

El lactosuero como alternativa energética: una revisión

Whey as an alternative energy source: a review

O soro de leite como alternativa energética: uma revisão

Orlando Castiblanco-Urrego¹
Leidy P. Alfonso-A²
Andrés Otálora-Rodríguez³

Artículo de investigación

Recibido: 25 de octubre de 2022

Aceptado: 5 de diciembre de 2023

Publicado: 26 de mayo de 2024

RESUMEN

El lactosuero es un líquido remanente de la coagulación de la leche y uno de los mayores subproductos de la industria láctea, dado que, para producir de 1 a 2 kg de queso, se utilizan 10 kg de leche, generando de 8 a 9 kg de suero como subproducto. Se ha pronosticado que para el año 2050 la población va a aumentar un 26%, razón por la que el consumo de queso también incrementará significativamente, provocando mayor generación de lactosuero. El objetivo de la presente revisión, es identificar la cantidad de lactosuero producido en Colombia, sus principales características y mostrar las diferentes alternativas para producir hidrógeno a partir de lactosuero, tal como la fermentación oscura, la fotofermentación y las celdas de electrólisis microbiana, con sus principales variables y respectivos microorganismos. Así, se logra determinar que los procesos integrados son una de las alternativas con mayor potencial, ya que rutas como la fotofermentación y las celdas de electrólisis microbiana no tienen los mejores resultados si no son combinados con otros mecanismos biológicos.

- 1 Ing. Químico, Universidad de América, Departamento de Ingeniería Química, Bogotá, Colombia. Email: orlando.castiblanco@profesores.uamerica.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3238-0912>
- 2 Ing. Química, Universidad de América, Departamento de Ingeniería Química, Bogotá, Colombia. Email: leidy.alfonso@estudiantes.uamerica.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1309-9607>
- 3 Ing. Químico, Universidad de América, Departamento de Ingeniería Química, Bogotá, Colombia. Email: andres.otalora@estudiantes.uamerica.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3123-3782>

Como Citar (Norma Vancouver): Castiblanco-Urrego O, Alfonso-A LP, Otálora-Rodríguez A, El lactosuero como alternativa energética: una revisión. Orinoquia, 2024;28(1):e-720 <https://doi.org/10.22579/20112629.720>

La Revista Orinoquia es una revista de acceso abierto revisada por pares. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Internacional Creative Commons Attribution 4.0 (CC-BY 4.0), que permite el uso, distribución y reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se acredite el autor y la fuente originales.

Consulte <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

OPEN ACCESS



Palabras claves: Hidrógeno, biomasa, procesos biológicos, suero de leche, rendimiento.

ABSTRACT

Whey is a liquid byproduct of milk coagulation and one of the largest byproducts in the dairy industry. To produce 1 to 2 kg of cheese, 10 kg of milk is used, generating 8 to 9 kg of whey as a byproduct. It is forecasted that by 2050, the population will increase by 26%, which will lead to a significant rise in cheese consumption, thus increasing whey production. The aim of this review is to identify the amount of whey produced in Colombia, its main characteristics, and explore various alternatives for hydrogen production from whey, such as dark fermentation, photofermentation, and microbial electrolysis cells, along with their key variables and respective microorganisms. This allows for the determination that integrated processes are one of the most promising alternatives, as pathways like photofermentation and microbial electrolysis cells do not yield optimal results unless combined with other biological mechanisms.

Key Words: Hydrogen, biomass, biological processes, whey, yield.

RESUMO

O soro de leite é um líquido remanescente da coagulação do leite e um dos maiores subprodutos da indústria de laticínios. Para produzir de 1 a 2 kg de queijo, são necessários 10 kg de leite, gerando de 8 a 9 kg de soro como subproduto. Prevê-se que até 2050 a população aumentará em 26%, o que também levará a um aumento significativo no consumo de queijo, provocando uma maior geração de soro de leite. O objetivo desta revisão é identificar a quantidade de soro de leite produzido na Colômbia, suas principais características e apresentar diferentes alternativas para a produção de hidrogênio a partir do soro de leite, como a fermentação escura, a fotofermentação e as células de eletrólise microbiana, com suas principais variáveis e respectivos microrganismos. Assim, determina-se que os processos integrados são uma das alternativas com maior potencial, pois vias como a fotofermentação e as células de eletrólise microbiana não apresentam os melhores resultados se não forem combinadas com outros mecanismos biológicos.

Palavras chave: Hidrogênio, biomassa, processos biológicos, soro de leite, rendimento.

INTRODUCCIÓN

El mundo está presentando un acelerado crecimiento poblacional y por lo tanto un incremento en su demanda energética, especialmente en los países menos desarrollados. Según la Organización de las Naciones Unidas, se estima que para 2050 habrá más de 9700 millones de personas, lo que representa un aumento poblacional del 26% en los próximos 28 años (Naciones Unidas, 2020).

Además, el consumo actual de energía proveniente de la quema de combustibles fósiles representa una de las mayores fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero, generando una serie de problemáticas medioambientales, por lo que a nivel mundial se ha planteado el objetivo de la carbono neutralidad para el año 2050 (Guterres, 2020). De este modo, para cumplir esa meta es de gran relevancia conocer y utilizar fuentes de energía renovables y así reducir las emisiones y los niveles de contaminación.

Un recurso renovable importante en Colombia es la biomasa, que mediante procesos físicos y químicos permite la obtención de hidrógeno y la generación de energía. El hidrógeno es uno de los elementos más abundante en la naturaleza, que a pesar de no encontrarse en forma elemental, está combinado químicamente en compuestos como el agua, sales, hidruros, ácidos, hidrocarburos entre otros (Suárez Alcántara, 2019).

En el planeta existe una pequeña cantidad de hidrógeno diatómico y esto se debe principalmente a que cuenta con un bajo peso molecular (14 veces más ligero que el oxígeno), razón por la cual solo se encuentra en las capas externas de la atmósfera, y aunque se puede producir, tiende a escapar y a dispersarse con gran facilidad (Bazán Valle, 2016).

El hidrógeno es un vector energético de gran interés gracias a sus propiedades, como lo es la densidad energética, que tiene un valor de 120 MJ/kg, lo cual supera por mucho a los hidrocarburos, como por ejemplo la gasolina con 44 MJ/kg, el metano

con 50 MJ/kg y el etanol con 26,8 MJ/kg (Kadier et al., 2016).

Este portador de energía se puede producir a partir de dos fuentes; renovables y no renovables; sin embargo, hoy en día un poco más del 95% de la producción de hidrógeno se supe mediante combustibles fósiles (Taibi et al., 2018), siendo el reformado con vapor de metano el método más común y rentable para su producción, con aproximadamente el 50% de la producción mundial (Basile et al., 2015). Tan solo un 4% del suministro mundial de hidrógeno es generado mediante la electrólisis (Taibi et al., 2018), razón por la que se adelantan varias investigaciones acerca de la producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables, todo con el objetivo de alcanzar una verdadera transición energética.

El hidrógeno se clasifica por colores que hacen referencia a qué tan limpia o no es su generación, las tonalidades gris y azul se relacionan con la producción a partir de energías fósiles, y su diferencia radica principalmente en que el hidrógeno azul no presenta emisiones de CO₂. El hidrógeno verde, por otro lado, se asocia con el hidrógeno producido por la electrólisis mediante fuentes renovables de energía y agua, así como con el biohidrógeno (Proaño, 2021), (Pérez et al, 2024).

