

Arcillas nativas de México, una alternativa sustentable para un agua limpia

Martha Beatriz Morales-Murillo, María Adriana Martínez-Prado, Perla García-Guzmán, Nicolás Óscar Soto-Cruz, Luis Medina-Torres, Diola Marina Núñez-Ramírez, Francisco Javier Rodríguez-González, Luis Arturo Torres Castañón

Resumen

El acceso a agua potable es un desafío global, especialmente en comunidades rurales donde el agua subterránea suele estar contaminada con metales pesados, fluoruros y pesticidas. Frente a la limitada viabilidad de tecnologías convencionales, las arcillas naturales se presentan como una alternativa sustentable, económica y eficaz. México cuenta con una gran diversidad de arcillas, como la bentonita y la zeolita, que gracias a su estructura porosa y propiedades de adsorción pueden eliminar diversos contaminantes. Investigaciones en Durango demuestran que arcillas nativas modificadas mejoran su capacidad para retener fluoruro, validando su potencial local. A pesar de retos como la saturación o disposición final, el desarrollo de materiales híbridos ha ampliado sus aplicaciones. Además, estas tecnologías promueven la participación comunitaria, reducen el uso de químicos costosos y son replicables en contextos similares. Así, las arcillas nativas se posicionan como una solución local con impacto global para el tratamiento del agua.

Introducción

El acceso a agua limpia y segura es uno de los desafíos más urgentes del siglo XXI. En muchas regiones del mundo, especialmente en comunidades rurales y marginadas, las

fuentes de agua subterránea están contaminadas con sustancias dañinas o tóxicas como metales pesados, fluoruros, pesticidas o colorantes industriales, etc. Esta contaminación representa un riesgo grave para la salud pública y limita el desarrollo sostenible de las poblaciones afectadas.

Ante dicha problemática, la ciencia ha vuelto la mirada hacia soluciones simples, accesibles y sostenibles sin ocasionar impacto al ambiente. Entre ellas destaca el uso de arcillas, las cuales han emergido como una alternativa prometedora. Estos minerales son abundantes en muchas regiones del mundo. También México es un país con una gran variedad de arcillas que poseen una estructura y composición química que les permite actuar como filtros naturales, capaces de atrapar y remover una amplia variedad de contaminantes. Cabe destacar que se consideran como contaminantes cuando la concentración de cualquier compuesto excede el límite máximo permisible (LMP) establecido por la normatividad vigente.

Este artículo explora cómo las arcillas, desde su estructura hasta sus aplicaciones más recientes, así como su aplicación para mejorar la calidad del agua. Se analizan sus propiedades, ventajas, limitaciones y casos exitosos, con el fin de mostrar cómo un recurso tan básico puede convertirse en una herramienta poderosa para enfrentar la crisis del agua desde una perspectiva local y sostenible.

Agua contaminada: Un problema mundial

El agua es un recurso esencial para la vida, pero su disponibilidad en condiciones seguras y limpias se ha vuelto cada vez más limitada. La escasez de agua potable no es exclusiva de regiones áridas; incluso en lugares con abundantes cuerpos de agua como ríos, lagos o acuíferos, la calidad del recurso hídrico se ha visto comprometida por diversos tipos de contaminación (Figura 1). Este deterioro no distingue fronteras ni climas, afecta tanto a comunidades rurales como a zonas urbanas densamente pobladas, agravando desigualdades sociales y dificultando el acceso a un derecho humano básico.

Entre los contaminantes más comunes y preocupantes se encuentran los metales pesados, como el plomo, el arsénico, el mercurio y el cadmio. Estos elementos tóxicos pueden ingresar a los cuerpos de agua a través de diversas actividades humanas (antropogénicas), incluyendo procesos industriales, minería, escurrimientos agrícolas y el uso de pesticidas. Aun en concentraciones mínimas, estos metales representan un riesgo considerable para la salud, ya que su exposición prolongada puede provocar daños neurológicos, enfermedades renales, trastornos reproductivos y diversos tipos de cáncer (Sarkar et al., 2018).

