



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM
Facultad de Ciencias de la Vida
Ingeniería en Biotecnología

**Análisis bibliométrico sobre la producción de biohidrógeno:
generación a partir de la digestión anaerobia y tendencias**

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:

INGENIERA EN BIOTECNOLOGÍA

AUTOR: ROSSANA BEATRIZ PARRA AGUIAR

TUTOR: Mgs. CRISTHIAN DAVID CHICAIZA ORTIZ

Napo-Ecuador

2023

Declaración de derecho de autor, autenticidad y responsabilidad

Tena, 25 de abril de 2023

Yo, ROSSANA BEATRIZ PARRA AGUIAR con documento de identidad N° 1726371766, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título de Ingeniero en Biotecnología son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

En virtud de lo cual, el contenido, criterios, opiniones, resultados, análisis, interpretaciones, conclusiones, recomendaciones y todos los demás aspectos vertidos en la presente investigación son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.

Por la favorable atención a la presente, suscribo de usted, Atentamente,

Firma:



Rossana Beatriz Parra Aguiar
C.I. 1726371766

Autorización de publicación en el repositorio institucional

Yo, ROSSANA BEATRIZ PARRA AGUIAR, con documento de identidad N° 1726371766, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación: **ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO SOBRE LA PRODUCCIÓN DE BIOHIDRÓGENO: GENERACIÓN A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA Y TENDENCIAS** de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN, reconozco a favor de la Universidad Regional Amazónica Ikiam una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Así mismo autorizo a la Universidad Regional Amazónica Ikiam para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación superior.

Tena, 25 de abril de 2023



Rossana Beatriz Parra Aguiar
C.I. 1726371766

Certificado de dirección de trabajo de integración curricular

Certifico que el trabajo de integración curricular titulado: “Análisis bibliométrico sobre la producción de biohidrógeno: generación a partir de la digestión anaerobia y tendencias” en la modalidad de: proyecto de investigación en formato artículo académico, fue realizado por: Rossana Beatriz Parra Aguiar, bajo mi dirección.

El mismo ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad Regional Amazónica Ikiam, para su entrega y defensa.

Tena, 25 de abril de 2023

.....
Mgs. Cristhian David Chicaiza Ortiz
C.I: 1500637887

Dedicatoria

A Dios:

Dios Padre todo poderoso, gracias porque has llenado mi vida de tantas bendiciones, locuras, miedos, obstáculos y grandes oportunidades que me has ido presentando en este camino llamado “Vida universitaria”. Gracias porque a veces parecía que no encontraba sentido a las cosas que iban ocurriendo en el camino pero luego me mostrabas el camino correcto y porque de las cosas que iban sucediendo. De todas estas cosas que me han pasado ya sean buenas o malas me quedaron enseñanzas únicas que solo se presentan una vez en la vida. Gracias por nunca soltar mi mano y porque siempre escuchaste mis suplicas.

A mis padres:

Gracias a mis padres Estela y Guido porque por ellos siempre pude hacer todo lo que he soñado desde que he sido pequeñita. Gracias a ellos he podido ser una mejor mujer cada día porque me han enseñado a levantarme cada que me he caído, a luchar por lo que amo y siempre a hacer las cosas como deben ser. Gracias a ellos estoy a punto de ser una ingeniera, porque siempre se preocuparon de que no me falte absolutamente nada. Gracias por proteger a mis hermanos y a mí como los tesoros más importantes de sus vidas. También aprovecho para agradecerles a mis hermanitos David y Chari porque cada que iban me dejaban cartas hermosas que demostraban cuanto me extrañaban pero que siempre me tenían presente en su corazón.

A esas personitas:

Gracias a cada una de las amistades que he podido hacer en estos años de universidad y más aún a los que estuvieron en los momentos en los que era un “madre mía, ya no doy más”. Gracias a cada uno de ustedes porque pude aprender tantas cosas que me permitieron vivir tantos momentos importantes. Espero poder encontrarlos a futuro como colegas, que estemos trabajando y cumpliendo todos los sueños que algún día nos estuvimos contando que haríamos. Los quiero mucho y por favor sigan adelante siempre. Estelita Mashkamuyinyikiq risaq!! Muchas gracias a cada uno de los profesores por el tiempo que se dieron en darnos clases y a mi tutor por el tiempo que me dio para avanzar cada etapa del proceso de titulación.

Y por último y no menos importante:

A mí.

Agradecimiento

Agradezco a todo el personal que conforma la Universidad Regional Amazónica Ikiam. Por ustedes somos una comunidad universitaria, gracias a todo su esfuerzo podemos aprender desde cero y llegar a graduarnos de una gran universidad. Que con cada uno de sus conocimientos, experiencias y vivencias impartidos y experimentados podamos ayudar y servir a la sociedad en la que nos encontramos por ser ingenieros en biotecnología.

¡Gracias a todos!

Rossi

TABLA DE CONTENIDOS

CARÁTULA.....	i
DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD.....	ii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICU- LAR.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
TABLA DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	x
1.INTRODUCCIÓN.....	4
2.METODOLOGÍA.....	7
2.1. Análisis bibliométrico.....	7
2.1.1. Selección de bases de datos y criterios de búsqueda.....	8
2.1.2. Análisis bibliométrico.....	8
2.1.3. Selección de bases de bases de datos y criterios de búsqueda	9
2.2. Revisión bibliográfica sobre la producción de biohidrógeno.....	9
3.RESULTADOS.....	10
3.1.1. Producción científica anual por periodo.....	10
3.1.2. Análisis de cooperación entre países/regiones.....	13
3.1.3. Revistas con mayor número de documentos.....	15
3.1.4. Los 10 documentos más citados.....	17
3.1.5. Redes de colaboraciones.....	19
3.1.6. Palabras clave.....	20
3.2. Revisión bibliográfica sobre el biohidrógeno, hidrógeno y DA.....	21
3.2.1. Estado del arte de la producción de biohidrógeno e H ₂	21
3.2.2. Técnicas y rutas de producción de BIO-H ₂ e hidrógeno.....	23
3.2.3. Reactores utilizados para la producción de H ₂ y BIO-H ₂	30
4.DISCUSIÓN.....	33
5.CONCLUSIONES.....	38
6.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Diagrama de flujo basado en la metodología PRISMA, cada cuadro representa una fase de la metodología de investigación bibliométrica. Elaborado en diagramas.net	7
Figura 2:	Las cuatro fases del procedimiento del método de Framework SALSA, elaborado en Word	10
Figura 3:	Producción anual de documentos por año sobre la producción de biohidrógeno utilizando la digestión anaerobia. Elaborado en origin y en Excel	11
Figura 4:	Mapa de visualizaciones de citas por países/regiones	13
Figura 5:	Número de publicaciones sobre la producción de biohidrógeno por país. Elaborado en ArcMAP	15
Figura 6:	Mapa de colaboraciones en estudios sobre la producción de biohidrógeno utilizando la digestión anaerobia desde el 2003 al 2023. Elaborado por Bibliometrix	20
Figura 7:	Palabras claves más frecuentes en la investigación y visualización de una red de concurrencia de las palabras claves más utilizadas en el gestor de búsqueda de la base de datos Scopus. Elaborado en VOSviewer	21
	Rutas metabólicas para la producción de biohidrógeno. Elaborado en Word	24

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Recopilación de artículos desde los más antiguos a los más citados con los respectivos tópicos de interés según el periodo	21
Tabla 2:	Enlaces y fuerza total de los enlaces de los 10 principales países con mayor número de documentos	24
Tabla 3:	Clasificación de revistas por el número de publicaciones más relevantes sobre la producción de biohidrógeno utilizando la digestión anaerobia	25
Tabla 4:	Artículos más citados sobre la producción de biohidrógeno utilizando la digestión anerobia	28
Tabla 5:	Ventajas y desventajas de las técnicas de producción de hidrógeno y biohidrógeno	38

RESUMEN

El constante incremento de la población está vinculado al incremento de recursos fósiles energéticos, principalmente de origen fósil. Hoy en día, el interés se enfoca en desarrollar tecnologías eficientes para producir alternativas como el biohidrógeno de manera rentable, óptima y eficiente. Con ello, se podría contribuir en la mitigación del cambio climático y la crisis energética. En este sentido, el objetivo de este estudio de esta investigación es desarrollar un análisis bibliométrico sobre la producción de biohidrógeno utilizando la digestión anaerobia como técnica potencial. La metodología propuesta consideró el alcance de producción de documentos que existe sobre el tema, que fue desde el 2003 al 2023, se utilizó artículos indexados de la base de datos, Scopus. Se siguieron tres fases para el análisis bibliométrico: a) Selección de bases de datos y criterios de búsqueda; b) Análisis bibliométrico y, c) Revisión bibliométrica, Método PRISMA. Por otro lado, para el análisis bibliográfico, se basó en las cuatro fases de investigación según el método Framework: (1) búsqueda, (2) evaluación, (3) análisis, y, (4) síntesis. En los resultados se analizaron diferentes aspectos que permitieron identificar las tendencias del tema, autores, revistas y países con mayor número de publicaciones. Se presentaron las condiciones para la producción de biohidrógeno como los reactores, parámetros óptimos, factores que influyen en el proceso, rutas biológicas y microorganismos presentes. Conclusión, se ha demostrado que producir biohidrógeno utilizando la digestión anaerobia permite sustituir a los combustibles fósiles por ser una opción exitosa para lograr satisfacer las necesidades energéticas a futuro.

Palabras claves: anaerobia, bibliometría, biohidrógeno, digestión, energía, fermentación.

ABSTRACT

The constant increase in population is linked to the constant demand for fossil resources. Today, the literature focuses on the development of efficient technologies to produce alternatives such as biohydrogen in a cost-effective, optimal and efficient way. This could contribute to the mitigation of climate change and the energy crisis. In this sense, the objective of this research study is to develop a bibliometric analysis of biohydrogen production using anaerobic digestion as a technique. The proposed methodology has taken into account the extent of the existing literature production on the subject, from 2003 to 2023, using the indexed articles of the Scopus database. The bibliometric analysis was carried out in three phases: a) selection of databases and search criteria; b) bibliometric analysis and c) bibliometric examination according to the PRISMA method. On the other hand, the bibliometric analysis was based on the four phases of research according to the Framework method: (1) research, (2) evaluation, (3) analysis and (4) synthesis. The results analyzed different aspects that identified trends on the topic, authors, journals and countries with the highest number of publications. The conditions for biohydrogen production such as reactors, optimal parameters, factors influencing the process, biological pathways and microorganisms present were also presented. In conclusion, it was shown that biohydrogen production by anaerobic digestion can replace fossil fuels as an efficient option to meet future energy needs.

Keywords: anaerobic, bibliometrics, biohydrogen, digestion, energy, fermentation

Análisis bibliométrico sobre la producción de biohidrógeno: generación a partir de la digestión anaerobia y tendencias

RESUMEN

El constante incremento de la población está vinculado al incremento de recursos fósiles energéticos, principalmente de origen fósil. Hoy en día, el interés se enfoca en desarrollar tecnologías eficientes para producir alternativas como el biohidrógeno de manera rentable, óptima y eficiente. Con ello, se podría contribuir en la mitigación del cambio climático y la crisis energética. En este sentido, el objetivo de este estudio de esta investigación es desarrollar un análisis bibliométrico sobre la producción de biohidrógeno utilizando la digestión anaerobia como técnica potencial. La metodología propuesta consideró el alcance de producción de documentos que existe sobre el tema, que fue desde el 2003 al 2023, se utilizó artículos indexados de la base de datos, *Scopus*. Se siguieron tres fases para el análisis bibliométrico: a) Selección de bases de datos y criterios de búsqueda; b) Análisis bibliométrico y, c) Revisión bibliométrica, Método PRISMA. Por otro lado, para el análisis bibliográfico, se basó en las cuatro fases de investigación según el método *Framework*: (1) búsqueda, (2) evaluación, (3) análisis, y, (4) síntesis. En los resultados se analizaron diferentes aspectos que permitieron identificar las tendencias del tema, autores, revistas y países con mayor número de publicaciones. Se presentaron las condiciones para la producción de biohidrógeno como los reactores, parámetros óptimos, factores que influyen en el proceso, rutas biológicas y microorganismos presentes. Conclusión, se ha demostrado que producir biohidrógeno utilizando la digestión anaerobia permite sustituir a los combustibles fósiles por ser una opción exitosa para lograr satisfacer las necesidades energéticas a futuro.

Palabras claves: anaerobia, bibliometría, biohidrógeno, digestión, energía, fermentación.

ABSTRACT

The constant increase in population is linked to the constant demand for fossil resources. Today, the literature focuses on the development of efficient technologies to produce alternatives such as biohydrogen in a cost-effective, optimal and efficient way. This could contribute to the mitigation of climate change and the energy crisis. In this sense, the objective of this research study is to develop a bibliometric analysis of biohydrogen production using anaerobic digestion as a technique. The proposed methodology has taken into account the extent of the existing literature production on the subject, from 2003 to 2023, using the indexed articles of the Scopus database. The bibliometric analysis was carried out in three phases: a) selection of databases and search criteria; b) bibliometric analysis and c) bibliometric examination according to the PRISMA method. On the other hand, the bibliometric analysis was based on the four phases of research according to the Framework method: (1) research, (2) evaluation, (3) analysis and (4) synthesis. The results analyzed different aspects that identified trends on the topic, authors, journals and countries with the highest number of publications. The conditions for biohydrogen production such as reactors, optimal parameters, factors influencing the process, biological pathways and microorganisms present were also presented. In conclusion, it was shown that biohydrogen production by anaerobic digestion can replace fossil fuels as an efficient option to meet future energy needs.

Keywords: anaerobic, bibliometrics, biohydrogen, digestion, energy, fermentation

Abreviaturas

Digestión anaerobia	:	DA
Biohidrógeno	:	Bio-H ₂
Hidrógeno	:	H ₂
Primer Cuartil	:	Q1
Segundo cuartil	:	Q2
Tercer cuartil	:	Q3
Cuarto cuartil	:	Q4
SJR	:	<i>SCImago Journal Rank</i>
Gases de efecto invernadero	:	GEI
Dióxido de carbono	:	CO ₂

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe en el mundo 8.000 millones de personas que requieren de mayor cantidad de energía por esta alza poblacional que existe para satisfacer necesidades como el transporte, calefacción, iluminación, entre otros. El uso de los combustibles fósiles son el principal factor que satisface esta demanda, a pesar de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y al cambio climático que produce generar al generar el biohidrógeno con este recurso (Baiman, 2022). Por lo tanto, es fundamental buscar fuentes de energía sostenibles y eficientes para abordar la sobrepoblación y la demanda energética de manera equilibrada y rentable (Arimi et al., 2015; Tezel et al., 2019).

En este contexto, existen diferentes investigadores que se han dedicado a buscar alternativas como los biocombustibles (Velásquez & Moreno, 2011), una de las opciones innovadoras es el uso de hidrógeno (H_2) por su potencial de reducción de gases de efecto invernadero (Arimi et al., 2015). El H_2 es el elemento más liviano y abundante del mundo, es considerado un vector energético que puede ser utilizados en una gran variedad de aplicaciones, como la generación de electricidad, transporte, calefacción, industria, entre otros (Lubbe et al., 2023; Rasul et al., 2022). Esto podría influir en la actividad económica, diversificando la matriz energética (Beasy et al., 2022; van Renssen, 2020).

En este sentido, el hidrógeno producido a partir de fuentes biológicas es conocido como biohidrógeno. El biohidrógeno es una alternativa viable por ser una energía limpia (Dokhani et al., 2022) y merece ser evaluada a largo plazo (Catumba et al., 2022). En la actualidad, se han publicado artículos que han evaluado distintos sustratos para la producción de biohidrógeno. Se han estudiado algas (Singh & Sarma), organismos fotoautótrofos (Singh & Sarma) y enzimas (Kruse et al., 2005; Kumar et al., 2020; Woodward et al., 2000) y residuos orgánicos de hogares y mercados (Levikhin & Boryaev, 2022). Esto sugiere un amplio abanico de materias primas potenciales para la producción biohidrógeno (Burton et al., 2021; Chen et al., 2022).