Teniendo en cuenta que el sector energético es uno de los mayores contribuyentes a la crisis climática, el hidrógeno verde debe empezar a ser visto como una gran alternativa en la lucha contra el efecto invernadero, ya que tiene el potencial de transformarse en un instrumento valioso para una transición energética justa, democrática y popular (Proaño, 2021).

Por lo anterior, se decidió escoger el lactosuero como fuente de biomasa para la producción de biohidrógeno. Para esta elección se tuvo en cuenta dos aspectos, el contenido de materia orgánica y el volumen de producción, y el lactosuero cumple ambos criterios, pues tiene un alto contenido de materia orgánica en forma de lactosa, proteínas y otros compuestos procedentes de la leche, y a su



vez, se produce en grandes cantidades, tanto en industrias, como en hogares. Cabe destacar que esta biomasa representa un problema ambiental cuando se vierte a los ecosistemas acuáticos y terrestres, de manera que su uso puede ser visto como una solución a dicha problemática (Fernández Rodríguez et al., 2016).

El objetivo de este artículo es la recopilación de información de las diferentes rutas biológicas de producción de hidrógeno, en cuanto a sus principales características, condiciones de operación y uso de microorganismos, y a su vez, dar a conocer cómo es la producción de lactosuero en Colombia, junto con las características que debe tener para la producción de hidrógeno.

MATERIALES Y MÉTODOS:

La presente revisión es de carácter cualitativo, descriptivo y comparativo, ya que el análisis de la información se fundamenta en la consulta de bases de datos bibliográficas como ScienceDirect, SpringerLink, Lumières, SciELO y EBSCO, así como en libros, tesis de grado y revistas ampliamente reconocidas en la comunidad académica.

Para la búsqueda de información, se utilizaron términos clave como "hidrógeno," "suero de leche," "fermentación oscura," "fotofermentación" y "celdas de combustible microbianas," aplicando operadores booleanos AND/OR. Además, se revisaron estudios relevantes en las listas de referencias de los artículos identificados y en revisiones sistemáticas previas. La búsqueda se enfocó principalmente en los últimos cinco años, aunque se incluyeron también estudios importantes de años anteriores.

LACTOSUERO COMO FUENTE DE BIOMASA

El lactosuero es un líquido remanente de la coagulación de la leche, se caracteriza por ser de color amarillo verdoso, turbio y de sabor ácido (Vázquez Esnoval et al., 2017). Se obtiene en el proceso de elaboración de quesos, mediante la acción áci-

da o enzimática (adición del cuajo), cuyo objetivo es romper el sistema coloidal de la leche en dos fracciones: una fracción sólida, compuesta principalmente por proteínas y lípidos, y, una fracción líquida, correspondiente al suero, cuyo interior contiene varios compuestos con potenciales beneficios nutricionales, motivo por el que en varios países es usado como materia prima para la elaboración de suplementos (Poveda, 2013).

Dentro de su composición química, el agua es el principal componente, pues constituye un 90-92%, mientras que el 8-10% restante se compone principalmente de lactosa (60-80%) y proteínas (10-20%). Hay otros compuestos en concentraciones más bajas como minerales, vitaminas, grasas, ácido láctico y oligoelementos (Pacheco V et al., 2017). Sin embargo, es necesario mencionar que dicha composición también se ve influenciada por la leche utilizada, el sistema de coagulación y el tipo de queso a fabricar (queso panela, quesillo, queso crema, queso de sal, etc.) (Ballinas-Hernández et al., 2015).

Teniendo en cuenta lo anterior, el lactosuero se clasifica principalmente por el tipo de coagulación, ya que cuando se da mediante la acción enzimática, se conoce como básico o dulce, dado que el pH varía entre 6 y 6,98 (queso de panela y de sal). Mientras que cuando se da la coagulación ácida da origen al lactosuero ácido (quesillo y queso crema) el cual comprende valores de pH entre 4,5 a 5,18 aproximadamente (Ballinas-Hernández et al., 2015; Gómez Soto & Sánchez Toro, 2019).

A partir de lo anterior, es recomendable trabajar con el suero ácido, ya que presenta un mayor contenido de ácido láctico, y por lo tanto, se logra alcanzar mayores rendimientos; sin embargo, para que este sea realmente eficiente debe tener un control de pH (4,5 a 5,18) y temperatura (<62 °C), debido a que la solubilidad de las proteínas en el lactosuero está sujeta a cambios en la temperatura y en el pH, factores que pueden llevar a su desnaturalización y posterior agregación, perjudicando la presencia de azúcares necesarios que permiten el desarrollo

bacteriano para la producción de hidrógeno por vía biológica (Ballinas-Hernández et al., 2015), (Castillo Moreno, 2018).

El contenido proteico del lactosuero comprende alrededor del 20% de las proteínas de la leche, estas proteínas se conocen como aquellas que se conservan en solución tras precipitar las caseínas a pH de 4,6 y a una temperatura de 20 °C, entre ellas están la α -lactoalbúmina y la β -lactoglobulina (Juliano et al., 2017).

Tabla 1. Composición del lactosuero ácido y dulce

Componentes	Lactosuero ácido (g/L)	Lactosuero dulce (g/L)	Ref.
Sólidos totales	63 - 70	63 - 70	(Ballinas-Hernández et al., 2015; Cervantes et al., 2018; Gómez Soto & Sánchez Toro, 2019; Parra Huertas, 2009)
Lactosa	44 - 46	46 - 52	
Proteína	6 - 8	6 - 10	
Calcio	1,2 - 1,6	0,4 - 0,6	
Fosfato	2 - 4,5	1 - 3	
Lactato	6,4	2	
Cloruros	1,1	1,1	(Castillo Moreno, 2018)
Densidad (g/cm ³)	1,024	1,025	

Gracias a la gran variedad de componentes que tiene el lactosuero y a sus altos volúmenes de producción a nivel mundial (180-190 millones de toneladas métricas anuales), varios grupos de investigación han realizado estudios con el fin de darle un mayor valor agregado a este subproducto (Obregon Taborda, 2022). Estos altos volúmenes de producción son importantes porque representan una oportunidad significativa para la industria en términos de aprovechamiento y sostenibilidad, además de plantear un desafío ambiental si no se gestionan adecuadamente. (Pacheco V et al., 2017).

Lactosuero en Colombia

En Colombia se producen 827596 toneladas de lactosuero (Gómez Soto & Sánchez Toro, 2019), lo cual es de esperar, ya que el país tiene un alto potencial ganadero, de manera que existen por lo menos unos 350000 predios dedicados a la pro-

ducción de leche y unas 220 industrias lácteas certificadas que procesan al día 9 millones de litros (El Tiempo, 2020).

En 2020 se determinó que durante los últimos 5 años, Colombia ha sido uno de los países que más ha presentado crecimiento en el consumo y venta de queso (más del 50%), de hecho se estima que para ese entonces se vendieron alrededor de 70000 kg (ACIS, 2020). Los departamentos responsables del 84% del acopio total de la industria láctea son Antioquia, Cundinamarca, Boyacá, Caldas, Cauca, Nariño, Quindío, Risaralda y Valle del Cauca, siendo los dos primeros los mayores productores (Daza Castañeda, 2022).