Además de los metales existen contaminantes inorgánicos como los fluoruros; si bien en bajas concentraciones este ion puede tener un efecto protector en la salud



Figura 1. Gota de agua en ecosistema. Diseñado por Freepik: <https://www.freepik.es/>

dental, en concentraciones elevadas se asocia con problemas como fluorosis dental en niños y fluorosis esquelética en adultos (Sani et al., 2017). En muchas regiones, especialmente donde el agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento, los niveles de fluoruro superan los límites recomendados por organismos internacionales como la OMS (Figura 2).

A este panorama se suman otras sustancias nocivas como nitratos derivados de fertilizantes, residuos de pesticidas y colorantes industriales vertidos sin control, los cuales pueden alterar gravemente la calidad del agua, haciendo que su uso para consumo humano o riego represente un riesgo para la salud y el medio ambiente.

Frente a esta realidad alarmante surge una necesidad compartida a nivel global, desarrollar e implementar soluciones accesibles, sostenibles y eficaces para remover estos contaminantes del agua. Lo anterior es

especialmente urgente en comunidades con recursos limitados, donde las tecnologías convencionales de tratamiento como plantas potabilizadoras avanzadas, sistemas de ósmosis inversa o carbón activado, son técnica y económicamente inviables.



Figura 2. Efecto del fluoruro en los dientes. Diseñado por Freepik: <https://www.freepik.es/>

En este contexto, las tecnologías basadas en materiales naturales como las arcillas ofrecen una alternativa valiosa. Estas soluciones no solo son más económicas, sino que pueden adaptarse a las condiciones locales, promoviendo la participación comunitaria y el uso responsable de los recursos disponibles en el entorno inmediato.

La ciencia detrás de las arcillas

¿Qué hace a las arcillas tan especiales? Las arcillas son minerales naturales formados por láminas microscópicas extremadamente delgadas organizadas en capas parecidas a hojas apiladas, lo que les confiere una

superficie interna y externa muy vasta. Esta gran área superficial, junto con la presencia de cargas eléctricas negativas en su estructura, les permite atraer y retener diversos tipos de contaminantes, especialmente aquellos con carga positiva, actuando como dos imanes, de polos opuestos que se atraen como varios metales pesados y ciertos compuestos orgánicos (Al-saeedi, 2022). Este proceso se conoce como adsorción y es uno de los mecanismos principales por los cuales las arcillas pueden purificar el agua (Kalsido et al., 2021). Gracias a esta propiedad, las arcillas funcionan como eficaces filtros naturales, capaces de purificar el agua.

Además, las arcillas naturales pueden llevarse a los laboratorios y pueden modificarse químicamente para potenciar su capacidad adsorbente. En otras palabras, se vuelven más eficientes en su labor de limpieza. Por ejemplo, al tratarlas con ácidos, sales metálicas o materiales orgánicos, es posible incrementar su porosidad, alterar su carga superficial y aumentar su selectividad por ciertos contaminantes (Tabi et al., 2021).

Tipos de arcilla más utilizados

Entre los tipos de arcilla más estudiados por su capacidad para purificar agua se encuentran:

- **Bentonita:** Compuesta principalmente por montmorillonita y destaca por su alta capacidad de hinchamiento.

miento, además de una gran superficie específica; es eficaz para eliminar metales pesados y ciertos colorantes de uso industrial

- **Zeolita:** Aunque técnicamente es un aluminosilicato cristalino y no una arcilla en sentido estricto, su estructura porosa la convierte en un excelente adsorbente para cationes metálicos, amonio y fluoruros (Sairam Sundaram et al., 2009).
- **Caolinita e illita:** Con menor capacidad de hinchamiento, pero útiles en aplicaciones específicas, especialmente cuando se busca estabilidad estructural.

Cada tipo de arcilla presenta ventajas y limitaciones; sin embargo, su combinación con procesos de modificación química o térmica ha permitido ampliar sus aplicaciones para la remoción de diversos tipos de contaminantes. La Figura 3 representa de manera general la disminución de contaminantes presentes en el agua mediante el uso de arcillas mediante el mecanismo de adsorción.

