerámicos resume las actividades en su desarrollo, figura 1.

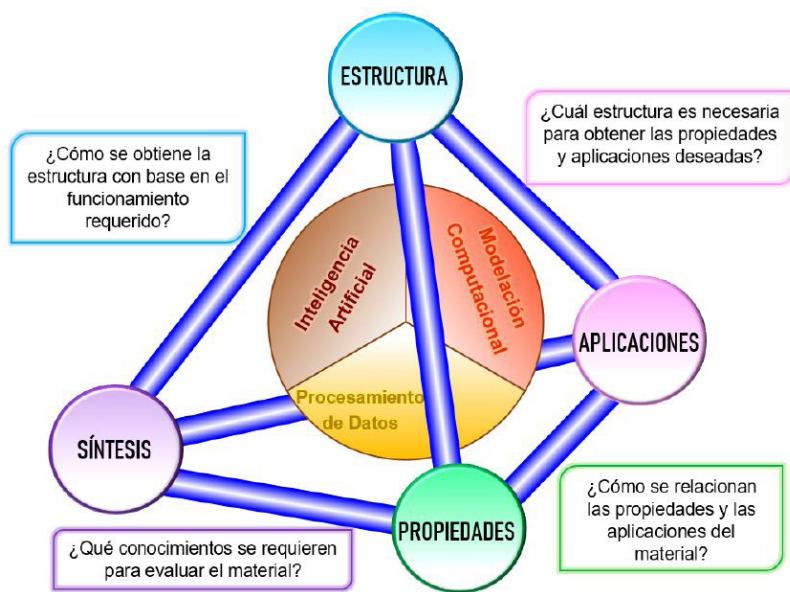


FIGURA 1. Tetraedro de la Ciencia de los Materiales Cerámicos, modificada de Deagen, et al., 2022.

El tetraedro de la ciencia de los materiales cerámicos enfatiza la investigación interdisciplinaria sobre la estructura, el procesamiento o síntesis, las propiedades y el rendimiento para aplicación de los cerámicos (Constant, 2005). Con adición del uso y desarrollo de sistemas informáticos, la inteligencia artificial, el procesamiento de datos y otros (Deagen, et al., 2022).

La comprensión de lo que significa la ciencia y la aplicación de los materiales se realiza al considerar los conocimientos y las habilidades con los que se tiene relación, como son: la estructura, el equilibrio de fases y sus transformaciones, la caracterización de la composición y la microestructura, el desarrollo de propiedades, el desarrollo funcional, los procesamientos de síntesis y manufactura, la degradación y durabilidad del material y, el diseño, figura 1 (Chowdhury, et al., 2021).

El aprendizaje con base en problemas, ABP, ha sido identificado como estrategia potencial para la participación de los estudiantes, con un impacto positivo en el proceso de la enseñanza-aprendizaje. El ABP es una didáctica que plantea como punto de partida un reto a los estudiantes con relación a su entorno, clave detonante para facilitar su aprendizaje. Proporciona un marco para diseñar experiencias de aprendizaje, en donde los estudiantes se interesan en la resolución del problema, reflexionan, analizan, investigan y aprenden alternativas de resolución novedosas y de aplicación práctica en la realidad del mundo más allá del aula de clase para su comunidad y la sociedad en general (Causil y Rodríguez, 2021; Martín, et al., 2021; Nagarajan y Overton, 2019).

El aprendizaje activo permite a los estudiantes asumir la responsabilidad de su aprendizaje (Ramos, 2018), descubren sus preferencias y estrategias en el proceso de resolución del problema; adicional, colaboran en grupos pequeños; mientras que el instructor o el maestro funciona como un facilitador. De esta forma, los estudiantes alcanzan los objetivos de aprendizaje y la adquisición o promoción de habilidades de conocimiento y sociales (Causil y Rodríguez, 2021; Martín, et al., 2021; Nagarajan y Overton, 2019). Para consolidar el aprendizaje se requiere de evidencia en donde quede plasmado el conocimiento adquirido y se refleje la motivación, el comportamiento y las relaciones sociales, entre otros factores (Cevallos y Botto, 2019).

El propósito de esta propuesta experimental fue plantear a los estudiantes el desarrollo de un nanocompuesto cerámico con base en nanopartículas magnéticas de hierro soportadas en una arcilla montmorillonítica, NPM-Fe/MNT, para la remediación de la contaminación de lagos y suelos, por medio de la metodología del ABP. Con esta didáctica, se les anima a los estudiantes a desarrollar un proyecto de investigación real, al plantearles un problema o un reto, de tal forma que se motiven a investigar en la literatura; a proponer objetivos e hipótesis; a diseñar el desarrollo experimental; a realizar la experimentación y caracterización de sus productos; así como, el analizar y discutir los resultados para animarse a presentarlos ante la sociedad. Lo cual, les ofrece la posibilidad de motivarlos en el aprendizaje relacionado con el conocimiento de la estructura de los sólidos, los métodos de síntesis y la caracterización de los materiales cerámicos; importantes en la Química del Estado Sólido y de la Ciencia y la Química de los Materiales, por su influencia directa en el desarrollo de habilidades de investigación en la búsqueda de información, metodología, práctica experimental, trabajo colaborativo y actitud crítica, que fomentan el desarrollo de habilidades de comunicación, resolución de problemas y el autoaprendizaje. Evidenciado por escrito, con un documento tipo artículo de investigación y la exposición experimental en un medio social.

Arcillas Minerales y Montmorillonita

Las arcillas minerales están disponibles en la naturaleza, son eliminadores naturales de especies tóxicas en el ambiente a través de mecanismos de intercambio iónico, la adsorción o ambos fenómenos, haciendo uso de su área de superficie alta. Cuando se comparan con otras técnicas de remoción de metales pesados presentes en cuerpos de aguas y aguas residuales, que incluyen técnicas de coagulación/floculación, filtración por membrana, fotocatalisis, precipitación química, adsorción, intercambio iónico, entre otras; y, al considerar el objetivo de estas investigaciones para encontrar metodologías de remoción sostenibles en el tiempo, operativos y energéticos, facilidad de implementación y recuperación. Las arcillas cumplen con estas características, al ser uno de los minerales más abundantes en el planeta; por lo cual son de costo bajo y rendimiento alto para la protección del ambiente, eliminación y almacenamiento de químicos peligrosos, tanto en la remediación de agua y suelos contaminados, de tal forma que, las características de las arcillas minerales y sus modificaciones son reconocidas como los materiales del siglo veintiuno (Drovíková, et al., 2020; Oliveira, 2003).