Entre 2013 y 2018 la dinámica de consumo de lácteos fue creciente, estimulada mayoritariamente por el consumo de quesos (Gonzalez, 2020); sin embargo, a pesar de que ello contribuya a la economía del país, no es tan beneficioso, puesto que para producir de 1 a 2 kg de queso, se utilizan 10 kg de leche, produciendo entre 8 a 9 kg de suero de queso como subproducto (Fuentes Castillo, 2020).

El problema que acarrea el lactosuero, es que gran parte de las industrias lo vierten en ecosistemas acuáticos y ecosistemas terrestres como "fertilizantes", disminuyendo el rendimiento de las cosechas y favoreciendo el fenómeno de lixiviación, el cual ocurre debido a que el suero contiene nitrógeno soluble en agua, que una vez entra en contacto con los mantos freáticos, lo convierte en un peligro para la salud de personas y animales (Valencia & Ramírez, 2019).

Asimismo, su vertido a la red de saneamiento podría suponer un problema de saturación de las estaciones de depuración de aguas residuales (EDARs) (Fernández Rodríguez et al., 2016), y generar mayores problemas ambientales dentro de este sector, debido a su alta demanda biológica de oxígeno (DBO) (>35000 ppm) y su alta demanda química de oxígeno (DQO) (>60000 ppm) (Pacheco V et al., 2017). Con ello se hace referencia a que por cada 1000 L de lactosuero se generan 35 kg y 68



kg de DBO y de DQO respectivamente (Rojas et al., 2015), provocando que muchos microorganismos se quieran alimentar de la gran cantidad de materia orgánica presente, generando un desequilibrio en el oxígeno disuelto en el medio, lo que provoca que los peces y otras especies no puedan respirar y mueran, pues a mayor cantidad de materia orgánica, más cantidad de oxígeno necesitan los microorganismo para oxidarla o degradarla (Ruiz Lizama & Raffo Lecca, 2014). Esta fuerza contaminante es equivalente a la de las aguas negras producidas en un día por 500 personas (Juliano et al., 2017).

Para evitar todos los problemas que acarrea el lactosuero no tratado, se deben buscar alternativas que acojan al subproducto contaminante (Rosas & Garfias, 2022). Las opciones tecnológicas que se han propuesto hasta este momento son básicamente la producción de horneados para adulto mayor (Veliz Sedano, 2015), galactooligosacáridos, ácido láctico, bebidas lácteas, salchichas, jamón, bioetanol, hidrolizados de proteína, ácido cítrico, ácido propiónico, ácido acético (Gómez Soto & Sánchez Toro, 2019) y en el procesamiento de bebidas energizantes (Cervantes et al., 2018).

En cuanto a la contaminación por lactosuero existen varias alternativas para su uso, sin embargo tan solo una parte del lactosuero producido es aprovechado adecuadamente, aproximadamente el 47% de las 115 millones de toneladas producidas a nivel mundial son desechadas sin tratamiento alguno (Cury et al., 2014). En el caso de Colombia, se estima que el 70% se utiliza como alimentación animal o como efluente líquido (Juliano et al., 2017). Esto se debe principalmente a que el sector lácteo colombiano carece de diseños que reintegren al lactosuero a la cadena de valor, y no tiene en cuenta alternativas sostenibles como la producción de biocombustibles (Gómez Soto & Sánchez Toro, 2019), dejando a un lado la economía circular, y la valoración energética del lactosuero como subproducto.

MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE HIDROGENO

Para que la generación de hidrógeno sea un proceso sostenible, los sustratos utilizados deben cumplir lo siguiente: ser producidos a partir de recursos renovables, estar en una buena cantidad para que la fermentación ocurra de manera eficiente y que los pretratamientos sean mínimos y de bajo costo (Bedoya et al., 2007), como es el caso de los diferentes desechos agroalimentarios, los cuales presentan un gran porcentaje de carbohidratos y por lo tanto, un gran contenido de carbono en forma de azúcares simples, almidón y celulosa (Redondas Monteserín, 2014), siendo la glucosa y la sacarosa los sustratos fermentables más estudiados en el laboratorio.

Los azúcares simples suelen ser la mejor opción para la generación de biohidrógeno, sin embargo, debido al elevado costo de las fuentes puras de estos carbohidratos, es necesario buscar otras fuentes, como los subproductos industriales, en este caso el lactosuero, y de esta manera generar energía a un menor costo (Rosales Colunga, 2007), (López Gutiérrez, 2015), (Leroy Freitas, 2022).

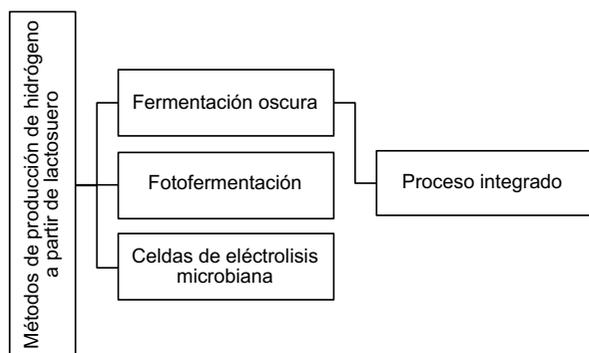
Tabla 2. Producción de hidrógeno a partir de diferentes biomásas

Biomasa	Sustrato	Rendimiento	Ref.
Residuos de piña	Glucosa	1,541 mol H ₂ /mol glucosa	(Montoya-Pérez & Durán-Herrera, 2017)
Jugo de remolacha	Glucosa	1,7 mol H ₂ /mol glucosa	(Hernández Pardo, 2008)
Bagazo de agave tequila	Glucosa	0,76 - 1,36 mol H ₂ /mol glucosa	(López Gutiérrez, 2015)
Bagazo de caña de Azúcar	Glucosa y xilosa	1,73 mol H ₂ /mol de azúcar total	(Pattra et al., 2008)
Lactosuero	Lactosa y lactato	2,08 mol H ₂ /mol de azúcar total	(Castillo Moreno, 2018)

Como se puede ver en la tabla 2, el lactosuero es una biomasa que genera un rendimiento elevado en comparación con otros residuos agroindustria-

les, puesto que entre sus componentes la lactosa constituye un gran porcentaje de su composición y es la principal fracción de su carga orgánica, convirtiéndolo en un sustrato susceptible de ser valorizado energéticamente mediante la aplicación de diversos procesos biológicos (Fernández Rodríguez et al., 2016).

Figura 1. Métodos de producción biológica de hidrógeno a partir de suero de leche.



Fermentación oscura

La fermentación oscura, más conocida como fermentación heterotrófica, es un proceso biológico (Cuautle, 2017), en ausencia de luz, donde los microorganismos, como las bacterias, descomponen la materia orgánica a partir de la hidrólisis de polisacáridos, proteínas y lípidos, para la obtención de hidrógeno gaseoso, sin embargo la principal fuente de carbono viene siendo la glucosa y la xilosa (Larsen, 2022; Sotelo, 2017).

