



Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento

Año 11, Número 25, Artículo 18: 1-17. Enero - Diciembre 2023
e-ISSN: 2007-8064

<http://revistas.unam.mx/index.php/entreciencias>



Materiales conductores de electrones y su impacto durante la producción anaerobia de metano

Electron transfer via conductive materials and their impact on the anaerobic methane production

DOI: 10.22201/enesl.20078064e.2023.25.85046
e25.85046

Vianey Ariadna Burboa Charis^{a*}
<https://orcid.org/0000-0001-7210-7219>
Miriam Orrantia López^{b*}
<https://orcid.org/0000-0002-3838-755X>
Luis Humberto Alvarez Valencia^{c*} [▲]
<https://orcid.org/0000-0003-1809-9304>

Fecha de recepción: 7 de marzo de 2023.
Fecha de aceptación: 22 de septiembre de 2023.
Fecha de publicación: 9 de octubre de 2023.

^{a*} Autor de correspondencia
luis.alvarez@itson.edu.mx

^{*}Instituto Tecnológico de Sonora

Se autoriza la reproducción total o parcial de los textos aquí publicados siempre y cuando se cite la fuente completa y la dirección electrónica de la publicación.
CC-BY-NC-ND



RESUMEN

Objetivo: revisar la literatura científica para conocer el impacto de materiales conductores a base de carbón y metálicos durante procesos de digestión anaerobia para la producción de metano.

Diseño metodológico: revisión de literatura científica para recopilar la información y datos presentados.

Resultados: análisis de resultados de procesos de digestión anaerobia con diferentes sustratos y materiales conductores, para identificar el incremento en la producción y rendimiento de metano, reducción de fase lag y producción de productor intermediarios.

Limitaciones de la investigación: se centra en el uso de materiales que promueven la producción de metano por digestión anaerobia.

Hallazgos: los materiales conductores permiten aumentar la producción de metano y reducir el tiempo de la fase lag, al promover la transferencia directa de electrones entre especies durante la digestión de materia orgánica simple y compleja.

Palabras clave: producción de metano, digestión anaerobia, transferencia directa de electrones interespecies, materiales conductores.

ABSTRACT

Purpose: To review the scientific literature to assess the impact of carbon-based and metallic conductive materials during anaerobic digestion processes for methane production

Methodological design: A review of scientific literature to collect the information and data presented.

Results: Analysis of the results of anaerobic digestion processes with different substrates and conductive materials, to identify the increase in methane production and yield, lag phase reduction, and production of intermediate producers.

Research limitations: It focuses on the use of materials that promote the production of methane by anaerobic digestion.

Findings: Conductive materials allow for increasing methane production and reducing the lag phase time, in addition to promoting the direct transfer of electrons between species during the digestion of simple and complex organic matter.

Keywords: Methane Production, Anaerobic Digestion, Direct Interspecies Electron Transfer, Conductive Materials.

INTRODUCCIÓN

El metano es considerado una forma de energía renovable que se produce utilizando sistemas de bioingeniería a partir de la degradación de una amplia cantidad de sustratos orgánicos como aguas residuales, estiércol animal y residuos sólidos municipales e industriales. La recuperación de energía en forma de metano ocurre bajo condiciones libres de oxígeno a través del proceso de digestión anaerobia realizado por diferentes comunidades microbianas. Comparada con la digestión aerobia, la digestión anaerobia presenta diferentes ventajas como baja producción de sólidos y en consecuencia bajos requerimientos de nutrientes, opera con altas cargas orgánicas y permite la recuperación de energía en forma de biogás. Durante la última década se han estudiado e incluso aplicado diferentes estrategias para mejorar cada una de las etapas de la digestión anaerobia con el propósito de incrementar los rendimientos de metano (Kato *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2012; Zhao *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2020). Una de las estrategias más estudiadas es el uso de materiales conductores de electrones, que permiten mejorar las relaciones simbióticas entre bacterias fermentativas y arqueas metanogénicas durante la producción de metano. La adición de materiales conductores abióticos, como los materiales a base de carbón y materiales metálicos, facilita la transferencia de electrones, lo cual permite un aumento en la producción de metano. Varios estudios han demostrado que facilitar la transferencia directa de electrones entre especies (*DIET por sus siglas en inglés*) en la digestión anaerobia puede mejorar significativamente la cinética de la metanogénesis, por lo que aumenta las tasas de producción de metano (Liu *et al.*, 2012a; Dang *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2014; Rotaru *et al.*, 2014), en comparación con los digestores convencionales (Zhao *et al.*, 2015; Dang *et al.*, 2016).

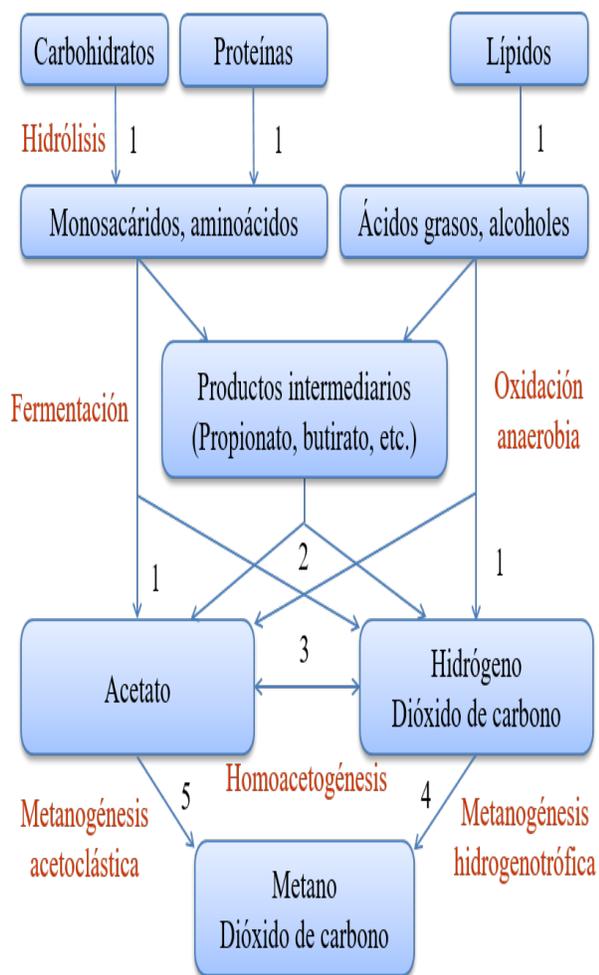
PRODUCCIÓN DE METANO MEDIANTE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Etapas de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia de materia orgánica es un proceso bioquímico con reacciones en serie y paralelo, que ocurre por grupos de bacterias fermentativas e hidrolíticas (1), bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno (2), bacterias acetogénicas consumidoras de hidrógeno (3), reductores de dióxido de carbono (4) y metanógenos acetoclásticos (5) (figura 1). Van Lier *et al.* (2008) describen el proceso de digestión anaerobia que se divide en las siguientes cuatro etapas:

- **Hidrólisis:** es realizada por exoenzimas provenientes de bacterias fermentativas que son responsables de convertir materiales complejos (proteínas, carbohidratos y lípidos) en compuestos solubles de menor peso molecular, que pueden ser capaces de atravesar membranas bacterianas.
- **Acidogénesis:** los compuestos provenientes de la etapa hidrolítica son convertidos en compuestos más simples como ácidos grasos volátiles, alcoholes, ácido láctico, CO₂, H₂, NH₃ y H₂S.
- **Acetogénesis:** algunos de los productos intermedios de la etapa anterior se convierten en acetato, hidrógeno y CO₂, con la producción de nuevas células.
- **Metanogénesis:** su producto principal es el metano a partir de la conversión de acetato, bicarbonato, ácido fórmico o metanol.

Figura 1. Proceso global de la digestión anaerobia de sustratos orgánicos para producción última de metano. Los números indican el grupo de bacterias involucrado: 1) bacterias hidrolíticas y fermentativas, 2) bacterias acetogénicas, 3) bacterias homoacetogénicas, 4) metanógenos hidrogenotróficos y 5) metanógenos acetoclásticos.



Fuente: adaptada de Gujer y Zehnder, 1983.