Aunque el biohidrógeno es un elemento prometedor, también existen algunas limitaciones en su producción y uso: a) *Proceso de producción costoso*: La producción de biohidrógeno a gran escala aún es costosa por la tecnología limitada que hay hoy en día y la necesidad de sistemas de producción que sean eficientes y económicos a la vez

(Stenina & Yaroslavtsev, 2022); b) *Fuentes limitadas de materia prima*: La producción de biohidrógeno depende de la disponibilidad de materias primas orgánicas, como residuos agrícolas y forestales, lo que puede ser un limitante en algunas regiones del mundo; c) *almacenamiento y transporte*: El biohidrógeno al ser un gas volátil requiere un almacenamiento y transporte de manera segura para su uso a gran escala; e) *Eficiencia limitada*: La eficiencia de la producción y uso de biohidrógeno aún es limitada en comparación con otros vectores energéticos, como los combustibles fósiles (Godvin Sharmila et al., 2022); f) *Emisiones de gases de efecto invernadero*: El proceso de producción de biohidrógeno puede emitir gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO₂), lo que limita su capacidad para ser una solución completamente sostenible para la energía. A pesar de estas limitaciones, el biohidrógeno (Bio-H₂) sigue siendo una fuente potencial de energía renovable y sostenible que requiere más investigación y desarrollo para mejorar su eficiencia y reducir sus impactos ambientales (Benavides & León, 2007; Castiblanco & Cárdenas, 2020).

La digestión anaerobia (DA) es un proceso biológico que descompone la materia orgánica en ausencia de oxígeno que a la vez produce biogás. Por medio de la digestión anaerobia se puede obtener como producto el biohidrógeno. Algunas de las formas que se pueden obtener el biohidrógeno utilizando la digestión anaerobia es por medio de la codigestión de residuos orgánicos. Con codigestión se refiere a la mezcla de diferentes tipos de residuos orgánicos (residuos alimentarios, residuos agrícolas, residuos de municipios o de hogares, etc) que se encuentran dentro de un reactor de digestión anaerobia. Otra de las formas que se puede obtener el biohidrógeno es utilizando microorganismos como las bacterias fermentativas (*Clostridium sp.*, *Enterobacter sp.*, *Escherichia coli*, y *Bacillus sp*) o las bacterias fototróficas (*Rhodobacter sphaeroides*, *Rhodopseudomonas palustris*, y *Chlorobium tepidum*) que son sensibles a las condiciones del entorno.

La presente investigación aborda la Digestión Anaerobia, puesto que es una tecnología apropiada para la producción de biohidrógeno (Bio-H₂) (Khan et al., 2018; Yuan et al., 2021), ya que permite valorizar la materia orgánica generada diariamente (Liu et al., 2021) en ausencia de oxígeno. Con esta ruta biológica no solo se puede producir energía, sino también se puede llevar un control de los residuos orgánicos (Liu et al., 2021). De este proceso se tendrá como producto el biogás, compuesto en su mayoría por metano y dióxido de carbono, con partes menores de hidrógeno (Zhang et al., 2021). Estos compuestos químicos son biocombustibles alternativos viables para satisfacer la

creciente demanda de energía.

Actualmente, se han desarrollado estudios que destacan temas como los bioprocesos, optimización, avances potenciales de la producción de Bio-H₂ (Ghosh, 2022). Sin embargo, no existe un reporte actualizado que recopile las mejores técnicas, rendimientos y metodologías que permitan producir el Bio-H₂ a partir de la DA, donde se indique la importancia de un análisis bibliométrico, en el cual se muestre un enfoque global de los nuevos temas o vacíos de la investigación al respecto. Por ello, esta investigación tiene como objetivo, realizar un análisis bibliométrico y bibliográfico sobre la producción de hidrógeno a partir de la digestión anaerobia, identificando las áreas de interés en investigación y las tendencias, considerando los artículos publicados desde el 2003 al 2023.

Este trabajo consta de cuatro secciones. El primero contiene una introducción sobre la producción de biohidrógeno utilizando la técnica de digestión anaerobia. La sección 2 presenta la metodología para el análisis bibliométrico (selección de bases de datos y los criterios de búsqueda, análisis bibliométrico con el método PRISMA y para la revisión bibliográfica sobre la producción de biohidrógeno). La sección 3 se presenta los resultados sobre los diferentes puntos analizados en el análisis bibliométrico como: la producción científica anual por periodo, análisis de cooperación entre países/regiones, revistas con mayor número de documentos, los 10 documentos más citados, las redes de colaboraciones y las palabras claves del autor, y en la revisión bibliográfica con temas como el estado del arte, las técnicas y rutas de producción, y los reactores que se utilizan para la producción de biohidrógeno e hidrógeno. En la sección 4 se presenta una discusión de los análisis expuestos en los resultados. Y por último, se presentan una breve conclusión de todo el trabajo, hallazgos y las limitaciones que pueden existir al utilizar esta técnica para producir el Bio-H₂.

2. METODOLOGÍA

2.1 Análisis Bibliométrico

Se desarrolló en función de la metodología PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Este método permite recopilar los documentos de manera rápida y eficiente. La metodología PRISMA se utiliza para estandarizar la forma en que se llevan a cabo las revisiones sistemáticas y metaanálisis en el campo de las ciencias biológicas (Page et al., 2021; Rethlefsen et al., 2021).

Respecto a la revisión bibliométrica, como se muestra en la figura 1, se dividió el estudio en tres fases para tener un análisis óptimo sobre la producción de biohidrógeno utilizando la digestión anaerobia, así en la figura 1 se puede observar estas fases: a) Selección de bases de datos y criterios de búsqueda; b) Análisis bibliométrico y, c) Revisión bibliométrica, Método PRISMA.

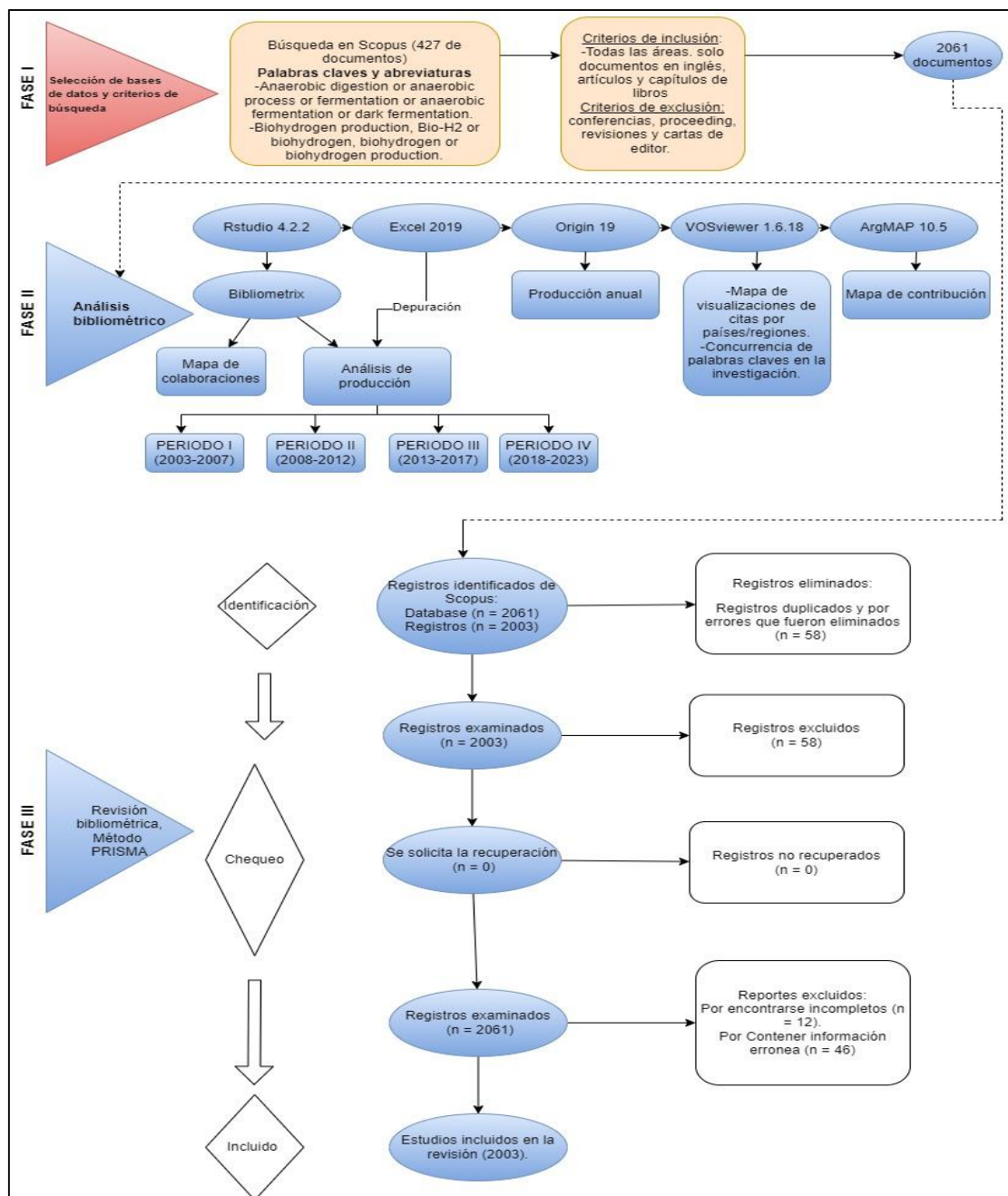


Figura 1: Diagrama de flujo basado en la metodología PRISMA con cada fase de la metodología aplicada. Obtenido con diagramas.net

Realizado por: Rossana Parra

2.1.1 Selección de bases de datos y criterios de búsqueda

En cuanto a la recopilación y búsqueda de documentos, se descargaron los datos en marzo del 2023, utilizando solo la información de títulos, resúmenes y las palabras claves del autor. A la vez, se tomó todo el lapso de producción científica que existe desde el 2003 al 2023 y se lo dividió en cuatro periodos que se pueden observar en la

figura 1 fase II. Para que se pueda llevar a cabo este proceso, se empleó la siguiente sintaxis con la configuración de búsqueda avanzada que se muestra a continuación: (TITLE-ABS-KEY ("biohydrogen production" OR "bio-h2" OR "bio hydrogen" OR "bio-hydrogen" OR "bio-hydrogen production")) AND TITLE-ABS-KEY ("ad" OR "anaerobic digester" OR "anaerobic process" OR "fermentation" OR "anaerobic fermentation" OR "dark fermentation")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "ch")) AND (EXCLUDE (DOCTYPE , "ch")) AND (EXCLUDE (SRCTYPE , "k") OR EXCLUDE (SRCTYPE , "d")). La búsqueda arrojó 2,061 documentos hasta la fecha de obtención de los documentos de la base de datos.

Con respecto a los criterios de búsqueda, se excluyeron *conference proceeding* y cartas al editor; solo se seleccionaron artículos completos, como documentos científicos en los que se incluyó a las revisiones para este estudio. Esta categoría fue seleccionada por encontrarse entre los documentos más analizados a nivel científico porque aportan información a mayor profundidad. Además, también son revisados de manera rigurosa por pares ciegos al ser extensos los documentos de investigación. Asimismo, se ha considerado solo documentos que ya hayan cumplido y completado el proceso de revisión por pares y se encuentren en estado de publicación final antes de febrero de 2023. Bajo estos criterios, se excluyeron 58 documentos, quedando un total de 2003 documentos.

2.1.2 Análisis bibliométrico

En este análisis bibliométrico se utilizaron diferentes tipos de software para el análisis de la información científica que fue recopilada de la base de datos *Scopus*, que fue depurada en *Microsoft Excel Office 2019* y luego procesada y analizada en *Bibliometrix 4.1.0* por medio de *RStudio 4.2.2* utilizando el formato CSV, con *Bibliometrix* se obtuvo el mapa de colaboraciones y también se clasificó en *Excel* el análisis de producción. Otro de los programas que se utilizó para analizar los datos que fueron exportados de *Microsoft Excel Office 2019* a *Origin 2019*, con este se obtuvo la producción anual de documentos. Asimismo, con *VOSviewer 1.6.18* permitió obtener diferentes figuras como el mapa de visualizaciones y la concurrencia de países o palabras claves. Todo esto se ingresó con el formato CSV. Por último, con *ArcMap* se obtuvo el mapa de contribuciones por países que se obtuvo de los datos de la base de datos *Scopus* de los 2003 documentos.

2.1.3 Revisión Bibliométrica, Método PRISMA}

Se siguió el método PRISMA, en el cual se identificó tres fases, a) identificación, b) chequeo y, c) incluido. En la identificación se identificaron los documentos totales que obtuvimos de la base de datos *Scopus*, en esta se obtuvieron 2061 documentos de los cuales se eliminaron 58 por encontrarse duplicados y por contener errores, quedó un total de 2003 documentos. La segunda fase fue el chequeo, en este se examinaron los 2003 documentos de los que se excluyeron anteriormente de los 2061. No se solicitó recuperación de ningún documento eliminado. De estos 58 documentos se excluyeron por encontrarse incompletos los títulos o porque no contenían la información completa como, por ejemplo, en los títulos, palabras claves, resúmenes. O porque contenía errores en los títulos. En vez de tener los títulos correctos en la base de datos que daba la base de datos *Scopus*, tenían correos electrónicos en vez del respectivo título o documentos no tenían el DOI. El 26 de marzo de 2023 se volvió a tomar los datos en los que se observa que aumento la producción científica con documentos depurados, quedaron 2210 documentos. Estos datos fueron los que se tomaron para realizar los resultados de esta investigación.

2.2 Revisión bibliográfica sobre la producción de biohidrógeno

Para que pueda ser una revisión sistemática es necesario que cumpla estas cuatro fases que se muestran en la Figura 2 con respecto al método de Framework SALSA. Este método Framework o también conocido como SALSA por “*Search*”, “*Appraisal*”, “*Syntesis*” y “*Analysis*”. Aunque es necesario mencionar que alguna de estas cuatro fases que se muestran en la figura 2 puede segregarse en otras. Cada fase necesitó que la pregunta planteada fuera respondida para tener como resultado una revisión de calidad. Con esto las dos primeras fases (búsqueda y evaluación) permitieron obtener la información de manera recopilada de la base de datos que se seleccione, en este caso es *Scopus*. Las otras dos fases restantes (análisis y síntesis), van a depender de la investigación en concreto, pero sin dejar que se proporcionen orientaciones sobre el tema. La fase adicional puede ser la presentación, al ser una síntesis de la información en la cual recomiendan utilizar las tablas y diagramas al texto.

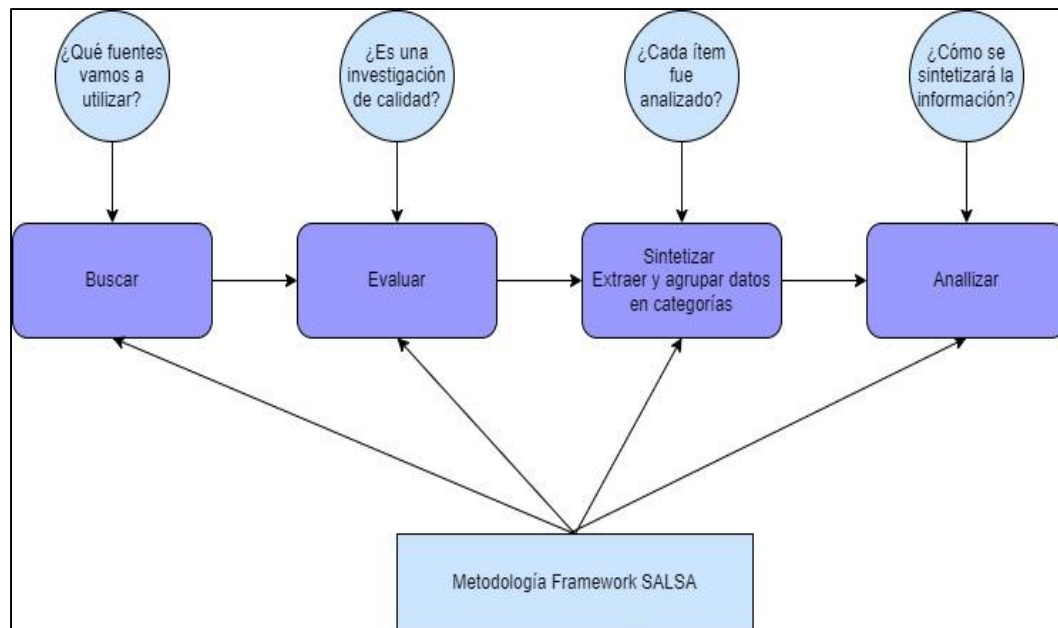


Figura 2: Las cuatro fases del procedimiento del método de Framework SALSA, figura realizada en Word.

