

FERMENTACIÓN OSCURA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

Dark Fermentation for Hydrogen Production

Héctor Alfredo López-Aguilar,¹ Elliott Humberto Luna Nevarez¹

Resumen

Desde la Revolución industrial se ha perpetuado un sistema de producción en el que el uso de combustibles fósiles ha sido el escenario más común y rentable a corto plazo. Ello ha ocasionado el cambio climático global, causando alteraciones en la temperatura y los patrones de precipitación. Actualmente, es de vital importancia la búsqueda de combustibles alternativos, que minimicen la contaminación ambiental, así como reusar, reciclar y reutilizar los residuos obtenidos en los procesos de producción. En este trabajo se presenta la tecnología de fermentación oscura (FO) para la producción de hidrógeno, como un proceso amigable con el ambiente, con potencial para producir hidrógeno y atender la demanda energética, además de propiciar la disposición de los residuos orgánicos, tanto agrícolas como urbanos, y transformarlos en productos de valor. El presente trabajo es un análisis del estado del arte del proceso de FO para la producción de biohidrógeno, que analiza los microorganismos participantes y las principales acciones que es necesario realizar para mejorar el rendimiento del proceso biotecnológico. La naturaleza y el tipo de investigación fueron cualitativa y exploratoria, respectivamente, y la metodología utilizada en la misma fue bibliográfica/documental. Se pretende que la información recopilada pueda ser utilizada como base para futuras investigaciones y desarrollo de tesis. Se concluye que el aprovechamiento de la biomasa residual a partir de su transformación en hidrógeno por medio de la FO, tiene potencial para generar beneficios para la sociedad y contribuir al desarrollo sostenible en la producción de energéticos.

Palabras clave

Bacterias anaerobias, Biocombustibles, Biohidrógeno, Residuos

Abstract

Since the industrial revolution, a production system has been perpetuated in which the use of fossil fuels has been the most common and profitable production scenario in the short term. What has caused global climate change, causing alterations in temperature and precipitation patterns. Currently, the search for alternative fuels that minimize environmental pollution, as well as reuse, recycle, and reuse the waste produced in production processes is of vital importance. The dark fermentation technology for hydrogen production is presented as an environmentally friendly process, with the potential for hydrogen production and meeting energy demand. In addition to promoting the disposal of organic waste, both agricultural and urban, and transforming them into valuable products. The present work is an analysis of the state of the art of the dark fermentation process for the production of biohydrogen, the participating microorganisms and the main actions to improve the performance of the biotechnological process. The nature and type of research was qualitative and exploratory, respectively, and the methodology used for this research was bibliographic / documentary. It is intended that the information collected can be used as a basis for future research and thesis development. It is concluded that the use of residual, agricultural and / or urban biomass, from its transformation into hydrogen, through dark fermentation, has the potential to generate benefits for society, contributing to sustainable development in energy production.

Keywords

Anaerobic bacteria, Biofuels, Biohydrogen, Wastes.

<https://doi.org/10.56643/rcia.v1i1.152>

Como citar este artículo: López, H., Luna, E. (2022). Fermentación oscura para la producción de hidrógeno. Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura, 1(1), 22-29. DOI: <https://doi.org/10.56643/rcia.v1i1.152>

Recibido: 01/07/2021 | Aceptado: 22/11/2021 | Publicado: diciembre de 2022

Héctor Alfredo López Aguilar

<https://orcid.org/0000-0001-7324-1700>

Elliott Humberto Luna Nevárez

¹Universidad La Salle de Chihuahua, Escuela de Ingenierías.

Autor para correspondencia: helopez@ulsachihuahua.edu.mx

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.
La investigación fue financiada con recursos de los autores.