Limitaciones de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia es una de las tecnologías alternas que ayuda a enfrentar los problemas de abasto de energía y de contaminación, gracias a la gran capacidad para convertir contaminantes orgánicos complejos en un producto de valor energético como el metano. Este proceso permite tratar de manera efectiva residuos orgánicos sólidos y aguas residuales que se caracterizan

por tener altas cargas orgánicas y otros componentes que los hacen complejos. Sin embargo, la digestión anaerobia presenta algunas limitaciones como requerir largos tiempos de retención y bajas tasas de eliminación de materia orgánica comparada con un tratamiento aerobio (Baek *et al.*, 2015), que son ocasionadas por condiciones adversas como baja biodegradabilidad, acidez, alcalinidad, amonio, temperatura y diversos elementos, iones y compuestos químicos (Chen *et al.*, 2008). Por tal motivo, diversos estudios relacionados con la digestión anaerobia están encaminados a mejorar la productividad de metano y buscar procesos que sean autosustentables (Li, Chen y Wu, 2019). Parte de las investigaciones se han centrado en comprender el proceso de transferencia directa de electrones entre especies (*direct interspecies electron transfer*, DIET) que ocurre durante la digestión anaerobia, en donde están involucrados diferentes tipos de microorganismos que tienen gran influencia en el rendimiento del proceso (Dang *et al.*, 2016; Kato *et al.*, 2012; Kato *et al.*, 2015; Lovley, 2017).

La digestión anaerobia está sujeta a condiciones físicas como el pH y temperatura, que son críticas para que el buen desarrollo del proceso (Acosta y Obaya, 2005). En general, los factores físicos y químicos que más influyen en los procesos anaerobios son (Álvarez, 2003):

- Composición del sustrato.
- Tasas de carga orgánica y el tiempo de retención hidráulica.
- Temperatura (óptima 35°C).
- pH (óptimo 7.0)
- Contenido de sólidos suspendidos

Los metanógenos trabajan efectivamente en un rango de pH de 6.5-8.2, con un pH óptimo de 7.0. Aunque se ha demostrado que el rango de pH óptimo para la máxima obtención de rendimiento de gas es 6.5-7.5 (Parra, 2015, p. 153). El amoníaco (NH₃) y el amonio (NH₄⁺) se acumulan durante el rompimiento de proteínas y son los principales inhibidor del proceso de digestión anaerobia, a concentraciones cerca de 1700-1800 mg/L pueden inhibir inóculos sin aclimatar; a través de la aclimatación, los niveles de amonio pueden ser de hasta 5000 mg/L (Yenigun y Demirel, 2013, p. 902).

Aplicación de la digestión anaerobia en la generación de energía

La producción de biogás es una biotecnología utilizada mundialmente para generar energía renovable; puede contener entre 50-70% de metano (Weiland, 2010). Además, su producción tiene un impacto ambiental positivo porque puede ser producido a partir de residuos agropecuarios, forestales, desechos de alimentos y residuos municipales e industriales. La producción de metano ha sido una buena medida utilizada por los granjeros para el tratamiento de residuos y la obtención de energía extra para cocinar o calentar agua para uso familiar. En regiones más desarrolladas, la gran cantidad de residuos orgánicos generados hace de la producción de biogás o biometano una opción atractiva para tratar la contaminación y proveer energía de calidad, que puede aplicarse como combustible a vehículos, generación de electricidad y generación de calor (Münster y Lund, 2010). En algunas ciudades de Suecia, el uso de biometano casi ha reemplazado a los combustibles fósiles para satisfacer la mayoría de su demanda energética (Junginger *et al.*, 2006; Teng *et al.*, 2014). En México existen casos exitosos de generación de biogás. Uno de ellos se localiza en la zona metropolitana de Monterrey, Nuevo León, en donde se pueden generar hasta 7,300 m³ biogás/h a partir de la digestión de 19 Mt de residuos sólidos municipales. El biogás es convertido en energía eléctrica que permite abastecer el 40% del alumbrado público de la zona metropolitana, equivalente a 25,000 casas pequeñas (Prehn y Cumana, 2010).

TRANSFERENCIA DE ELECTRONES EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Los microorganismos son capaces de intercambiar electrones vía H₂ o formiato, entre células donadoras yceptoras de electrones. El H⁺ es el principal aceptor de electrones de la digestión anaerobia, pero es de bajo potencial redox ($E_{H^+/H_2} = -414$ mV, pH = 7.0), lo que indica que es difícil oxidar la mayoría de los sustratos, incluyendo importantes intermediarios ($E_{NaD^+/NaDH} = -320$ mV, $E_{FADH^+/FADH_2} = -220$ mV, $E_{Fd-ox^+/Fd-red} = -398$ mV, pH = 7.0) (Buckel y Thauer, 2013; Kracke, Vassilev y Kro-

mer, 2015). Esta condición puede ocasionar lentitud en el metabolismo anaerobio y permitir la acumulación de H⁺ e intermediarios como ácidos grasos volátiles, lo que promueve un descenso del pH. Esta es una de las principales causas que ocasiona las bajas tasas de producción observadas durante la digestión anaerobia de compuestos orgánicos complejos (Yang *et al.*, 2017). La estrategia más conocida de transferencia de electrones entre bacterias fermentativas y arqueas metanogénicas es la transferencia de H₂ entre especies. Este proceso es frágil debido a que las arqueas metanogénicas hidrogenotróficas no son las especies dominantes, además de que la difusión de H₂ entre productores y metanógenos es baja (Stams *et al.*, 2006). Una ligera interrupción en el consumo de H₂ puede romper el balance del metabolismo sintrófico. Durante la digestión anaerobia de materia orgánica, especialmente para compuestos complejos, se requiere una adecuada transferencia de electrones para acelerar la digestión y favorecer su conversión eficiente hasta metano. La DIET es un proceso sintrófico que promueve de manera efectiva la transferencia de electrones. Este proceso sintrófico que ocurre en diferentes comunidades anaerobias, incluyendo las metanogénicas, en donde los microorganismos son capaces de ceder y aceptar electrones de forma directa entre especies, incrementando la productividad de metano (Rotaru *et al.*, 2014).

MECANISMOS DE LA DIET

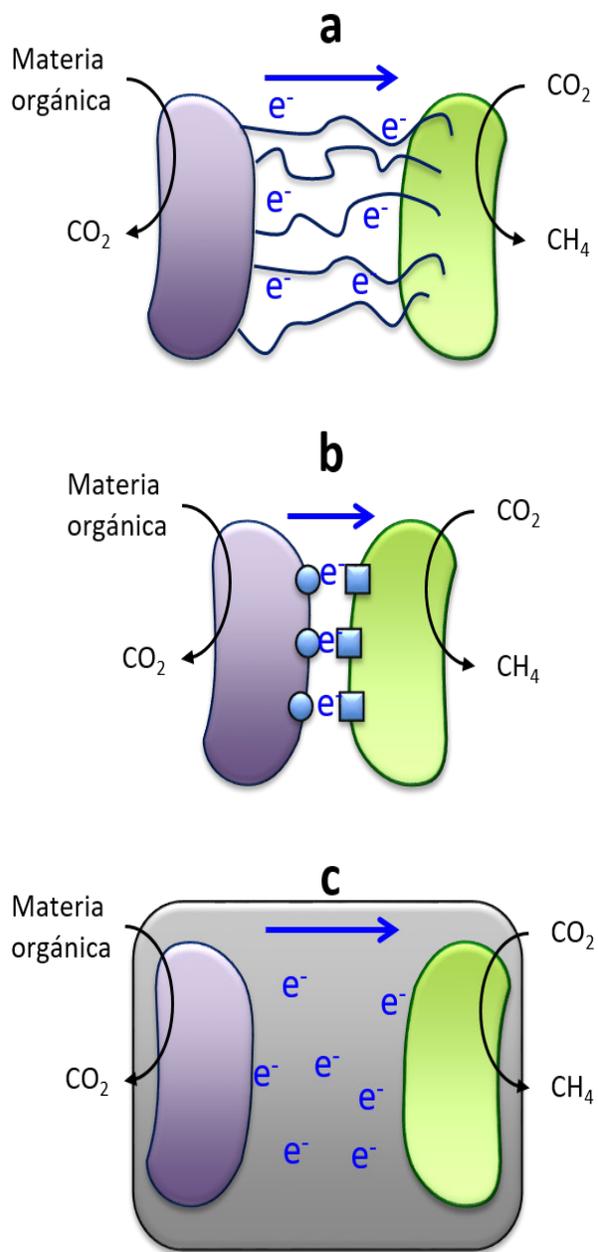
La DIET es un proceso sintrófico que ocurre en comunidades microbianas anaerobias, en donde los electrones que son generados por microorganismos exoelectrogénicos son transferidos directamente hacia otros microorganismos vía 1) estructuras bióticas como proteínas de transporte localizadas en la membrana y pili conductivos, o 2) abióticamente mediante el uso de materiales conductores (figura 2).