Realizado por: Rossana Parra

3. RESULTADOS

3.1 Análisis Bibliométrico

3.1.1 Producción científica anual por periodo

La figura 3 muestra una visión de manera cronológica del número de documentos que fueron publicados por año desde el 2003 hasta marzo del 2023. En la cual se dividió en cuatro lapsos de tiempo, (a) periodo I (2003 - 2007), (b) periodo II (2008 - 2012), (c) periodo III (2013 – 2017) y el último periodo que contiene los últimos 6 años, (2018 - 2023). Cada uno de los periodos se dividió de un color para poder distinguirlos con más facilidad, (a) periodo I (azul), (b) periodo II (anaranjado), (c) periodo III (gris) y el periodo IV (verde). Los números que se encuentran de color rojo son los que tienen mayor cantidad de documentos publicados por año.

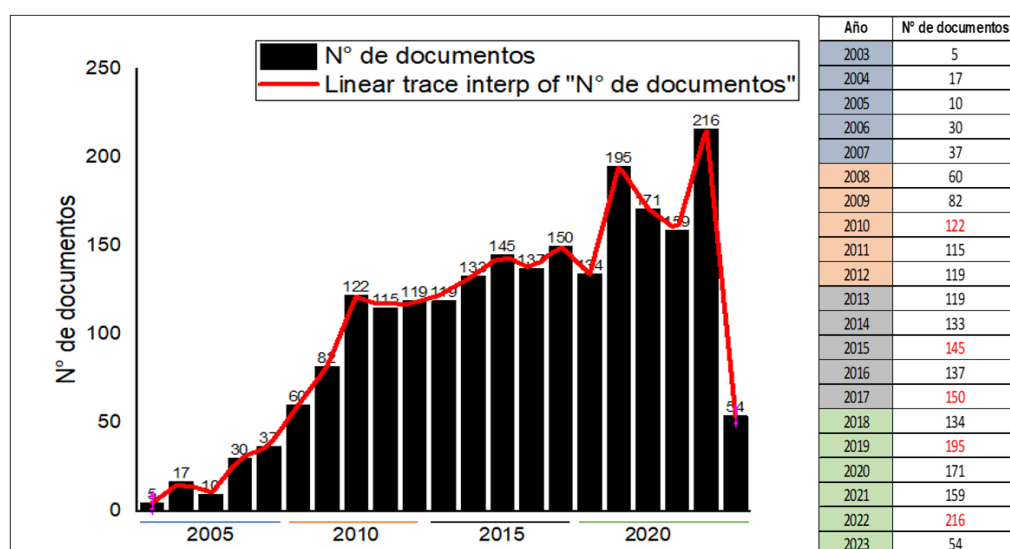


Figura 3: Producción anual de documentos por año sobre la producción de biohidrógeno utilizando la digestión anaerobia. Figura obtenida con Origin y Excel.

Realizado por: Rossana Parra

La progresión acumulativa de la figura 3 ilustra de manera evidente como desde el segundo periodo que empieza en el 2003 hasta el 2022. La producción anual de publicaciones anuales de investigación sobre la producción de biohidrógeno utilizando la digestión anaerobia muestra cómo los años 2010 ($n = 122$), 2015 ($n = 145$), 2017 ($n = 150$), 2019 ($n = 195$), 2022 ($n = 216$) son los que tuvieron mayor número de documentos por año, en cambio, los que tuvieron menor número de documentos por año fueron en el primer periodo los tres primeros años, el 2003 ($n = 5$), 2004 ($n = 17$), y 2005 ($n = 10$). El 2023 tuvo solo 54 artículos pero, es porque la fecha de corte fue el 16 de marzo del año mencionado. En cada uno de los periodos que han sido divididos según el número de publicaciones, se recopiló en la siguiente tabla 1 los dos artículos más antiguos, los dos más citados de cada periodo y el tema central de cada periodo.

Tabla 1: Recopilación de artículos desde los más antiguos a los más citados con los respectivos tópicos de interés según el periodo.

	Artículos más antiguos	Artículos más citados	Tópicos de interés del periodo
P E R I O D O I	Uso de filtrado de biosólidos de desecho para producir biohidrógeno de manera efectiva mediante fermentación anaerobia (Wang et al., 2003)	Producción de biohidrógeno: perspectivas y limitaciones para la aplicación práctica (Levin, 2004)	- Producción de biohidrógeno utilizando residuos orgánicos, alimenticios o de animales como el estiércol de vaca, técnicas como la fermentación anaeróbica, electrohidrógenos
	Producción de biohidrógeno a partir de almidón en aguas residuales en condiciones	Producción sostenible y eficiente de biohidrógeno mediante	

	termófilas (Zhang et al., 2003)	electrohidrogénesis (Cheng & Logan, 2007)	is en la que utilizaron la bacteria <i>Citrobacter sp. Y19</i> .
P E R I O D O II	Producción simultánea de biohidrógeno y tratamiento de aguas residuales con almidón en un reactor de lecho de lodo granular expandido acidogénico mediante cultivo mixto para operación a largo plazo (Guo et al., 2008)	Producción de hidrógeno a partir de residuos agrícolas por fermentación oscura: una revisión (Guo et al., 2010)	-Residuos agrícola (bagazo de caña de azúcar, celulos y algas). -Se genera biocombustible utilizando la fermentación oscura
	Fermentación ligera de efluentes de fermentación oscura para la producción de biohidrógeno por diferentes especies de <i>Rhodobacter</i> a diferentes concentraciones iniciales de ácidos grasos volátiles (AGV) (Argun et al., 2008)	Avances en los procesos biológicos de producción de hidrógeno (Das & Veziroglu, 2008)	
P E R I O D O III	Estudio de factibilidad de producción de biohidrógeno a partir de lodo prensado por procesos UASB y evaluación de parámetros operativos (Radjaram et al., 2013)	Materiales lignocelulósicos en biohidrógeno y biometano: impacto de las características estructurales y el pretratamiento (Monlau et al., 2013)	-Ecologías microbianas, microalgas, materiales lignocelulósicos o nanopartículas de níquel. -Fermentación oscura, fotofermentación, digestión anaerobia termófila. -Reactores de lecho fijo
	Caracterización por heterogeneidad de longitud (Tápparo et al.)-PCR de una comunidad productora de hidrógeno obtenida en fermentación oscura utilizando sedimentos de lagos costeros como inóculo (Di Bonito Rita et al., 2013)	Una biorrefinería de <i>Nannochloropsis sp.</i> microalga - Extracción de aceites y pigmentos. Producción de biohidrógeno a partir de la biomasa sobrante (Nobre et al., 2013)	
P E R I O D O IV	Bioenergía sostenible a partir de residuos y desechos de biocombustibles (Sheehan et al., 2018)	Nexo entre residuos y energía para la economía circular y la protección del medio ambiente: tendencias recientes en la energía del hidrógeno Sharma (Sharma et al., 2020)	-Se busca optimizar y determinar las condiciones adecuadas de la producción de biohidrógeno utilizando biorresiduos, residuos sólidos u orgánico y desechos orgánicos.
	Producción mejorada de biohidrógeno a partir de un medio de fermentación anaeróbica libre de nutrientes con paja de arroz pretratada con hongos comestibles (Sheng et al., 2018)	El ácido nítrico libre promueve la producción de hidrógeno a partir de la fermentación oscura de lodos activados residuales (Wang et al., 2018)	

Realizado por: Parra. 2023

3.1.2 Análisis de cooperación entre países/ regiones

A partir de los datos obtenidos de la base de datos *Scopus*, se creó el mapa de visualización de la red de coautoría de países/regiones (figura 4) con *VOSviewer*. En el proceso de creación del mapa de la figura 4, el umbral mínimo de documentos se fijó en 25. Había 40 países de los 85 listados como elementos visualización.

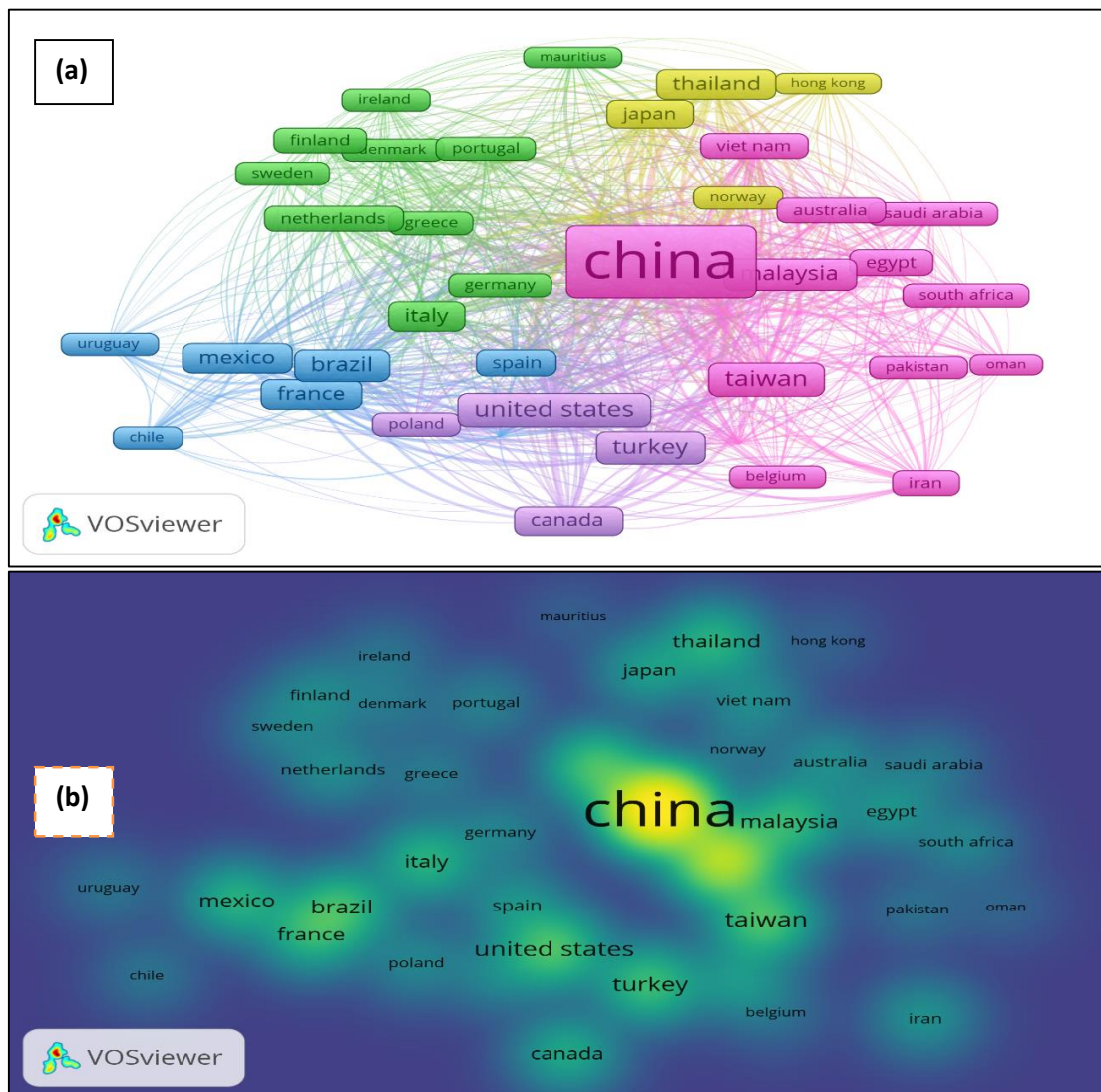


Figura 4: Mapa de visualizaciones de citas por países/regiones. Nota: (a) Mapa de visualización de la red de los 40 principales países/regiones por citas; (b) Mapa de visualización de los 40 principales países/regiones por citas. Figura obtenida con VOSviewer

Realizado por: Rossana Parra

En la figura 4a, el tamaño de cada círculo representa el número de documentos. Por ello, cuando mayor es el círculo mayor es el número de documentos. Mediante el uso de cinco colores diferentes, se pueden distinguir cinco campos científicos de investigación sobre la producción de biohidrógeno utilizando la digestión anaerobia. Por

ejemplo, China ($n = 552$), India, Malasia, Australia, Egipto, entre todos los países que se encuentran de color rosado, colaboraron mucho, mientras que Estados Unidos ($n = 122$), Turquía, Canadá y Polonia, así como países del continente americano y europeo, se vincularon profundamente por Brasil ($n = 96$), Uruguay, México, Chile y Francia. El cuarto equipo coloreado en verde reúne a países y regiones como Italia ($n = 84$), Alemania, Países Bajos, Grecia, Finlandia, etc. Por último, los países de color en amarillo que mantuvieron una amplia colaboración son Corea del Sur, Japón, Tailandia, Hong Kong y Noruega. La visualización de la densidad de la Figura 4b muestra que China, India y Taiwán lideraron la cooperación en la investigación sobre la producción de biohidrógeno utilizando la digestión anaerobia.

Un dato de interés de la tabla 2 es que China, es el primer productor mundial de documentos con un total de 552 documentos, sin embargo, India, que ocupa el segundo lugar, le aventaja en la media anual de publicaciones. Esto demuestra que China e India son los principales países en los que centran la investigación del mundo sobre la producción de biohidrógeno utilizando la tecnología de digestión anaerobia.

Tabla 2: Enlaces y fuerza total de los enlaces de los 10 principales países con mayor número de documentos.

Top de Clasificación n ^a	País/Regiones	Enlace	Fuerza total del enlace	Documentos	Citaciones por país/región
1	China	39	5428	552	16435
2	India	39	3457	259	9611
3	Taiwán	39	2189	125	5194
4	Corea del Sur	39	2066	116	4570
5	Estados Unidos	39	2059	122	6668
6	Francia	39	1590	84	3718
7	Turquía	39	1557	106	4633
8	Malasia	39	1472	95	2854
9	Brasil	39	1224	96	2693
10	Canadá	38	1204	67	3634

Nota: Top de Clasificación^a : Orden de clasificación

Realizado por: Parra, 2023

3.3 Aportes por países

Cada contribución científica que realiza cada país permite identificar la afiliación y el lugar donde se han investigado los temas. Como se muestra en la figura 5 se generó un mapa utilizando ArcMAP para visualizar el aporte de 84 países. Cada rango de número de documentos se encuentra clasificado por colores. Azul (1-3 documentos), azul cielo (4-7), azul pálido (8-12), verde amarillo (15-23), pera (24-35), limón (36-48), mantequilla

(49-70), mango (71-125), anaranjado fuerte (126-268) y rojo (269-587).

De color azul los tres principales países que desataron fueron Ecuador, Kazajstán y Sudán. De color azul cielo están, Argentina y Argelia. Azul pálido está Colombia, Chile y Pakistán. Verde amarillo está Rusia y Suecia. Color pera, Sudáfrica y Australia. Color limón, España, Egipto y Arabia Saudita. Color Mantequilla, Canadá. Color mango, Brasil Francia y Turquía. Color anaranjado fuerte, Alaska, Estados Unidos, India y México. Y por último, color rojo está China.

China (color rojo) fue el más influyente, con 552 publicaciones, colaborando con 37 países, más significativamente con Estados Unidos (anaranjado fuerte) El segundo país es India, con 259 publicaciones, colaborando con 31 colaboraciones, más significativamente con Corea y Reino Unido.

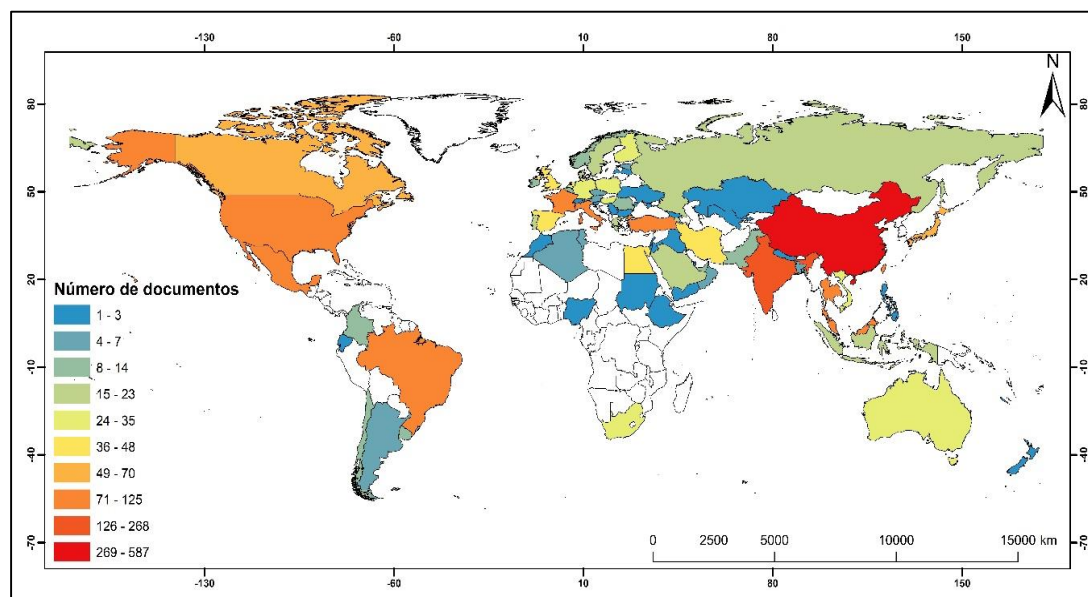


Figura 5: Número de publicaciones sobre la producción de biohidrógeno por país. Obtenido en ArcMAP.