1. INTRODUCCIÓN

La búsqueda de la sostenibilidad nunca había sido tan importante en la historia del hombre como lo es hoy en día. Actualmente es considerada en las agendas internacionales de los miembros de las Naciones Unidas (CEPAL, 2019). La sostenibilidad está arraigada en la conciencia social de la necesidad de alcanzar un balance entre el desarrollo humano y la conservación del ambiente (Sobrino, Monroy y Pérez, 2011). No obstante, la estabilidad mundial se encuentra amenazada por el cambio climático; probablemente éste sea el desafío más crítico que debe afrontar la humanidad en este siglo (University of Oxford, 2015).

Desde la Revolución industrial se han utilizado combustibles de origen fósil como fuente de energía. El uso de este tipo de combustibles está asociado a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente CO₂, cuya producción ha aumentado un 40% desde dicha revolución (Moreira y Pires, 2016). El incremento en las emisiones de CO₂ ha afectado los patrones climáticos naturales de la tierra, ocasionando cambios de temperatura y patrones de precipitación atípicos (Costello y otros, 2009). Para mitigar el cambio climático, se debe fomentar el uso de sistemas de combustible de baja emisión de carbono (Von Christiansen y Haselip, 2018). El hidrógeno (H₂) no genera emisiones de CO₂; el producto de su combustión es agua. La generación de hidrógeno (H₂) puede lograrse mediante la utilización de residuos orgánicos a través de los procesos biológicos (Mirza, Qazi, Liang y Chen, 2019; Lu y otros, 2019). Se ha encontrado que el H₂ es un combustible limpio, que desempeñará un papel clave en la transición hacia un sistema energético sostenible en 2050 (Staffell y otros, 2019). En el presente trabajo se realiza una revisión y análisis del estado del arte de la tecnología de fermentación oscura para la producción de biohidrógeno. Se espera que la información presentada sirva de base y material de consulta para la realización de futuras investigaciones y el desarrollo de trabajos de tesis para la formación de ingenieros, especialmente en el área de las energías alternativas.

2. CRITERIOS METODOLÓGICOS

La naturaleza de la presente investigación es cualitativa, ya que el fenómeno se aborda desde un enfoque interpretativo del estado de arte disponible.

El tipo de investigación es exploratorio, debido a que se busca encontrar la solución a una problemática emergente, como es la necesidad de combustibles disponibles y la disposición de los residuos orgánicos. La metodología de esta investigación es bibliográfica/documental, pues se basa en el análisis de artículos científicos publicados en revistas internacionales indexadas. Su alcance es transversal y se basa en información publicada previamente.

3. RESULTADOS

Biohidrógeno y fermentación oscura

El hidrógeno es un vector o portador promotor de energía; puede ser producido mediante procesos biológicos, menos costosos energéticamente y más amigables con el ambiente en términos globales de reducción de la emisión de CO₂. Se ha encontrado que las tecnologías de producción de biohidrógeno renovable tienen potencial para volverse competitivas en costos, ya que pueden usar biomasa residual como materia prima (Kotay y Das, 2008), por ejemplo, residuos municipales, de la agricultura y la industria, así como aguas residuales.

El biohidrógeno puede ser producido por organismos autótrofos y heterótrofos (Kotay y Das, 2008; Koutsopoulos, Fotidis, Tsolakis y Martsopoulos, 2009) a partir de catálisis microbiana, ya sea en presencia o ausencia de fuentes de luz (Azwar, Hussain y Abdul, 2014; Show y otros, 2019); también puede ser generado mediante fotofermentación y biofotólisis (Eroglu y Melis, 2011; Mishra, Roy y Mohanty, 2019) y por medio de fermentación oscura (FO) (Banu, Kavitha,

Kannah, Bhosale y Kumar, 2020; Ghimire A. y otros, 2015).

De todos los métodos biológicos utilizados para producir hidrógeno, el más prometedor y amigable con el ambiente es la FO (Bedoya, Castellón, Ramírez y Arias Zabala, 2008). Se trata de un proceso biológico en el que microorganismos degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno para producir una mezcla gaseosa llamada biogás, compuesta en su mayoría por hidrógeno y bióxido de carbono, y una mezcla sólida denominada digestato, que contiene ácidos grasos volátiles, alcoholes, carbohidra-

tos, lípidos y proteínas, entre otros compuestos (Pandey, 2013; Suntomauro y otros, 2018).