DIET vía interacciones bióticas

La capacidad de ciertos microorganismos para interactuar en sistemas de transporte de electrones es posible vía pili conductores de electrones (figura 2a). La DIET, inicialmente descubierta en un co-cultivo de *G. meta-*

lfireducens (bacteria donadora de electrones) durante la oxidación de etanol y con la producción de acetato, que es posteriormente utilizado por *G. sulfurreducens* (bacteria aceptora de electrones) para reducir fumarato, fue el proceso responsable de proveer los electrones para sustentar el crecimiento de microbiano. Estas especies fueron capaces de formar agregados en donde, aunque no estuvieron en asociación cercana, tuvieron la capacidad de transferir electrones vía pili conductores (Summers *et al.*, 2010). Estudios posteriores confirman que la transferencia de electrones en una biopelícula delgada de *G. sulfurreducens* es debida a una red densa de pili o nanocables conductores en forma similar a un conductor metálico (Malvankar *et al.*, 2011). La participación de citocromos tipo-C, específicamente el citocromo OmcS, ha sido asociado con pili conductores (Leang *et al.*, 2010) y es importante para la DIET, pues se sugiere que es el responsable de la transferencia de electrones entre pili de diferentes microorganismos (Summers *et al.*, 2010). Un estudio posterior demostró que la DIET a través de pili conductores fue responsable de la producción de metano en gránulos anaerobios colectados de digestores para tratar residuos de la industria cervecera. En los agregados granulares se encontró que especies del género *Methanosaeta* fueron los metanógenos dominantes y especies del género *Geobacter* fueron las bacterias metabólicamente más activas, evidenciado por la conductividad en los agregados, en donde los pili conductores fueron los responsables para que ocurriera la DIET (Morita *et al.*, 2011). Co-cultivos con *Methanosaeta harundinacea*, aislado de un digestor anaerobio y con *G. metallireducens*, demostraron la capacidad de reducir dióxido de carbono a metano por *M. harundinacea* (Rotaru *et al.*, 2014).

Figura 2. Mecanismos de transferencia de electrones entre especies de microorganismos (púrpura = donador de electrones, verde = aceptor de electrones) mediante el proceso DIET. a) Transferencia de electrones a través de pili eléctricamente conductivos (azul), b) transferencia de electrones entre proteínas de transporte (círculos y cuadros en azul), c) transferencia de electrones utilizando materiales conductores (cuadro naranja).



Fuente: modificado de Lovley (2017, p. 645).

Otro mecanismo de transporte de electrones biótico que participa en la DIET es a través de las proteínas de transporte de electrones localizadas en la membrana celular (figura 2b). El citocromo tipo-c OmcZ localizado en la membrana externa de *Geobacter sulfurreducens* y *Shewanella oneidensis*, que es responsable de transferir electrones a electrodos (Martínez y Alvarez, 2018), ha sido asociado como posible responsable del proceso DIET vía proteínas de membrana (Lovley, 2017). *Prosthecochloris aestaurii*, una bacteria fotosintética, pudo recibir electrones para su crecimiento vía electrodos o acetato a partir de un cultivo de *Geobacter sulfurreducens*. Sin embargo, la bacteria fotosintética no creció en el co-cultivo con *Geobacter sulfurreducens* mutada carente de proteínas de transporte de membrana (Ha *et al.*, 2017).

DIET vía interacciones abiótica: uso de materiales conductores

Las estructuras celulares conductoras de electrones como los pili pueden ser sustituidas por materiales abióticos conductores (figura 2c) o bien materiales que pueden mejorar la efectividad de los pili y proteínas transporte en el proceso DIET. La primera evidencia del uso de materiales conductores para promover la DIET fue documentada con minerales de óxidos de hierro. En ese estudio, Kato *et al.* (2012) observaron que se acortó la fase lag y se incrementó la tasa máxima de producción de metano al usar hematita y magnetita. Tras el análisis de la comunidad microbiana de los cultivos, el incremento de la productividad metanogénica se debe a especies de los géneros *Geobacter* y *Methanosaeta* (Kato *et al.*, 2012), que posteriormente fueron reportadas como responsables del proceso DIET (Lovley, 2017). Después, la producción de metano fue también demostrada en co-cultivos de *Geobacter metallireducens* y *Methanosarcina barkeri* mediante el uso de CAG utilizando etanol como sustrato (Liu *et al.*, 2012b). La adición de CAG demostró ser más efectiva para la producción de metano en relación con la DIET vía pili conductores de electrones. Tras estos dos primeros hallazgos con hematita, magnetita y CAG, se han estudiado diferentes materiales metálicos como oxihidróxido de hierro, nanopartículas de óxido de hierro, ferrihidrita, hierro cero valente, acero inoxidable, manganeso, óxido de magnesio

y nanopartículas de plata; y materiales a base de carbón como carbón negro, biocarbón, telas, fibras, grafito, nanotubos de pared simple y múltiple y grafeno (Martins *et al.*, 2018). Las condiciones experimentales e impacto del uso de materiales a base de carbón activado y metálicos (con combinaciones) son diversos y se han conducido con sustratos modelo y residuos orgánicos, pero también con cultivos puros o consorcios anaerobios.

MATERIALES CONDUCTORES A BASE DE CARBÓN

Los materiales conductores a base de carbón se han utilizado ampliamente para estimular el proceso DIET para la producción de metano (tabla 1). Entre los más utilizados se encuentran el carbón activado granular (CAG), carbón activado en polvo (CAP), biocarbón, tela de carbón, nanotubos de carbón de pared múltiple o simple, grafeno y grafito (Park *et al.*, 2018). Sin embargo, los mecanismos específicos de transferencia de electrones en los cuales intervienen los materiales conductores aún no están claramente definidos (Zhao *et al.*, 2017). La conductividad eléctrica, área superficial, capacidad para formación de biopelícula, resistencia contra la corrosión y capacidad de adsorción de sustancias potencialmente tóxicas, son algunas características de los materiales a base de carbón que se asocian a la producción de metano (Watanabe, 2008; Pham, Aelterman y Verstraete, 2009). En la figura 3 se muestran los procesos en los que intervine el uso de materiales a base de carbón en la digestión anaerobia. La adición de 25 g/L de CAG y etanol como sustrato a un co-cultivo de *Geobacter metallireducens* y *Methanosarcina barkeri*, incrementó el metabolismo metanogénico, evidenciado el aumento de siete veces la concentración de metano producido, encontrando la adhesión de los microorganismos en la superficie del material (Liu *et al.*, 2012). Posteriormente, otros estudios también documentaron que la adición CAG (Rotaru *et al.*, 2014), biocarbón (Chen *et al.*, 2014) y tela de carbón (Chen *et al.*, 2014) aceleran el metabolismo del etanol a metano a través de DIET en co-cultivos con *G. metallireducens* y *M. barkeri*.

Después de los primeros hallazgos que demostraron el efecto del CAG sobre la producción de metano, también se encontró que la adición de CAG a reactores anaerobios