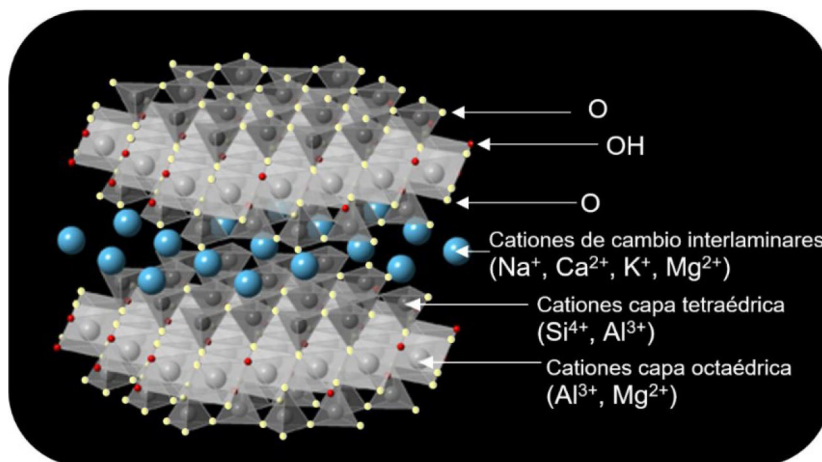


FIGURA 2. Estructura de la montmorillonita, modificada de wikimedia.org.

La montmorillonita (MNT) es una arcilla mineral multifuncional con una estructura laminar 2:1, en donde, una lámina está compuesta por una capa octaédrica de Al(OH)₂O₄ situada entre dos capas tetraédricas de SiO₄⁴⁻. En estas capas se producen sustituciones isomórficas, en donde, los cationes se sustituyen por otros de tamaño similar de valencia baja, sin alterar la estructura, induciendo una carga negativa permanente; así, en la capa tetraédrica el Si⁴⁺ es sustituido por Al³⁺ y en la octaédrica el Al³⁺ por Mg²⁺. Esta carga negativa es compensada por cationes hidratados, alojados en el espacio entre cada lámina; lo cual confiere a la MNT la capacidad de hinchamiento y porosidad elevada por la adsorción de agua de acuerdo con la fórmula general siguiente (Schoonheydt, et al., 2018):



El requerimiento de cationes satisface el equilibrio electrostático, tanto en los sitios activos, en la interlámina como en la superficie; se establece una relación entre las propiedades eléctricas de los cationes hidratados y el comportamiento de las moléculas de agua; los cuales se ubican en el espacio interlaminares expansivo en función de su hidratación. Así mismo, el tamaño de partícula pequeño (< 2 μm), la plasticidad, el área superficial alta (250-800 m²/g) y la ausencia de toxicidad le proporciona a la montmorillonita propiedades

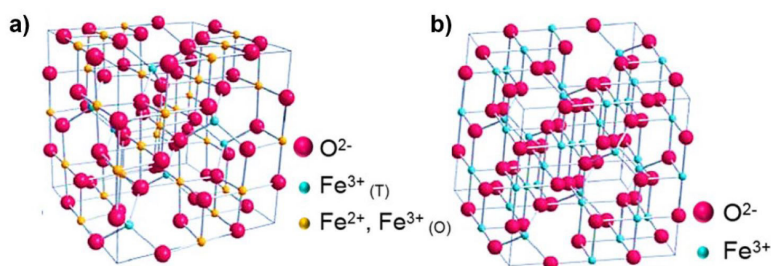
de adsorción excelente y potencial de intercambio catiónico (80-120 meq/100 g), figura 2. Así, en la MNT el proceso de intercambio catiónico se ha propuesto como el mecanismo principal para la adsorción, mientras que participan otros, como es el caso en donde, los grupos terminales —OH y los sitios ácidos, tanto de Brönsted como Lewis presentan interacción específica con iones de metales pesados. De esta forma, el grado de adsorción no es simplemente función de la capacidad de intercambio, porque la adsorción de estos iones implica procesos de complejación de la superficie directa (denominada de esfera interna) o indirecta (esfera externa); el intercambio iónico simple y la precipitación superficial, el tipo y extensión de los sitios de defecto, la carga de la capa y el tipo de cationes intercambiables, entre otros.