Para la generación de hidrógeno por este método se han empleado diferentes tipos de bacterias, las cuales pueden ser estrictamente anaerobias o anaerobias facultativas. Dependiendo del tipo de inóculo pueden ser bacterias del género *Clostridium*, *Enterobacter* y *Bacillus*, bacterias termofílicas y acidogénicas anaerobias provenientes de lodos de plantas de tratamiento, compost y el suelo (Redondas Monteserín, 2014). Si el inóculo es un cultivo mixto, no se requerirá de agentes reductores ni de un tratamiento costoso, debido a la presencia de los microorganismos anaerobios

facultativos que se encargan de la reducción del oxígeno y de las bacterias capaces de producir metabolitos, que vienen siendo fuente de nutrientes para el resto de microorganismos. Por el contrario, si se maneja un cultivo puro, suelen ser más complejos de mantener, debido a las condiciones asépticas que deben tenerse (Cuzco & Paulina, 2020; Redondas Monteserín, 2014; Sotelo, 2017)

Los organismos del género *Clostridium* son bacilos Grampositivos esporulados y anaerobios (García-Sánchez et al., 2016), mientras que las *Enterobacter* son bacilos de 0,3-1 µm de ancho por 1-6 µm de largo, Gramnegativos, sin agrupación y que pueden vivir en presencia y ausencia de oxígeno, es decir son anaerobios facultativos (Dominguez).

Además del tipo de inóculo, la obtención de hidrógeno depende de varios factores, el sustrato, los nutrientes, el pH del medio, la temperatura, entre otros. Todos con una gran importancia y repercusión en el proceso (Cuzco & Paulina, 2020).

Reacción y rendimiento



La ecuación anterior, ha sido ampliamente aceptada como referencia para la estimación de la producción teórica del hidrógeno fermentativo, muestra que cuando la vía metabólica favorece la producción de ácido acético (único ácido graso volátil producido), se llega a obtener una producción máxima teórica de 4 mol H₂/mol glucosa, pero cuando la vía favorece la formación de ácido butírico (UGV producido) la generación máxima teórica es de 2 mol H₂/mol glucosa (Sotelo, 2017); y si se obtiene tanto ácido acético como ácido butírico se puede esperar un rendimiento de 2,5 moles H₂/mol glucosa (Mizuno et al., 2000).

En el caso que se produzca ácido propiónico se obtiene un consumo de 1 mol de H₂ por mol de ácido propiónico producido (Argun & Kargi, 2011), mientras que cuando se da la obtención de etanol y ácido láctico no se genera consumo ni producción de

H₂. Sin embargo, cabe destacar que la producción real será menor que la producción teórica, dado que la degradación de los sustratos puede seguir otras vías metabólicas, y a su vez parte de este es usado por los microorganismos para su sustento y desarrollo microbiano (Blanco Londoño & Rodríguez Chaparro, 2012).

La fermentación oscura a diferencia de otros métodos tiene varios beneficios como lo son: no necesitar una fuente de luz para que se produzca el proceso, se pueden utilizar diversas fuentes de carbono como sustrato, entre ellas desechos agroindustriales, funcionar sin la necesidad de condiciones anaeróbicas estrictas y llevarse a cabo mediante condiciones de operación ambiente (Larsen, 2022). Asimismo, tiene algunas limitaciones, tales como: el rendimiento, el cual suele ser alrededor de 2 mol H₂/mol glucosa, lo que dificulta su escalamiento a nivel piloto e industrial (Cuautle, 2017), el buen control de las condiciones de fermentación para evitar la formación de alcoholes o ácidos orgánicos, y la presencia de microorganismos consumidores del metabolito de interés (hidrógeno), las bacterias homoacetogénicas y metanogénicas (Castillo Moreno, 2018), (Blanco Londoño & Rodríguez Chaparro, 2012), (Valentine et al., 2000).

Celdas de electrólisis microbiana

Las celdas de electrólisis microbiana (MECs) se presentan como una tecnología emergente empleada para la producción de hidrógeno. Usualmente constan de 2 electrodos, y una membrana selectiva de intercambio de iones, pues este modelo puede variar, ya que presenta una flexibilidad en sus diseños, ya sea cambiando su geometría, material, número de electrodos, entre otros. Cada uno de estos cambios repercuten directamente en la obtención de hidrógeno, por ejemplo, un arreglo de 3 electrodos permite una mayor eficiencia (Cercado Quezada, 2016).

Las MECs para su correcto funcionamiento requieren de la ausencia de oxígeno y de un poco de energía eléctrica (0,4-0,9 V) (Estrada Arriaga et al., 2017), debido a que la energía dada por las bacterias en el ánodo no es suficiente, razón por la que no disponen del potencial eléctrico necesario para que los microorganismos presentes en la cámara anódica lleven a cabo la oxidación del sustrato a través de su metabolismo, de tal manera que una vez reciben la energía necesaria, se liberan iones que se transportan hacia la cámara catódica, donde ocurre la reducción de los protones para la obtención de hidrógeno gaseoso (Paz Mireles, 2016).

Los microorganismos aptos para esta ruta son las bacterias electroactivas, dado que presentan la capacidad de transferir y aceptar electrones de otras bacterias por medio de una serie de reacciones de óxido-reducción (Yañez de Ugarte, 2016). Las bacterias electroactivas más comunes, gracias a su método de transferencia de energía directa, pertenecen a los géneros *Geobacter* y *Shewanella*, ya que en su estructura (por medio del pili) se logra dar una transferencia directa de carga, permitiendo así la generación de hidrógeno (Prados, 2022). El primer género de bacterias se encuentra clasificado en el grupo *Deltaproteobacteria* de la familia *Geobacteraceae*, son Gramnegativos, y quimiorganótrofo anaerobio, es decir que utilizan compuestos orgánicos como fuente de energía y de carbono para su crecimiento y desarrollo (Romero Mejía et al., 2012).

Por otro lado se encuentran especies como las *Pseudomonas*, que son un tipo de bacteria aerobia estricta, las cuales mediante un método indirecto, y por medio de distintos metabolitos generados, sirven como transportadores de electrones (Cercado Quezada, 2016), en el caso de la *Shewanella* pueden ser parte tanto el método de transferencia directa como indirecta, y se caracterizan por ser capaces de vivir en condiciones tanto aeróbicas como anaeróbicas (Lisouli Pérez-Torres et al., 2021).

En un estudio de la Universidad Autónoma de Barcelona se pudo evidenciar que con un cultivo sintrófico es posible degradar el lactosuero para la producción de hidrógeno, inhibiendo la actividad metanogénica, sin necesidad de utilizar otras estrategias (Rago, 2015).

Teniendo en cuenta el gran número de variables que influyen en el proceso, es recomendable que el cultivo de microorganismos sea mixto, puesto que de esta forma se dará un amplio aprovechamiento de los diferentes compuestos orgánicos presentes, a la vez de generar estabilidad dentro del sistema; aun así, se debe tener presente que el consorcio de microorganismos puede llegar a provocar efectos adversos, como inhibir la producción de hidrógeno por la obtención de otro metabolito (Cercado Quezada, 2016).

La generación de hidrógeno depende fundamentalmente del tipo de sustrato y su naturaleza, ya que el voltaje aplicado será mayor o menor de acuerdo a la carga de materia orgánica presente. Un ejemplo son los ácidos grasos volátiles, pues aunque los microorganismos sin necesidad de corriente eléctrica logran degradarlo de forma espontánea, es recomendable aplicar un poco de voltaje para obtener una mayor densidad de corriente (Cercado Quezada, 2016).

Un requisito que debe tener el sustrato es el bajo contenido de materia orgánica y la ausencia de azúcares fermentables, de manera que para que el lactosuero sea visto como una opción, debe pasar primero por un proceso de fermentación. Una vez culmine dicha ruta, puede ser llevado como efluente a las celdas de electrólisis microbiana, de no hacerse este proceso se da un desvío de los electrones el cual favorece el proceso de fermentación de las bacterias endógenas presentes en el lactosuero (Wenzel et al., 2017); y a su vez, desfavorece la producción de hidrógeno.