Tabla 1. Impacto de materiales a base de carbón en la digestión anaerobia

Material conductor ^a	Inóculo	Sustrato ^b	Resultado ^c	Referencia
CAG (25 g/L)	G. metallireducens M. barkeri	Etanol	+2.5 TP CH ₄ FL menor	Liu <i>et al.</i> , 2012
CAG, CAP (5 g/L)	Lodo anaerobio	AR industria cervecera	64-70% producción CH ₄ FL menor	Xu <i>et al.</i> , 2015
CAG (0.43-0.48 g/mL)	Lodo anaerobio	AR sintética	+1.8 TP CH ₄ 97% conversión CH ₄	Lee, Lee, y Park, 2016
CAG (27 g/L)	Lodo anaerobio	Lodos activados de desecho	+13.1% producción CH ₄ +10% consumo DQO 76% conversión CH ₄	Peng <i>et al.</i> , 2017
CAG (0.5- 5.0 g)	Lodo anaerobio	Lodos activados de desecho	+37.2% producción CH ₄	Yang <i>et al.</i> , 2017
CAG (0.1 g/10 ml)	Sedimento anaerobio	Glucosa, butirato, acetato y metanol	+ 82% asimilación de sustratos +1.9 concentración CH ₄	Rotaru <i>et al.</i> , 2018
CAG, FC, TCA, BG	Lodo anaerobio	Comida de perro	65-82% consumo de AGV +85% conversión CH ₄	Dang <i>et al.</i> , 2016
CAG, FG, TCA (10 g/L)	Lodo anaerobio	AR porcina con antibióticos	+3 producción CH ₄ +2 conversión CH ₄	Burboa-Charis y Álvarez, 2020
Biocarbón	G. metallireducens, G. sulfurreducens y M. barkeri	Etanol	Alta eficiencia y rendimiento de conversión a CH ₄	Chen <i>et al.</i> , 2014
Biocarbón (10 g/L)	Lodo anaerobio granular	Glucosa	11.4-21.6% decremento en FL +86.6% TP CH ₄	Luo <i>et al.</i> , 2014
Biocarbón (20 g/L)	Lodo anaerobio	Ricos en N	+32% rendimiento CH ₄	Mumme <i>et al.</i> , 2014
Biocarbón (2.5 g/L)	Lodo anaerobio	AR sintética	+66.6% producción CH ₄	Zhao <i>et al.</i> , 2015
Biocarbón (35 g/L)	Lodo anaerobio	Cáscaras de cítricos	FL menor +11.5% producción CH ₄	Fagbohunge <i>et al.</i> , 2016
Biocarbón (10 g/L)	Lodo granular anaerobio	AR industria de papel	FL menor +18.6% TP CH ₄	Lü <i>et al.</i> , 2016
Biocarbón (1 y 10 g/L)	Lodo anaerobio	Estiércol lácteo seco	FL menor +35.7% producción CH ₄	Jang <i>et al.</i> , 2017
Biocarbón (15 g/L)	Lodo anaerobio	Mezcla de agua, lodos activados y desperdicios de alimentos	FL menor +40.3% TP CH ₄	Wang <i>et al.</i> , 2018
TCA (10 piezas/100 cm ²)	Lodo anaerobio	Lixiviados	Mejor conversión AGV	Lei <i>et al.</i> , 2016
Grafeno (0.5, 1 y 2 g/L)	Lodo anaerobio	Etanol y propionato/butirato	+25% rendimiento CH ₄ +19.5% TP CH ₄	Lin <i>et al.</i> , 2017
Nanografeno (20 y 120 mg/L)	Lodo activado	AR sintética	+51.4% TP CH ₄	Tian <i>et al.</i> , 2017

Nota: ^a CAG: carbón activado granular; FC: fieltro de grafito; TCA: tela de carbón activado; BG: barras de grafito.

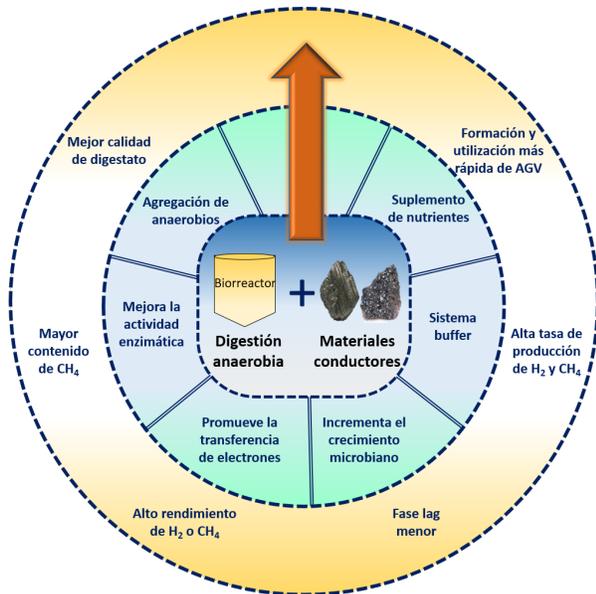
^b AR: agua residual.

^c “+” se refiere al incremento (veces o %) respecto al control; TP: tasa de producción; FL: fase lag.

Fuente: elaboración propia.

incrementa la tolerancia a altas cargas orgánicas (Xu *et al.*, 2015; Dang *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2016), aumenta la tasa de producción de metano (Lee *et al.*, 2016) y la tasa de consumo de ácidos orgánicos intermediarios (Peng *et al.*, 2017). Además del CAG, el efecto de materiales como fieltro de carbón, tela de carbón y grafito fue evaluado en la producción de metano utilizando comida para perro comercial (Dang *et al.*, 2016). Los resultados indican que en el reactor sin material la tasa conversión a metano disminuyó 43% y los ácidos grasos volátiles se acumularon ocasionando descenso en el pH <6.0. En contraste, los reactores adicionados con los materiales tuvieron un desempeño estable y eficiente, sin acumulación de ácidos orgánicos y tasas de conversión a metano superiores al 85%. El establecimiento de comunidades microbianas en los reactores correspondientes a los géneros *Sporanaerobacter* y *Metanosarcina* sobre la superficie de los materiales indica su capacidad para participar en el proceso DIET (Dang *et al.*, 2016).

Figura 3. Ejemplo de procesos en los que participan y favorecen los materiales conductores durante la digestión anaerobia y su impacto en la productividad de metano y otros productos.



Fuente: elaboración propia.

La evidencia indica que la estrategia de introducir materiales a base de carbón en digestores anaerobios ayuda a fortalecer las asociaciones sintróficas entre bacterias y metanógenos y, por lo tanto, a mejorar la eficiencia del digestor (Zhao *et al.*, 2015). Xu *et al.* (2015) llevaron a cabo un estudio donde comparan diferentes tamaños de partícula de CAG (0.84–2.0 mm) y CAP (75–177 μm) para el tratamiento de agua residual sintética de cervecería, enriquecida con etanol y glucosa en reactores anaerobios de flujo ascendente (UASB por sus siglas en inglés) adicionando 5 g/L de cada material conductor. El control sin materiales tuvo una brusca disminución de pH de 7.8 a 5.5 debido a la acumulación de ácidos orgánicos, causando inhibición en la producción de biogás, mientras que los reactores con CAG y CAP permitieron amortiguar el pH con valores de 7.0 a 7.8. La producción de biogás en los reactores con CA aumentó simultáneamente con la carga orgánica, alcanzando una eficiencia de consumo superior al 90%. Una diferencia significativa entre ambos materiales fue el contenido promedio de metano en el biogás producido, para CAG fue de 64.1%, mientras que para CAP fue de 70.4% bajo la operación estable, lo que indica que la tasa de conversión de sustrato en metano fue ligeramente mayor con PAC, lo que podría ser el resultado de una cooperación sintrófica más eficiente. Sin embargo, el autor menciona que esta hipótesis necesita ser probada por investigaciones adicionales.

El biocarbón (BC) se produce a partir de biomasa derivada de plantas que se somete a tratamiento térmico en ausencia parcial o total de oxígeno (Qadeer y Hanif, 1994). Se ha reportado que el BC mejora el proceso de digestión anaerobia al reducir significativamente la fase lag (Luo y Lu, 2014; Fagbohunge *et al.*, 2016; Lü *et al.*, 2016; Jang, Choi y Kan, 2018; Wang *et al.*, 2018) y aumenta la producción de metano (Mumme *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2018). Un estudio realizado por Fagbohunge *et al.* (2016) fue el primero en utilizar como sustrato los residuos de cáscara de cítricos, que han mostrado tener un efecto inhibitorio sobre la digestión anaerobia. El estudio incluyó diferentes tipos de BC encontrándose una disminución en la duración de la fase lag y una mayor producción de metano (11.5%), en relación con las incubaciones de residuos de cáscaras de cítricos sin materiales. El BC mitiga la inhibición del amonio (N-NH₄⁺) sobre la metanogénesis (Mumme *et al.*, 2014; Lü *et al.*, 2016) y permite ofrecer superfi-

cies que pueden ser colonizadas por microorganismos (Kato, Hashimoto y Watanabe, 2012). Chen *et al.* (2014) adicionaron BC a co-cultivos de *G. metallireducens* y *G. sulfurreducens* en un medio con etanol como donador de electrones y fumarato como aceptor de electrones, lo que estimuló el metabolismo sintrófico del etanol con la reducción de fumarato a succinato en dos días. En contraste, el co-cultivo control sin BC requirió 30 días para adaptarse al metabolismo del etanol. Las tasas de pérdida de etanol y producción de succinato con un extracto soluble en agua del biochar fueron solo ligeramente más rápidas que el control sin BC. Por tal motivo sugiere que la fracción de partículas del BC fue la principal responsable de estimular el metabolismo del co-cultivo, debido a que las células se unieron al BC, lo que sugiere que los electrones probablemente se condujeron a través del BC, en lugar de las conexiones eléctricas biológicas. Dicho hallazgo indica que BC puede estimular la DIET y puede ayudar a explicar por qué el BC puede mejorar la producción de metano a partir de desechos orgánicos en condiciones anaerobias.

