

APLICACIÓN DE NANOMATERIALES PARA POTENCIAR EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

FRANCISCO J. CERVANTES

La ciencia ha logrado avances importantes en diferentes disciplinas del conocimiento, derivado de la introducción de materiales nanométricos (1 nanómetro es la milmillonésima parte de un metro) con diversas aplicaciones en la medicina, así como en la fabricación de alimentos, dispositivos electrónicos, catalizadores químicos y muchos otros productos que demanda la sociedad creciente actual. Incluso, estos avances se han traducido en reconocimientos del más alto nivel para científicos que trabajan en el desarrollo de nanomateriales (NM), como el caso de los científicos Konstantín Novosiólov y Andréy Gueim, quienes ganaron el premio Nobel de Física 2010, por sus trabajos relacionados con el grafeno, un material constituido por carbono que forma una lámina de un átomo de espesor; el cual es 200 veces más resistente que el acero, pero cinco veces más ligero que el aluminio. Estas propiedades de los NM los hacen muy atractivos porque presentan un desempeño muy superior en las aplicaciones industriales donde son utilizados, comparado con los materiales convencionales de mayor tamaño (Pat-Espadas y Cervantes, 2018).

Los NM también han sido aplicados en distintos procesos ambientales relevantes; por ejemplo, al ser utilizados como catalizadores para acelerar la producción de biogás durante el tratamiento de aguas residuales industriales, la biodegradación de contaminantes persistentes y la eliminación de nitrógeno, entre otras aplicaciones (Cervantes y Ramírez-Montoya, 2022). A continuación, se describirán algunos temas relacionados con estos puntos que actualmente se llevan a cabo en la Unidad Académica Juriquilla, del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (IIUNAM).

Aplicaciones para incrementar la producción de biogás a partir de aguas residuales complejas

El proceso de digestión anaerobia ha sido ampliamente aplicado para tratar aguas residuales municipales e industriales desde el desarrollo de reactores anaerobios de alta velocidad, cuyas primeras tecnologías se desarrollaron en la década de los setenta. A partir de entonces, su empleo se ha expandido para tratar aguas residuales en una amplia variedad de industrias. Su éxito se debe, en parte, a sus bajos costos de operación y a la producción de biogás durante el tratamiento, lo cual, representa

una gran ventaja, ya que este subproducto se puede emplear como fuente de energía renovable para diferentes propósitos dentro de estas instalaciones.

La digestión anaerobia es un proceso complejo que involucra la hidrólisis del material suspendido en las aguas, principalmente constituido por proteínas, carbohidratos y grasas, seguido de un proceso fermentativo en el que se generan compuestos más simples, como alcoholes y ácidos orgánicos. La última etapa de este proceso consiste en la conversión de estos últimos compuestos simples en metano y dióxido de carbono, principales constituyentes del biogás, por microorganismos metanogénicos.

Para que la digestión anaerobia se lleve a cabo de manera eficiente, es necesario la participación de distintos grupos microbianos que participan en una cadena trófica en secuencia, en la que los productos generados durante las primeras etapas, se convierten en los sustratos para los metanogénicos que actúan en la última instancia. No obstante, esta cadena trófica puede verse afectada por diversos aspectos ambientales que prevalecen en los reactores anaerobios, como el pH, la temperatura, presencia de compuestos inhibitorios, entre otros. Por otra parte, recientemente se ha descubierto que NM aplicados en reactores anaerobios incrementan la eficiencia de los mismos durante el tratamiento de aguas residuales complejas, como las generadas a partir de granjas porcinas o rastros (Romero *et al.*, 2020; Ramírez-Montoya *et al.*, 2022). Entre los mecanismos involucrados en la mejora promovida por los NM está el aumento en la transferencia de electrones entre las especies microbianas participantes, conocida como DIET por sus siglas en inglés (Direct Interspecies Electron Transfer).

Los efectos observados por NM en la producción de biogás por consorcios anaerobios depende fuertemente de las propiedades fisicoquímicas de los mismos. Por ejemplo, cuando se aplicó óxido de grafeno (OG) en un consorcio metanogénico se observó que las láminas de este NM cubrieron los gránulos de almidón, el cual, era el principal compuesto orgánico a degradar en el proceso, lo que provocó limitaciones de transferencia de masa en el proceso; esto se reflejó en una disminución en la producción de metano, comparado con el cultivo de control incubado sin OG (Bueno-López *et al.*, 2018). Estos efectos adversos se relacionaron con interacciones electrostáticas entre los grupos oxigenados presentes en el OG y los grupos hidroxilo del almidón. Sin embargo, estudios posteriores indicaron que cuando el OG se reduce (OGr) previo a su adición al mismo consorcio anaerobio, elimina parte de los grupos oxigenados presentes en la superficie de este NM, con lo cual se reduce la atracción hacia el almidón y evita la cobertura de sus partículas, entonces, quedan disponibles para los microorganismos para poder metabolizarlo. Además, la presencia del OGr estimuló el proceso de digestión anaerobia promoviendo

el proceso DIET entre los microorganismos presentes, con lo cual, se obtuvo un incremento en la velocidad de producción de metano (114% de aumento con respecto al control sin OGr (Bueno-López *et al.*, 2020)).