La FO es una etapa intermedia de la degradación de materia orgánica en condiciones anaerobias y se desarrolla en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (figura 1). La metanogénesis es la etapa determinante, pues en ella se consume el H₂ producido en la fermentación para producir CH₄. Por lo anterior, es necesario buscar métodos que inhiban la etapa de metanogénesis, pues, para producir H₂, es vital su desaparición (Valdez-Vázquez y Poggi-Varaldo, 2009).

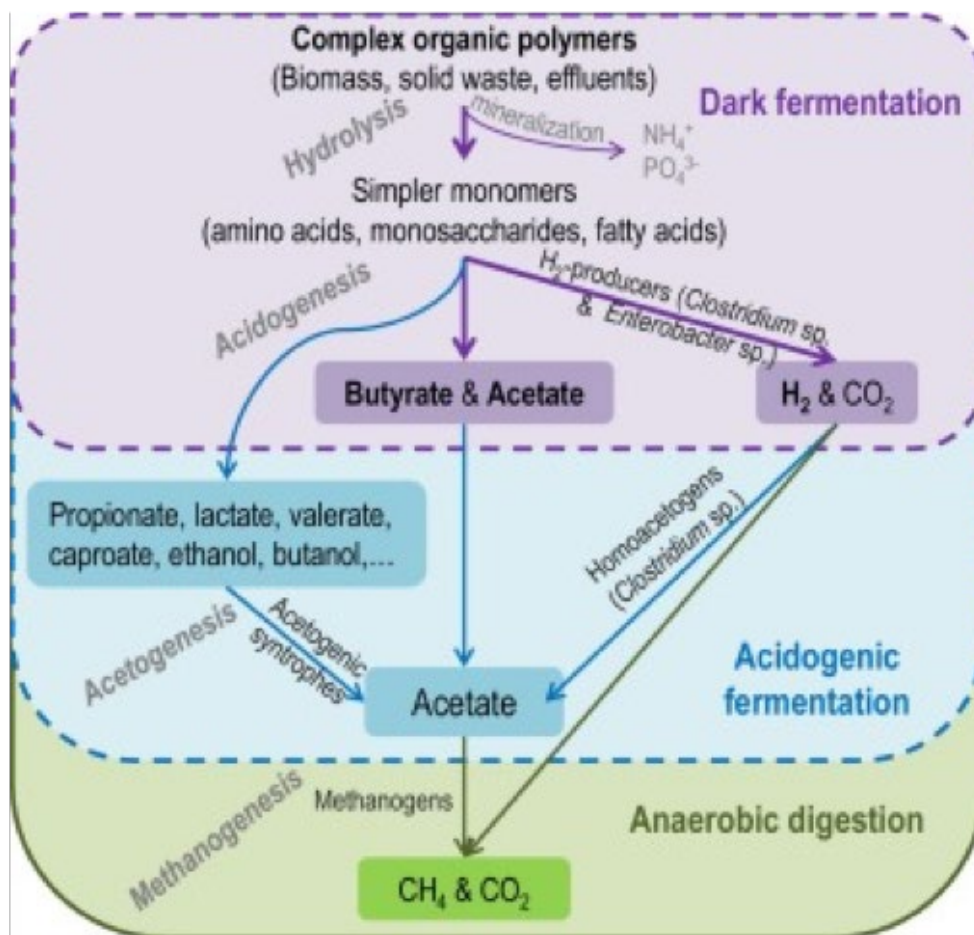


Figura. 1 Relación entre digestión anaeróbica, fermentación acidogénica, fermentación y fermentación oscura (Saady, 2013).