Materiales a base de carbón que no han sido ampliamente estudiados, como el grafeno, han demostrado ser una buena opción para el aumento en la producción de metano. Lin *et al.* (2017) evaluaron la oxidación de etanol al adicionar grafeno (1 g/L), dando como resultado un aumento del 25% del rendimiento de metano (695.0 ± 9.1 mL/g) y 19.5% más en la tasa de producción (95.7 ± 7.6 mL/g día). El análisis microbiano comprobó que especies electrogénicas de los géneros *Geobacter* y *Pseudomonas* junto con arqueas *Methanobacterium* y *Methanospirillum* podrían participar en la transferencia directa de electrones entre especies, indicando que el grafeno puede sostener un flujo de transferencia de electrones mucho mayor que la transferencia de hidrógeno convencional. Otro estudio reveló que las partículas de nanografeno tiene efectos significativamente positivos sobre la metanogénesis en la digestión anaerobia, ya que la tasa de producción de metano mostró aumentos desde 17.0% hasta valores por arriba de 50% con respecto al control (Tian *et al.*, 2017).

MATERIALES CONDUCTORES DE ORIGEN METÁLICO

La magnetita (Fe_3O_4) es un óxido de hierro bien conocido (contiene Fe [II] y Fe [III] en una proporción de 1:2) que tiene propiedades electroquímicas distintas dependiendo de sus estructuras cristalinas con una eficacia para promover la DIET (Sharma, Mahajan y Goel, 2019). Distintas publicaciones destacan el papel de la magnetita (y otros materiales) como material conductor para promover la transferencia de electrones en asociaciones sintróficas con consorcios microbianos definidos y mixtos, diferentes sustratos, diferentes concentraciones y tamaño de partícula (tabla 2). Una de las primeras investigaciones con materiales conductores de origen metálico fue llevada a cabo por Kato *et al.* (2012), quienes utilizaron nanopartículas de óxido de hierro con diámetro de 10-50 nm y suelo de un cultivo de arroz como inóculo para enriquecer la comunidad microbiana. Fueron utilizados tres óxidos de hierro: magnetita, hematita y ferrihidrita, con una concentración final de 20 mM con respecto al Fe. Los experimentos se dividieron en dos etapas de enriquecimiento, la primera etapa fue enriquecido con acetato o etanol (20 mM). Cuando la metanogénesis alcanzó la fase estacionaria, una parte del cultivo de enriquecimiento se transfirió a una botella que contenía medio fresco (segunda etapa). Los resultados mostraron que la adición de nanopartículas de hematita y magnetita estimulaba significativamente la metanogénesis durante la oxidación de acetato y etanol, evidenciado por la disminución en la fase lag y aumento en la tasa de producción en comparación con el control sin los materiales. Dicha investigación abrió paso al estudio del mecanismo de la DIET en presencia de materiales conductores de origen metálico. Zhuang *et al.* (2015) utilizaron también suelo de un arrozal enriquecido con óxidos de hierro y benzoato como sustrato, obteniendo incrementos en la producción de metano con hematita de 4.1% y magnetita de 7.6% con respecto al control. Por otro lado, la metanogénesis no cambió en presencia de ferrihidrita.

La magnetita es un mineral abundante que podría desempeñar un papel crucial en los ciclos biogeoquímicos. Las partículas de magnetita han sido ampliamente utilizadas para el estudio de la DIET con diferentes matrices y sustratos, obteniendo resultados significativamente

positivos. En un estudio utilizando propionato, lodo anaerobio y con una suspensión de partículas de magnetita (0.35 g Fe/L), permitió la degradación del propionato, con una fase lag ligeramente más corta (seis días frente a 16 días) y continuó hasta su finalización más rápidamente (48 días frente a 55 días) en comparación con el control no suplementado con magnetita. En presencia de partículas conductoras la tasa de producción de metano mejoró un 33%, comparado con control no modificado, a partir del propionato, un intermediario clave de la digestión anaerobia de materia orgánica y un sustrato modelo para estudiar comunidades sintróficas de energía. Los resultados sugieren que probablemente se debió al establecimiento de la DIET, basándose en que las partículas de magnetita sirven como conductores de electrones entre los acetógenos oxidantes de propionato y los metanógenos reductores de CO₂ (Cruz Viggi *et al.*, 2014). Además de sustratos modelo se han utilizado aguas residuales para evaluar el efecto de materiales metálicos. En un estudio realizado por Baek *et al.* (2015) utilizaron tres reactores anaerobios de 2 L para tratar aguas residuales de industria láctea operados en modo discontinuo por 30 días. Para estimular la producción de metano fueron adicionados con oxihidróxido férrico y magnetita. El consumo de DQO después de 30 días fue de 31.9%, 59.3% y 82.5% en los reactores control, con oxihidróxido férrico y magnetita, respectivamente. La DQO consumida se recuperó casi por completo como biogás con oxihidróxido férrico y magnetita, mientras que solo el 79% se recuperó en el control.

Los diferentes sustratos permiten tener diferencias marcadas en la producción de metano utilizando magnetita como conductor de electrones, ya que se reportan incrementos desde 7.3% (Peng *et al.*, 2017), 15.4% (Yin *et al.*, 2018), 16.1% (Zhang, Li y Wang, 2019) hasta valores que van de 50% (Zhao *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2018) a 90% [46]. Estas diferencias significativas también están relacionadas con las propiedades de la magnética tales como su cristalinidad y conductividad, así como también la concentración y tamaño de partícula. El uso de nanomateriales naturales o artificiales como conductores de electrones para acelerar la producción sintrófica de metano puede ayudar a los microorganismos a ahorrar energía para la biosíntesis de las conexiones extracelulares, biológicas y eléctricas (Zhang y Lu, 2016). Recientes estudios confirmaron que la adición de nano-

magnetita mejoró la interacción entre microorganismos sintróficos y aceleró la producción de metano a partir de diferentes sustratos, como etanol, acetato, propionato y butirato (Martins *et al.*, 2018). En un estudio llevado a cabo por Ren *et al.* (2019), utilizaron partículas de nanomagnetita por primera vez en un proceso de electrometanogénesis con aguas residuales de una granja lechera, mejorando la tasa de producción de metano 2.3 veces mayor que en el proceso de metanogénesis convencional y una fase lag casi nula. La conductividad de la nanomagnetita disminuyó efectivamente la resistencia de la biopelícula y facilitó la transferencia de electrones y la transferencia de masa durante la vía electroquímica de la metanogénesis, incluso cuando los metanógenos no estaban cerca de la superficie del electrodo.

En una investigación reciente se muestra el uso de materiales conductores como la magnetita aplicada a la etapa acidogénica y con CAG aplicado a la etapa acidogénica, utilizando agua residual sintética de la industria de lácteos como sustrato (Zhao *et al.*, 2017). Los resultados indican que el reactor con magnetita tenía una ventaja considerable en la degradación de compuestos orgánicos complejos, con producción significativa de hidrógeno que permitió enriquecer la comunidad metanogénica hidrogenotrófica. Por otro lado, el reactor con CAG permitió la conversión sintrófica de los productos de la fermentación a metano vía DIET, obteniendo tasas de producción de metano superiores.

Tabla 2. Impacto de materiales conductores de origen metálico (o combinados) en la digestión anaerobia