La ciencia de las arcillas es una disciplina complicada porque las propiedades de los minerales arcillosos están en relación directa con las condiciones ambientales; como son, el carácter ácido-básico (pH; fuerza iónica); las termodinámicas, presión, temperatura y composición; la interacción con otros minerales, agua, moléculas orgánicas e inorgánicas; así como, el contacto con sólidos fundidos, líquidos y gases. La interpretación de los análisis de caracterización de los minerales arcillosos es complicado, debido al tamaño de grano fino ($< 2\mu\text{m}$); así como por los tipos diferentes de agua identificada, como es la de hidratación; la interlaminar, que está relacionada con los cationes hidratados de cambio; la continua u osmótica que incluye los espacios interlaminares a las superficies externas y, la condensación capilar de agua libre que rellena los microporos existentes. Estos estudios de la adsorción de agua, en montmorillonitas, evidencian el complejo arcilla/agua relacionado con el catión intercambiable, así como de su proporción. De esta forma, los análisis se hacen laboriosos porque están en interacción termodinámica continua, por el entorno de origen cambiante y otras características descritas en literatura especializada (Berry, et al., 2006). En el caso de los contaminantes, el proceso de la adsorción por las partículas de arcilla en los espacios entre las láminas, es difícil de determinar, no son inertes; su tamaño y forma de los poros varían con el medio ambiente (Berry, et al., 2006). Por lo que, el estudio de las arcillas ha sido descuidado y excluido de los planes de estudios a pesar de sus aplicaciones; donde el aprendizaje de los principios científicos fundamentales, apoyan el aprendizaje. En otros países, la enseñanza de la ciencia de las arcillas se ha incluido en los planes de estudios para los estudiantes de nivel elemental desde la primera infancia, primaria, secundaria y preparatoria; el tema se introduce por la facilidad de identificar a las arcillas como parte de la vida cotidiana; se encuentra en el entorno doméstico y en la sociedad. Una forma sencilla se relaciona con la identificación, el origen y las fuentes de las arcillas; la importancia y la tipificación en casa, en la vida diaria y a nivel industrial. En el sector educativo es común la obtención de una pieza cerámica, a través de la modelación de una arcilla para observar propiedades físicas, como es su plasticidad, su posterior rigidez en el secado, la medición de pérdida de masa, de expansión y contracción de la pieza y el cambio de color. En algunos de estos niveles educativos, se relacionan las arcillas con su composición química. En los estudios profesionales, la práctica ha sido similar, ha quedado de forma elemental de alfarería, no se profundiza sobre la composición química del cuerpo formado antes y después de la cochura, en donde los cambios físicos son expresión directa de los químicos; su explicación requiere bases de cristalografía elemental, equilibrio de fases, acompañadas de las técnicas de identificación durante sus cambios, por lo que el estudio de las arcillas se ha implementado más en las artes y las ciencias de la tierra (Rule, 2007); mientras que, en las ciencias químicas, su estudio ha sido dejado de lado, siendo las arcillas un sistema químico activo.

Fases magnéticas de hierro. Magnetita y Maghemita

Las fases magnéticas del óxido de hierro son la magnetita y la maghemita. La magnetita es un óxido mixto de hierro ($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$, Fe_3O_4), cristaliza en una estructura de espinela inversa. Los cationes de hierro existen en dos estados de oxidación de forma simultánea, divalente y trivalente. Su celda unitaria está conformada por un empaque cúbico compacto distorsionado de 32 aniones de oxígeno y 24 cationes hierro, 16 están en forma férrica y 8 en ferrosa. En donde los intersticios tetraédricos están ocupados por Fe^{3+} , mientras que, los octaédricos, en proporción igual de Fe^{2+} y Fe^{3+} . Así, los 8 iones Fe^{3+} ocupan una cuarta parte de los 64 sitios tetraédricos (T) totales; mientras que, 8 iones Fe^{3+} y 8 iones Fe^{2+} están en un octavo de los 32 sitios octaédricos (O) totales, figura 3 (Reichel y Faivre, 2017).

FIGURA 3. Estructura de a) Magnetita y b) Maghemita, modificada de Reichel y Faivre, 2017.



La maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) es la versión oxidada de la magnetita, deficiente de Fe^{2+} , es fuertemente magnética, con orden ferrimagnético por el intercambio entre iones en los intersticios tetraédricos y octaédricos, (Shokrollahi, 2017). Cristaliza con una estructura de espinela inversa, con un arreglo de empaque cúbico de oxígenos, hay ausencia de Fe^{2+} y presencia de Fe^{3+} , distribuidos de forma arbitraria, en los 16 intersticios octaedrales, 8 tetraedrales; con formación de sitios vacantes de hierro, descrita como, $[\text{Fe}^{3+}]_T[\text{Fe}^{3+}_{5/3}\text{X}_{1/3}]_O\text{O}_4$ (X, sitio vacante de hierro; figura 3). Estos sitios vacantes permiten que la maghemita tenga un momento magnético neto distinto de cero, por lo que su comportamiento es ferrimagnético, en función del tamaño de la partícula. Las nanopartículas de maghemita con un tamaño de 7 a 14 nm presentan superparamagnetismo (Shokrollahi, 2017).

En las fases de las nanopartículas magnéticas de hierro, los sitios activos son proporcionados por los cationes Fe^{2+} y Fe^{3+} , junto con los aniones O^{2-} . En la estructura, los Fe^{3+} se comportan como ácidos de Lewis, mientras que los O^{2-} , como bases de Brönsted; ambos accesibles en la superficie, lo que les confiere características de adsorción potencial. La atracción de las NPM del medio contaminante por medios magnéticos facilita su recuperación; no obstante, debido a su tamaño, sufren de una tasa de lixiviación de hierro alta, forman agregados que generan lodo no deseado, debido a sus energías superficiales altas e interacciones magnéticas fuertes entre sí, lo que limita su reutilización (Liosis, et al., 2021; Liu, et al., 2014; Reichel y Faivre, 2017).

Nanocompuestos de Montmorillonita con las Fases Magnéticas de Hierro

La montmorillonita (MNT) y las fases magnéticas del hierro son la combinación perfecta en el desarrollo de nanotecnologías nuevas para enfrentar los problemas ambientales. La MNT y las fases magnéticas del hierro de forma individual se consideran nanopartículas, NP, debido a sus tamaños de cristalito de 1 a 100 nm; ambas dan lugar a nanomateriales de dimensión cero; categorizadas por sus propiedades, formas y tamaños; debido a sus áreas

superficiales grandes y tamaños de partícula cristalina a nanoescala, con propiedades químicas y físicas distintivas (Joseph, et al., 2023). Así, la nanotecnología y la nanociencia se consideran la revolución nueva del siglo XXI (Sebastian y Gimenez, 2016).

La revisión realizada de los adsorbentes a estudiar en este trabajo, muestra que las arcillas minerales han ofrecido una opción disponible, atractiva y barata en la remoción de compuestos orgánicos e inorgánicos; se han utilizado industrialmente en la inmovilización de metales pesados; en la remoción de compuestos orgánicos, pesticidas y radiactivos, a través de la modificación por rutas de intercalación de compuestos orgánicos, activación ácida, funcionalización y tratamientos térmicos, entre otros. En cuanto a las nanopartículas magnéticas (NPM), también, han sido una alternativa en los problemas ambientales de contaminantes en efluentes líquidos y gaseosos; y, con polímeros funcionalizados se eliminan compuestos orgánicos. Las ventajas adicionales, con la tecnología de los nanocompuestos adsorbentes, de MNT con NPM, en comparación con sus contrapartes individuales; se debe a la estabilidad que le confiere la MNT a las nanopartículas de hierro; de esta forma se evita la pérdida de ambas partículas, su aglomeración y la formación de lodo; con la consecuente remoción y recuperación del nanoadsorbente del medio por separación magnética, después de la saturación del contaminante; por lo que, el procedimiento es sencillo, así como su regeneración y reintegración al ciclo de remediación (Tokarčiková, et al., 2020).