Los anteriores requerimientos aplican tanto en las celdas de combustibles microbianas como en las celdas de electrólisis microbiana. En el caso del lactosuero, hay poca información acerca de los rendimientos en las MECs, es por ello que se toman datos encontrados de las celdas de combustible microbianas cuando el efluente proveniente de la fermentación del lactosuero, que puede llegar a tener una densidad de corriente igual a 1,71 A/m², mientras que cuando se toma como sustrato directamente el suero, se tiene un rendimiento de 1,37 A/m². En el primer caso se evidencia un mayor rendimiento, lo que se debe a que el efluente ya no va a contener azúcares fermentables como la lactosa, sino solamente ácidos grasos volátiles, tales como ácido láctico, acético y butírico (Wenzel et al., 2017).

Fotofermentación

La fotofermentación es un proceso biológico que consiste en la descomposición de sustratos, como ácidos orgánicos volátiles (AGVs), mediante un grupo de bacterias que realizan fotosíntesis anoxigénica, logrando descomponer los ácidos y a su vez transformarlos en hidrógeno y dióxido de carbono en condiciones limitantes de nitrógeno y amoníaco. Los microorganismos responsables de este proceso son las bacterias púrpuras no sulfurosas (BPNS), las cuales se destacan por ser fotoheterótrofas y por tener esa coloración púrpura característica, brindada por las bacterioclorofilas y los carotenoides. Dentro de este grupo de bacterias, se encuentran la *Rhodobacter sp*, la *Rhodospirillum sp* y la *Rhodopseudomonas capsulatus* (Martínez & García, 2010; Ni et al., 2006).

Los aspectos más relevantes de este proceso son poder utilizar diferentes desechos como sustrato, y utilizar bacterias que tienen la capacidad de trabajar en un amplio espectro luz; por otra parte, los inconvenientes de la ruta son su baja eficiencia, y la incapacidad de continuar con la presencia de oxígeno (Castillo Moreno, 2012).



Por lo general, este proceso suele ir acompañado de la fermentación oscura, dado que las BNSP comúnmente no pueden utilizar la lactosa como sustrato, razón por la que en los proyectos que involucran lactosuero se utilizan procesos integrados o tienen como sustrato principal el ácido láctico (efluente común de la fermentación del lactosuero). Sin embargo, existen bacterias recombinadas capaces de utilizar como sustrato la lactosa y el ácido láctico (Castillo Moreno, 2018).

En cuanto a procesos integrados se conocen tres; el proceso integrado con fermentación oscura, el proceso integrado con fermentación oscura y biofotólisis, y el proceso combinado con homofermentación. El primero consiste en tratar el efluente de la fermentación oscura mediante la fotofermentación, dado que los microorganismos utilizados liberan los AGVs, los cuales son aprovechados por las BNSP logrando alcanzar rendimientos hasta del 70% (Montiel et al., "Junio, 2015")

CONSIDERACIONES FINALES

Una gran parte de los residuos agroindustriales generados en todo el mundo poseen un gran contenido de carbohidratos, en forma de almidón, celulosa y azúcares simples (lactosa, xilosa, glucosa y sacarosa), lo que conlleva a pensar en su valorización y por lo tanto en la generación de un producto de alto valor energético.

Las principales rutas para la producción de hidrógeno a partir de lactosuero son procesos de tipo biológico como lo son la fermentación oscura, las celdas de electrólisis microbiana y la fotofermentación. Es ideal que, para las dos últimas, el lactosuero haya pasado por una etapa de fermentación, ya que, al estar en presencia de azúcares fermentables, el rendimiento disminuye, ya sea por la incapacidad de las bacterias de degradarlos o por favorecer el proceso de fermentación de las bacterias endógenas presentes en el lactosuero.

Tabla 3. Rendimientos de producción de Hidrógeno

Microorganismo	Proceso	Rendimiento	Condiciones de operación	Ref.
<i>C.saccharoperbutylacetonicum</i>	Fermentación oscura	2,7 mol H ₂ /mol lactosa	pH: 5,6-6,0 Temperatura: 30 °C	(Calli et al., 2008)
Bacterias electroactivas	MECs	101,84 mL H ₂ /g sustrato	Voltaje: 1,0 V pH inicial: 6,7-6,9	(Paz Mireles, 2016)
<i>Rhodobacter capsulatus B10::LacZ</i>	Fotofermentación (Lactosa 0,2M)	0,55 mol H ₂ mol ⁻¹ lactosa	Intensidad de luz: 30000 lux pH: 6,7-4,9 Temperatura: 30 °C	(Castillo Moreno, 2012)
<i>E. aerogenes</i> MTCC 2822/ <i>Rhodopseudomonas BHU 01</i>	Integrado secuencial (10 g Lactosa L ⁻¹)	58 mmol H ₂ L ⁻¹	pH: 6,8 Temperatura: 34 °C	(Rai et al., 2014)
<i>Rhodobacter sphaeroides</i> DSM158	Fotofermentación (proceso integrado con fermentación oscura)	2280 mL H ₂ /L	Intensidad de luz 139,72 klux pH 4,53-5,3	(Reungsang et al., 2018)
<i>Rhodobacter capsulatus</i> IR3::LacZ	Fotofermentación (proceso integrado con homofermentación)	2,96 mol H ₂ mol ⁻¹ sustrato 13036,36 mL H ₂ /L	pH: 4,53-5,3 Intensidad de luz: 5000 lux Temperatura: 30 °C	(Castillo Moreno, 2018)

En la tabla 3 se presentan algunos de los microorganismos aptos para la obtención de hidrógeno y sus respectivos rendimientos a partir de las diferentes rutas, teniendo en cuenta que cada una de ellas comprende diferentes variables que afectan de forma directa la producción del metabolito de interés.

En el caso de la fermentación oscura, la ausencia de luz hace que los requerimientos energéticos sean menores, convirtiéndolo en un proceso rentable, pues no solo se pueden utilizar residuos agroindustriales como fuente de carbono, sino que también se tiene la posibilidad de utilizar consorcios de bacterias, en lugar de cultivos puros, lo que facilita la degradación de los diferentes compuestos y consigo la producción de hidrógeno.

Este proceso fermentativo se caracteriza por ser una de las alternativas de obtención de hidrógeno más estudiadas; y a su vez, por ser uno de los procesos que presenta mayores rendimientos; aunque, en muchas ocasiones la producción de hidrógeno puede verse limitada por la generación de subproductos. Una de las causas es la elección del tipo de cultivo, pues si se opta por un cultivo puro, como se evidencia en la tabla 6, es necesario que se manipulen las condiciones de operación, de forma tal que se favorezcan las vías fermentativas de generación de hidrógeno en detrimento de las vías que conlleva el consumo de hidrógeno (homoacetanogénesis) y producción de metano (metanogénesis). Igualmente, si la opción es un cultivo mixto la probabilidad de encontrar bacterias consumidoras de H₂ es alta; sin embargo, este efecto se puede mitigar enriqueciendo el cultivo mixto con bacterias que inhiban los consumidores de hidrógeno.