Estudios más recientes, llevados a cabo con aguas residuales sintéticas con un alto contenido de proteínas, simulando aguas residuales de un rastro, mostraron que xerogeles adicionados con NM, como el OG, incrementaron la velocidad de producción de metano (14% con respecto al control) a partir del tratamiento de estas aguas (Figura 1). Estos materiales también propiciaron que el sistema lograra eficiencia de eliminación de materia orgánica de 88%; mientras que el control sin NM sólo logró 50% de eliminación. Análisis adicionales revelaron que la presencia de NM en el sistema de tratamiento también fomentó una eliminación importante del nitrógeno amoniacal derivado de la hidrólisis de las proteínas, lo cual, se atribuye a fenómenos de adsorción y de oxidación anaerobia de amonio en el sistema adicionado con NM (Ramírez-Montoya *et al.* 2022). Estudios desarrollados por otros grupos de investigación han mostrado que NM magnéticos incrementan la producción de metano (más del triple comparado con el control) en reactores adicionados con estos NM que tratan aguas residuales municipales (Song *et al.*, 2019). Estos resultados marcan la pauta para diseñar y aplicar NM para acelerar la producción de metano durante el tratamiento de aguas residuales complejas en sistemas anaerobios.

Aplicaciones para degradar contaminantes emergentes

Los NM también han sido aplicados en sistemas de tratamiento de aguas residuales con el propósito de degradar contaminantes emergentes. Por ejemplo, nanopartículas (NP) de paladio, inmovilizadas en un lodo granular dentro de un reactor anaerobio, catalizaron la degradación de 3-cloro-nitro-benceno (3CNB) y del medio de contraste yodado, iopromida, lo cual se tradujo en mayor eficiencia de eliminación y mayor grado de degradación de estos contaminantes, comparado con el reactor control operado sin NP de paladio (Pat-Espadas *et al.* 2016). Estas NP de paladio han mostrado también su efectividad, acelerando la biodegradación de otros contaminantes, como colorantes azo, compuestos nitro-aromáticos, entre otros (Suja *et al.*, 2014; Quan *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2014). También, se ha observado que el OG aplicado en reactores anaerobios acelera la biodegradación de contaminantes, como 3CNB, iopromida y colorantes azo, al acelerar reacciones de óxido-reducción involucradas en la conversión reductiva de estos compuestos (Colunga *et al.*, 2015; Toral-Sánchez *et al.*, 2018).

Más recientemente, NP metálicas recuperadas de un efluente metalúrgico, fueron inmovilizadas en reactores anaerobios para acelerar la biodegradación de antivirales empleados para combatir el SARS-CoV-2, como tenofovir y ribavirina.

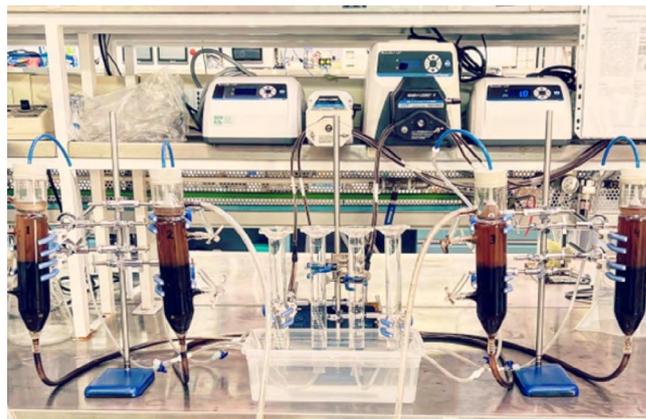


Figura 1. Bioreactores adicionados con NM para acelerar la producción de biogás a partir de aguas residuales de un rastro

La degradación de estos fármacos en los reactores control fue limitada (entre 37 y 58 %); mientras que los reactores cuya biomasa fue enriquecida con los minerales recuperados lograron entre 95 y 98% de degradación de estos contaminantes emergentes. Además, se pudo verificar por cromatografía líquida, acoplada a espectroscopia de masas (HPLC-MS), que los productos derivados de la biodegradación de estos compuestos tienen una estructura mucho más sencilla que les permite ser susceptibles a ser mineralizados en un postratamiento aerobio (Mares-Carbajal, 2022). Estos estudios muestran el potencial de aplicar NM para acelerar la biodegradación de contaminantes emergentes, lo cual es relevante, ya que podría sentar las bases para establecer sistemas de tratamiento eficientes para tratar efluentes derivados de hospitales y de la industria farmacéutica.