Material conductor ^a	Inóculo	Sustrato ^b	Resultado ^c	Referencia
Magnetita y hematita (20 mM)	Mixto	Etanol, acetato	+1.4 producción CH ₄	Kato <i>et al.</i> , 2012
Magnetita (25mM)	Lodo anaerobio	Propionato	+1.3 producción CH ₄ 62% decremento en FL	Cruz Viggí <i>et al.</i> , 2014
Magnetita Oxihidróxido de Hierro III (20mM)	Lodo anaerobio	AR industria láctea	27% decremento en FL +3.03 TP CH ₄	Baek <i>et al.</i> , 2015
Magnetita (6.4 mM)	Mixto	Butirato	+3.0 producción CH ₄	Li <i>et al.</i> , 2015
Magnetita, hematita (25 mM)	Mixto	Benzoato	29% decremento en FL	Zhuang <i>et al.</i> , 2015
Magnetita (27 g/L)	Lodo anaerobio	AR	+7.3% producción CH ₄	Peng <i>et al.</i> , 2018
Magnetita (150–250µm)	Lodo anaerobio	AR Fischer-Tropsch	+48.6% producción CH ₄	Wang <i>et al.</i> , 2018
Magnetita (10 g/L)	Lodo anaerobio	AR sintética	+2.78 producción CH ₄ 48% decremento en FL	Yin <i>et al.</i> , 2018
Magnetita Urea con Fe ₃ O ₄ (25 a 75 mg/L)	Efluente anaerobio	Residuos de comida	+1.45 producción CH ₄	Ali <i>et al.</i> , 2019
Magnetita (1.5 g/L)	Lodo mixto	Glicerol	+6% producción CH ₄	Im <i>et al.</i> , 2019
Magnetita (5-350 mmol)	Lodo anaerobio	AR porcina	+16.1% producción CH ₄	Zhang <i>et al.</i> , 2019
Nanomagnetita (10 mM)	Mixto	Butirato	+90% producción CH ₄	Zhang y Lu., 2016
Nanomagnetita (2.5 g/L)	Lodo anaerobio	AR industria láctea	+2.3 producción CH ₄	Ren <i>et al.</i> , 2019
Magnetita-CAG (25 g/L, 40 g/L)	Lodo anaerobio	AR industria láctea	+80% TP CH ₄ +90% conversión CH ₄	Zhao <i>et al.</i> , 2017
Magnetita-CAG (13.5 g/L)	Lodo anaerobio	Agua residual de PTAR.	+20% producción CH ₄	Peng <i>et al.</i> , 2018
CAG-NanoFe ⁰ (5 g/L)	Lodo anaerobio	AR sintética con tetraciclina	+21.2% producción CH ₄ +27 % contenido de CH ₄	Zhang <i>et al.</i> , 2018
BC-NanoFe ⁰ (2.5 g)	Lodo anaerobio	Lodo residual	+115% producción CH ₄	Zhang, Li, y Wang, 2019
CA magnético (0-400 mg/L)	Lodo anaerobio	Glucosa	+1.64 producción H ₂	Fan <i>et al.</i> , 2019
TC-óxido férrico	Lodo anaerobio	Propionato	+19.6% producción CH ₄	Xu <i>et al.</i> , 2020
Acero inoxidable (0.2–0.8 g/L)	Lodo anaerobio	Acetato	+4.5 producción CH ₄	Li <i>et al.</i> , 2017
Fierro, Fe ²⁺ (400 mg/L)	Metanogénicos	AR porcina	+2.46 producción CH ₄	Wang <i>et al.</i> , 2020

Nota: ^a CAG: carbón activado granular; BC: biocarbón; TC: tela de carbón.

^b AR: agua residual.

^c “+” se refiere al incremento (veces o %) respecto al control; TP: tasa de producción; FL: fase lag.

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIÓN

El conocimiento fundamental y los avances tecnológicos de los procesos de digestión anaerobia han evolucionado significativamente en las últimas décadas. Por tal motivo, es necesario documentar los avances científicos y tecnológicos por medio de la revisión bibliográfica, que permite tener trabajos con datos actualizados que formen parte del conocimiento universal, que es el objetivo del presente documento. El metano es una fuente de energía renovable que se puede producir en sistemas controlados de bioingeniería a partir de una amplia gama de sustratos orgánicos, incluyendo residuos agroindustriales. El tipo de material conductor, el sustrato y el modo de operación de los sistemas de digestión anaerobia son los que definirán la producción de metano. Los mecanismos de producción de metano involucrados con el uso de materiales conductores no han sido completamente elucidados; sin embargo, algunas características como la conductividad eléctrica, potencial redox, área específica, capacidad de transferencia de electrones y la rugosidad de los materiales parecen ser factores importantes. El uso de materiales conductores permite establecer comunidades microbianas que soporten el proceso DIET y que permitan mejorar la productividad de metano como la fase lag, tasa de producción, cantidad y calidad del metano, acoplado a altas eficiencias de degradación de la materia orgánica. Además, la combinación de materiales es una solución prometedora para incrementar la eficiencia de la digestión anaerobia y fomentar la industria del biogás, con el fin de cumplir con la demanda de energía actual y en el futuro.

AGRADECIMIENTOS

Vianey A. Burboa y Miriam Orrantia agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) por la beca recibida postdoctoral y doctoral, respectivamente. Este trabajo fue realizado bajo el apoyo del Programa de Fortalecimiento a la Investigación (Pro-fapi 2023) del Instituto Tecnológico de Sonora.

REFERENCIAS

- Acosta, Y. y Obaya, M. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *Revista ICIDCA*, 1, 35-48.
- Ali, A., Mahar R. B. y Sherazi, S. T. H. (2020). Methane Augmentation of Anaerobic Digestion of Food Waste in the Presence of Fe₃O₄ and Carbamide Capped Fe₃O₄ Nanoparticles. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 4093-4107.
- Álvarez, J. A. (2003). *Tratamiento anaerobio de aguas residuales urbanas en planta piloto*. (Tesis doctoral). Departamento de Física, Química e Ingeniería Química. Universidad de Coruña.
- Baek, G., Kim, J., Cho, K., Bae, H., y Lee, C. (2015). The Biostimulation of Anaerobic Digestion with (Semi)Conductive Ferric Oxides: Their Potential for Enhanced Biomethanation. *Applied Microbiology And Biotechnology*, 99(23), 10355-10366. doi: 10.1007/s00253-015-6900.
- Buckel, W. y Thauer, R. K. (2013). Energy Conservation Via Electron Bifurcating Ferredoxin Reduction and Proton/Na⁺ Translocating Ferredoxin Oxidation. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 1827(2), 94-113. doi: 10.1016/j.bbabi.2012.07.002.
- Burboa Charis, V. A. y Alvarez, L. H. (2020). Methane Production from Antibiotic Bearing Swine Wastewater Using Carbon Based Materials as Electrons' Conduits during Anaerobic Digestion. *International Journal of Energy Research*, 44(13), 10996-11005.
- Chen, S., Rotaru, A., Shrestha, P. M., Malvankar, N. S., Liu, F., Fan, W., Nevin, K. P. y Lovley, D. R. (2014). Promoting Interspecies Electron Transfer with Biochar. *Scientific Reports*, 4, 5019. <https://doi.org/10.1038/srep05019>.
- Chen, Y., Cheng, J. J. y Creamer, K. S. (2007). Inhibition of Anaerobic Digestion Process: A Review. *Bioresourcetechnology*, 99(10), 4044-4064. doi:10.1016/j.biortech.2007.01.057.
- Cruz Viggì, C., Rossetti, S., Fazi, S., Paiano, P., Majone, M. y Aulenta, F. (2014). Magnetite Particles Triggering a Faster and More Robust Syntrophic Pathway of Methanogenic Propionate Degra-