Es posible inhibir la etapa de metanogénesis empleando diferentes métodos, como el control biocinético (control de la carga orgánica, el tiempo de residencia hidráulica y el pH) y los pretratamientos del inóculo, los cuales pueden ser térmicos y químicos. El pretratamiento térmico es uno de los más utilizados y consiste en inactivar los microorganismos metanogénicos y seleccionar aquellos que producen esporas en condiciones de estrés térmico (Valdez-Vásquez y Poggi-Varaldo, 2009).

La FO de carbohidratos complejos por microbiota anaeróbica mezclada puede dar lugar a una amplia gama de intermediarios y derivados, dependiendo de los parámetros operacionales, por ejemplo, el tipo de sustrato, la carga de sustrato, el pH, la temperatura y otras condiciones operativas y ambientales.

MICROORGANISMOS EN LA FO

Las bacterias anaeróbicas fermentativas —*Enterobacter*, *Bacillus* y *Clostridium*— pueden producir H₂ mediante procesos de FO (Dong-Hoon y Kim, 2011). Las bacterias más comúnmente utilizadas en la FO son las pertenecientes al género *Clostridium*, que comprenden *buytricum*, *thermolacticum*, *pasteurianum* y *bifermentans* (Bao, Su y Tan, 2012). El género *Clostridium* es una bacteria gram positiva con alta producción de H₂, debido a que tiene una ruta metabólica versátil; se identificó que, junto con la generación de H₂, puede producir diferentes derivados (Silva y otros, 2018).

La producción de hidrógeno por estas bacterias depende de ciertas condiciones del proceso, como pH, tiempo de retención hidráulica (HRT) y presión parcial del gas. La formación de los productos obedece a las condiciones ambientales en que crecen los microorganismos. Productos como etanol, butanol y lactato contienen hidrógeno que todavía no se ha liberado; así, para maximizar la cantidad de hidrógeno, el metabolismo de la bacteria debe enfocarse en la producción de ácidos grasos volátiles (VFA) (Chen y otros, 2005; Lin y Chen, 2006).

Estas bacterias utilizan inicialmente las rutas catabólicas de los polisacáridos, los aminoácidos y el glicerol para producir glucosa; poste-

riormente, la glucosa es transformada en piruvato vía glucólisis para seguir las rutas de la fermentación alcohólica, láctica y acética (Bedoya y otros, 2009). Las fermentaciones se llevan a cabo a diferentes temperaturas, desde mesófilas (25-40 °C), hasta termófilas (>50 °C), produciéndose biogás que contiene H₂, CO₂, CO, H₂S y, en algunos casos, CH₄ (Lin y Chang, 2004),

MEJORA DEL RENDIMIENTO DE LA FO

Para incrementar el rendimiento de la FO, es esencial usar microorganismos capaces de generar un alto rendimiento de hidrógeno, como los *Bacillus amyloliquefaciens* y *C. pasteurianum*, así como usar algunas técnicas avanzadas de fermentación co-cultivo. La aplicación de cepas mutantes obtenidas mediante ingeniería genética será prometedora en la FO. El desarrollo de sistemas integrados de FO con otras tecnologías, como la digestión anaeróbica, es importante para la valorización del efluente de FO, haciendo que la producción de biohidrógeno sea rentable y sostenible (Baeyens y otros, 2020).

El sustrato es un factor crucial para la producción de hidrógeno mediante fermentación oscura (Srivastava y otros, 2019). Las bacterias anaeróbicas de fermentación oscura son capaces de producir hidrógeno desde varias fuentes de carbono, como azúcares simples (por ejemplo, glucosa, sucrosa y lactosa), desechos que contienen almidón o celulosa, desechos de la industria alimentaria y aguas residuales.

Un método de producción de biocombustible rentable y amigable con el ambiente se desarrolla utilizando lenteja de agua como materia prima para la producción de biohidrógeno mediante FO, usando, simultáneamente, el residuo fermentado para producir lípidos de microalgas. Los resultados sugieren que la hidrólisis con 1% de H₂SO₄ es más adecuada para el pretratamiento de la biomasa de lenteja de agua. La producción máxima de hidrógeno fue de 169.30 mL g⁻¹. Después de la FO, en el residuo se detectaron ácidos grasos volátiles, incluyendo acetato y butirato, en concentraciones de 1.04 g L⁻¹ y 1.52 g L⁻¹, respectivamente (Mu y otros, 2020).