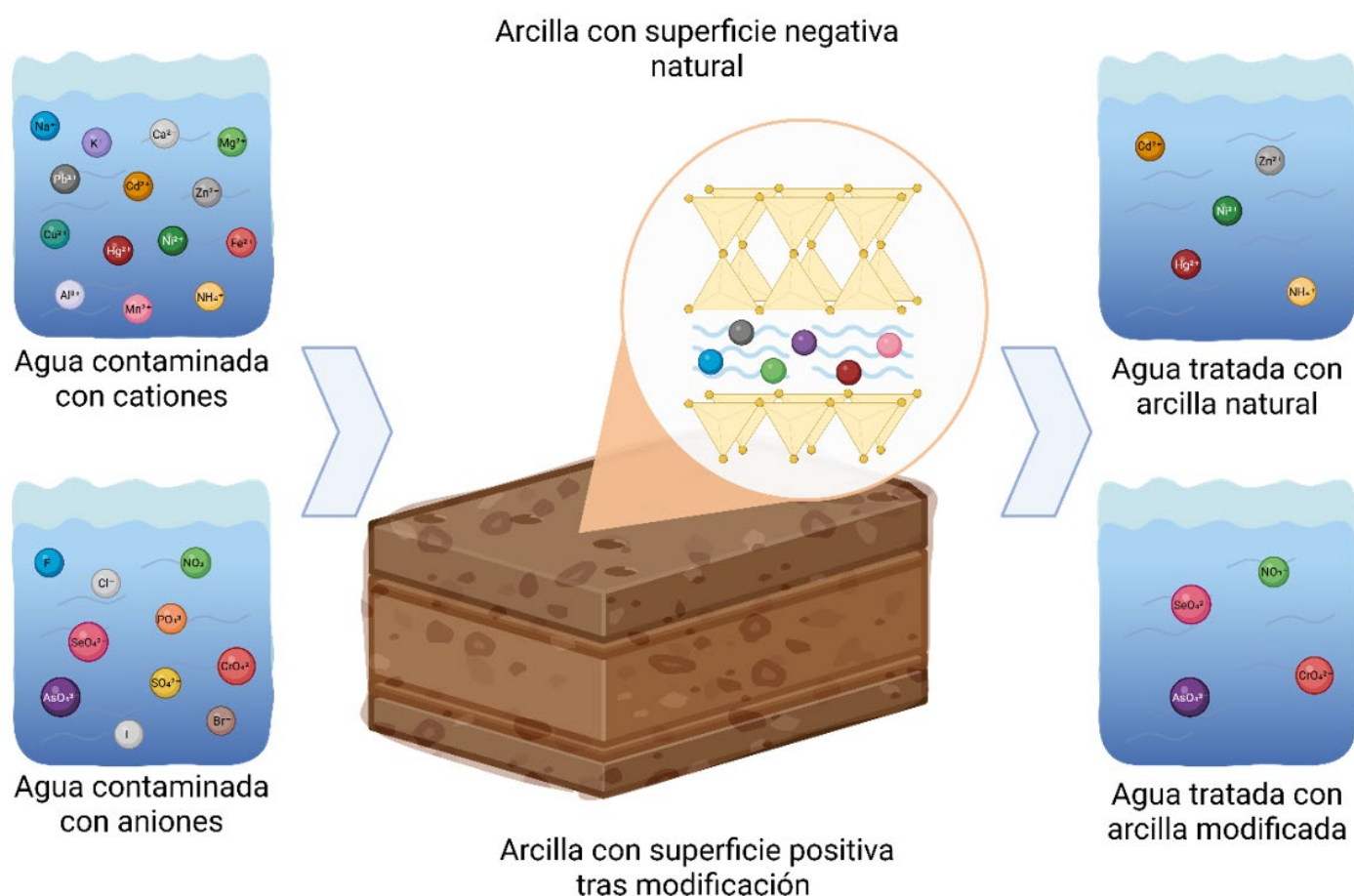


Figura 3. Proceso de purificación del agua con arcilla.
Diseñado por Biorender: <https://app.biorender.com/>

Limitaciones y retos actuales

A pesar de sus ventajas, el uso de arcillas también presenta desafíos:

1. **Selectividad limitada:** Algunas arcillas pueden adsorber varios iones a la vez, lo que dificulta separar contaminantes específicos.
2. **Rápida saturación:** Si la concentración de los contaminantes es elevada, las arcillas pueden saturarse y perder eficacia en la remoción.
3. **Disposición segura:** Posterior a su uso, las arcillas cargadas con metales pesados pueden disponerse correctamente y así evitar impactos ambientales.