Aplicaciones para eliminar nitrógeno amoniacal de aguas residuales

El amonio (NH_4^+) es la forma nitrogenada más abundante en la mayoría de las aguas residuales; su presencia en los ecosistemas causa toxicidad hacia diferentes especies acuáticas, eutrofización, pérdida de biodiversidad, acidificación, entre otros problemas ambientales. Por tal motivo, es imperativo eliminar este contaminante de aguas residuales antes de ser vertidas a los cuerpos de agua receptores. Además, es importante mencionar que muchos efluentes industriales y pecuarios contienen un alto contenido de nitrógeno amoniacal, como los derivados de granjas porcinas, enlatadoras de pescados y mariscos, así como rastros.

Los procesos convencionales que típicamente se aplican para eliminar el amonio de aguas residuales incluyen reactores aerobios y anóxicos en los que se llevan a cabo los procesos de nitrificación y desnitrificación (Chan-Pacheco *et al.* 2021). La nitrificación, en primer lugar, consiste en un proceso micro-

biano aerobio en el que el amonio es oxidado a nitrito y nitrato. Por su parte, la desnitrificación consiste en un proceso microbiano en el que el nitrito y nitrato son convertidos a nitrógeno molecular (N_2) en condiciones anóxicas. Estos procesos eran los únicos aplicados con este fin hasta finales del siglo pasado. Recientemente, se descubrió un proceso novedoso en el que microorganismos anaerobios oxidan al amonio a N_2 empleando al nitrito como aceptor de electrones. Este proceso, denominado anammox (por sus siglas en inglés, anaerobic ammonium oxidation), significó un gran avance para el desarrollo de sistemas de tratamiento de aguas residuales, capaces de eliminar nitrógeno amoniacal, ya que disminuye significativamente los costos operativos.

Estudios recientes revelaron también que el proceso anammox puede ser sustentado con aceptores de electrones alternos al nitrito, como sulfato, óxidos de Fe (III) y Mn (IV), así como materiales de carbono como OG (Rios-Del Toro *et al.* 2018a; b; Shaw *et al.*, 2020). Al respecto, los NM basados en el OG y en NP de Fe (III) y Mn (IV) podrían ser considerados para potenciales aplicaciones del proceso anammox para tratar efluentes ricos en amonio, como los sobrenadantes de digestores anaerobios o efluentes acuícolas. Una forma atractiva de aplicar estos NM con este propósito sería inmovilizarlos en biorreactores o en celdas de combustible microbianas en los que puedan actuar como aceptores de electrones para oxidar el amonio a N_2 . Ésta es otra línea de investigación que actualmente se desarrolla en la Unidad Académica Juriquilla del II-UNAM.

Conclusiones

La aplicación de NM en sistemas de aguas residuales tiene un gran potencial para mejorar procesos anaerobios y aumentar su producción de biogás, así como en sistemas destinados a eliminar contaminantes emergentes y nitrógeno amoniacal. Esta línea de investigación es promisoría, a futuro, se deberán explorar estrategias que permitan inmovilizar NM en sistemas de tratamiento de aguas con el fin de aplicarlos con estos propósitos a gran escala. |

Agradecimientos

El autor agradece el financiamiento otorgado por el CONACyT a través del proyecto 682328 del programa Ciencia de Frontera y de la DGAPA proyecto PAPIIT TA200122.

Referencias



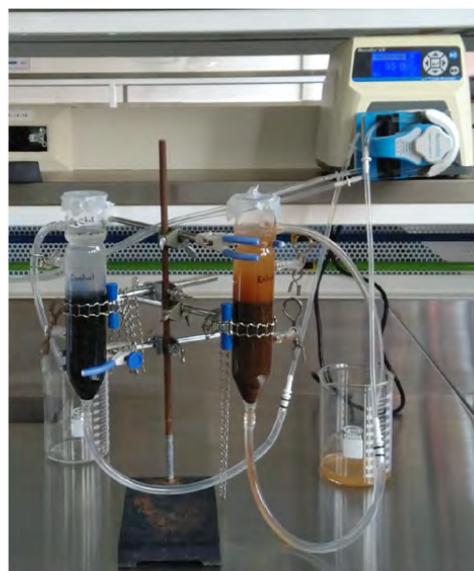
http://www.iingen.unam.mx/es-mx/AlmacenDigital/Gaceta/marzo-abril_2023/Paginas/Aplicaciondenanomaterialesparatratamientodeaguas.aspx



Efluente metalúrgico



Minerales recuperados



Aplicación de minerales en la biodegradación de antivirales

Figura 2. Aplicación de minerales recuperados de un efluente metalúrgico en la biodegradación de antivirales empleados para combatir el SARS-CoV-2