Realizado por: Rossana Parra

3.1.3 Revistas con mayor número de documentos

La tabla 3 muestra los índices de desempeño y calidad de las diez revistas que han liderado sobre la producción de biohidrógeno utilizando la digestión anaerobia por tener el mayor número de artículos que han colaborado con el tema. Estas revistas contienen 1.192 de las 2003 publicaciones analizadas, que representan el 59.51 % de la producción científica. La tabla muestra los indicadores de desempeño de las revistas como SJR y su respectivo cuartil.

Tabla 3. Clasificación de revistas por el número de publicaciones más relevantes sobre la producción de biohidrógeno utilizando la tecnología de digestión anaerobia.

Revista	Editorial	País	Número de documentos	SJR 2021	Cuartil	Documentos de acceso abierto
<i>International Journal of Hydrogen Energy</i>	<i>Elsevier</i>	Reino Unido	604	1.2	Q1	All open access /Green Open Access/ Gold Open Access/ Bronze Open Access/ Hybrid gold
<i>Bioresource Technology</i>	<i>Elsevier</i>	Reino Unido	349	2.35	Q1	All open access /Green Open Access/ Gold Open Access/ Bronze Open Access/ Hybrid gold
<i>Renewable Energy</i>	<i>Elsevier</i>	Reino Unido	42	1.88	Q1	All open access/ Green Open Access
<i>Fuel</i>	<i>Elsevier</i>	Países bajos	40	1.51	Q1	All open access /Green Open Access/ Hybrid gold
<i>Biomass And Bioenergy</i>	<i>Elsevier</i>	Reino Unido	35	1.01	Q1	All Open Access/ Green Open Access/ Bronze Open Access
<i>Journal Of Cleaner Production</i>	<i>Elsevier</i>	Reino Unido	33	1.92	Q1	All open access /Green Open Access/ Hybrid gold
<i>Chemical Engineering Journal</i>	<i>Elsevier</i>	Países bajos	26	2.42	Q1	All Open Access/ Bronze/ Open Access/ Green Open Access
<i>Biotechnology For Biofuels</i>	<i>Biomed Central</i>	Reino Unido	24	1.33	Q1	All Open Access/ Gold Open Access/

						<i>Green Open Access</i>
<i>Taiyangneng Xuebao Acta Energiae Solaris Sinica</i>	<i>Science Press</i>	China	21	0.2	Q4	<i>Open Access</i>
<i>Applied Energy</i>	<i>Elsevier</i>	Reino Unido	18	3.06	Q1	<i>All Open Access/ Bronze Open Access/ Green Open Access/ Hybrid Gold Open Access</i>
Nota: Se ha mantenido las editoriales y nombres de revistas en el idioma original por ser nombres propios.						

Realizado por: Parra, 2023

Como se observa en la tabla 3 se seleccionó las 10 revistas con mayor número de documentos publicados en las diferentes revistas que se encuentran dentro de la base de datos *Scopus*. Las tres principales revistas que se encuentran liderando en la investigación son: *International Journal of Hydrogen Energy* es la revista líder en estas contribuciones científicas con 604 documentos, lo que representa el 30.15 % del número total de artículos que han sido publicados. Esta revista tiene un índice SJR de 1.2 y se encuentra en Q1, también, se encuentra dentro de la editorial *Elsevier* y tiene *All, Green, Gold, Bronze y Hybrid gold Open Access*. El segundo lugar lo ocupa *Bioresource Technology* con 349 artículos, lo que representa el 17.42 % del total de documentos publicado. Para este caso el índice SJR de 2.35 y actualmente se encuentra en el primer cuartil (Q1). Además, esta revista se encuentra también dentro de la editorial *Elsevier* y contiene diferentes tipos de accesos como: *All, Green, Gold, Bronze y Hybrid gold Open Access*. Finalmente, la tercera revista con mayor número de publicaciones de documentos en la revista *Renewable Energy* con 42 artículos lo que equivale el 2.1 del total de publicaciones. Tiene un índice SJR de 1.88 y está en el Q1. Esta revista solo tiene *Green Open Access y All Open Access*. Las tres principales revistas se encuentran ubicadas en Reino Unido. De la tabla 2 la única revista que se encuentra en el quintil 4 es la revista *Taiyangneng Xuebao Acta Energiae Solaris Sinica* y es *Open Access*. Se encuentra ubicada en China y tiene un SJR de 0.2 en la editorial *Science Press* con 21 artículos, lo que corresponde al 1.05 % del total de publicaciones del tema de investigación.

3.1.4 Los 10 documentos más citados

Se identificó las publicaciones más citadas para resaltar los temas de mayor interés sobre el tema de investigación. En este contexto, la producción científica sobre la producción de biohidrógeno utilizando la digestión anaerobia a nivel mundial fue de 2210 documentos. La tabla 4 muestra los 10 artículos más citados con un total de 5437 citas totales. Es necesario aclarar que cada una de las investigaciones que se presentan a continuación tiene sus propias palabras claves que han sido generadas por cada autor y se encuentran relacionadas con las palabras claves que han servido para generar esta investigación.

Entre los diez documentos que fueron analizados con mayor número de citas, los más antiguos fueron publicados en el 2004 por Levin & Love. (Levin, 2004), Han & Shin, (Han, 2004) y Kim et al, (Kim, 2004). De este grupo de artículos que fueron publicados en el 2004 el artículo de Levin & Love fue el que más citas de todo el grupo de documentos con 1275, fue publicado en la revista *International Journal of Hydrogen Energy*. Este artículo no es de acceso abierto. El segundo artículo con más citas fue publicado en la revista *International Journal of Hydrogen Energy* con 599 citas, tampoco es de acceso abierto el artículo y el tercer artículo con más citas es *Advances in biological hydrogen production processes* con 561 citas en la revista *International Journal of Hydrogen Energy*. De este grupo de diez artículos más citados solo hubo dos artículos que fueron de acceso abierto el de Han & Shin y Cai et al. Ambos artículos fueron publicados en el 2004 en diferentes revistas: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* y *Environmental Science and Technology* respectivamente.

Tabla 4. Artículos más citados sobre la producción de biohidrógeno utilizando DA.

N°	Artículo	Autores	Revista	N° de citas	Artículo de acceso abierto
1	<i>Biohydrogen production: Prospects and limitations to practical application</i>	Levin & Love, 2004	<i>International Journal of Hydrogen Energy</i>	1275	No
2	<i>Hydrogen production from agricultural waste by dark fermentation: A review</i>	Guo et al., 2010	<i>International Journal of Hydrogen Energy</i>	599	No

3	<i>Advances in biological hydrogen production processes</i>	Das & Veziroglu, 2008	<i>International Journal of Hydrogen Energy</i>	561	No
4	<i>Use of algae as biofuel sources</i>	Demirbas., 2010	<i>Energy Conversion and Management</i>	543	No
5	<i>Sustainable and efficient biohydrogen production via electrohydrogenesis</i>	Cheng & Logan, 2007	<i>Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America</i>	530	Sí
6	<i>Biohydrogen production by anaerobic fermentation of food waste</i>	Han & Shin, 2004	<i>International Journal of Hydrogen Energy</i>	439	No
7	<i>Comparison of biohydrogen production processes</i>	Manish & Banerjee, 2008	<i>International Journal of Hydrogen Energy</i>	385	No
8	<i>Enhanced biohydrogen production from sewage sludge with alkaline pretreatment</i>	Cai et al., 2004	<i>Environmental Science and Technology</i>	379	Sí
9	<i>Feasibility of biohydrogen production by anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge</i>	Kim et al., 2004	<i>International Journal of Hydrogen Energy</i>	367	No
10	<i>Biofuels generation from sweet sorghum: Fermentative hydrogen production and anaerobic digestion of the remaining biomass</i>	Antonopoulou et al., 2008	<i>Bioresource Technology</i>	362	No
Nota. Se ha mantenido las revistas con el idioma original al ser nombres propios al igual que lo títulos y revistas de cada artículo.					

Realizado por: Parra, 2023

3.1.5 Redes de colaboraciones

Esta investigación fue enfocada en la producción de biohidrógeno utilizando la digestión anaerobia, 84 países han colaborado en el desarrollo de documentos científicos enfocados en el tema. De este total, al menos 20 países cuentan como mínimo con tres artículos en colaboraciones con autores de otros países. La figura 6 muestra un mapa global de colaboraciones científicas entre países en las diferentes regiones a nivel

mundial. Desde el año 2003 hasta la actualidad, dentro de las colaboraciones mundiales que se realizaron y realizan en la búsqueda de la producción de biohidrógeno utilizando la digestión anaerobia en la base de datos *Scopus*, se pudo apreciar que existieron y existen hasta la actualidad colaboraciones en gran parte del planeta Tierra, es decir, una gran cantidad de países contribuyen al desarrollo científico en el marco de la producción de biohidrógeno. En la figura 6 se puede ilustrar la tonalidad azul más oscura muestra mayor nivel de colaboraciones con otros países y mientras más disminuye la tonalidad es que menor nivel de colaboraciones hay entre países, asimismo, las líneas rojas representan con qué país es que se realizó la colaboración concretamente. Con ello, se destacan mayor número de colaboraciones con el continente americano y este último con el continente africano y también con Oceanía.

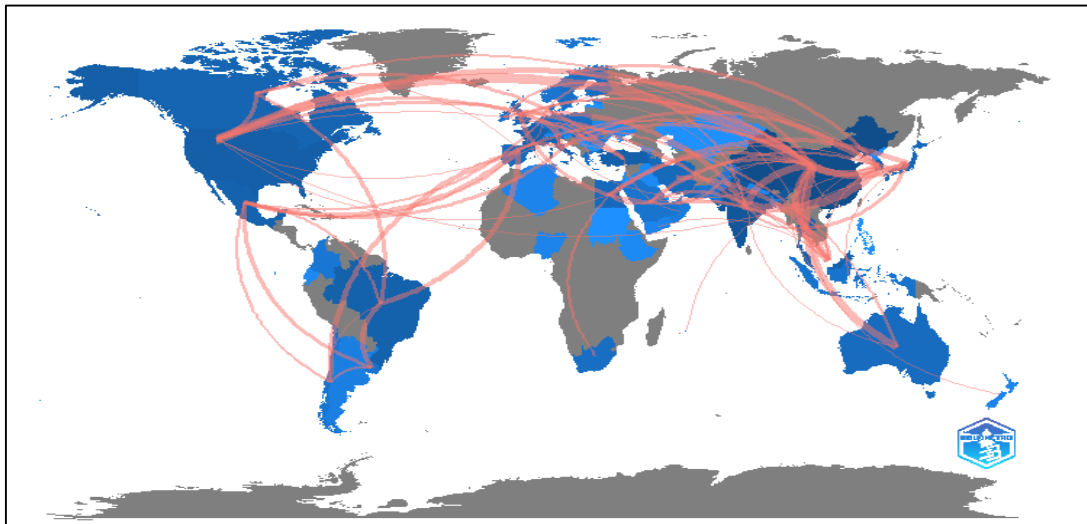


Figura 6: Mapa de colaboraciones en estudios sobre la producción de biohidrógeno utilizando la digestión anaerobia desde el 2003 al 2023. Figura obtenida con Bibliometrix.

Realizado por: Rossana Parra

3.1.6 Palabras claves

De los 2003 documentos obtenidos de la base de datos de *Scopus*, el software *VOSviewer* analizó 45 palabras claves, generando así un mapa de datos de las palabras claves más frecuentes de la investigación. La figura 7 muestra la co-ocurrencia de las palabras clave, que determinó 3 clusters (son cada uno de los grupos de palabras que se encuentran del mismo color y ocurrencia): digestión anaerobia, producción de biohidrógeno y biomasa. Clúster 1, denominado “*digestión anaerobia*” (con 263 ocurrencias), es el área de estudio con mayor cantidad de palabras relacionadas al tema, con 26 palabras conectadas a 44 nodos. Dentro de este primer grupo se encuentra

relacionado con la digestión anaerobia, en esta se han realizado investigaciones como producir biohidrógeno a partir de biorresiduos o a través de diferentes tipos de inóculos, sustratos o por residuos sólidos urbanos (Angeriz-Campoy et al., 2023; Patel et al., 2023; Zainal et al., 2023). El segundo clúster denominado “*producción de biohidrógeno*”, presenta 252 ocurrencias con 15 palabras conectadas a 44 líneas. Este grupo se encuentra relacionado a la producción de biohidrógeno a partir de la fermentación oscura a partir de aguas residuales, melaza de remolacha celdas de combustibles microbianas o de residuos orgánicos y alimenticios (Guo et al., 2010; Özgür et al., 2010; Shanmugam et al., 2023; Wang et al., 2011). Por último, el clúster 3 denominado “*biomasa*” con 335 ocurrencias que tiene 4 palabras que se encuentran conectadas a 44 líneas. Para este último grupo se relaciona con estudios para producir biohidrógeno utilizando biomasa lignocelulósica o como la piel plateada del café, algas como *Enterobacter cloacae* o con nanopartículas (El-Sheekh et al., 2023; Mohanakrishna & Modestra, 2023; Ngoc Bao Dung et al., 2023).

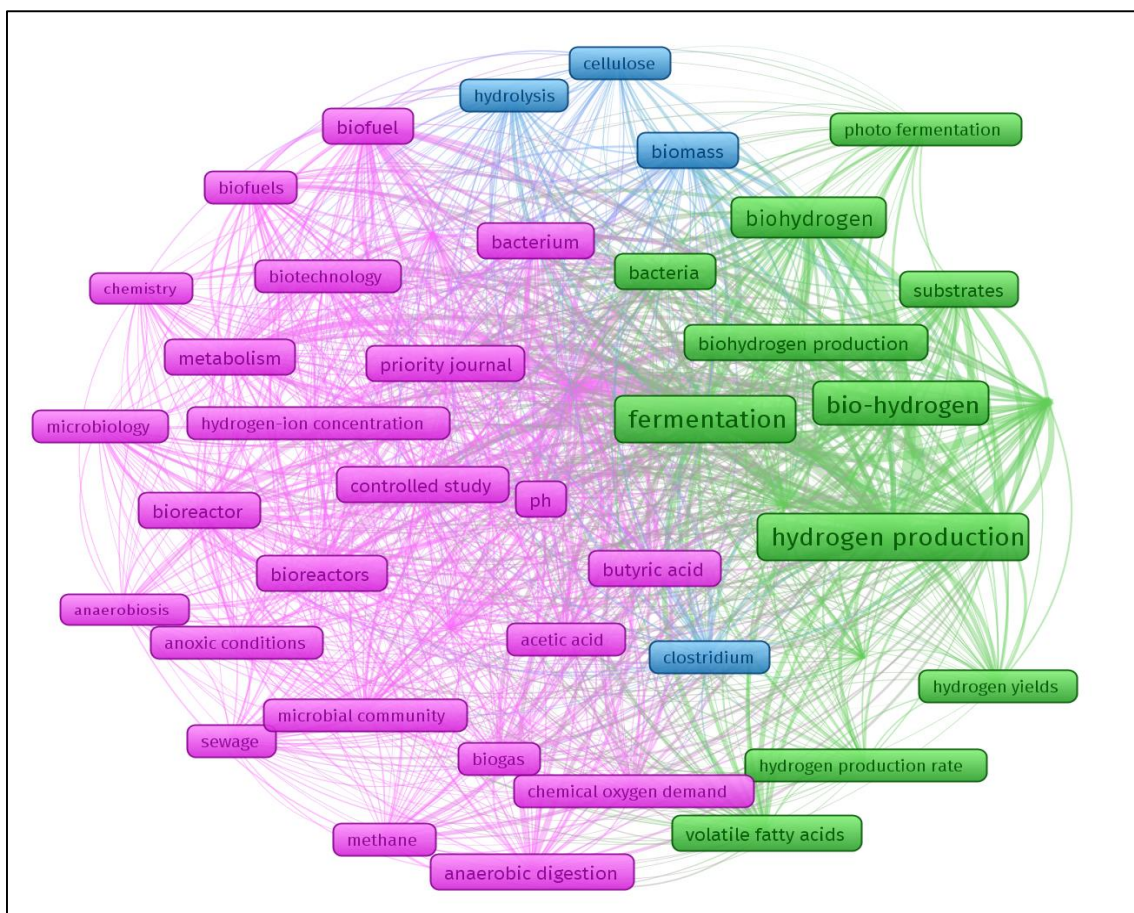


Figura 7: Palabras clave más frecuentes en la investigación y visualización de una red de concurrencia de las palabras clave más utilizadas en el gestor de búsqueda de la base de datos Scopus sobre el tema. Figura obtenida con VOSviewer.