Metodología

La Propuesta Experimental se plantea a tres estudiantes, de pregrado, cursando el 6.º semestre en adelante de la licenciatura en Química, por medio del ABP (Ramos, 2018); durante el intersemestre en una Estancia Corta de Investigación, en la Facultad de Química de la UNAM. El desarrollo tiene una duración máxima de 3 a 4 semanas. Al inicio de la estancia se les propone el problema a resolver, figura 4.

La empresa Pirotec S.A. fabrica fuegos artificiales; para dar colores diversos a éstos, implementa el uso de sales metálicas, lo que produce una deposición alta de los cationes de estas sales en su terreno de fabricación en forma acuosa. La empresa busca un material económico y sustentable, capaz de adsorber estos contaminantes, así como la separación y recuperación fácil y económica de estos cationes, sin generar contaminación secundaria. Se sabe que, a 2 Km de distancia, se encuentra una zona minera rica en bentonita.

FIGURA 4. Problema a resolver.

Los estudiantes con la propuesta del problema a resolver, abordan el desarrollo de nanomateriales compuestos a base de nanopartículas magnéticas en arcilla montmorillonítica; en donde el maestro o instructor es un apoyo, una guía para la consecución del proyecto.

Objetivos de aprendizaje

Investigar en la literatura, en medios confiables, información para la resolución del problema.

Proponer y realizar la síntesis de los nanomateriales compuestos magnéticos.

Usar conceptos de la química del estado sólido para explicar el mecanismo de transformación de la montmorillonita homioónica y la formación del nanocompuesto magnético.

Obtener experiencia práctica con las técnicas de síntesis y las caracterizaciones técnicas.

Investigar y explicar las transformaciones y propiedades químicas a nivel nanoescala en los nanocompuestos magnéticos.

Analizar, discutir y concluir los resultados.

Evidenciar el aprendizaje con presentaciones semanales, un escrito final redactado en forma de artículo y una presentación de los resultados en un foro académico.

Propuesta Experimental

El trabajo de ABP se propone desarrollar de acuerdo al plan descrito siguiente:

Primera semana: a los estudiantes integrados en equipo de colaboración se les proporciona el problema; se permite el tiempo para leer, analizar, reflexionar y tomar notas. A continuación se realizan preguntas, afirmaciones, hechos conocidos, restricciones y sugerencias de resolución, al final se discuten con el maestro. Para iniciar la investigación en la literatura para fundamentar sus propuestas de resolución del problema, se les anima a realizar una división del trabajo, a calendarizar, a proponer y explicar un par de propuestas válidas, con la descripción de sus objetivos, hipótesis, experimentos y reactivos. Así como, iniciar el desarrollo del marco teórico; a la par, una presentación para su exposición frente a otros grupos de trabajo.

Segunda semana: los estudiantes, bajo la asesoría del maestro; elegida la metodología experimental, comienzan el trabajo con la caracterización y acondicionamiento de los reactivos, para el desarrollo de la síntesis, de acuerdo con las medidas de seguridad. Así mismo, se les invita para que continúen la escritura y su presentación en los seminarios.

Tercera semana: los estudiantes analizan e interpretan sus resultados; los discuten con base en la literatura. Prosiguen con la elaboración del marco teórico, así como las conclusiones preliminares para su presentación en el seminario.

Cuarta semana: en esta etapa final, los estudiantes concluyen su escrito para entregar su informe a las instancias encargadas de las Estancias Cortas de Investigación. Los resultados se plasman en una presentación y un cartel para su exposición final, en el Seminario del Laboratorio de Materiales Cerámicos.

Desarrollo de la Propuesta Experimental

Los estudiantes propusieron el desarrollo de su trabajo, en un periodo de 4 semanas, de acuerdo a la secuencia de la figura 5.



FIGURA 5. Esquema del Desarrollo de la Propuesta por parte de los estudiantes.

Resultados

En la resolución del problema, los estudiantes, en la primera semana, investigaron la información en la literatura, la analizaron y la plasmaron en una presentación; para su exposición en el seminario ante maestros y un grupo de estudiantes con proyectos distintos. En donde se les proporcionaron sugerencias para profundizar su búsqueda, preguntas a sus propuestas y su presentación; así mismo iniciaron la escritura del documento final. Presentaron la interpretación de su investigación, con base en esto, eligieron una propuesta, del conjunto que ellos formularon, figura 6.

<p>Propuesta 1:</p> <p><i>Debido a que se encuentra una zona minera rica en bentonita; se propone realizar la adsorción de los iones metálicos con la bentonita natural, ya que tiene la capacidad de intercambio de cationes y alta reactividad superficial (Hao, et al., 2019).</i></p>	<p>Propuesta 2:</p> <p><i>Se propone encapsular nanopartículas magnéticas en la bentonita, ya que mejora las propiedades superficiales de la arcilla como su porosidad y área superficial, además de que la propiedad magnética ayuda a evitar los procesos de filtrado (Zeynizadeh & Rahmani, 2019).</i></p>
--	--

FIGURA 6. Propuesta de solución por parte de los estudiantes.

Segunda semana: los estudiantes, plantearon el diseño experimental, con la metodología, la preparación de los reactivos, junto con las medidas de seguridad. Con la revisión de literatura y discusión del problema decidieron sintetizar, por el método de coprecipitación, los nanocompuestos magnéticos de ferritas de níquel, zinc y hierro, en arcilla montmorillonita, de acuerdo con las condiciones experimentales planteadas, tabla 1.