Por ello, se continúa investigando en el desarrollo de materiales híbridos, que combinan arcillas con biopolímeros, nanopartículas u otros compuestos para mejorar su desempeño y facilitar su reutilización (Han et al., 2021).

Casos de éxito en el uso de arcillas

Varios grupos de científicos alrededor del mundo han trabajado en numerosos estudios, demostrado que las arcillas modificadas pueden remover eficientemente contaminantes como:

- Plomo (Pb^{+2}): Mediante el uso de bentonita modificada con hierro o manganeso (Chowdhury et al., 2022).
- Arsénico ($As^{+3/+5}$): Con zeolitas tratadas con óxidos de hierro.
- Cromo (Cr^{+6}): Empleando arcillas activadas con ácidos o mediante impregnación con surfactantes (Wang & Xu, 2020).
- Fluoruros (F^-): Mediante el uso de zeolitas modificadas con sales de aluminio o arcillas enriquecidas con calcio (Ai et al., 2021).

Caso de estudio en marcha

En México también hay investigadores preocupados por limpiar el agua, por ejemplo, en el estado de Durango, miles de personas dependen del agua subterránea como fuente principal para el consumo doméstico, así como para actividades agrícolas y ganaderas, según lo reportado por la Comisión Nacional del Agua en el 2023. Sin embargo, este recurso esencial enfrenta una amenaza creciente: la presencia de niveles elevados de fluoruros disueltos en distintas zonas del estado (Abraham et al., 2024).

Motivados por esta problemática, un grupo de investigadores del Instituto Tecnológico de Durango decidió explorar una alternativa accesible y sostenible: el uso de arcillas nativas de la región. En su búsqueda identificaron dos materiales abundantes y poco aprovechados localmente: la bentonita y la zeolita. Ambos tipos de arcilla se reco-

lectaron del suelo del estado de Durango (Figura 4) y sometidos a un proceso de modificación para mejorar sus propiedades fisicoquímicas, con el objetivo de evaluar su capacidad para remover contaminantes presentes en el agua. Estos tratamientos ayudan a reorganizar su estructura interna, eliminar impurezas y aumentar su capacidad de adsorción, como si se tratara de una esponja que amplía sus poros para atrapar mejor las partículas no deseadas.



Figura 4. Bentonita y zeolita nativas del estado de Durango: (A) Naturales o crudas. (B) Imágenes tomadas por los autores.

Los resultados preliminares sugieren que las arcillas modificadas presentaron una capacidad mejorada para retener iones de fluoruro, gracias principalmente a interacciones electrostáticas y mecanismos de adsorción en su superficie. Estos hallazgos respaldan la viabilidad técnica del uso de materiales locales en el tratamiento del agua, destacando además su potencial como una alternativa económica y ambientalmente responsable para enfrentar uno de los problemas de salud pública más relevantes en la región.

Lo anterior demuestra que el uso de arcillas no se limita a un solo tipo de contaminante, sino que puede adaptarse según la necesidad. También reafirma la alta capacidad de adsorción y el enorme potencial como una solución práctica, económica y sustentable para el tratamiento del agua contaminada como una tecnología flexible y de bajo costo.

Beneficios para la comunidad y el ambiente

El uso de arcillas nativas como método de purificación del agua no solo ofrece una solución eficaz ante distintos tipos de contaminantes, sino que también constituye una estrategia sustentable y respetuosa con el medio ambiente. Al tratarse de un recurso abundante y local, su aplicación permite reducir la dependencia de productos químicos costosos y potencialmente dañinos, favoreciendo así un tratamiento más limpio, económico y ambientalmente responsable.

En comunidades donde el acceso a tecnologías avanzadas es limitado, los filtros elaborados con arcilla representan una opción accesible y efectiva. Su simplicidad no es una desventaja, sino una ventaja crucial: permite que familias en situación vulnerable puedan obtener agua segura mediante un recurso natural y de bajo costo. De este modo, la tecnología basada en arcillas se convierte en una herramienta transformadora con alto impacto social.