Asimismo, la adición de materiales a base de carbono al digestor puede promover el desempeño de ciertos procesos biológicos, incluyendo la digestión anaeróbica (Chen y otros, 2018; Pan y otros, 2019, Cimon, Kadota y Eskicioglu, 2019) y procesos de fermentación (Duan, y otros, 2019). Sunyoto et al. (2016) agregaron 8.3 g/L de biocarbón para aumentar el rendimiento de biohidrógeno en 25.8% de residuos de comida. Sharma y Melkania (2017) agregaron 12.5 g/L de biocarbón para incrementar la tasa de producción de biohidrógeno en 330% de residuos sólidos urbanos. Yang y Wang (2019) agregaron 600 mg/L de biocarbón de aserrín para aumentar la producción de biohidrógeno en 15.9%. Para cierto tipo de materiales a base de carbono existe un rango de concentración que puede promover el desempeño de los procesos de fermentación de manera factible (Lu y otros, 2020).

Se ha identificado que la biomasa lignocelulosa es una materia prima atractiva para la producción de hidrógeno mediante FO, debido a la abundancia y alto contenido de azúcar (40% de celulosa y 30% de hemicelulosa). Para reducir los costos asociados a la materia prima, el National Renewable Energy Laboratory (NREL) ha desarrollado el degradante de celulosa *Clostridium Thermocellum*; éste convierte las materias primas directamente en hidrógeno, sin depender de enzimas intermediarias (NREL, 2020).

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó un análisis del estado del arte del proceso de fermentación oscura para la producción de biohidrógeno. En este sentido, se identificaron los principales microorganismos participantes en la metabolización del H₂, así como las principales

acciones que pueden realizarse para mejorar el rendimiento en la producción de biohidrógeno.

Se concluye que el aprovechamiento de la biomasa residual, agrícola y/o urbana, a partir de su transformación en hidrógeno por fermentación oscura, presenta el potencial de generar beneficios para la sociedad, contribuyendo al desarrollo sostenible en la producción de energéticos, además de ofrecer una alternativa para la disposición de los residuos.

Se pretende que la información recopilada pueda ser utilizada como base para futuras investigaciones y desarrollo de tesis, principalmente para la formación de ingenieros en energías alternativas.