Tabla 1. Condiciones experimentales para la síntesis de las ferritas propuestas por los estudiantes.

Ferritas	Montmorillonita	Relación molar	Álcali	Temperatura
Ferrita de níquel	MNT natural	Ni^{2+}/Fe^{3+} 1:2	NaOH 2M	>60 °C
Ferrita de zinc	MNT natural	Zn^{2+}/Fe^{3+} 1:1	NaOH 2M	>60 °C
Ferrita de níquel	MNT natural	Ni^{2+}/Fe^{3+} 2:1	NaOH 8M	>60 °C
Ferrita de hierro	MNT-Ca	Fe^{2+}/Fe^{3+} 2:1	NaOH 8M	Ebullición

Tercera semana: los estudiantes prosiguieron con sus experimentos; los productos de las reacciones se caracterizaron por DRX y FTIR, figura 7. Y, sus propiedades magnéticas se corroboraron frente a un imán duro de Nd. Los estudiantes continuaron trabajando la escritura y la presentación.

Análisis de la caracterización experimental:

El análisis del difractograma por DRX de la arcilla montmorillonítica natural (MNT) y de la cálcica (MNT-Ca) mostró como componente mayor a la montmorillonita (d_{hkl} (Å): 4.47, 5.00, 14.17) y cantidades menores de cuarzo (d_{hkl} (Å): 4.22, 3.33, 3.14), cristobalita (d_{hkl} (Å): 4.03, 3.14, 2.20), feldespato (d_{hkl} (Å): 4.03, 4.92, 4.22) y calcita (d_{hkl} (Å): 3.86, 3.00, 2.49). Para la montmorillonita cálcica, la señal principal de la MNT fue más intensa, debido a la homoionización con Ca^{2+} . Estos resultados fueron confirmados por el espectro de FTIR con los modos de vibración del Si-O de las capas tetraédricas y del Al-O de las octaédricas.

La interpretación de los resultados de la síntesis *in situ* con DRX de las ferritas de Ni y Zn en la MNT indicaron la formación de bunsenita (NiO) (d_{hkl} (Å): 2.40, 2.08, 1.39) y zincita (ZnO) (d_{hkl} (Å): 2.81, 2.60, 2.47), sin la formación de las fases magnéticas. Para la ferrita de hierro en MNT-Ca, por análisis DRX, se identificó la formación de magnetita (d_{hkl} (Å): 2.96, 2.53, 1.61) en la montmorillonita; mientras que por FTIR se identificaron los modos de vibración Si-O y Al-O de las láminas de MNT en 1048 cm^{-1} y 915 cm^{-1} , respectivamente, y, la vibración en 875 cm^{-1} de la interacción Al-O-Fe.

Figura 7. Interpretación de los análisis de DRX y FTIR del nanocompuesto magnético, por parte de los estudiantes.

Cuarta semana, los estudiantes realizaron un experimento de comprobación y analizaron y discutieron los resultados, figura 8.

Discusión de Resultados:

Los nanocompuestos magnéticos fueron caracterizados por DRX y FTIR, se obtuvo la ferrita de hierro en la MNT-Ca, con la adición de un exceso de Fe^{2+} , con NaOH 8 M y temperatura de ebullición. Esta adición se realizó al considerar la oxidación rápida del Fe^{2+} a Fe^{3+} en condiciones normales atmosféricas (Barraqué, et al., 2018). Las síntesis de ferritas de níquel y zinc en una MNT no fueron posibles con las condiciones propuestas; debido a que, la montmorillonita natural tiene en su espacio interlamina diversos cationes hidratados como Ca^{2+} , Na^+ , K^+ y Li^+ , entre otros, que entran en competencia con los iones de Ni^{2+} , Zn^{2+} y Fe^{3+} , en la dispersión arcillosa. Además, la formación de bunsenita (NiO) y zincita (ZnO) indican la necesidad de un pH alcalino alto en el medio de reacción.

La obtención del nanocompuesto magnético de ferrita de hierro obtenido representa ser un nanocompuesto factible para la adsorción de iones de metales pesados en disolución, esto debido a su área de superficie alta. Además de ser un material sustentable por la facilidad de su obtención y compatibilidad con los humanos y el ambiente, por la toxicidad nula del hierro y la recuperación fácil de los iones metálicos por medio de la atracción magnética.

Figura 8. Discusión de resultados, por parte de los estudiantes.

Los estudiantes concluyeron su trabajo de acuerdo al recuadro de la figura 9.

Conclusiones de los estudiantes:

- *Se modificó la montmorillonita natural a montmorillonita cálcica por intercambio iónico con CaCl_2 .*
- *Se sintetizó ferrita de hierro en una montmorillonita cálcica por el método de coprecipitación in situ con NaOH 8M y temperatura de ebullición.*
- *La condición propuesta, con temperatura $>60^\circ\text{C}$ y NaOH para la síntesis de las ferritas de zinc y níquel no fueron las adecuadas ya que no se formaron las fases magnéticas.*

FIGURA 9. Conclusiones del problema, por parte de los estudiantes.

Finalmente, los estudiantes presentaron el desarrollo y los resultados de su propuesta en la Muestra Experimental, ante estudiantes de semestres distintos. El trabajo intersemestral se concluyó con la presentación en el Seminario del Laboratorio de Materiales Cerámicos y el escrito presentado ante el departamento del Subprograma 121 de Estancias Cortas de Investigación de la Facultad de Química, en donde, se obtuvo el tercer lugar, en la categoría de Química, con el nombre de “Arcillas intercaladas”.

La opinión de los estudiantes, con respecto a la estancia, se presenta en la figura 10.