La fermentación oscura se lleva a cabo principalmente por microorganismos anaerobios, como la bacteria *Clostridium saccharoperbutylacetonicum* y la *Clostridium butyricum*, unas de las más utilizadas para la producción de hidrógeno, cuyas condiciones de operación son: un medio aséptico, un pH entre 5,6 y 6,0, una temperatura de 30 °C y

la presencia de agentes reductores de oxígeno. Cabe destacar que el rendimiento depende significativamente del sustrato y del microorganismo en cuestión.

En los procesos fotofermentativos se cuenta con una variable además que afecta en gran medida el proceso, siendo esta la intensidad de luz, pues a medida que aumenta, repercute de manera significativa en la velocidad de producción y el rendimiento de hidrógeno; sin embargo, ello depende del tipo de sustrato y del microorganismo que se esté utilizando.

Una de las ventajas de este proceso es que se pueden utilizar diferentes materiales de desecho como sustrato, y que las bacterias empleadas pueden usar un amplio espectro de energía lumínica. Las desventajas son su baja eficiencia y que el oxígeno es un fuerte inhibidor para el proceso, por lo que es necesario que se lleve a cabo en condiciones anaeróbicas, y preferiblemente, combinarlo con otra ruta capaz de mejorar la tasa de producción de hidrógeno, como es el caso de la fermentación oscura y la homofermentación.

Como se observa en la tabla 3, el proceso integrado con homofermentación se obtienen mayores rendimientos con respecto al integrado con fermentación oscura, y ello se debe principalmente a que la primera ruta presenta como único producto ácido láctico, mientras que la segunda ruta genera gran variedad de ácidos orgánicos volátiles, a pesar de que los microorganismos empleados (*Rhodobacter capsulatus* IR3::LacZ y *Rhodobacter sphaeroides* DSM 158) hayan sido genéticamente modificados para aumentar la producción de hidrógeno.

Se ha identificado que la intensidad lumínica aplicada varía entre los diferentes microorganismos, pero generalmente los valores se sitúan entre (5000 y 139720 lux). Para mantener esta variable de forma constante es aconsejable el uso de luces led, puesto que son las que incluyen longitudes de onda específicas y presentan menores consumos



energéticos, y además no aumentan la temperatura del sistema (30 ± 2 °C); es decir, que contribuyen a mantener constantes las condiciones del sistema.

Otro proceso que se debe manejar integrado con otros, es precisamente las celdas de electrólisis microbiana, dado que su rendimiento se ve afectado negativamente con la presencia de azúcares fermentables, razón por la que se puede tratar inicialmente con la fermentación oscura, cuyo efluente será aprovechado por las bacterias electroactivas, que dependiendo de la configuración de la celda (aumenta el rendimiento con un arreglo de 3 electrodos), el pH (6,7-6,9), el voltaje (0,4-1,0 V), el material y la temperatura, se logrará obtener una buena tasa de generación de hidrógeno.

Pensar en el lactosuero como fuente de biomasa para la producción de hidrógeno presenta un mundo de alternativas; puesto que, se cuenta con diferentes rutas, microorganismos y condiciones, que conducen a la obtención de un vector energético como el hidrógeno, el cual tiene un gran potencial y un gran futuro en este siglo; por ejemplo, países como Colombia podrían darle un uso energético a este subproducto, contribuyendo a los objetivos de descarbonización que el mundo ha planteado.

REFERENCIAS

- ACIS. (2020). *En lo corrido del 2020 ha crecido el consumo del queso en Colombia*. ACIS. <https://www.acis.org.co/portal/content/noticiasdeinteres/en-lo-corrido-del-2020-ha-crecido-el-consumo-del-queso-en-colombia>
- Argun, H., & Kargi, F. (2011). Bio-hydrogen production by different operational modes of dark and photo-fermentation: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(13), 7443-7459. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.116>
- Ballinas-Hernández, L. A., García-Lara, C. M., & Alfaro-Domínguez, B. G. 2015. Lactobiohidrógeno, una buena opción para el aprovechamiento de residuos en Chiapas. *Quehacer Científico En Chiapas*, 10(2), 24-34. <https://www.dgip.unach.mx/images/pdf-REVISTA-QUEHACERCIENTIFICO/2015-jul-dic/Lactobiohidrogenounabuenaopcionparaelaprovechamiento.pdf>
- Basile, A., Di Paola, L., Hai, F., & Piemonte, V. (2015). Membrane reactors for energy applications and basic chemical production. *Elsevier*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2013-0-16489-6>
- Bazán Valle, J. A. (2016). *Elaboración de una celda de hidrógeno para su uso como soplete* <https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/12892>
- Bedoya, A., Castrillón, J. C., Ramírez, J. E., Vásquez, J. E., & Arias Zabala, M. (2007). Producción biológica de hidrógeno: una aproximación al estado del arte. *Virtualpro*, 138-157. <https://www-virtualpro-co.ezproxy.uamerica.edu.co/biblioteca/produccion-biologica-de-hidrogeno-una-aproximacion-al-estado-del-arte>
- Blanco Londoño, S. A., & Rodríguez Chaparro, T. (2012). Producción de biohidrógeno a partir de residuos mediante fermentación oscura: una revisión crítica (1993-2011). *Chilena De Ingeniería*, 20(3), 398-411. <https://www.scie-lo.cl/pdf/ingeniare/v20n3/art14.pdf>
- Calli, B., Schoenmaekers, K., Vanbroekhoven, K., & Diels, L. (2008). Dark fermentative H₂ production from xylose and lactose—Effects of on-line pH control. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(2), 522-530. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.10.012>
- Castillo Moreno, P. (2012). *Evaluación experimental de la producción de hidrógeno a partir de suero de leche como sustrato en la fotosíntesis de microorganismos recombinados de Rhodobacter Capsulatus*