Realizado por: Rossana Parra

3.2 Revisión Bibliográfica Sobre el Biohidrógeno, Hidrógeno y la DA

3.2.1 Estado del arte de la producción de biohidrógeno e hidrógeno

Actualmente, el 96% del hidrógeno mundial se produce a partir de los combustibles fósiles. Este gas es consumido en un sinnúmero de procesos convencionales como la industria química y petroquímica, que equivale al 72% (Angenent et al., 2004). El resto es utilizado en metalurgia, electrónica y propulsión de vehículos (Khawer et al., 2022). Existen dos materias primas que pueden ser utilizadas para producir hidrogeno, los recursos no renovables y los recursos renovables (Martínez et al., 2022). Cuando se habla de recursos fósiles se entiende que son derivados de petróleo, gas natural y carbón. En cambio, los recursos renovables son el agua y biomasa (Bedoya et al., 2007). Las principales técnicas son: los procesos de conversión química (reformado, gasificación y pirolisis), los procesos termolíticos (la termólisis directa y por ciclos termoquímicos), procesos electrolíticos (electrólisis), procesos biológicos (digestión anaerobia y la fermentación) y los procesos fotónicos (fotobiólisis, fotocátalisis y fotoelectrólisis) (Aguilar, 2017). Sin embargo, todavía hay muchos desafíos técnicos y económicos que deben abordarse antes de su desarrollo a gran escala (Abdin et al., 2020).

De todos los procesos mencionados para producir hidrógeno, esta investigación se centrará en el proceso biológico para producir el biohidrógeno. Uno de estos procesos biológicos es la digestión anaerobia, esta técnica permite aprovechar el contenido bacteriano de la materia orgánica en ausencia de oxígeno (Khawer et al., 2022). Como producto final de este proceso se obtuvo el biogás, que está compuesto en su mayoría por metano y dióxido de carbono, con partes menores de hidrógeno (Arimi et al., 2015). Como se produce una baja cantidad de biohidrógeno en la digestión anaerobia, hoy en día se están empleando diferentes tipos de biomasa, sustratos, algas, nanopartículas que permiten aumentar la productividad de biohidrógeno (El-Sheekh et al., 2023; Kim, 2004; Ren et al., 2006).

Los últimos avances en la producción de hidrógeno son a partir de fuentes biológicas, por cuanto se considera una alternativa sostenible que potencialmente puede disminuir la dependencia de combustibles fósiles, ya que se basa en recursos renovables y no

emite gases de efecto invernadero. La producción de hidrógeno puede ser producto por organismos anaerobios facultativos y estrictos como, por ejemplo, *Escherichia coli* o *Clostridium butyricum* para convertir azúcares en hidrógeno (Bedoya et al., 2007; Abdin et al., 2020).

Para producir biohidrógeno utilizando la DA existen 4 etapas: la hidrolítica, la acidogénica, acetogénica y la metanogénesis (Parra, 2015). La hidrólisis es el primer paso para producir hidrógeno, en el cual se da la degradación de los compuestos orgánicos complejos como: lípidos, proteínas, hidratos de carbono y compuestos orgánicos (Lim et al., 2022). En este proceso se utilizan bacterias hidrolíticas-acidogénicas que permiten degradar fácilmente los ácidos grasos, aminoácidos, monosacáridos y compuestos inorgánicos (Rivera-Salvador et al., 2009); en la etapa acidogénica los compuestos solubles resultantes de la etapa anterior serán transformados por acción de los microorganismos y de las bacterias fermentativas a través del proceso biológico de la fermentación (Obulisamy et al., 2016). En la siguiente etapa se producirán 3 compuestos resultantes (ácido acético, hidrógeno y el dióxido de carbono), estos serán transformados en la fase acidogénica por las bacterias acetogénicas (*Syntrophobacter wolinii* o *Syntrophomonas wolfei*) (Cazier et al., 2015). En la misma fase se obtendrá principalmente hidrógeno, ácido acético y el dióxido de carbono. Estos tres productos obtenidos serán responsables de la formación del metano en la metanogénesis. Por ello, para producir biohidrógeno mediante la DA se debe evitar que llegue a la última parte de la metanogénesis, puesto que si no se transformará el H_2 en CH_4 .

3.2.2. Técnicas y rutas de producción de biohidrógeno e hidrógeno

Según las investigaciones realizadas por Brijaldo, Castillo y Pérez (2021) mencionan que existen 3 rutas que permiten que se lleve a cabo la producción de biohidrógeno. Estas rutas son: bioquímicas, termoquímicas y fotoquímicas (Brijaldo et al., 2021); al producir el biohidrógeno utilizando las rutas termoquímicas se debe tener en cuenta que las reacciones químicas deben ser asistidas térmicamente (Barbarias et al., 2016). En cambio, las rutas termoquímicas dependen de la presión y temperatura, pueden variar según el proceso para producir el biohidrógeno (Dincer & Zamfirescu, 2016). Por último, la ruta fotoquímica capta la energía solar para producir energía calorífica a altas temperaturas (Brijaldo et al., 2021).

Por otro lado, las rutas bioquímicas, o también conocida como biofotólisis directa, es la que permite aprovechar la energía que produce el sol para producir el hidrógeno a partir del agua. En cambio, la biofotólisis indirecta es la que convierte los carbohidratos en partículas más pequeñas; en esta técnica se utilizan catalizadores de deshidrogenasas con condiciones estrictamente anaerobias (Jorquera et al., 2020). Esto se puede corroborar en la tabla 5 más adelante, donde se comparan los procesos;

En cambio, existen 3 rutas metabólicas que permiten que lleve a cabo la producción de biohidrógeno, como se observa en la Figura 8. Cada ruta metabólica necesita fuentes de biomasa que permitan la obtención de biohidrógeno.

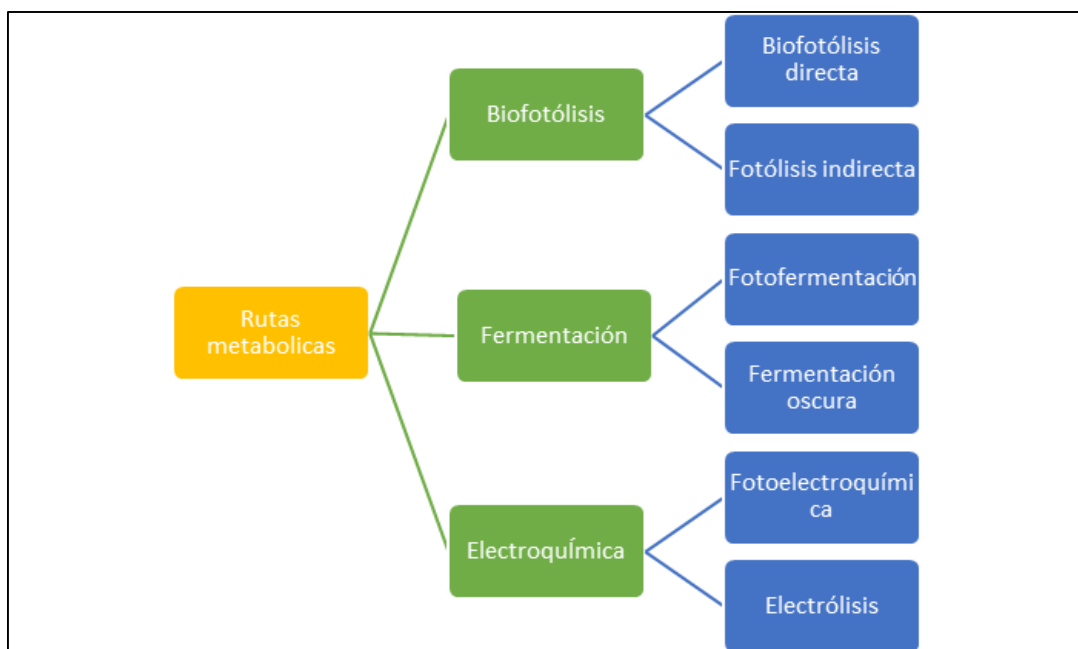


Figura 8: Rutas metabólicas para la producción de biohidrógeno. Figura obtenida en Word.
Realizado por: Rossana Parra

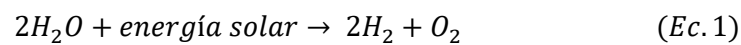
3.1.3 Biofotólisis

I. Biofotólisis directa

En la ruta de la biofotólisis, la energía solar es utilizada por el fotosistema II para lograr descomponer el agua en un agente reductor: El adenosín trifosfato (ATP) y en O_2 . Este agente reductor será el encargado de producir el hidrógeno mediante la reducción de protones al utilizar cualquiera de estas dos enzimas: hidrogenasa o la nitrogenasa. En este proceso se obtendrán electrones que al romper el agua pasarán a través de la cadena de transporte de electrones que se encuentra constituido por el fotosistema I

(PSI) y el fotosistema II (PSII). Después, se producirá el ATP y se reducirá el compuesto de ferredoxina. Estos compuestos participarán en diversas reacciones al producir el H₂. Después este proceso se dividirá en dos subprocesos, tales como la biofotólisis directa e indirecta.

En la biofotólisis directa, como se observa en la ecuación 1 (ec.1) las moléculas de H₂O se dividen gracias a la luz solar, pues esta es la fuente de energía en el fotosistema II. Posteriormente, se transferirá el electrón residual al fotosistema I (Ni et al., 2006; Show et al., 2018). Al llegar a este paso, la hidrogenasa ayudará a producir el hidrógeno sin que se genere los GEI y a la vez se liberará el oxígeno.



II. Biofotólisis indirecta

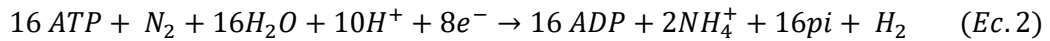
En cambio, la biofotólisis indirecta es un método que no es ni directo ni continuo, debido a que un cambio de luz puede provocar un crecimiento fotosintético que dificulta que la hidrogenasa realice el proceso de producción. En este paso se pueden utilizar las microalgas únicamente en condiciones anóxicas (Dębowski et al., 2021; El-Dalatony et al., 2020). Es decir, que se obtendrá mayor contenido de oxígeno disuelto suministrado con presencia de nitrato. Este proceso también se divide en dos pasos esenciales: a) producción de O₂ y la fijación del CO₂ en los carbohidratos y lípidos; b) se lleva a cabo el mismo proceso que en la etapa anterior, pero en esta se utiliza un fotobiorreactor sellado que permitirá la producción de biohidrógeno en ausencia de luz (Aslam et al., 2018; Lam et al., 2019).

3.1.4 Fermentación

La segunda vía es la fermentación, este proceso permite producir el biohidrógeno de manera eficiente debido a que tiene grandes ventajas (Linares & Moratilla, 2007). Esta vía de producción no afecta al ambiente y evita que se siga utilizando los combustibles fósiles, puesto que controla la contaminación (Mahata et al., 2023). A la vez es una de las técnicas que permite sustituir a los combustibles por el enorme potencial que tiene este proceso (Rojas et al., 2012). Este tipo de proceso se subdivide en dos etapas: la fotofermentación y la fermentación oscura.

I. Fotofermentación

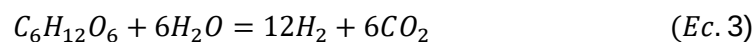
La fotofermentación es la que utiliza luz solar para realizar la fotosíntesis por ser esta una fuente de energía renovable (Dhanya et al., 2020). Teniendo en cuenta que esta técnica es más ventajosa a diferencia de las otras rutas que existen hoy en día (Baeyens et al., 2020; Zhang et al., 2020); Para la producción de hidrógeno utilizando esta técnica se describe mediante la siguiente ecuación:



En esta etapa la energía lumínica juega un papel importante debido a que da paso a la separación de los electrones. Al separarse logran extraerse los productos del sustrato orgánico por el proceso del fotocatabolismo. Los electrones se generan a partir de los sustratos endógenos por medio del catabolismo, luego serán agrupados al grupo de la plastoquinona que se encuentran en el PSI y PSII. En esta etapa la energía lumínica es asimilada en el PSI y ayuda a generar electrones.

II. Fermentación oscura

La fermentación oscura o también conocido como *dark fermentation* es un proceso mejor para producir el biohidrógeno (Dalena et al., 2017). Con este método se puede convertir la materia compleja en productos más simples por medio de la hidrólisis. Con ello, en este proceso se utilizan diferentes sustratos que permiten mejorar la tasa de producción de hidrógeno, tales como la glucosa, celulosa, sacarosa y almidón.



La fermentación oscura es más efectiva, puesto que produce un 58,90 % hidrógeno a diferencia de otros métodos con una efectividad de 10,12 %. A la vez, la fermentación oscura es una técnica que permite recuperar el biohidrógeno en las tres primeras etapas de la digestión anaerobia que son la hidrolítica, la acidogénica, acetogénica y la metanogénesis. Durante cada una de estas fases la materia orgánica se ira transformando en diferentes compuestos hasta que se dé la producción de biohidrógeno como ya se mencionó anteriormente.

3.1.5 Electroquímica

I. Fotoelectroquímica

Por último, la fotoelectroquímica es la que estudia los procesos químicos que ocurren en materiales conductores o semiconductores cuando estos son expuestos a la luz (Seo et al., 2023). Estos procesos incluyen la generación de electrones y agujeros, que pueden ser aprovechados para realizar reacciones químicas (Z. Li et al., 2023). La fotoelectroquímica es importante porque permite el desarrollo de tecnologías que utilizan la energía de la luz para producir electricidad, como los paneles solares, o para generar productos químicos a partir de compuestos inorgánicos, como el oxígeno y el hidrógeno (Ortiz Rabell et al., 2022).

II. Electrólisis

En cambio, la electrólisis es una de las alternativas para obtener biohidrógeno utilizando diferentes fuentes de energía de biomasa renovable. Esta técnica es capaz de convertir el dióxido de carbono en productos químicos útiles (Kadier et al., 2018). En este proceso los electrones y el CO_2 son transferidos a través del ánodo al cátodo para poder combinarse con los átomos del hidrógeno en la solución. Seguidamente, se liberará el hidrógeno. Siendo necesario mencionar que en este proceso se necesita suministrar voltaje externo en el cátodo de la célula microbiana para producir biohidrógeno (Khetkorn et al., 2017);

Siendo la electrólisis un sistema híbrido más eficiente a diferencia de la fermentación (Rodríguez & Sánchez, 2021). Esto se debe a que en esta técnica se coloca mayor cantidad de microorganismos fotosintéticos y no fotosintéticos que son inoculados en una fuente de biomasa, como puede ser una celda electrolítica que contenga aguas residuales (Kadier et al., 2018).