Organizaciones internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), así como diversos programas de desarrollo rural en países como India, Sudáfrica, Etiopía y México, han mostrado creciente interés en tecnologías basadas en materiales naturales. En este escenario, las arcillas sobresalen como una alternativa prometedora gracias a su eficacia, bajo costo y disponibilidad en múltiples regiones.

En el caso de México, instituciones como el Instituto Tecnológico de Durango (TecNM – ITD), la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), la Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED) y diversos centros de investigación han liderado proyectos enfocados en el uso de arcillas para el tratamiento del agua cumpliendo con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua Para Uso y Consumo Humano. Límites Permisibles de La Calidad Del Agua., 2021). Estos esfuerzos han generado propuestas adaptadas a las condiciones locales, pero con potencial de replicación en otras regiones del mundo.

Este enfoque se alinea con una tendencia global que busca soluciones sustentables a partir de recursos naturales, integrando el conocimiento científico con las necesidades sociales. Así, el aprovechamiento de materiales como la arcilla no solo resuelve problemáticas inmediatas, sino que también abre el camino hacia modelos de desarrollo más justos, accesibles y sostenibles.

Al final, esta experiencia nos recuerda que a veces, las mejores respuestas están justo donde no solemos mirar: bajo nuestros pies, en lo más básico y natural. Con ciencia, compromiso y colaboración, lo que comenzó como un problema regional puede convertirse en una solución global.

Referencias

- Ai, L., Yang, Y., Wang, B., Chang, J., Tang, Z., Yang, B., & Lu, S. (2021). Insights into photoluminescence mechanisms of carbon dots: advances and perspectives. *Science Bulletin*, 66(8), 839–856. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.12.015>. Acceso: junio 15 de 2025.
- Al-saeedi, A. A. (2022). Clay basics and their physical and chemical properties : Review Paper. *Advanced Research In Applied Sciences*, August, 12–18. https://www.researchgate.net/publication/363056615_Clay_basics_and_their_physical_and_chemical_properties_Review_Paper. Acceso: junio 15 de 2025.
- Chowdhury, I. R., Chowdhury, S., Mazumder, M. A. J., & Al-Ahmed, A. (2022). Removal of lead ions (Pb2+) from water and wastewater: a review on the low-cost adsorbents. In *Applied Water Science*, 12 (8), Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01703-6>. Acceso: Junio 15 de 2025.
- Han, H., Cui, P., Xiao, L., & Wu, W. (2021). MoCS@NSC with interfacial heterojunction nanostructure: A highly selective catalyst for synthesizing methanol from CO2 at low temperature. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), 106354. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106354>. Acceso: Junio 15 de 2025.
- Kalsido, A. W., Kumar, A., Tekola, B., Mogessie, B., & Alemayehu, E. (2021). Evaluation of bentonite clay in modified and unmodified forms to remove fluoride from water. *Water Science and Technology*, 84(10–11), 2661–2674. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.220>. Acceso: junio 15 de 2025.
- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua Para Uso y Consumo Humano. Límites Permisibles de La Calidad Del Agua. (2021). https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5650705. Acceso: junio 15 de 2025.
- Sairam Sundaram, C., Viswanathan, N., & Meenakshi, S. (2009). Defluoridation of water using magnesite/chitosan composite. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2–3), 618–624. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.009>. Acceso: junio 15 de 2025.
- Sani, T., Gómez-Hortigüela, L., Mayoral, Á., Chébude, Y., Pérez-Pariente, J., & Díaz, I. (2017). Controlled growth of nano-hydroxyapatite on stilbite: Defluoridation performance. *Microporous and Mesoporous Materials*, 254, 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.04.036>. Acceso: junio 15 de 2025.
- Sarkar, B., Singh, M., Mandal, S., Churchman, G. J., & Bolan, N. S. (2018). Clay minerals-organic matter interactions in relation to carbon stabilization in soils. In *The Future of Soil Carbon: Its Conservation and Formation*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811687-6.00003-1>. Acceso: Junio 15 de 2025.
- Tabi, R. N., Agyemang, F. O., Mensah-Darkwa, K., Arthur, E. K., Gikunoo, E., & Momade, F. (2021). Zeolite synthesis and its application in water defluorination. *Materials Chemistry and Physics*, 261, 124229. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124229>. Acceso: junio 15 de 2025.
- Wang, F., & Xu, W. (2020). CTMAB-Modified Bentonite – Based PRB in Remediating Cr (VI) Contaminated Groundwater. *Water Air Soil Pollut*, 231(20). <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-019-4386-4>. Acceso: junio 15 de 2025.