Referencias

- Azwar, M., Hussain, M., y Abdul, -W. A. (2014). Development of biohydrogen production by photobiological fermentation and electrochemical process: a review. *Renewable Sustainable Energy Review*, 31, 158-173 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.022>
- Baeyens, J., Huili, Z., Jiapei, N., Lise, A., Raf, D., Renaud, A., y Yimin, D. (2020). Reviewing the potential of biohydrogen production by fermentation. *Renewable and sustainable energy reviews*, 131, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110023>.
- Banu, J. R., Kavitha, S., Kannah, R. Y., Bhosale, R. R., y Kumar, G. (2020). Industrial waste water to biohydrogen: possibilities towards successful biorefinery route. *Bioresources Technology*, 298, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122378>.
- Bao, M., Su, H., y Tan, T. (2012). Biohydrogen Production by Dark Fermentation of Starch Using Mixed Bacterial Cultures of *Bacillus* sp and *Brevumdimonas* sp. *Energy and Fuels* 26(9) , 5872-5878. doi 10.1021/ef300666m.
- Bedoya, A., Castrillón, J., Ramírez, J., Vázquez, J. E., y Arias Zabaleta, M. (2008). Producción biológica de hidrógeno: una aproximación al estado del arte. *DYNA*. Año 75, (154), 137-157. <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v75n154/a14v75n154.pdf>
- Cepal (2019). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. Objetivos, metas e indicadores mundiales. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141_es.pdf
- Chen, S., Rotaru, A., E, Shrestha, P. M., Malvankar, N. S., Liu, F., ... Lovley, D. R. (2018). Promoting interspecies electron transfer with biochar. *Science Rep.* 4, 5019. <https://doi.org/10.1038/srep05019>
- Christiansen, L. von, y Haselip, J. (2018). *UN Environment Emissions Gap Report 2018*.
- Cimon, C., Kadota, P., y Eskicioglu, C. (2019). Effect of biochar and wood as ash amendment on biochemical methane production of wastewater sludge from a temperature phase anaerobic digestion process. *Bioresource Technology* 297, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122440>.
- Costello, A., Abbas, M., Allen, A., Ball, S., Bell, S., Bellamy, R., ... Lee, M. (2009). Managing the health effects of climate change: lancet and University College London Institute for Global Health Commission. *Lancet*. 373(9676), 1693-1733. doi: 10.1016/S0140-6736(09)60935-1.
- Dong-Hoon, K., y Kim, M.-S. (2011). Hydrogenases for biological hydrogen production. *Bioresource Technology*. 102(18), 8423-8431 doi 10.1016/j.biortech.2011.02.113.
- Duan, X., Chen, Y., Yan, Y. Y., Feng, L. Y., Chen, Y. G., y Zhou, Q. (2019). New method for algae comprehensive utilization: algae derived biocar enhances algae anaerobic fermentation for short-chain fatty acids production. *Bioresources Technology*. 289 , <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121637>.
- Eroglu, E., y Melis, A. (2011). Photobiological hydrogen production: recent advances and state of the art. *Bioresource Technology*. 102 (18), 8403-8413. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.026>
- Ghimire, A., Frunzo, L., Pirozzi, F., Trably, E., Escudie, R., Lens, P., y Esposito, G. (2015). A review on dark fermentative biohydrogen production from organic biomass: Process parameters and use of by-products. *Applied Energy*. 144, 73-95 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.045>
- Kotay, S. M., y Das, D. (2008). Biohydrogen as a renewable energy resource- prospects and potentials. *International Journal Hydrogen Energy*. 33(1), 258-263 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.07.031>
- Koutsopoulos, T., Fotidis, L., Tsolakis, N., y M. G. (2009). Biohydrogen production from pig slurry in a CSTR reactor system with mixed cultures under hyper-thermophilic temperature (70 °C). *Biomass bioenergy*. 33(9), 1168-1174 <https://doi.org/10.1016/j.BIOMBIOE.2009.05.001>
- Lin, C. Y., y Chang, R. C. (2004). Fermentative hydrogen production at ambient temperature. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(7), 715-720. doi:10.1016/j.ijhydene.2003.09.002
- Lin, C. Y., y Chen, H. P. (2006). Sulfate effect on fermentative hydrogen production using anaerobic mixed microflora. *International journal of hydrogen energy*, 31(7), 953-960 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.07.009>
- Lu, C., Zhang, H., Zhang, Q., Chu, C., Tahir, N., Ge, X., ... Zhang, T. (2019). An automated control system for pilot-scale biohydrogen production: design, operation and validation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(6), 3795-3806. doi:10.1016/j.ijhydene.2019.04.28.
- Mirza, S., Qazi, J. I., Liang, Y., y Chen, S. (2019). Growth characteristics and photofermentative biohydrogen production potential of purple non sulfure bacteria from sugar cane bagasse. *Fuel*. 255, 115805. doi: 10.1016/j.fuel.2019.115805.
- Mishra, S., Roy, M., & Mohanty, K. (2019). Microalgal bioenergy production under zero-waste biorefinery approach: recent advances and future perspectives. *Bioresources Technology*. 292 , 122008. doi: 10.1016/j.biortech.2019.122008
- Moreira, D., y Pires, J. (2016). Atmospheric CO2 capture by algae: negative carbon dioxide emissions path. *Bioresource Technology*. 215, 371-379 doi: 10.1016/j.biortech.2016.03.060
- Mu, D., Liu, H., Lin, W., Shukla, P., y Luo, J. (2020). Simultaneous biohydrogen production from dark fermentation of duckweed and waste utilization for microalgal lipid production. *Bioresource Technology*. 302, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122879>.
- NREL (2021, mayo 23). *National Renewable Energy Laboratory*. <https://www.nrel.gov/bioenergy/biohydrogen.html>