Tabla 5. Ventajas y desventajas de las técnicas de producción de hidrógeno y biohidrógeno

Ruta meta-bólica	Vía de producción	Resumen	Ventajas	Desventajas	Referencia
F E R M E N T A C I Ó N	Fermentación oscura	Obtiene el hidrógeno a partir de residuos orgánicos en ausencia de luz. En este proceso las moléculas grandes de materia orgánica se descomponen primero en carbohidratos solubles y luego se hidrolizan en moléculas más pequeñas (monosacáridos). Por último, se degradan las moléculas pequeñas (alcoholes y ácidos orgánicos) que producirán hidrógeno y dióxido de carbono. -Se puede utilizar las bacterias fermentativas como: <i>Escherichia coli</i>, <i>Clostridia</i>, <i>Enterobacter</i>. -Tiene una eficiencia de 42.80 % de rendimiento	No requiere que se tenga una provisión de una fuerte de luz. -Se pueden producir diferentes metabolitos por los diversos sustratos que se utilizan -No requiere que se tenga una provisión de una fuerte de luz. -Se pueden producir diferentes metabolitos por los diversos sustratos que se utilizan. -Se puede utilizar microalgas y bacterias anaerobias para degradar materias orgánicas complejas en pequeñas moléculas que estarán en condiciones anaerobias que producirán H₂. -Se puede utilizar una variedad de fuentes de carbono de los cuales se incluye los desechos de biomasa.	-Esta técnica es la que produce la menor cantidad de H₂, al ser termodinámicamente desfavorable. -Se da mucha acumulación de oxígeno al producir hidrógeno. *Como posible solución se utiliza los subproductos (ácido acético y ácido butírico) para aumentar la producción de H₂ ya que se puede mejorar la asequibilidad de la fermentación oscura.	(Tashyrev, 2021; Trchounian et al., 2017; Zhao et al., 2020)
F E R M E N	Fotofermentación	Se utilizan microorganismos que utilizan la energía lumínica para convertir los sustratos orgánicos en el producto deseado (H₂) y dióxido de carbono.	-Se puede utilizar una variedad de sustratos -Permite procesar los efluentes en la fermentación oscura.	-Las condiciones externas tienen un impacto significativo en el proceso bioquímico de producción de Bio-H₂.	(Chaoyang Lu a et al., 2021; Oncel, 2015)

T A C I Ó N		-En esta técnica se pueden utilizar los siguientes microorganismos: <i>Photoheterotrophic bacteria</i> (<i>Rhodopseudomona</i>, <i>Rhodobacter</i>). -Tiene una eficiencia de 15.93 % en la conversión de la energía.	-Permite que se dé la producción de hidrógeno y a la vez se consume los desechos al mismo tiempo que se realiza el proceso. -Se pueden utilizar las bacterias sin azufre como la bacteria púrpura sin azufre que es la que permitirá catalizar las reacciones en un entorno deficiente.	-Se necesita controlar la luz de manera estricta para así evitar pérdidas. La longitud optima de luz varía entre los 400 a 1000 nm. -Tanto la luz como la temperatura deben estar distribuidas estrictamente de manera uniforme en el biorreactor.	
B I O F O T Ó L I S I S	Biofotólisis directa	Aquí juegan un papel importante los microorganismos que utilizan la luz para realizar reacciones de descomposición del H₂O para producir H₂ que permitirá ser almacenado en forma de energía química que es convertida por la luz. -Se puede utilizar las cianobacterias y las algas verdes. -Tiene una eficiencia de más del 80%.	-Se utilizan las algas para realizar este proceso ya que tienen clorofila y pueden llevar a cabo la fotosíntesis. -Tiene cero contaminaciones al realizar el proceso. -Consume solo agua como materia prima. -No tiene emisiones de carbono. -Es una vía sostenible. -Es una ruta prometedora por los reactivos son el H₂O, luz solar y CO₂.	-Mencionan que aún esta vía necesita superar muchos desafíos para convertirse en una ruta buena y factible. -Se acumula demasiado oxígeno al producir el hidrógeno. -Se necesita una alta intensidad de luz. -Se necesita una baja eficiencia fotoquímica. -Se necesita un cultivo masivo si se va a utilizar algas como biomasa.	(Ahmed et al., 2021; Chaoyang Lu a et al., 2021; Kumar et al., 2019)
B I O F O	Biofotólisis indirecta	La Biofotólisis indirecta es un proceso que utiliza la energía solar para la producción de hidrógeno a partir del agua, mediante la utilización de microorganismos	-Tiene mayor eficiencia que la biofotólisis directa. -Es menos costosa a diferencia de la otra técnica.	-Al ser una tecnología emergente aún se desconoce sobre el proceso y sus limitaciones. Esto significa	(Melitos 2021 Waste)

T Ó L I S I S		fotosintéticos y no fotosintéticos. Los microorganismos convierten la energía solar en energía química y luego esta energía es utilizada para producir hidrógeno. Este proceso se considera una alternativa limpia y renovable a los combustibles fósiles.	-No requiere catalizadores para poder separar el agua en hidrógeno. -Tiene un menor impacto ambiental al no producir subproductos que son tóxicos para el medio ambiente. -No requiere equipos especializados.	que todavía se necesita mucha investigación para mejorar la tecnología y superar sus limitaciones.	
---------------------------------	--	--	--	--	--

Realizado por: Parra, 2023

3.2.3. Reactores utilizados para la producción de hidrógeno y biohidrógeno

En esta última década se investigó una serie de reactores tanto continuos como discontinuos que han permitido que se lleve a cabo los procesos para la producción de hidrógeno y de biohidrógeno (Saini et al., 2021). Para que se lleve a cabo este proceso se necesita requisitos básicos que debe tener un digestor anaerobio: a) debe permitir una tasa de carga orgánica que sea continuamente alta y a la vez sea sostenible, b) debe tener un tiempo de retención hidráulica corto (con esto se puede minimizar el volumen del reactor) y c) debe producir el volumen necesario para la producción del hidrógeno que se requiera (Chen et al., 2008; Mahmudul et al., 2021). Para que se dé la producción de biohidrógeno es importante controlar los parámetros de operación del reactor, como la temperatura, pH, y el oxígeno. Al controlar estos parámetros se optimiza la producción de biohidrógeno. Además, se pueden utilizar diferentes cepas de bacterias y medios de cultivo para maximizar la producción de biohidrógeno (Khan et al., 2016). Por ello, en general el tipo de reactor que se vaya a utilizar dependerá no solo de las condiciones necesarias sino también del tipo de sustrato que se coloque dentro del reactor.

Ciertos diseños de reactores pueden aumentar significativamente el costo de producción y también las materias primas pueden implicar un costo extra de fabricación (Dokhani et al., 2022). Esto se debe a que el costo de los materiales y los nutrientes puede superar el ochenta por ciento de los gastos principales de producción. Actualmente, se encontraron estudios en los que muestran los diferentes tipos de reactores que han sido utilizados para producir el biohidrógeno. El principal biorreactor para producir biohidrógeno es el reactor de lecho fijo, este tipo de reactor utiliza sustratos que son líquidos o semisólidos, en cambio, los microorganismos que participan en la digestión anaerobia que se encuentran sujetos a un material inerte (arena, grava, carbón activado, nanopartículas de magnetita, entre otros) (Seelert et al., 2015). El segundo reactor es el de lecho fluidizado, en este tipo de reactor tanto los sustratos como los microorganismos se van a mantener en suspensión al encontrarse un fluido en circulación por el reactor. En este tipo de reactor el biohidrógeno será producido en un ambiente anaerobio en el que se recuperará el gas (biometano y biohidrógeno) por medio de un sistema de separación de gases del medio anaerobio. El tercero es el reactor de membrana sumergida, este tipo de reactor utiliza una membrana que permite separar los microorganismos del sustrato, permitiendo así recuperar el biohidrógeno que es producido dentro del reactor. El último es el reactor UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), este tipo de reactor

utiliza, en cambio, un lecho lodoso anaerobios que fluyen hacia la superficie del reactor. En este, los microorganismos que son utilizados para que se lleve a cabo la digestión anaerobia se fijarán a los lodos y el biohidrógeno será producido en un medioambiente anaerobio de igual forma que los anteriores (Morales et al., 2014).

Hoy en día existen diferentes aplicaciones para producir tanto hidrógeno como biohidrógeno con reactores, por ejemplo, si se ha diseñado un reactor tubular que sea casi horizontal para la producción del biohidrógeno se puede utilizar las algas para que realice la etapa de la biofotólisis en una sola etapa, situándose entre los 50 dólares por m^2 (Show et al., 2019). En cambio, si se ha diseñado un reactor con las condiciones mencionadas, se han simplificado 0.75 dólares por m^2 en construcción. Mencionado esto se recalca la importancia de realizar una evaluación de un diseño a escala piloto para tener así costos comparativos generales del biorreactor y evitar perder así biomasa (X. Li et al., 2023).

Finalmente, el reactor continuo de tanque agitado (CSTR), es un tipo de reactor químico en el que una mezcla reactiva es mantenida en un tanque cilíndrico y agitada constantemente para garantizar una homogeneización adecuada y una transferencia de masa eficiente (Show et al., 2019). Actualmente, este tipo de reactor es uno de los más utilizados por varios investigadores para la producción de biohidrógeno (Ding et al., 2010). En este tipo de reactor va a tener un material o biomasa que va a entrar y salir de manera continua, manteniendo así una concentración constante de reactivos y productos que se encuentran dentro del tanque (Niño-Navarro et al., 2016).

Este tipo de reactor es utilizado comúnmente en procesos químicos y biológicos debido a que ayuda a controlar la velocidad de reacción y así lograr la conversión óptima para la obtención final de biohidrógeno (Zhao et al., 2020).

El hidrógeno puede ser producido en un reactor CSTR mediante un proceso conocido como fermentación alcohólica (Chen & Lin, 2003; Chen et al., 2008). En este proceso, se agrega una cepa de bacterias a un medio de cultivo que contiene azúcares y se da la agitación que permite mantener una mezcla uniforme como se mencionó anteriormente (Castillo-Hernández et al., 2015). Las bacterias son las encargadas de fermentar los azúcares en alcohol y dióxido de carbono. Al producirse la fermentación de estos se obtiene como subproducto el biohidrógeno (Niño-Navarro et al., 2016). Es importante destacar que la producción de biohidrógeno a través de la fermentación

alcohólica requiere una tecnología avanzada y una optimización cuidadosa de los parámetros de operación para obtener una producción eficiente y rentable del mismo (Brindhadevi et al., 2021). De igual forma, en la producción de biohidrógeno, los CSTR se pueden utilizar para controlar y optimizar el crecimiento de bacterias y la producción de hidrógeno mediante la fermentación de azúcares o celulosa (Han et al., 2016).

En el 2021 se realizó un estudio a escala de laboratorio durante 34 días para producir hidrógeno utilizando los residuos alimenticios, en este reactor añadieron 0.2 L células inmovilizadas, mientras que el restante del reactor lo llenaron con materia prima. Las condiciones fueron estrictamente anaeróbicas en el que fue operado primero en modo discontinuo por 24 horas para luego continuar con la operación con un reactor CSTR. En este estudio concluyeron que la producción continua de biohidrógeno a altas tasas de desechos alimenticios permite que se aumente significativamente utilizando células divididas (Jung et al., 2021).

Otro de los reactores que destacan para producir hidrógeno son los reactores *Batch*, estos son un tipo de reactor químico. En este reactor los reactivos son cargados en una sola operación para luego realizarse la reacción. Después de la reacción, el reactor es vaciado para luego seguir con un nuevo lote (Laikovaac et al., 2022). Este tipo de reactores son adecuados para los procesos que tienen una cantidad de producto limitado o también es cuando la reacción es exotérmica y requiere enfriamiento antes de continuar con el proceso (Bar-Even, 2013). Sin embargo, los reactores secuenciadores por lotes tienen una eficiencia de procesamiento limitada debido a la necesidad de vaciar y preparar el reactor entre cada lote, lo que resulta en una mayor cantidad de tiempo y recursos invertidos en comparación con los reactores continuos (Pérez et al., 2003). Este tipo de reactor puede ser óptimo si se va a trabajar para producir biohidrógeno solo para escala piloto al ser limitado el proceso.

4.4 Microorganismos para la producción de biohidrógeno

Actualmente, existen diferentes tipos de microorganismos que pueden ser utilizados para la producción de biohidrógeno. Los géneros bacterianos mayormente empleados para la producción de biohidrógeno son: *Clostridium*, *Enterobacter*, *Klebsiella* y *Escherichia* (Bedoya et al., 2008).

Es importante destacar que la selección del microorganismo adecuado para la

producción de biohidrógeno va a depender de diversos factores, como la disponibilidad de la fuente de carbono, la eficiencia de producción de biohidrógeno, y la capacidad de controlar los parámetros de operación. De tal modo es importante evaluar cuidadosamente las diferentes opciones antes de seleccionar el microorganismo adecuado para una aplicación específica (Ward et al., 2008).

Las bacterias del género *Clostridium* para producir el biohidrógeno utilizan diferentes fuentes de carbono, almidones y azúcares; En cambio, las bacterias del género *Enterobacter* utilizan los residuos orgánicos y agrícolas para que se pueda producir el biohidrógeno (Guo et al., 2010, Ward et al., 2008); Las bacterias del género *Klebsiella* utilizan las fuentes de carbono y los azúcares para llevar a cabo la producción del Bio-H₂; Por último, las bacterias *Escherichia coli* son las más utilizadas por la facilidad de cultivo y la capacidad que tienen para producir el biohidrógeno a partir de diferentes fuentes de carbono. Gracias a estas ventajas son tan utilizadas hoy en día para realizar proyectos a pequeña escala en la investigación (Bedoya et al., 2008);

Siempre es necesario seleccionar la bacteria adecuada para producir el biohidrógeno porque esto también deberá ser tomado en cuenta a la hora de seleccionar los diferentes factores como son la disponibilidad de carbono, la eficiencia de producción y así mismo, controlar los parámetros de operación.

4. DISCUSIÓN

Según varios autores mencionan que el hidrógeno es considerado uno de los vectores energéticos más prometedores para futuras fuentes de energía (Romero et al., 2014). Esto es porque el hidrógeno puede regenerarse en un proceso cíclico a partir del agua sin llegar a emitir el dióxido de carbono. Al no emitir el CO₂ permite que el hidrógeno sea neutro para el ambiente. En cambio, el hidrógeno se convierte en biohidrógeno utilizando una técnica biológica a partir recursos renovables como la energía solar y agua, residuos orgánicos o fotobiológicos como la fermentación oscura que es necesaria para la digestión anaerobia. Entonces, el biohidrógeno es hidrógeno puro, gracias a esto no se necesita ningún proceso de purificación para tratarlo y tampoco produce contaminación al planeta, evitando así el uso de los combustibles fósiles que producen gases de efecto invernadero (Jung et al., 2021). Actualmente se están buscando

diferentes fuentes que permitan obtener energía de manera sostenible debido a que la forma casual de producir hidrógeno es utilizando los combustibles fósiles (Khan et al., 2018). Según la Agencia Internacional de Energía menciona que para producir hidrógeno se gastan 89 millones de barriles por día al utilizar los combustibles fósiles (Mazloomi & Gomes, 2012) para evitar que se consuma todos esos barriles de petróleo es necesario que la producción de biohidrógeno sea generada de manera inteligente para lograr las fuentes de energía sostenible y renovable que servirán para el presente y el futuro.

Existen diferentes técnicas que permiten producir el Bio-H₂, una de esas técnicas es la digestión anaerobia, dentro de esta investigación se recolectaron 2210 documentos de la base de datos *Scopus*. Estas publicaciones en este campo de estudio comenzaron desde el 2003 hasta la actualidad (marzo de 2023). Cada uno de los apartados que se obtuvieron en los resultados son relevantes para esta investigación por ser un complemento tanto del análisis bibliométrico y dentro de este, la revisión bibliográfica. Dentro de esta investigación se ha podido observar como la producción anual de documentos sobre el tema ha ido aumentando con el tiempo, con la participación de más de 2000 autores de 84 países, predominando en la investigación el idioma inglés y el chino. La producción de biohidrógeno utilizando la digestión anaerobia ha ido incrementando exponencialmente en los veinte años de producción (figura 1). Dentro de los diferentes artículos que se han encontrado en la investigación con las palabras claves, los temas con mayor relevancia para producir biohidrógeno e hidrógeno se han relacionado con las diferentes técnicas como, la fermentación oscura, ejemplos (El-Sheekh et al., 2023; Magdalena et al., 2023), fotofermentación, ejemplos (Zhang et al., 2023; Zhu et al., 2023), entre otras más. A la vez, también se pudo observar que como la materia prima que se utiliza ha variado debido a que ahora se utilizan los desechos de alimentos y desechos orgánicos que son producidos en los hogares y mercados municipales, ejemplos (Moreno-Andrade et al., 2022; Regueira-Marcos et al., 2023; Shanmugam et al., 2023) a diferencia de antes que aún no se utilizaba estas técnicas por falta de información sobre el tema.

Por otro lado, la producción científica alcanzó su punto máximo en el 2022 con 216 publicaciones por año (figura 1). Dentro de estos 216 documentos se puede observar que se centraron en producir biohidrógeno de diferentes formas pero procuraron que se dé el cuidado del medio ambiente, gracias a esto, tratan diferentes temas como la sostenibilidad medioambiental y el uso de algas y microalgas para producir

biohidrógeno, ejemplos (Ahmed et al., 2022; Deng et al., 2022; Feng et al., 2022; Li et al., 2022). Actualmente también se sigue utilizando la algas como la *Chlamydomonas reinhardtii*, aunque también se utilizan los diferentes residuos orgánicos que salen del hogar. Otro de los temas que destacó fue la bioconversión de lixiviados y recolección de biohidrógeno de las aguas residuales debido a que permite utilizar darle un tratamiento a estas para darle un segundo uso en procesos industriales o hasta en la agricultura (Feng et al., 2022). En cambio, en el 2003, fue el año con menor número de documentos publicados sobre el tema, al tener solo 5 documentos. Estos cinco documentos se han centraron en la producción de biohidrógeno utilizando desechos biosólidos con la fermentación anaerobia (Wang et al., 2003) de igual forma, han enfocado los estudios en utilizar el agua residual para producir el biohidrógeno utilizando la materia prima como el almidón (Zhang et al., 2003). Algo que se pudo observar que destacó en los cuatro periodos como se muestra en la tabla 1, fue que producían el biohidrógeno utilizando diferentes tipos de materias primas provenientes de los residuos orgánicos, agrícolas y alimenticios que son producidos en los hogares, fabricas, empresas, municipios, entre otros, ejemplos (Cheng & Logan, 2007; Guo et al., 2010). Dentro de las técnicas más utilizadas para producir el Bio-H₂ está la fermentación oscura debido a que permite recuperar el biohidrógeno utilizando la digestión anaerobia (Sheng et al., 2018).