- dition. *Environmental Science and Technology*, 48(13), 7536-7543. doi:10.1021/es5016789.
- Dang, Y., Holmes, D. E., Zhao, Z., Woodard, T. L., Sun, D., Wang, L., Nevin, K. P. y Lovley, D. R. (2016). Enhancing Anaerobic Digestion of Complex Organic Waste with Carbon-Based Conductive Materials. *Bioresource Technology*, 220, 516-522. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.114>.
- Fagbohunbe, M. O., Herbert, B. M. J., Hurst, L., Li, H., Shams, Q. y Semple, K. T. (2016). Impact of Biochar on the Anaerobic Digestion of Citrus Peel Waste. *Bioresource Technology*, 216, 142-149. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.106>.
- Fan, C., Zhang, J. y Zang, L. (2019). Improving Biohydrogen Evolution from Glucose with Magnetic Activated Carbon. *Water, Air, & Soil Pollution*, 230(5). doi:10.1007/s11270-019-4155-4.
- Gujer, W. y Zehnder, A. J. B. (1983). Conversion Processes in Anaerobic Digestion. *Water Science and Technology*, 127-167.
- Ha, P. T., Lindemann, S. R., Shi, L., Dohnalkova, A., Fredrickson, J. K., Madigan, M. T. y Beyenal, H. (2017). Syntrophic Anaerobic Photosynthesis Via Direct Interspecies Electron Transfer. *Nature Communications*, 8, 1-7. doi: 10.1038/ncomms13924.
- Im, S., Yun, Y. M., Song, Y. C. y Kim, D. H. (2019). Enhanced Anaerobic Digestion of Glycerol by Promoting DIET Reaction. *Biochemical Engineering Journal*, 142, 18-26.
- Jang, H. M., Choi, Y. K. y Kan, E. (2018). Effects of Dairy Manure-Derived Biochar on Psychrophilic, Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Digestions of Dairy Manure. *Bioresource Technology*, 1(250), 927-931.
- Junginger, M., De Visser, E., Hjort-Gregersen, K., Koornneef, J., Raven, R., Faaij, A. y Turkenburg, W. (2006). Technological Learning in Bioenergy Systems. *Energy Policy*, 34(18), 4024-4041. doi:10.1016/j.enpol.2005.09.012.
- Kato, S. (2015). Biotechnological Aspects of Microbial Extracellular Electron Transfer. *Microbes and Environments*, 30(2), 133-139. doi:10.1264/jsme2.me15028.
- Kato, S., Hashimoto, K. y Watanabe, K. (2012). Methanogenesis Facilitated by Electric Syntrophy Via (Semi)Conductive Iron-Oxide Minerals. *Environmental Microbiology*, 14: 1646-1654. doi: 10.1111/j.1462-2920.2011.02611.x.
- Kracke, F., Vassilev, I. y Kromer, J. O. (2015). Microbial Electron Transport and Energy Conservation. The Foundation for Optimizing Bioelectrochemical Systems. *Frontiers in Microbiology*, 6. doi:10.3389/fmicb.2015.00575.
- Leang, C., Qian, X., Mester, T. y Lovley, D. R. (2010). Alignment of the C-Type Cytochrome Omcs Along Pili of Geobacter Sulfurreducens. *Applied and Environmental Microbiology*, 76, 4080-4084. doi: 10.1128/AEM.00023-10.
- Lee, J., Lee, S. y Park, H. (2016). Enrichment of Specific Electro-Active Microorganisms and Enhancement of Methane Production by Adding Granular Activated Carbon in Anaerobic Reactors. *Bioresource Technology*, 205, 205-212. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.054>.
- Li, H., Chang, J., Liu, P., Fu, L., Ding, D. y Lu, Y. (2020). Direct Interspecies Electron Transfer Accelerates Syntrophic Oxidation of Butyrate in Paddy Soil Enrichments. *Environmental Microbiology*, 17(5), 1533-1547. <http://doi.wiley.com/10.1111/1462-2920.12576>.
- Li, Y., Chen, Y. y Wu, J. (2019). Enhancement of Methane Production in Anaerobic Digestion Process: A Review. *Applied Energy*, 240, 120-137. doi:10.1016/j.apenergy.2019.01.24.
- Li, Y., Zhang, Y., Yang, Y., Quan, X. y Zhao, Z. (2017). Potentially Direct Interspecies Electron Transfer of Methanogenesis for Syntrophic Metabolism Under Sulfate Reducing Conditions with Stainless Steel. *Bioresource Technology*, 1(234), 303-309.
- Lin, R., Cheng, J., Zhang, J., Zhou, J., Cen, K. y Murphy, J. D. (2017). Boosting Biomethane Yield and Production Rate with Graphene: The Potential of Direct Interspecies Electron Transfer in Anaerobic Digestion. *Bioresource Technology*, 239, 345-352. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.017>.
- Liu, F., Rotaru, A., Shrestha, P. M., Malvankar, N. S., Nevin, K. P. y Lovley, D. R. (2012a). Promoting Direct Interspecies Electron Transfer with Activated Carbon. *Environmental Science*, 8982-8989.
- Liu, F., Rotaru, A., Shrestha, P. M., Malvankar, N. S., Nevin, K. P. y Lovley, D. R. (2012b). Promoting Direct Interspecies Electron Transfer with Activated

- Carbon. *Energy & Environmental Science*, 5(10), 8982-8989. doi: 10.1039/c2ee22459c.
- Lovley, D. R. (2017). Syntrophy Goes Electric: Direct Interspecies Electron Transfer. *Annual Review of Microbiology*, 71, 643-664. doi: 10.1146/annurev-micro-030117-020420.
- Lü, F., Luo, C., Shao, L. y He, P. (2016). Biochar Alleviates Combined Stress of Ammonium and Acids by Firstly Enriching Methanosaeta and then Methanosarcina. *Water Research*, 90, 34-43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2015.12.029>.
- Luo, C. y Lu, F. (2014). Application of Eco-Compatible Biochar in Anaerobic Digestion to Relieve Acid Stress and Promote the Selective Colonization of Functional Microbes. *Water Research*, 68, 710-718. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2014.10.052>.
- Malvankar, N. S., Vargas, M., Nevin, K. P., Franks, A. E., Leang, C., Kim, B.-C., Inoue, K., Mester, T., Covalla, S. F., Johnson, J. P., Rotello, V. M., Tuominen M. T. y Lovley, D. (2011). Tunable Metallic-Like Conductivity in Microbial Nanowire Networks. *Nature Nanotechnology*, 6(9), 573-579. doi: 10.1038/nnano.2011.119.
- Martins, G., Salvador, A. F., Pereira, L. y Alves, M. M. (2018). Methane Production and Conductive Materials: A Critical Review. *Environmental Science and Technology*, 52, 10241-10253. doi: 10.1021/acs.est.8b01913.
- Martínez, C. M. y Alvarez, L. H. (2018). Application of Redox Mediators in Bioelectrochemical Systems. *Biotechnology advances*, 36(5), 1412-1423.
- Morita, M., Malvankar, N. S., Franks, A. E., Summers, Z. M., Giloteaux, L., Rotaru, A. E. Rotaru, C. y Lovley, D. R. (2011). Potential for Direct Interspecies Electron Transfer in Methanogenic Wastewater Digester Aggregates. *MBio*, 2(4), 10-1128.
- Mumme, J., Srocke, F., Heeg, K. y Werner, M. (2014). Use of Biochars in Anaerobic Digestion. *Biore-source technology*, 164, 189-197. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.008>.
- Münster, M. y Lund, H. (2010). Comparing Waste-to-Energy Technologies by Applying Energy System Analysis. *Waste Management*, 30, 1251-1263. doi: 10.1016/j.wasman.2009.07.001.
- Park, J., Kang, H., Park, K. y Park, H. (2018). Direct Interspecies Electron Transfer Via Conductive Mate-rials: A Perspective for Anaerobic Digestion Appli-cations. *Biore-source Technology*, 254, 300-311. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.095>.
- Parra, R. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos bio-tecnológicos en el tratamiento de aguas residua-les y su aplicación en la industria. *Producción + Limpia*, 10(2), 142-159.
- Peng, H., Zhang, Y., Tan, D., Zhao, Z., Zhao, H. y Quan, X. (2017). Roles of Magnetite and Granular Activa-ted Carbon in Improvement of Anaerobic Sludge Digestion. *Biore-source Technology*, 249, 666-672.
- Pham, T. H., Aelterman, P. y Verstraete, W. (2009). Bioanode Performance in Bioelectrochemical Systems: Recent Improvements and Prospects. *Trends in Biotechnology*, 27(3), 168-178. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2008.11.005>.
- Prehn M. y Cumana I. (2010). *La bioenergía en México: estudios de caso, 2010*. Morelia: Red Mexicana de Bioenergía.
- Qadeer, R. y Hanif, J. (1994). Kinetics of Zirconium Ions Adsorption on Activated Charcoal from Aqueous Solutions. *Carbon*, 32, 8, 1433-1439. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(94\)90137-6](https://doi.org/10.1016/0008-6223(94)90137-6).
- Ren, G., Chen, P., Yu, J., Liu, J., Ye, J. y Zhou, S. (2019). Recyclable Magnetite-Enhanced Electrometha-nogenesis for Biomethane Production from Was-tewater. *Water Research*, 166, 115095. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115095>.
- Rotaru, A. E., Shrestha, P. M., Liu, F., Markovaite, B., Chen, S., Nevin, K. P. y Lovley, D. R. (2014). Direct Interspecies Electron Transfer Between *Geobac-ter metallireducens* and *Methanosarcina barkeri*. *Applied and Environmental Microbiology*, 80(15), 4599-4605. doi: 10.1128/AEM.00895-14.
- Sharma, D., Mahajan, R. y Goel, G. (2019). Insights into Direct Interspecies Electron Transfer Mechanisms for Acceleration of Anaerobic Digestion of Wastes. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(4), 2133-2142.
- Stams, A. J. M., De Bok, F. A. M., Plugge, C. M., Van Ee-kert, M. H. A., Dolfling, J. y Schraa, G. (2006). Exo-cellular Electron Transfer in Anaerobic Microbial Communities. *Environmental Microbiology*, 8, 371-382. doi: 10.1111/j.1462-2920.2006.00989.x.
- Summers, Z. M., Fogarty, H. E., Leang, C., Franks, A. E., Malvankar, N. S. y Lovley D. R. (2010). Direct