Opinión de la estancia:

- Q 8 (31) En la estancia pude desarrollar mis habilidades en el laboratorio, la búsqueda de información en bases de datos, conocer e interpretar resultados obtenidos en las distintas técnicas de caracterización, además de descubrir el mundo de los cerámicos que es una arte viejo pero una ciencia joven, las sorprendentes aplicaciones que tiene por si sola la arcilla y como pueden ser modificadas y mejoradas dichas aplicaciones, despertó en mí una curiosidad enorme acerca de los cerámicos y su aplicaciones, aprendí que no importa que tanto estudies no puedes tener todo el conocimiento porque siempre hay cosas nuevas que investigar.*
- Q 8 (31) Durante la estancia se realizó una investigación previa con la finalidad de conocer las características del material con el que se trabajó, seleccionar el método y las condiciones adecuadas para la experimentación. Se realizaron experimentos para sintetizar nanopartículas magnéticas en una arcilla natural. Se llevaron a cabo tres seminarios donde se expuso la información recopilada y los resultados, dos visitas al USAI, la primera para conocer el equipo de difracción de rayos x de polvos y la segunda para espectroscopia infrarroja.*

FIGURA 10. Opinión de la estancia por parte del estudiante de 8.º semestre.

El desarrollo de la propuesta experimental sugerido a los estudiantes en la estancia de investigación, durante 4 semanas, está plasmado en el esquema de la figura 11.

El periodo de experimentación de la estancia efectiva fue de tres semanas, lo que acotó el proyecto y no fue posible desarrollar las pruebas del proceso de adsorción y desorción de los metales pesados. Es de hacer notar que los estudiantes desde el inicio de su investigación, mostraron las reacciones deletéreas de las sales metálicas en el ambiente, figura 12; por lo que en sus antecedentes tuvieron presente las pruebas de adsorción, que podrían realizar. De hecho, fue el detonante que les despertó el interés para que iniciaran su proyecto, figura 13.

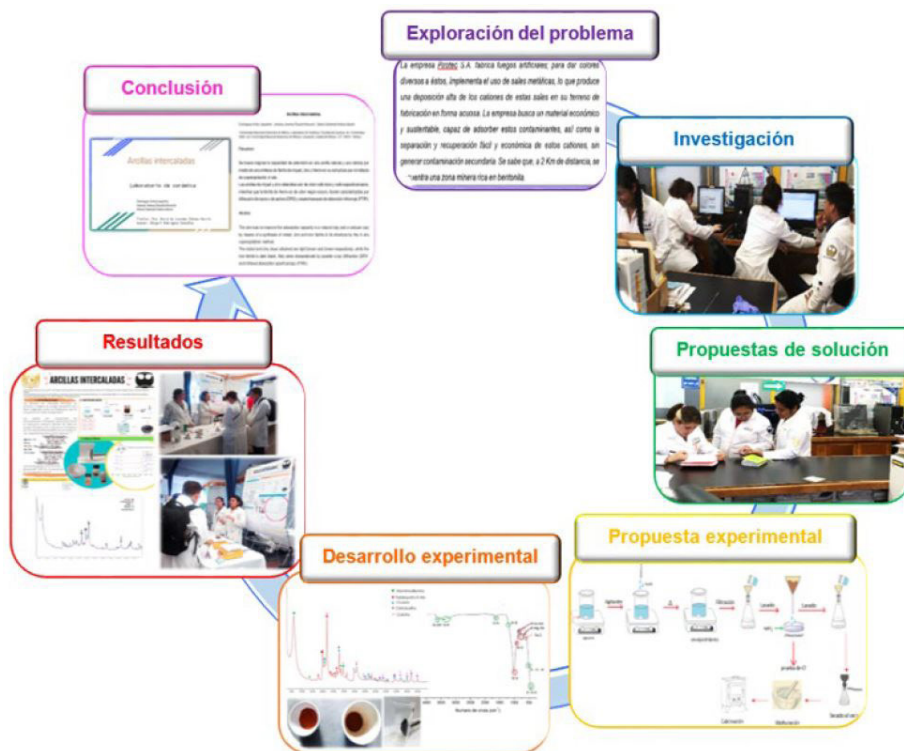


FIGURA 11. Desarrollo de la propuesta de investigación.

Iones metálicos en pirotecnia:

Los fuegos artificiales se basan en reacciones de oxidación y reducción empleándose distintos tipos de sales metálicas para obtener efectos de luz y sonido como el clorato o nitrato de potasio, carbonato de estroncio para el color rojo, cloruro de sodio para el amarillo, carbonato de bario para el verde, sulfato y cloruro de cobre para el azul, cloruro de calcio para el naranja. Aunque el nivel permitido en agua para uso y consumo humano de estos iones se encuentra en el intervalo de 5.0 a 0.7 mg/L, con excepción del Na^+ y Ca^{2+} , su uso continuo y excesivo genera una deposición alta que puede sobrepasar este límite afectando a la salud de la humanidad e inclusive de animales y plantas mediante la cadena alimenticia (Prada, 2006; NOM-127-SSA1-1994).

FIGURA 12. Investigación de iones metálicos en pirotecnia por parte de los estudiantes.

Ventajas del nanocompuesto en la adsorción de iones metálicos:

La encapsulación de NPM en MNT mejora la porosidad y área superficial de la arcilla ya que también presentan energía superficial alta lo que hace que su capacidad de adsorción aumente (Zeynizadeh & Rahmani, 2019; Jafari, et al., 2018). También, la MNT funciona como una matriz recubridora de las NPM, lo que evita la reducción del área superficial y la agregación de las NPM por su uso repetido en los procesos de adsorción (Isasi, et al., 2019).

FIGURA 13. Ventajas de adsorción por parte del nanocompuesto investigadas por los estudiantes.

Discusión

El propósito de esta propuesta experimental fue plantear a los estudiantes el desarrollo de un nanocompuesto cerámico con base en nanopartículas magnéticas de hierro soportadas en una arcilla montmorillonítica, NPM-Fe/MNT, para la remediación de contaminación de lagos y suelos, por medio de la metodología del ABP. Al completar la parte experimental se constató que los estudiantes:

- 1) Explicaron las estructuras de la arcilla montmorillonítica y las magnéticas del NPM-Fe.
- 2) Interpretaron la literatura científica y la usaron para proponer y desarrollar un plan de resolución del problema; así como para, describir, analizar y explicar sus resultados.
- 3) Usaron los datos experimentales para determinar, analizar e interpretar la modificación de la arcilla y la formación del nanocompuesto magnético.
- 4) Demostraron la utilidad de las técnicas de DRX y FTIR en la caracterización de los materiales de partida; así como la consecución del nanocompuesto NPM-Fe/MNT sintetizado.
- 5) Concretaron sus conclusiones y presentaron sus resultados ante sus pares y la sociedad.