- Castillo Moreno, P. (2018). *Desarrollo de un proceso de producción fotofermentativa de hidrógeno a partir de suero de leche* <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/63830>
- Cercado Quezada, B. (2016). Análisis de los factores que inciden en la producción de biohidrógeno en celdas de electrólisis microbianas. *Tecnología E Innovación*, 3(8), 21-34. https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Tecnologia_e_innovacion/vol3num8/Revista_de_Tecnologia_e_Innovaci%C3%B3n_V3_N8_4.pdf
- Cervantes, L., Tello, M., & Moreno, A. (2018). *La reutilización del lacto suero: Una forma de disminuir los impactos ambientales y obtener energía alternativa*. https://www.researchgate.net/publication/332554062_La_reutilizacion_del_lacto_suero_Una_forma_de_disminuir_los_impactos_ambientales_y_obtener_energia_alternativa
- Cuautle, M. (2017). *Producción de hidrógeno a partir de lactosuero en un reactor de lecho expandido* <http://132.248.9.195/ptd2016/noviembre/0753133/0753133.pdf>
- Cury, K., Márquez, M. A., Flórez, G. M., Rhenals, D. L., & Villadiego, A. D. (2014). Evaluación de la fermentación del lactosuero ácido (entero y desproteinizado) utilizando *Lactobacillus casei*. *Revista Colombiana De Biotecnología*, 16(1), 137-145. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4808903>
- Cuzco, M., & Paulina, A. (2020). *Producción de biohidrógeno a partir de lodos residuales irradiados mediante un proceso integrado de fermentación oscura y electrólisis microbiana*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo). Retrieved from <http://dspace.espacech.edu.ec/handle/123456789/14271>
- Daza Castañeda, N. E. (2022). *ANÁLISIS DE COYUNTURA SECTOR LÁCTEO – 2021 / 2022 1er Trimestre*. (). Colombia: http://uspleche.minagricultura.gov.co/assets/boletin_economico_sector_lacteo_2022.pdf
- Dominguez, M. PRINCIPALES GÉNEROS DE BACTERIAS GRAM NEGATIVAS. ENTEROBACTERIAS. *Academia*, https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/56804133/PRINCIPALES_GENEROS_DE_BACTERIAS_GRAM_NEGATIVAS-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1666056848&Signature=fQ-10jU6W4CVk2dTHGmjMaaikVz760A9lCI-7tb2wnuYugHxGyTgQlkpUAgZwiiGX0oouyb-fDT07ct2k7d8ECRii-21fbouBE0e3nMdpX-b9rCY260DSD64nFaRQISINC38NtV3BuuwLiYZA7cLQlJErlojW6nOxa5pqPofE~~2B8Co57lc7ixQkp76evy71T1uyic-l3PSsZ-G6FBjrYxqZo-dkHP6K40lp2-nVKiM1VXq2taTLjEmuhbDmOLb-nVdAc22-076yezmrzv-qb0YU1eKPyLmBN7EbFEEZ18HCvFJp7f20WHXjuRgTQRcu3xs-SBeydDy8CNJOn7Ao-1pw_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV-4ZA
- El Tiempo, C. E. (2020). *Se inicia rastreo a la leche para saber si hay exceso de lactosuero*. Retrieved from <https://www.eltiempo.com/economia/sectores/rastreo-oficial-a-leche-en-colombia-por-exceso-de-lactosuero-462734>
- Estrada Arriaga, E., Guadarrama Pérez, Ó., & Hernández Romano, J. Producción de energía en un reactor bio-electroquímico generador de hidrógeno. *Paper presented at the Congreso Regional Para Norteamérica Y El Caribe*, http://187.174.234.55/bitstream/handle/20.500.12013/2119/OT_257.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Fernández Rodríguez, C., Martínez Torres, E. J., Morán Palao, A., & Gómez Barrios, X. (2016). Procesos biológicos para el tratamiento de lactosuero con producción de biogás e hidrógeno : *revisión bibliográfica*. *Virtualpro*, 29(1), 47-62. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016004>

- Fuentes Castillo, L. C. (2020). *Producción de hidrogeno por fermentación oscura y producción de electricidad a partir de suero de queso y otros subproductos industriales*. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/27666/1/uy24-19923.pdf>
- García-Sánchez, J. E., García-Sánchez, E., García-Moro, M., FAJARDO, M., HIDALGO, R., GAITÁN, J., SÁNCHEZ-SILOS, R., MARTÍN-CORDERO, P., JAÉN-SÁNCHEZ, N., & SUÁREZ-HORMIGA, L. (2016). El microbiólogo clínico ante los cambios taxonómicos en el género *Clostridium*. *Rev Esp Quimioter*, 29(5), 239-243. <https://seq.es/seq/0214-3429/29/5/garcial5sep2016.pdf>
- Gómez Soto, J. A., & Sánchez Toro, Ó J. (2019). Producción de galactooligosacáridos: alternativa para el aprovechamiento del lactosuero. *Una revisión. Ingeniería Y Desarrollo*, 37(1), 129-157. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14482/inde.37.1.637>
- Gonzalez, A. (2020). *Cadena láctea colombiana*. (). Colombia: https://www.upra.gov.co/documents/10184/124468/20200820_PPT_Analisis_Situacional_CadenaLactea.pdf/415b9312-a13b-4061-84f5-fd83c1b-48dbc
- Guterres, A. (2020). *Neutralidad en carbono para 2050: la misión mundial más urgente*. Naciones Unidas. <https://www.un.org/sg/es/content/sg/articles/2020-12-11/carbon-neutrality-2050-the-world%E2%80%99s-most-urgent-mission>
- Hernández Pardo, M. A. (2008). *Producción de hidrógeno a través de la digestión anaerobia del estiércol de cerdo* <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/9773/u303172.pdf?sequence=1>
- Hitit, Z. Y., Zampol Lazaro, C., & Hallenbeck, P. C. (2017). Increased hydrogen yield and COD removal from starch/glucose based medium by sequential dark and photo-fermentation using *Clostridium butyricum* and *Rhodospseudomonas palustris*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(30), 18832-18843. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.161>
- Juliano, P., Muset, G. B., & Castells, M. L. (2017). *Valorización del lactosuero*. Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- Kadier, A., Simayi, Y., Abdeslahian, P., Azman, N. F., Chandrasekhar, K., & Kalil, M. S. (2016). A comprehensive review of microbial electrolysis cells (MEC) reactor designs and configurations for sustainable hydrogen gas production. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 427-443. <https://doi.org/https://doi-org.ezproxy.uamerica.edu.co/10.1016/j.aej.2015.10.008>
- Larsen, C. (2022). *Informe preliminar con la lista de bienes y servicios asociados a las mejores tecnologías de producción, acondicionamiento, almacenamiento, distribución y re-electrificación de hidrógeno verde y azul*. (). https://www1.upme.gov.co/ServicioCiudadano/Documents/Proyectos_normativos/Informe_preliminar_propuesta_bienes_servicios_asociados_tecnologias_hidrogeno_verde_azul_Cir_10_2022.pdf
- Leroy Freitas, D. (2022). Producción de biohidrógeno a partir de lactosuero a través de fermentación oscura impulsada por lactato: aplicación de estrategias operacionales para la optimización de un sistema en continuo. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/55880>
- Lisouli Pérez-Torres, María de Lourdes Ballesteros-Almanza, & Georgina Carbajal-De, I. T. (2021). Obtención de membrana de grafeno a partir de *Shewanella oneidensis*. *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 9 <https://doi.org/10.29057/icbi.v9iEspecial2.7995>