Gracias a las diferentes cooperaciones que existieron entre los diferentes países y regiones (figura 4) se pudo mostrar que China fue el país que lidero la investigación sobre la producción de biohidrógeno utilizando la DA, con 552 documentos, este fue el país con más cooperación tuvo entre países como India, Malasia, Australia, Egipto. Estados Unidos. Estados Unidos fue el segundo país que lidero con 122 documentos y colaborando con países como Turquía, Canadá y Polonia, sin dejar de lado a la cooperación con países del continente americano y europeo. Aunque Brasil se encuentra en el tercer lugar con 96 documentos, este país tuvo relación con Uruguay, México, Chile y Francia, esto se puede corroborar en el mapa de colaboraciones de la figura 6.

Cada uno de los documentos que fueron citados en los países con mayor número de publicaciones permitió que la investigación siga avanzando, Por ello, en China tuvo 16.435 citaciones por país. Dentro de estas 16.435 citaciones, de estas publicaciones se predomina el uso de diferentes materias primas como, la melaza, lodos de depuradora o de desechos de paja o tallo ((Feng et al., 2022; Ren et al., 2006).

Actualmente en el mismo país se han publicado documentos relacionados con la producción de biohidrógeno en los que utilizan la fotofermentación a partir de diferentes sustratos y cosustratos (utilizan apoenzima), ejemplos (X. Zhang et al., 2023; Z. Zhang et al., 2023; Zhu et al., 2023). Cada una de estos documentos publicados en este país han permitido que se lleve a cabo nuevas investigaciones sobre el tema. Por otro lado, Estados Unidos con 6668 citaciones por país, en este país se destacaron documentos relacionados con la producción de hidrógeno y biohidrógeno. Pero lo que los diferencia con China es que utilizan otras tecnologías como la electrohdrogénesis, fermentación anaeróbica y por procesos biológicos para producir el Bio-H₂ (Cheng & Logan, 2007; Das & Veziroglu, 2008; Ren et al., 2006). Dentro de los dos países, los documentos de las investigaciones con mayor relevancia están relacionados con la comparación y avances de procesos biológicos para producir hidrógeno y biohidrógeno (Das & Veziroglu, 2008; Manish & Banerjee, 2008).

Cada una de las colaboraciones que se hicieron, fueron publicadas en diferentes revistas, en la tabla 3 se muestra las 10 revistas con mayor número de documentos publicados. En las diferentes revistas que han sido seleccionadas para publicar los documentos científicos han sido primordiales para ser tomados en cuenta en los avances científicos sobre la producción de Bio-H₂ utilizando la DA en diferentes países. Las 10 revistas tienen un total de 1.192 documentos publicados de las 2210. La revista *International Journal of Hydrogen Energy*, es la que lidera con el mayor número de publicaciones (n = 604). Esto lo podemos corroborar por el *SCImago Journal & Country Rank* (SJR), esta es una plataforma en internet que provee diferentes indicadores sobre el impacto y calidad de los documentos publicados en las revistas. En la tabla 3 se ha recopilado el cuartil y el SJR de este top de 10 revistas. Cada una de estas investigaciones han sido ubicadas dentro de un cuartil, existen 4 cuartiles que son, cuartil 1, cuartil 2, cuartil 3 y cuartil 4. Siendo así que el cuartil 1 es la que tiene el mejor ranking. Por ello, mientras más alto sea el cuartil menor será el impacto de la revista (Contreras, 2010).

En este caso, la revista *International Journal of Hydrogen Energy* se encuentra en el primer cuartil y es de alto impacto, a diferencia de la revista *Taiyangneng Xuebao Acta Energiae Solaris Sinica* que se encuentra en el cuarto cuartil con un menor índice de impacto. En esta investigación, nueve de las diez revistas son de alto impacto al encontrarse en el primer cuartil. Pero lo que las diferencia es el índice de impacto y la influencia de los documentos publicados en una revista. Dentro de las diez revistas que

están en la tabla 3 la que mayor impacto tuvo fue *Applied Energy* con 3.06 y la que menor impacto tuvo fue *Taiyangneng Xuebao Acta Energiae Solaris Sinica* con 0.2. Dentro de la revista *International Journal of Hydrogen Energy* tuvo el mayor número de citaciones en los documentos publicados como se observa en la tabla 4, ejemplos (Das & Veziroglu, 2008; Guo et al., 2008; Levin, 2004). Todas las investigaciones publicadas en las revistas se encuentran ampliamente relacionados con la DA y la producción de biohidrógeno, que han sido obtenidos de las palabras claves asignadas para la búsqueda en la base de datos *Scopus*.

Por último, esta investigación se realizó con una búsqueda concreta en la que se colocó las palabras claves como producción de biohidrógeno y digestión anaerobia, estos términos están en inglés en la búsqueda de la base de datos *Scopus*. De esta búsqueda salieron 2003 artículos científicos, de los cuales salieron las palabras más frecuentes que utilizaron los autores en su investigación, como se observa en la figura 7. En esta figura se observa las palabras clave del autor generan temas predominantes en la investigación sobre la mejora de la producción de biohidrógeno utilizando diferentes tipos de residuos orgánicos (frutas y verduras), residuos sostenibles o también conocidos como biorresiduos de color naranja, lodos de depuradora, microalgas utilizando técnicas como la fermentación anaerobia, fermentación oscura, fermentación (Abdelqader et al., 2021; Aghajani Delavar & Wang, 2021; Ahmed et al., 2022).

Dentro de todas las técnicas que han sido utilizadas la digestión anaerobia tuvo gran acogida, este es un proceso biológico que permite descomponer los residuos orgánicos en ausencia de oxígeno (Albini et al., 2019). Existen cuatro etapas que permiten que se lleve a cabo la digestión anaerobia, hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y la metanogénesis. En la primera etapa se transforman los materiales orgánicos insolubles (celulosa, hemicelulosa y los polisacáridos) en sustratos con derivados solubles (aminoácidos, ácidos grasos y azúcares) (Bar-Even, 2013). La segunda etapa es la acidogénesis, en esta etapa se da la producción de hidrógeno, en esta los monómeros y derivados solubles se convertirán en ácidos grasos volátiles (Bundhoo & Mohee, 2016). Se debe tener muy en cuenta esta etapa debido a que se da la producción de biohidrógeno. Por ello, la acetogénesis es muy importante debido a que los ácidos grasos volátiles se convertirán en hidrógeno y acetato. Y en la última etapa se produce el metano y el dióxido de carbono por la metanogénesis (Sarmiento et al., 2011). Durante esta etapa final, el grupo de los hidrogenotróficos actuarán como consumidores de hidrógeno, permitiendo que se forme el biohidrógeno sin la necesidad de utilizar los

combustibles fósiles. Según menciona Khan et al., (Khan et al., 2018) en su artículo, la digestión anaerobia es de las técnicas más exitosas y viables para producir biohidrógeno.

En las diferentes técnicas se las puede relacionar también con los reactores para producir biohidrógeno, pero cada diseño dependerá del tipo de sustrato que se esté utilizando y la disposición (Hafez et al., 2010). Hoy en día existen diferentes estudios que permiten producir biohidrógeno utilizando reactores pero como menciona este autor es necesario comprender como funciona un biorreactor para que el diseño y la operación de un reactor sea exitoso (Wang et al., 2009). Teniendo en cuenta cómo funciona el reactor se pueden evitar gastos que pueden ser utilizados en la producción de biohidrógeno. Algunos ejemplos de reactores que han sido diseñados por diferentes autores en los que han utilizado un reactor de biofiltro con percolador (Puhulwella et al., 2014).

Existen varios reactores que pueden ser utilizados con diferentes comunidades bacterianas, como el reactor por lotes H_2 /moles de lactosa que utiliza la comunidad bacteriana de *Clostridium* con un rendimiento de 6.35 moles o CSTR puede utilizar un consorcio bacteriano mixto que permitirá tener un rendimiento del 1.11 mol H_2 /moles de hexosa (Khan et al., 2018; Patel et al., 2016; Wu et al., 2010). Otro de los reactores que destaca y es más se ha utilizado para producir hidrógeno es el reactor UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*, por sus siglas en Inglés), este tipo de reactor utiliza las aguas residuales que se encuentran contaminadas para producir el hidrógeno con la ruta fermentativa (Braga et al., 2016).

5. CONCLUSIONES

Este estudio nos permitió analizar los diferentes documentos que han sido publicados desde el 2003 hasta la actualidad. Con esto también nos permitió cumplir el objetivo de investigación debido a que se analizó los diferentes aspectos para el análisis bibliométrico de todo el proceso de producción científica y los factores que pueden llegar a afectar la producción de biohidrógeno utilizando la digestión anaerobia. Otras de las conclusiones que obtuvimos, fue que producir biohidrógeno es una de las mejores alternativas a los combustibles fósiles para producir energía sostenible a futuro al utilizar la fermentación oscura y la digestión anaerobia.

Respecto al análisis bibliométrico, la evolución del número de publicaciones científicas en el campo de la producción de biohidrógeno utilizando la digestión anaerobia ha mostrado un crecimiento exponencial durante los últimos 20 años. Con respecto al número de citas, se pudo observar cómo se dio de igual forma un crecimiento exponencial, siendo así que en el 2022 fue el año con mayor número de publicaciones que se tuvo; en esta última década la investigación se ha dirigido a la búsqueda de diferentes soluciones que permitan llegar a cuidar el medioambiente al producir el biohidrógeno de manera sostenible, para ello, dentro de esta investigación se abordaron diferentes técnicas, reactores y diferentes tipos de bacterias que permiten aumentar la producción de biohidrógeno. Al conocer cada una de los diferentes factores se puede evitar consumir materia prima innecesaria ni desperdiciar ni materia prima, tiempo ni dinero al generar el Bio-H₂.

Por otro lado, la mayor parte de documentos han sido generados principalmente en los siguientes cinco países con mayor cantidad de documentos producidos en China, India, Brasil, Estados Unidos e Italia. Estas publicaciones científicas han sido publicadas en diferentes revistas en las que han sobresalido por la cantidad de citaciones, el cuartil y el índice de SJR. Estas son las tres principales revistas que sobresalieron en la investigación con nuestras palabras clave, *International Journal of Hydrogen Energy*, *Bioresource Technology* y *Renewable Energy* que se encuentran indexadas en *Scopus*. Las diferentes técnicas que existen para producir biohidrógeno otorgan diferentes tipos de ventajas, a pesar de que aún no se han realizado estos estudios a gran escala. Por eso se recomienda que se sigan estudiando estas técnicas con los respectivos reactores, biomasa, microorganismos y los parámetros necesarios que se deben aplicar

en cada caso. Con eso se podría romper esas barreras de solo hacer estudios a escala de laboratorio.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdin, Z., Zafaranloo, A., Rafiee, A., Mérida, W., Lipiński, W., & Khalilpour, K. R. (2020). Hydrogen as an energy vector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109620>
- Abdelqader, A., Abdelsalam, E., Attia, Y., Moselhy, M., Ali, A., Arisha, A., & Samer, M. (2021). Application of helium-neon red laser for increasing biohydrogen production from anaerobic digestion of biowastes. *Egyptian Journal of Chemistry*, 0(0), 0-0. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2021.65932.3423>
- Aghajani Delavar, M., & Wang, J. (2021). Numerical investigation of pH control on dark fermentation and hydrogen production in a microbioreactor. *Fuel*, 292. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120355>
- Aguilar, I. R. A. (2017). *Evaluación de alternativas para potencializar el uso de hidrógeno como vector energético* Universidad Nacional de Colombia].
- Ahmed, S. F., Rafa, N., Mofijur, M., Badruddin, I. A., Inayat, A., Ali, M. S., Farrok, O., & Yunus Khan, T. M. (2021). Biohydrogen Production From Biomass Sources: Metabolic Pathways and Economic Analysis. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.753878>
- Ahmed, S. F., Mofijur, M., Nahrin, M., Chowdhury, S. N., Nuzhat, S., Alherek, M., Rafa, N., Ong, H. C., Nghiem, L. D., & Mahlia, T. M. I. (2022). Biohydrogen production from wastewater-based microalgae: Progresses and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(88), 37321-37342. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.178>
- Airyalat, S. A. S., Malkawi, L. W., & Momani, S. M. (2019). Comparing bibliometric analysis using PubMed, Scopus, and Web of Science databases. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*(152), e58494.
- Albini, E., Pecorini, I., & Ferrara, G. (2019). Improvement of Digestate Stability Using Dark Fermentation and Anaerobic Digestion Processes. *Energies*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/en12183552>
- Angeriz-Campoy, R., Fdez-Güelfo, L. A., Álvarez-Gallego, C. J., & Romero-García, L. I. (2023). Pre-composting of municipal solid wastes as enhancer of bio-hydrogen production through dark fermentation process. *Fuel*, 333. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126575>
- Angenent, L. T., Karim, K., Al-Dahhan, M. H., Wrenn, B. A., & Domiguez-Espinosa, R. (2004). Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater. *Trends Biotechnol*, 22(9), 477-485. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2004.07.001>
- Antonopoulou, G., Gavala, H. N., Skiadas, I. V., Angelopoulos, K., & Lyberatos, G. (2008). Biofuels generation from sweet sorghum: fermentative hydrogen production and anaerobic digestion of the remaining biomass. *Bioresour Technol*, 99(1), 110-119. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.048>
- Arimi, M. M., Knodel, J., Kiprop, A., Namango, S. S., Zhang, Y., & Geißen, S.-U. (2015). Strategies for improvement of biohydrogen production from organic-rich wastewater: A review. *Biomass and Bioenergy*, 75, 101-118. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.02.011>
- Aslam, M., Ahmad, R., Yasin, M., Khan, A. L., Shahid, M. K., Hossain, S., Khan, Z., Jamil, F., Rafiq, S., Bilal, M. R., Kim, J., & Kumar, G. (2018). Anaerobic membrane bioreactors for biohydrogen production: Recent developments, challenges and perspectives. *Bioresour Technol*, 269, 452-464. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.050>

- Baeyens, J., Zhang, H., Nie, J., Appels, L., Dewil, R., Ansart, R., & Deng, Y. (2020). Reviewing the potential of bio-hydrogen production by fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110023>
- Baiman, R. (2022). Our Two Climate Crises Challenge: Short-Run Emergency Direct Climate Cooling and Long-Run GHG Removal and Ecological Regeneration. *Review of Radical Political Economics*, 54(4), 435-451. <https://doi.org/10.1177/04866134221123626>
- Barbarias, I., Lopez, G., Alvarez, J., Artetxe, M., Arregi, A., Bilbao, J., & Olazar, M. (2016). A sequential process for hydrogen production based on continuous HDPE fast pyrolysis and in-line steam reforming. *Chemical Engineering Journal*, 296, 191-198. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.091>
- Bar-Even, A. (2013). Does acetogenesis really require especially low reduction potential? *Biochim Biophys Acta*, 1827(3), 395-400. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2012.10.007>
- Beasy, K., Lodewyckx, S., & Mattila, P. (2022). Industry perceptions and community perspectives on advancing a hydrogen economy in Australia. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.230>
- Bedoya, A., Castrillón, J., Vásquez, J., & Zabala, M. (2007). PRODUCCIÓN BIOLÓGICA DE HIDRÓGENO: UNA APROXIMACIÓN AL ESTADO DEL ARTE.
- Benavides, H., & León, G. (2007). INFORMACIÓN TECNICA SOBRE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO.
- Braga, A., N Ferraz Júnior, A. D., & Zaiat, M. (2016). Thermophilic biohydrogen production using a UASB reactor: performance during long-term operation. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 91(4), 967-976. <https://doi.org/10.1002/jctb.4665>
- Brijaldo, M., Castillo, C., & Pérez, G. (2021). Principales Rutas en la Producción de Hidrógeno. *Ingeniería y competitividad*. <https://doi.org/10.25100/iyc.23i2.11155>
- Brijaldo, M. H., Castillo, C., & Pérez, G. (2021). Principales Rutas en la Producción de Hidrógeno. *INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD*, 23(2).
- Brindhadevi, K., Shanmuganathan, R., Pugazhendhi, A., Gunasekar, P., & Manigandan, S. (2021). Biohydrogen production using horizontal and vertical continuous stirred tank reactor- a numerical optimization. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(20), 11305-11312. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.155>
- Bundhoo, M. A. Z., & Mohee, R. (2016). Inhibition of dark fermentative bio-hydrogen production: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(16), 6713-6733. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.057>
- Burton, N. A., Padilla, R. V., Rose, A., & Habibullah, H. (2021). Increasing the efficiency of hydrogen production from solar powered water electrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110255>
- Callegari, A., Bolognesi, S., Cecconet, D., & Capodaglio, A. G. (2019). Production technologies, current role, and future prospects of biofuels feedstocks: A state-of-the-art review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(4), 384-436. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1629801>
- Castiblanco, O., & Cárdenas, D. J. (2020). Producción de hidrógeno y su perspectiva en Colombia: una revisión. *Gestión y Ambiente*, 23(2), 299-311. <https://doi.org/10.15446/ga.v23n2.86466>
- Castillo-Hernández, A., Mar-Alvarez, I., & Moreno-Andrade, I. (2015). Start-up and operation of continuous stirred-tank reactor for biohydrogen production from restaurant organic solid waste. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(48), 17239-17245. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.046>