Los estudiantes, en 4 semanas, investigaron, desarrollaron los experimentos e interpretaron sus resultados. La transformación y los procesos de adsorción en las arcillas no son triviales, es un tema complicado, excluido de los programas de estudio (Berry, et al., 2006). En este tiempo, los estudiantes se esforzaron por comprender, la síntesis por coprecipitación y de forma simultánea, el ingreso de las fases magnéticas en la arcilla, por el proceso de adsorción interlaminar, en función de la estructura en la obtención del nanomaterial.

El trabajo y la opinión de los estudiantes de esta propuesta muestran los beneficios del uso del ABP, de acuerdo con las publicaciones respectivas a la educación científica se verifica que los resultados de aprendizaje mejoran en comparación con los estilos de instrucción tradicional. Porque, incluye un grado de actividad mayor y colaboración de los estudiantes, en lugar de los esfuerzos de la enseñanza, sólo del maestro (Nagarajan y Overton, 2019). Se confirma que el ABP es un método dinámico; al proporcionarles a los estudiantes un detonador se activó su motivación para aprender y adquirir el conocimiento necesario para alcanzar los resultados de aprendizaje esperados. Lo que ayuda a que los estudiantes estén mejor equipados para resolver problemas y reafirmar su confianza (Jansson, 2015); tanto fue así que, los estudiantes participaron de forma entusiasta y espontánea con una demostración experimental del trabajo realizado en la Feria de Química de la Facultad de Química, UNAM (2020).

En esta propuesta experimental, para la síntesis del nanocompuesto magnético, los reactivos y los materiales son accesibles, se encuentran en cualquier laboratorio de química; la caracterización de sólidos, con difracción de rayos X para polvos y espectroscopía de absorción infrarroja, son técnicas que, por lo general, se tienen en las universidades. El tiempo de desarrollo de 4 semanas, con la investigación de literatura, propuestas, desarrollo e interpretación de resultados, cubren lo que son 4 prácticas experimentales tradicionales; que por lo general son recetas a seguir y el desarrollo llega a ser cansado y aburrido (Nagarajan y Overton, 2019).

La evidencia del aprendizaje con las presentaciones e informes semanales cubrieron los resultados esperados. Lo que supone, un enfoque de enseñanza-aprendizaje integral, a diferencia de la enseñanza tradicional que, con un examen y la entrega de un producto al final, se evalúa una práctica experimental. Mientras que, los estudiantes, mediante la

didáctica del ABP, trabajaron de forma colaborativa, desarrollaron sus habilidades sociales, interdisciplinarias, pensamiento crítico y retención de los materiales aprendidos (Moliner, et al., 2018).

La propuesta de la síntesis de un nanocompuesto para remediación ambiental está dentro del marco del pensamiento sistémico; por un lado, el acondicionamiento y la modificación de la arcilla y la síntesis química del nanomaterial magnético en la aplicación ambiental; y por otro, la utilidad de las técnicas de investigación en la literatura y la caracterización de sólidos. Ya que, en los últimos años, el énfasis en la reorientación de la educación química ha sido propuesto a través de un enfoque de pensamiento sistémico, con el objetivo de capacitar a los estudiantes, con las herramientas y habilidades necesarias para abordar los desafíos del siglo XXI. El enfoque sistémico busca extender el aprendizaje de los estudiantes más allá de los conceptos y teorías químicas para desarrollar una comprensión de las interconexiones entre los sistemas físicos, biológicos y ambientales. El conectar estos sistemas es crucial para resolver los problemas globales que aquejan a la humanidad (Nagarajan y Overton, 2019).

Conclusiones

La Propuesta Experimental planteada a un grupo de estudiantes se desarrolló y fortaleció al resolver un problema de aplicación práctica, con el desarrollo de un nanomaterial magnético de hierro en montmorillonita para la remediación de suelos contaminados.

La utilidad del ABP proporciona a los estudiantes una prueba del mundo real, fomenta la comunicación, la resolución de problemas y el aprendizaje autodirigido. Les permite contextualizar y construir su comprensión, por lo que contribuye al desarrollo de habilidades científicas y proporciona un método de aprendizaje agradable y motivado.

A los estudiantes, trabajar con las técnicas de difracción de rayos X y de espectroscopía de absorción infrarroja para la identificación de sus materiales de partida y del nanomaterial magnético, les proporciona la información de las fases cristalinas; la composición química a través del cálculo estequiométrico para su síntesis y la medición cualitativa magnética, lo que les incentiva al estudio de las ciencias y la importancia de la Química del Estado Sólido y la Ciencia Química de los Materiales en la sociedad. Por lo que, incide en el desarrollo interpersonal de los estudiantes, quienes se motivan para adquirir los conceptos teóricos que se refuerzan con la realización del proyecto a través de experimentar con problemas reales.

Agradecimientos

Se agradece el financiamiento de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (PAIP, 5000 9038). Los autores desean agradecer a los alumnos Jaqueline Domínguez Avilés, Andrea Solorio Sandoval y Mercurio Jiménez Jiménez; así como a C. Salcedo y M. Gutiérrez, de la USAI, todos de la Facultad de Química, UNAM.

Bibliografía

Chávez García, M.L., Carreto Cortés, J.M.E., García Mejía, T.A. (2020). Síntesis de materiales: cerámicas magnéticas. Propuesta experimental con el aprendizaje basado en problemas. *Educación Química*, 31(4). <http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2020.4.71995>.