- López Gutiérrez, I. (2015). *Producción de hidrógeno a partir de hidrolizados de bagazo de Agave tequilana Weber var. azul: efecto del procesamiento de la piña y de la sacarificación del bagazo* <http://hdl.handle.net/11627/2951>
- Martínez, V., & García, R. (2010). Fermentación oscura, fotofermentación y biofotólisis: análisis de su aplicación en secuencia para la producción de hidrógeno biológico. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2415.9844>
- Mizuno, O., Dinsdale, R., Hawkes, F. R., Hawkes, D. L., & Noike, T. (2000). Enhancement of hydrogen production from glucose by nitrogen gas sparging. *Bioresource Technology*, 73(1), 59-65. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00130-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00130-3)
- Montiel, V., Revah, S., & Morales, M. Producción de hidrógeno bajo ciclos luz-oscuridad en lote y semi-continuo por un cultivo fotoheterótrofo. Paper presented at the *Congreso Nacional De Biotecnología Y Bioingeniería*, <https://smbb.mx/congresos%20smbb/guadalajara15/PDF/XVI/trabajos/IX/IXC-28.pdf>
- Montoya-Pérez, L., & Durán-Herrera, J. E. (2017). Producción de Hidrógeno a partir de la fermentación de residuos agroindustriales de la piña. *Revista Tecnología En Marcha*, 30(3), 106-118. <https://doi.org/10.18845/tm.v30i3.3277>
- Naciones Unidas (2020). Cambios demográficos. Naciones Unidas. <https://www.un.org/es/un75/shifting-demographics>
- Ni, M., Leung, D. Y. C., Leung, M. K. H., & Sumathy, K. (2006). An overview of hydrogen production from biomass. *Fuel Processing Technology*, 87(5), 461-472. <https://doi.org/https://doi.org.ezproxy.uamerica.edu.co/10.1016/j.fuproc.2005.11.003>
- Obregon Taborda, R. M. (2022). Estudio analítico, característico y aplicativo de procesos innovadores para dar valor agregado al lactosuero en Colombia. <http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/5532>
- Pacheco V, M. M., Porras A, O. O., Velasco, E., Morales-Valencia, E. M., & Navarro, A. (2017). Effect of the milk-whey relation over physicochemical and rheological properties on a fermented milky drink. *Ingeniería Y Competitividad*, 19(2), 83-91. <https://doi.org/https://doi.org/10.25100/iyc.v19i2.5295>
- Parra Huertas, R. A. (2009). LACTOSUERO: IMPORTANCIA EN LA INDUSTRIA DE ALIMENTOS WHEY: IMPORTANCE IN THE FOOD INDUSTRY. *Revista Facultad Nacional De Agronomía*, Medellín, 62(1), 4967-4982. <https://doaj.org/article/bba97befd3e649f8a8255775242ecae8>
- Patra, S., Sangyoka, S., Boonmee, M., & Reungsang, A. (2008). Bio-hydrogen production from the fermentation of sugarcane bagasse hydrolysate by *Clostridium butyricum*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(19), 5256-5265. <https://doi.org/https://doi-org.ezproxy.uamerica.edu.co/10.1016/j.ijhydene.2008.05.008>
- Paz Mireles, C. L. (2016). *Efecto de la composición de mezclas de metabolitos procedentes de la fermentación oscura para su uso en la producción de biohidrógeno en celdas de electrólisis microbiana* <https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/571/3/TMIPICYTP3E42016.pdf>
- Pérez, Y. G. C., Santaella, J. R. B., & Susa, D. A. H. (2024). Hidrógeno verde revisión del estado del arte de las tecnologías de generación para la descarbonización del sector energético. *Ingeniería y Competitividad*, 26(3). https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/14190

- Poveda, E. (2013). Suero lácteo, generalidades y potencial uso como fuente de calcio de alta biodisponibilidad. *Revista Chilena De Nutrición*, 40(4), 397-403. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182013000400011>
- Prados, M. B. (2022). SISTEMAS BIOELECTROQUÍMICOS. Desde La Patagonia. *Difundiendo Saberes*, <https://revela.uncoma.edu.ar/index.php/desdelapatagonia/article/view/4286>
- Proaño, M. (2021). Hidrógeno verde. ¿Una oportunidad para la transición energética justa, democrática y popular en Latinoamérica? *Energía Y Equidad*, (3), 79-81. https://co.boell.org/sites/default/files/2021-12/E_y_E_2021-N3_Energia_Mundo.pdf#page=77
- Rago, L. (2015). *A microbiological approach to improve the performance of single-chamber bioelectrochemical systems* <http://hdl.handle.net/10803/309286>
- Rai, P. K., Asthana, R. K., & Singh, S. P. (2014). Optimization of photo-hydrogen production based on cheese whey spent medium. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(14), 7597-7603. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.09.011>
- Redondas Monteserín, V. (2014). *Obtención de Hidrógeno mediante la fermentación oscura de residuos de comida y lactosuero* <https://doi.org/10.18002/10612/3276> <http://hdl.handle.net/10612/3276>
- Reungsang, A., Zhong, N., Yang, Y., Sittijunda, S., Xia, A., & Liao, Q. (2018). Hydrogen from Photo Fermentation. In Q. Liao, J. Chang, C. Herrmann & A. Xia (Eds.), *Bioreactors for Microbial Biomass and Energy Conversion* (pp. 221-317). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7677-0_7
- Rojas, A., Montañó, L., & Bastidas, M. (2015, "Nov, 17, "). Producción de ácido láctico a partir del lactosuero utilizando *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus*. <https://www.proquest.com/docview/1819133846>
- Romero Mejía, A. A., Vásquez, J. A., & Lugo González, A. (2012). Bacterias, fuente de energía para el futuro. *Tecnura*, 16(32), 118-143. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0123-921X2012000200011&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Rosales Colunga, L. M. (2007). Obtención de cepas mutantes de *Escherichia coli* sobreproductoras de hidrógeno a partir de lactosuero. <http://hdl.handle.net/11627/3026>
- Rosas, J. E., & Garfias, M. J. A. (2022). Desarrollo de tecnologías para la reutilización sostenible del lactosuero. *Environmental Sciences and Practices*, 1(1). <https://www.mlsjournals.com/Environmental-Science-Practices/article/view/1369>
- Ruiz Lizama, E., & Raffo Lecca, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial Data*, 17, 71-80. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81640855010>
- Sotelo, P. (2017). "Producción de bioH₂ por fermentación oscura a partir de pañales desechables usados. *Mundo nano* (en línea), 10(18), 95-102. Retrieved from <http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/5719>
- Suárez Alcántara, K. (2019). Un poco de todo sobre el HIDRÓGENO. *Ciencia - Academia Mexicana De Ciencias*, 70(1), 72-80. https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/70_1/PDF/Hidrogeno.pdf
- Taibi, E., Miranda, R., Vanhoudt, W., Winkel, T., Lainoix, J., & Barth, F. (2018). *Hydrogen From Renewable Power Technology Outlook For The Energy Transition*. (). https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf

Valencia, E., & Ramírez, L. (2019). La industria de la leche y la contaminación del agua., 1-6. <https://www.redalyc.org/pdf/294/29411996004.pdf>

Valentine, D. L., Blanton, D. C., & Reeburgh, W. S. (2000). Hydrogen production by methanogens under low-hydrogen conditions. *Archives of Microbiology*, 174(6), 415-421. <https://doi.org/10.1007/s002030000224>

VázquezEsnoval, C. O., PintoRuiz, R., RodríguezHernández, R., de la Torre, Jesús Carmona, & de Jesús, A. G. (2017). *Uso, producción y calidad nutricional del lactosuero en la región central de Chiapas*. 21(1), 65-76. <https://web-p-ebscohost-com.ezproxy.uamerica.edu.co/ehost/detail/detail?vid=4&sid=c4b7bfff-ac2e-4330-8bf7-bf94b7bc490d%40redis&bdata=JkF1dGhUeXBIPWlwLHVybCZsYW5nPWVzJnNpdGUgZWwhvc3QtbGl2ZSZzY29wZT1zaXRl#db=bth&AN=123998536>

Veliz Sedano, N. M. (2015). Desarrollo de un producto horneado a base de quinua para el adulto mayor. *Virtual Pro*, <https://www.virtualpro.co/biblioteca/desarrollo-de-un-producto-horneado-a-base-de-quinua-para-el-adulto-mayor#comocitar>

Wenzel, J., Fuentes, L., Cabezas, A., & Etchebehere, C. (2017). Microbial fuel cell coupled to biohydrogen reactor: a feasible technology to increase energy yield from cheese whey. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 40(6), 807-819. <https://doi.org/10.1007/s00449-017-1746-6>

Yañez de Ugarte, J. (2016). *Influencia de les plantes en la produccio electrica de piles microbianes implementades en aiguamolls construïts* <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/84788/711-TES-CA-6834.pdf>