- Pandey, A. (2013). Biohydrogen. *Elsevier Science and Technology*, 259-278 <https://www.elsevier.com/books/biohydrogen/pandey/978-0-444-59555-3>.
- Saad, N. (2013). Homoacetogenesis during hydrogen production by mixed cultures dark fermentation: unresolved challenge. *International Journal Hydrogen*. 38(30), 13172-91. doi:10.1016/j.ijhydene.2013.07.122.
- Sharma, P., y Melkania, U. (2017). Biochar enhanced hydrogen production from organic fraction of municipal solid waste using co-culture of enterobacter aerogenes and E. coli. *International Journal Hydrogen Energy*. 42(30), 18865-18874.
- Show, K. Y., YAN, Y., Zong, C., Guo, N., Chang, J., y Lee, D. (2019). State of the art challenges of biohydrogen from microalgae. *Bioresource Technology*. 289, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121747>.
- Silva, J., Mendes, J., Correia, J., Rocha, M., y Micoli, L. (2018). Cashew apple bagasse as new feedstock for the hydrogen production using dark fermentation process. *Journal of Biotechnology*. 286, 71-78. doi 10.1016/j.jbiotec.2018.09.004.
- Sobrino, F., Rodríguez Monroy, C., y Hernández Pérez, J. L. (2011). Biofuels and fossil fuels: Life Cycle Analysis (LCA) optimisation through productive resources maximisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15(6), 2621-2628. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.03.010>
- Srivastava, N., Srivastava, M., Malhotra B, D., Gupta, V. K., Ramteke, P. W., Silva, R. N., ... Mishra, P. K. (2019). Nanoengineered cellulosic biohydrogen production via dark fermentation: A novel approach. *Biotechnology Advances* 37(6), 107384 doi:10.1016/j.biotechadv.2019.04.006.
- Staffell, I., Scamman, D., Velazquez-Abad, A., Balcombe, B., Dodds, P. E., Ekins, P., ... Ward, K. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy Environmental Science*. 2, 463-491. <https://doi.org/10.1039/C8EE01157E>
- Suntomauro, F., Fan, J., Budarin, V., Parsons, S., Clark, J., Miller, T., y Chuck, C. J. (2018). Microbial oil production from the fermentation of microwave-depolymerised rape seed meal. *Bioresource Technology Reports* 4, 159-165. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.10.008>
- Sunyoto, N. M., Zhu, M., Zhang, Z., y Zhang, D. (2016). Effect of biochar addition on hydrogen and methane production in two phase anaerobic digestion of aqueous carbohydrates food waste. *Bioresource Technology* (219), 29-36. doi: 10.1016/j.biortech.2016.07.089.
- University of Oxford (2015). Global Challenges – *Twelve risks that threaten human civilisation*. Future of Humanity Institute/Oxford Martin School/Faculty of Philosophy;.
- Valdez-Vásquez, I., y Poggi-Varaldo, H. (2009). Hydrogen production by fermentative consortia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(5), 1000-1013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.03.003>.
- Yang, G., y Wang, J. L. (2019). Synergistic enhancement of biohydrogen production from grass fermentation using biochar combined with zero-valent iron nanoparticles. *Fuel*. 251, 420-427, doi:10.1016/J.FUEL.2019.04.059.

Derechos de Autor (c) 2022 Héctor Alfredo López Aguilar y Elliot Humberto Luna Nevárez.



Este texto está protegido por una licencia *Creative Commons 4.0*.

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato — y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)