- Berry, R. W., Bergaya, F., y Lagaly, G. (2006). Chapter 16 Teaching Clay Science: A Great Perspective. En *Developments in Clay Science* (pp. 1183-1195). [https://doi.org/10.1016/s1572-4352\(05\)01044-5](https://doi.org/10.1016/s1572-4352(05)01044-5).
- Carretero-Cerdán, A., Peiró-Franch, A., Torres-Iglesias, R., Trigueros-Navarro, L., Cordoncillo, E. y Beltrán-Mir, H., (2017). *A simple approach to understand solid state chemistry with the example of a piezoelectric material incorporated in a birthday card speaker*. Proceedings of EDULEARN17 Conference, 7559-7568.
- Causil Vargas, L. A., & Rodríguez de La Barrera, A. E. (2021). Aprendizaje basado en Proyectos (ABP): experimentación en laboratorio, una metodología de enseñanza de las ciencias naturales. *Plumilla educativa*, 105-128. <https://doi.org/10.30554/pe.1.4204.2021>.
- Cevallos-Torres, L., y Botto-Tobar, M. (2019). The system simulation and their learning processes. En *Studies in computational intelligence* (pp. 1-11). https://doi.org/10.1007/978-3-030-13393-1_1.
- Chowdhury, S., Dhara, D., Chowdhury, S., Haldar, P., Chatterjee, K., y Bhattacharya, T. K. (2021). A novel approach toward microstructure evaluation of sintered ceramic materials through image processing techniques. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 18(3), 773-780. <https://doi.org/10.1111/ijac.13716>.
- Constant, KP., (2005). *Materials as Global Activity: Setting the Scene*. National Academies of Sciences. Engineering and Medicine. Globalization of Materials RyD: Time for a National Strategy. Chpt. 1, 11-16. <https://doi.org/10.17226/11395>.
- Deagen, M. E., Brinson, L. C., Vaia, R. A., y Schadler, L. S. (2022). The materials tetrahedron has a “digital twin”. *Mrs Bulletin*, 47(4), 379-388. <https://doi.org/10.1557/s43577-021-00214-0>.
- Drobíková, K., Štrbová, K., Tokarčíková, M., Motyka, O., y Seidlerová, J. (2020). Magnetically Modified Bentonite: Characterization and stability. *Materials Today: Proceedings*, 37, 53-57. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.375>.
- Jansson, S., Söderström, H., Andersson, P. L., y Nording, M. L. (2015). Implementation of Problem-Based Learning in Environmental Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 92(12), 2080-2086. <https://doi.org/10.1021/ed500970y>.
- Joseph, T. M., Mahapatra, D. K., Esmaeili, A., Piszczyk, Ł., Hasanin, M. S., Kattali, M., Haponiuk, J. T., & Thomas, S. (2023). Nanoparticles: taking a unique position in medicine. *Nanomaterials*, 13(3), 574. <https://doi.org/10.3390/nano13030574>.
- Martín, C., Segarra, I. M., Ibáñez, M., Mira, S., Fajardo, C., y González-Benito, M. E. (2021). Effectiveness of a Hybrid Project-Based Learning (H-PBL) approach for students' knowledge gain and satisfaction in a plant tissue culture course. *Education Sciences*, 11(7), 335. <https://doi.org/10.3390/educsci11070335>.
- Miravet, L. M., Cabedo, L., Royo, M., Gámez-Pérez, J., Lopez-Crespo, P., Segarra, M., & Guraya, T. (2018). On the perceptions of students and professors in the implementation of an Inter-university Engineering PBL experience. *European Journal of Engineering Education*, 44(5), 726-744. <https://doi.org/10.1080/03043797.2018.1498829>.

- Nagarajan, S., y Overton, T. (2019). Promoting systems thinking using project- and Problem-Based learning. *Journal of Chemical Education*, 96(12), 2901-2909. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00358>.
- Oliveira, L. C., Rios, R. V. R. A., Fabris, J. D., Sapag, K., Garg, V. K., y Lago, R. M. (2003). Clay-iron oxide magnetic composites for the adsorption of contaminants in water. *Applied Clay Science*, 22(4), 169-177. [https://doi.org/10.1016/s0169-1317\(02\)00156-4](https://doi.org/10.1016/s0169-1317(02)00156-4).
- Ramos Mejía, A. (2018). ¿Cómo producir una experiencia profunda y transformadora en un curso experimental de fisicoquímica? *Educación Química*, 29(2), 62. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2018.2.63708>.
- Reichel, V. y Faivre, D., (2017). Magnetite Nucleation and Growth. Alexander E.S. Van Driessche, Matthias Kellermeier, Liane G. Benning y Denis Gebauer, Editors. *New Perspectives on Mineral Nucleation and Growth*, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45669-0_14.
- Reyes, A., (2019). *Síntesis de hidroxapatita y B-fosfato tricálcico, en la elaboración de biomaterials, con ácido poliláctico, por impresión 3D para la regeneración ósea*. [Tesis que para obtener el título de Licenciada en Química, Universidad Nacional Autónoma de México]. TESIUNAM. <https://goo.su/wtkNJTS>.
- Rule, A. C. (2007). Preservice Elementary teachers' ideas about clays. *Journal of Geoscience Education*, 55(4), 310-320. <https://doi.org/10.5408/1089-9995-55.4.310>.
- Sebastián, V., y Gimenez, M. (2016). Teaching nanoscience and thinking nano at the macroscale: Nanocapsules of Wisdom. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 228, 489-495. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.07.075>.
- Tokarčíková, M., Seidlerová, J., Motyka, O., Životský, O., Drobíková, K., y Kutláková, K. M. (2020). Easy and low-cost preparation method of magnetic Montmorillonite/FEXOY Composite: Initial study for future applications. *Monatshefte für Chemie - Chemical Monthly*, 151(1), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s00706-019-02536-x>.
- Schoonheydt, R. A., Johnston, C. T., y Bergaya, F. (2018). Clay minerals and their surfaces. En *Developments in Clay Science*(pp. 1-21). <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102432-4.00001-9>.
- Shokrollahi, H. (2017). A review of the magnetic properties, synthesis methods and applications of maghemite. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 426, 74-81. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.11.033>.
- Vorozhtsov, S. A., Khrustalyov, A., y Kulkov, S. N. (2016). Synthesis and properties of aluminum-based composite materials for high operating temperatures. *Nucleation and Atmospheric Aerosols*. <https://doi.org/10.1063/1.4966524>.