- Exchange of Electrons within Aggregates of an Evolved Syntrophic Coculture of Anaerobic Bacteria. *Science*, 80(330), 1413-1415. doi: 10.1126/science.1196526.
- Teng, Z., Hua, J., Wang, C. y Lu, X. (2014). Design and Optimization Principles of Biogas Reactors in Large Scale Applications. *Sustainable Energy Technology*, 99-134.
- Tian, T., Qiao, S., Li, X., Zhang, M. y Zhou, J. (2017). Nano-Graphene Induced Positive Effects on Methanogenesis in Anaerobic Digestion. *Biore-source Technology*, 224, 41-47. doi:10.1016/j.biortech.2016.10.058.
- Van Lier, J. B., Mahmoud, N. y Zeeman, G. (2008). *Anaerobic wastewater treatment. Biological wastewater treatment: principles, modelling and design*. Londres: IWA, 415-456.
- Wang, O., Zheng, S., Wang, B. y Wang, W. (2018). Necessity of Electrically Conductive Pili for Methanogenesis with Magnetite Stimulation. *Peer J.*, 21, 6:e4541. doi: 10.7717/peerj.4541.
- Wang, S., Yuan, R., Liu, C. y Zhou, B. (2020). Effect of Fe²⁺ Adding Period on the Biogas Production and Microbial Community Distribution during the Dry Anaerobic Digestion Process. *Process Safety and Environmental Protection*, 136, 234-241.
- Watanabe, K. (2008). Recent Developments in Microbial Fuel Cell Technologies for Sustainable Bioenergy. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 106(6), 528-536. <http://dx.doi.org/10.1263/jbb.106.528>.
- Weiland, P. (2010). Biogas Production: Current State and Perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85, 849-860.
- Xu, S., He, C., Luo, L., Lü, F., He, P. y Cui, L. (2015). Comparing Activated Carbon of Different Particle Sizes on Enhancing Methane Generation in Upflow Anaerobic Digester. *Biore-source Technology*, 196, 606-612. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.018>.
- Xu, Y., Wang, M., Yu, Q. y Zhang, Y. (2020). Enhancing Methanogenesis from Anaerobic Digestion of Propionate with Addition of Fe Oxides Supported on Conductive Carbon Cloth. *Biore-source technology*, 302, 122796.
- Yang, Y., Zhang, Y., Li, Z., Zhao, Z., Quan, X. y Zhao, Z. (2017). Adding Granular Activated Carbon into Anaerobic Sludge Digestion to Promote Methane Production and Sludge Decomposition. *Journal of Cleaner Production*, 149, 1101-1108. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.02.156.
- Yenigun, O. y Demirel, B. (2013). Ammonia Inhibition in Anaerobic Digestion: A Review. *Process Biochemistry*, 48, 901-911.
- Yin, Q., Yang, S., Wang, Z., Xing, L. y Wu, G. (2018). Clarifying Electron Transfer and Metagenomic Analysis of Microbial Community in the Methane Production Process with the Addition of Ferroferric Oxide. *Chemical Engineering Journal*, 333, 216-225. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.160>.
- Zhang, J. y Lu, Y. (2016). Conductive Fe₃O₄ Nanoparticles Accelerate Syntrophic Methane Production from Butyrate Oxidation in Two Different Lake Sediments. *Frontiers in Microbiology*, 22(7):1316. doi: 10.3389/fmicb.2016.01316.
- Zhang, J., Zhao, W., Zhang, H., Wang, Z., Fan, C. y Zang, L. (2018). Recent Achievements in Enhancing Anaerobic Digestion with Carbon-Based Functional Materials. *Biore-source Technology*, 266, 555-567. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.076>.
- Zhang, M., Li, J. y Wang, Y. (2019). Impact of Biochar-Supported Zerovalent Iron Nanocomposite on the Anaerobic Digestion of Sewage Sludge. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(10), 10292-10305.
- Zhao, Z., Li, Y., Quan, X. y Zhang, Y. (2017). Towards Engineering Application: Potential Mechanism for Enhancing Anaerobic Digestion of Complex Organic Waste with Different Types of Conductive Materials. *Water Research*, 115, 266-277. doi:10.1016/j.watres.2017.02.067.
- Zhao, Z., Zhang, Y., Woodard, T. L., Nevin, K. P. y Lovley, D. R. (2015). Enhancing Syntrophic Metabolism in Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket Reactors with Conductive Carbon Materials. *Biore-source technology*, 191, 140-145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.007>.
- Zhuang, L., Tang, J., Wang, Y., Hu, M. y Zhou, S. (2015). Conductive Iron Oxide Minerals Accelerate Syntrophic Cooperation in Methanogenic Benzoate Degradation. *Journal of Hazardous Materials*, 293(808), 37-45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.03.039>.

NOTAS DE AUTOR

^a Doctora en Ciencias con especialidad en Biotecnología egresada del Instituto Tecnológico de Sonora. Actualmente es profesora de asignatura y posdoctorante del Departamento de Ciencias Agronómicas y Veterinarias del Instituto Tecnológico de Sonora. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel 1. Su línea de investigación es el manejo y aprovechamiento de residuos para la generación de bioenergía y tratamiento de aguas residuales. Correo electrónico: vburboach@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7210-7219>

Últimas publicaciones

Romero-Villegas, G. I., Burboa-Charis, V. A., Navarro-López, E., Cerón-García, M. C., Acién-Fernandez, F. G., Estrada-Alvarado, M. I., Rout, N. P. y Cira-Chávez, L. A. (2021). Biomass Production and Urban Centrate Nutrient Removal Using Native Microalgae Tolerant to High Nitrogen Concentration and Temperature. *Journal of Applied Phycology*. <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02487-z>.

Burboa, V. y Alvarez, L. H. (2020). Methane Production from Antibiotic Bearing Swine Wastewater Using Carbon-Based Materials as Electrons Conduits During Anaerobic Digestion. *International Journal of Energy Research*, 1-10. <https://doi.org/10.1002/er.5616>.

Orrantia, M., Meza-Escalante, E. R., Burboa-Charis, V. A., García-Reyes, R. B., Atilano-Camino, M. M., Serrano-Palacios, D., Leyva, L. A., Del Angel, Y. A., Alvarez, L. H. (2023). Granular Activated Carbon Enhances the Anaerobic Digestion of Solid and Liquid Fractions of Swine Effluent at Different Mesophilic Temperatures. *Anaerobe*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2023.102782>.

^b Maestra en Ingeniería de Sistemas egresada del Instituto Tecnológico de Sonora. Estudiante del Doctorado en Ciencias con especialidad en Biotecnología del Instituto Tecnológico de Sonora. Su línea de investigación es la producción de biocombustibles gaseosos a partir de residuos agropecuarios e industriales. Correo electrónico:

miriamorrantia@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3838-755X>

Últimas publicaciones

Orrantia, M., Meza-Escalante, E. R., Burboa-Charis, V. A., García-Reyes, R. B., Atilano-Camino, M. M., Serrano-Palacios, D., Leyva, L. A., Del Angel, Y. A., Alvarez, L. H. (2023). Granular Activated Carbon Enhances the Anaerobic Digestion of Solid and Liquid Fractions of Swine Effluent at Different Mesophilic Temperatures. *Anaerobe*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2023.102782>.

^c Doctor en Ciencias Ambientales por el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. Profesor de tiempo completo del Departamento de Ciencias Agronómicas y Veterinarias del Instituto Tecnológico de Sonora. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel 2. Sus líneas de investigación son la biotransformación y biodegradación de compuestos recalcitrantes y la producción de bioenergía a partir de residuos agroindustriales. Correo electrónico: luis.alvarez@itson.edu.mx
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1809-9304>

Últimas publicaciones

Orrantia, M., Meza-Escalante, E. R., Burboa-Charis, V. A., García-Reyes, R. B., Atilano-Camino, M. M., Serrano-Palacios, D., Leyva, L. A., Del Angel, Y. A., Alvarez, L. H. (2023). Granular Activated Carbon Enhances the Anaerobic Digestion of Solid and Liquid Fractions of Swine Effluent at Different Mesophilic Temperatures. *Anaerobe*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2023.102782>.

Valdez, M., Bobadilla, Y., Alvarez, L. H., Garcia, R. B. y Martínez, C. M. (2022). Separation of Swine Wastewater into Solid and Liquid Fractions and its Influence on Methane Production with Granular and Disperse Sludge. *Biotecnica*, 24(1), 107-115. doi: <https://doi.org/10.18633/biotecnica.v24i1.1537>.

González, P., Aguilar, A., Reynosa, A., Durán, U., Garzón, M., Meza, E., Alvarez, L. H. y Serrano, D. (2022). Organic Matter Removal in a Simultaneous Nitrification-Denitrification Process Using Fixed-Film System. *Scientific Reports*, 12, 1882. doi.org/10.1038/s41598-022-05521-3.