Agradecimientos

Al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento: Proyecto de Investigación en el Área de Posgrado. Sistema Avanzado de Adsorción para la Mitigación de Fluoruros en Agua: Un Enfoque con Arcillas Nativas Modificadas. TecNM-ITD. (Clave: 21796.25-P) en su Convocatoria 2025-1.

Sobre los autores/as

Ing. Martha Beatriz Morales Murillo. Ingeniera Química por el TecNM-ITD. Alumna de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Bioquímica, desarrollando investigación en la remoción de contaminantes en agua mediante el uso de materiales naturales. Se desempeña dentro del Laboratorio de Biotecnología Industrial adscrito a la UPIDET del TecNM – ITDurango. Email: 17040393@itdurango.edu.mx.

Dra. María Adriana Martínez Prado. Especialista en Biotecnología Ambiental y Microbiana. Profesora Investigadora del TecNM – ITDurango con distinción Nivel 1 del SNII. Ingeniera Química de formación por el ITD, con Maestría en Ingeniería Ambiental por el ITESM y Doctorado en Filosofía en Ingeniería Ambiental en Oregon State University (USA). Realiza investigación en áreas de la Ingeniería Ambiental, Microbiología Aplicada y Biotecnología Ambiental.

Dra. Perla García Guzmán. Especialista en Nanotecnología con aplicaciones en Nanomedicamentos, Tecnología Farmacéutica y nuevos materiales. Profesora investigadora de tiempo completo en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco con la distinción del Nivel 1 del SNII. QFB de formación, con Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas por parte de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Dra. Diola Marina Núñez Ramírez. Especialista en Biotecnología de Minerales. Profesora Investigadora de la FCQ de la Universidad Juárez del Estado de Durango, Ingeniero Químico de formación, con maestría y doctorado en Ciencias en Ingeniería Bioquímica y cuenta con la distinción del Nivel 2 del SNII. Se desempeña en biotecnología de minerales, aplicada principalmente en procesos de extracción y sistemas ambientales.

Dr. Luis Medina Torres. Especialista en Reología y Mezclado. Posee un doctorado en Ciencias Químicas en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) con especialidad en reología y mezclado de fluidos complejos. Profesor Titular C en la Facultad de Química de la UNAM. Sus líneas de investigación son biorreología y biomateriales. Cuenta con la distinción del Nivel 2 del SNII.

Dr. Nicolas Oscar Soto Cruz. Especialista en Fisiología Microbiana. Doctor en Biotecnología por la Universidad Autónoma Metropolitana. Profesor Investigador en el TecNM – ITDurango con la distinción del Nivel 1 del SNII. Trabaja en la caracterización y el aprovechamiento de cepas microbianas para el desarrollo de procesos biotecnológicos con metodologías de fisiología microbiana, biotecnología industrial, modelamiento matemático e ingeniería de bioprocesos.

Francisco Javier Rodríguez-González. Ingeniero Químico y Maestro en Tecnología de Polímeros por la Universidad Autónoma de Coahuila. Doctor en Ingeniería Química por la École Polytechnique de Montreal, Canadá. Investigador del Departamento de Procesos de Transformación del CIQA y Profesor en los Programas de Posgrado en maestría y doctorado. Cuenta con la distinción del Nivel 1 del SNII.

MSA Luis Arturo Torres Castañón. Ingeniero Químico con especialidad en Ambiental. Maestro en Sistemas Ambientales por el TecNM - ITDurango. Experiencia en el diseño de sistemas experimentales para el tratamiento de aguas residuales, desarrollo, implementación y validación de técnicas analíticas para el análisis de la calidad del agua, estudio de procesos de transporte de contaminantes a través de procesos de adsorción.