- Catumba, B. D., Sales, M. B., Borges, P. T., Ribeiro Filho, M. N., Lopes, A. A. S., Sousa Rios, M. A. d., Desai, A. S., Bilal, M., & Santos, J. C. S. d. (2022). Sustainability and challenges in hydrogen production: An advanced bibliometric analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.215>
- Cazier, E. A., Trably, E., Steyer, J. P., & Escudie, R. (2015). Biomass hydrolysis inhibition at high hydrogen partial pressure in solid-state anaerobic digestion. *Bioresource Technology Reports*.
- Chang, F. (2004). Biohydrogen production using an up-flow anaerobic sludge blanket reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(1), 33-39. [https://doi.org/10.1016/s0360-3199\(03\)00082-x](https://doi.org/10.1016/s0360-3199(03)00082-x)
- Chaoyang Lu a, b., a, W. L., Quanguo Zhang b, Linghui Liu b, Ningyuan Zhang b, Bin Qu a, X. Y. b., Ruobing Xu b, Jiacheng Chen b, & Yong Sun a. (2021). Enhancing photo-fermentation biohydrogen production by strengthening the beneficial metabolic products with catalysts. *Journal of Cleaner Production*.
- Cheng, S., & Logan, B. (2007). Sustainable and efficient biohydrogen production via electrohydrogenesis. *PNAS*.
- Chen, C. C., & Lin, C. Y. (2003). Using sucrose as a substrate in an anaerobic hydrogen-producing reactor. *Advances in Environmental Research*, 7(3), 695-699. [https://doi.org/10.1016/s1093-0191\(02\)00035-7](https://doi.org/10.1016/s1093-0191(02)00035-7)
- Chen, W., Tseng, Z., Lee, K., & Chang, J. (2005). Fermentative hydrogen production with CGS5 isolated from anaerobic sewage sludge. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(10), 1063-1070. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.09.008>
- Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: a review. *Bioresour Technol*, 99(10), 4044-4064. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>
- Chen, Z., Yun, S., Wu, L., Zhang, J., Shi, X., Wei, W., Liu, Y., Zheng, R., Han, N., & Ni, B. J. (2022). Waste-Derived Catalysts for Water Electrolysis: Circular Economy-Driven Sustainable Green Hydrogen Energy. *Nanomicro Lett*, 15(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s40820-022-00974-7>
- Contreras, R. C. A. A. J. D. (2010). SCImago Journal & Country Rank, una plataforma para la evaluación del comportamiento de la ciencia según fuentes documentales y países. *Revista Cubana de ACIMED* 2010;21(3):310-320.
- Corrales, C., Antolinez, M., Bohórquez, A., & Corredor, A. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta.
- Dalena, F., Senatore, A., Tursi, A., & Basile, A. (2017). Bioenergy production from second- and third-generation feedstocks. In *Bioenergy Systems for the Future* (pp. 559-599). <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-101031-0.00017-x>
- Das, D., & Veziroglu, T. (2008). Advances in biological hydrogen production processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(21), 6046-6057. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.098>
- Dębowski, M., Dudek, M., Zieliński, M., Nowicka, A., & Kazimierowicz, J. (2021). Microalgal Hydrogen Production in Relation to Other Biomass-Based Technologies—A Review. *Energies*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/en14196025>
- Dhanya, B. S., Mishra, A., Chandel, A. K., & Verma, M. L. (2020). Development of sustainable approaches for converting the organic waste to bioenergy. *Sci Total Environ*, 723, 138109. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138109>
- Deng, C., Lin, R., Kang, X., Wu, B., Wall, D., & Murphy, J. D. (2022). Improvement in biohydrogen and volatile fatty acid production from seaweed through addition of conductive carbon materials

depends on the properties of the conductive materials. *Energy*, 239.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122188>

- Dincer, I., & Zamfirescu, C. (2016). Other Hydrogen Production Methods. In *Sustainable Hydrogen Production* (pp. 411-439). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-801563-6.00007-8>
- Ding, J., Wang, X., Zhou, X. F., Ren, N. Q., & Guo, W. Q. (2010). CFD optimization of continuous stirred-tank (CSTR) reactor for biohydrogen production. *Bioresour Technol*, 101(18), 7016-7024. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.146>
- Dokhani, S., Assadi, M., & Pollet, B. G. (2022). Techno-economic assessment of hydrogen production from seawater. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.200>
- El-Dalatony, M. M., Zheng, Y., Ji, M. K., Li, X., & Salama, E. S. (2020). Metabolic pathways for microalgal biohydrogen production: Current progress and future perspectives. *Bioresour Technol*, 318, 124253. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124253>
- Ellegaard, O., & Wallin, J. A. (2015). The bibliometric analysis of scholarly production: How great is the impact? *Scientometrics*, 105(3), 1809-1831. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1645-z>
- El-Sheekh, M., Elshobary, M., Abdullah, E., Abdel-Basset, R., & Metwally, M. (2023). Application of a novel biological-nanoparticle pretreatment to *Oscillatoria acuminata* biomass and coculture dark fermentation for improving hydrogen production. *Microb Cell Fact*, 22(1), 34. <https://doi.org/10.1186/s12934-023-02036-y>
- Feng, H., Sun, C., Zhang, C., Chang, H., Zhong, N., Wu, W., Wu, H., Tan, X., Zhang, M., & Ho, S.-H. (2022). Bioconversion of mature landfill leachate into biohydrogen and volatile fatty acids via microalgal photosynthesis together with dark fermentation. *Energy Conversion and Management*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115035>
- Ferreira, A., Marques, P., Ribeiro, B., Assemany, P., de Mendonca, H. V., Barata, A., Oliveira, A. C., Reis, A., Pinheiro, H. M., & Gouveia, L. (2018). Combining biotechnology with circular bioeconomy: From poultry, swine, cattle, brewery, dairy and urban wastewaters to biohydrogen. *Environ Res*, 164, 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.02.007>
- Fuess, L. T., Kiyuna, L. S. M., Ferraz, A. D. N., Persinoti, G. F., Squina, F. M., Garcia, M. L., & Zaiat, M. (2017). Thermophilic two-phase anaerobic digestion using an innovative fixed-bed reactor for enhanced organic matter removal and bioenergy recovery from sugarcane vinasse. *Applied Energy*, 189, 480-491. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.071>
- Gavala, H., Skiadas, I., Ahring, B., & Lyberatos, G. (2005). Potential for biohydrogen and methane production from olive pulp. *Waster Science & Technology*.
- Ghosh, S. (2022). Assessment and update of status of pilot scale fermentative biohydrogen production with focus on candidate bioprocesses and decisive key parameters. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(39), 17161-17183. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.183>
- Godin, B., Ghysel, F., Agneessens, R., Gerin, P., Stilmant, D., & Delcarte, J. (2010). Higher heating value prediction of lignocellulosic crop based on their content of main components. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*.
- Godvin Sharmila, V., Tamilarasan, K., Dinesh Kumar, M., Gopalakrishnan, K., Sunita, V., Adish Kumar, S., & Rajesh Banu, J. (2022). Trends in dark biohydrogen production strategy and linkages with transition towards low carbon economy: An outlook, cost-effectiveness, bottlenecks and future scope. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(34), 15309-15332. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.139>

- Guo, W., Ren, N., Chen, Z., Liu, B., Wang, X., Xiang, W., & Ding, J. (2008). Simultaneous biohydrogen production and starch wastewater treatment in an acidogenic expanded granular sludge bed reactor by mixed culture for long-term operation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(24), 7397-7404. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.09.039>
- Guo, X. M., Trably, E., Latrille, E., Carrère, H., & Steyer, J.-P. (2010). Hydrogen production from agricultural waste by dark fermentation: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(19), 10660-10673. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.03.008>
- Hamed, I. (2016). The Evolution and Versatility of Microalgal Biotechnology: A Review. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 15(6), 1104-1123. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12227>
- Hafez, H., Nakhla, G., El. Naggat, M. H., Elbeshbishy, E., & Baghchehsaraee, B. (2010). Effect of organic loading on a novel hydrogen bioreactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(1), 81-92. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.10.051>
- Han, W., Hu, Y. Y., Li, S. Y., Li, F. F., & Tang, J. H. (2016). Biohydrogen production from waste bread in a continuous stirred tank reactor: A techno-economic analysis. *Bioresour Technol*, 221, 318-323. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.055>
- Han, S. (2004). Biohydrogen production by anaerobic fermentation of food waste. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(6), 569-577. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2003.09.001>
- Hidalgo, D., & Martín-Marroquín, J. M. (2022). Enhanced Production of Biohydrogen Through Combined Operational Strategies. *Jom*, 75(3), 718-726. <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05572-x>
- Ibrahim, S., & Akhbari, A. (2022). Realizing higher value output from biomass conversion to biogas through the production of biohydrogen, biomethane, and biohythane. In *Value-Chain of Biofuels* (pp. 317-334). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-824388-6.00009-9>
- Jayalakshmi, S., Sukumaran, V., & Joseph, K. (2009). Enhancement of hydrogen production from Kitchen Waste using heat treated anaerobic biogas plant slurry with pH control. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, 8(1). <https://doi.org/10.1504/ijesd.2009.023710>
- Jorquera, O., Hernández, J., & Herrera, L. (2020). PRODUCCIÓN BIOFOTOLÍTICA DE HIDRÓGENO. *Inglomayor*.
- Jung, J. H., Sim, Y. B., Baik, J. H., Park, J. H., & Kim, S. H. (2021). High-rate mesophilic hydrogen production from food waste using hybrid immobilized microbiome. *Bioresour Technol*, 320(Pt A), 124279. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124279>
- Kadier, A., Kalil, M. S., Chandrasekhar, K., Mohanakrishna, G., Saratale, G. D., Saratale, R. G., Kumar, G., Pugazhendhi, A., & Sivagurunathan, P. (2018). Surpassing the current limitations of high purity H₂ production in microbial electrolysis cell (MECs): Strategies for inhibiting growth of methanogens. *Bioelectrochemistry*, 119, 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2017.09.014>
- Khan, M. A., Ngo, H. H., Guo, W., Liu, Y., Zhang, X., Guo, J., Chang, S. W., Nguyen, D. D., & Wang, J. (2018). Biohydrogen production from anaerobic digestion and its potential as renewable energy. *Renewable Energy*, 129, 754-768. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.029>
- Khan, M. A., Ngo, H. H., Guo, W. S., Liu, Y., Nghiem, L. D., Hai, F. I., Deng, L. J., Wang, J., & Wu, Y. (2016). Optimization of process parameters for production of volatile fatty acid, biohydrogen and methane from anaerobic digestion. *Bioresour Technol*, 219, 738-748. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.073>
- Khawer, M. U. B., Naqvi, S. R., Ali, I., Arshad, M., Juchelková, D., Anjum, M. W., & Naqvi, M. (2022). Anaerobic digestion of sewage sludge for biogas & biohydrogen production: State-of-the-art

- trends and prospects. *Fuel*, 329. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125416>
- Khetkorn, W., Rastogi, R. P., Incharoensakdi, A., Lindblad, P., Madamwar, D., Pandey, A., & Larroche, C. (2017). Microalgal hydrogen production - A review. *Bioresour Technol*, 243, 1194-1206. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.085>
- Kim, S. (2004). Feasibility of biohydrogen production by anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(15), 1607-1616. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.02.018>
- Kruse, O., Rupprecht, J., Mussgnug, J. H., Dismukes, G. C., & Hankamer, B. (2005). Photosynthesis: a blueprint for solar energy capture and biohydrogen production technologies. *Photochem Photobiol Sci*, 4(12), 957-970. <https://doi.org/10.1039/b506923h>
- Kukharets, S., Hutsol, T., Glowacki, S., Sukmaniuk, O., Rozkosz, A., & Tkach, O. (2021). Concept of Biohydrogen Production by Agricultural Enterprises. *Agricultural Engineering*, 25(1), 63-72. <https://doi.org/10.2478/agriceng-2021-0005>
- Kumar, M., Sun, Y., Rathour, R., Pandey, A., Thakur, I. S., & Tsang, D. C. W. (2020). Algae as potential feedstock for the production of biofuels and value-added products: Opportunities and challenges. *Sci Total Environ*, 716, 137116. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137116>
- Kumar, S., Sharma, S., Thakur, S., Mishra, T., Negi, P., Mishra, S., Hesham, A., Rastegari, A., Yadav, N., & Yadav, A. (2019). Bioprospecting of Microbes for Biohydrogen Production: Current Status and Future Challenges. *Bioprocessing for Biomolecules Production*, 443-471. <https://doi.org/doi:10.1002/9781119434436.ch22>
- Lam, M. K., Loy, A. C. M., Yusup, S., & Lee, K. T. (2019). Biohydrogen Production From Algae. In *Biohydrogen* (pp. 219-245). <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64203-5.00009-5>
- Lee, D. J., Show, K. Y., & Su, A. (2011). Dark fermentation on biohydrogen production: Pure culture. *Bioresour Technol*, 102(18), 8393-8402. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.041>
- Levikhin, A. A., & Boryaev, A. A. (2022). Energy-saving, environmentally friendly production of hydrogen from the hydrocarbon feed. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 54. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102876>
- Levin, D. (2004). Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(2), 173-185. [https://doi.org/10.1016/s0360-3199\(03\)00094-6](https://doi.org/10.1016/s0360-3199(03)00094-6)
- Li, S., Li, F., Zhu, X., Liao, Q., Chang, J. S., & Ho, S. H. (2022). Biohydrogen production from microalgae for environmental sustainability. *Chemosphere*, 291(Pt 1), 132717. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132717>
- Li, X., Raorane, C. J., Xia, C., Wu, Y., Tran, T. K. N., & Khademi, T. (2023). Latest approaches on green hydrogen as a potential source of renewable energy towards sustainable energy: Spotlighting of recent innovations, challenges, and future insights. *Fuel*, 334. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126684>
- Li, Z., Fang, S., Sun, H., Chung, R. J., Fang, X., & He, J. H. (2023). Solar Hydrogen. *Advanced Energy Materials*, 13(8). <https://doi.org/10.1002/aenm.202203019>
- Lim, E. Y., Lee, J. T. E., Zhang, L., Tian, H., Ong, K. C., Tio, Z. K., Zhang, J., & Tong, Y. W. (2022). Abrogating the inhibitory effects of volatile fatty acids and ammonia in overloaded food waste anaerobic digesters via the supplementation of nano-zero valent iron modified biochar. *Sci Total Environ*, 817, 152968. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152968>
- Linares, J., & Moratilla, B. (2007). El hidrógeno y la energía. *Colección: Avances de ingeniería*
- Liu, H., Xu, Y., Li, L., Dai, X., & Dai, L. (2021). A review on application of single and composite conductive

- additives for anaerobic digestion: Advances, challenges and prospects. *Resources, Conservation and Recycling*, 174. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105844>
- Lubbe, F., Rongé, J., Bosserez, T., & Martens, J. A. (2023). Golden hydrogen. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100732>
- Magdalena, J. A., Perez-Bernal, M. F., Bernet, N., & Trably, E. (2023). Sequential dark fermentation and microbial electrolysis cells for hydrogen production: Volatile fatty acids influence and energy considerations. *Bioresour Technol*, 374, 128803. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128803>
- Mahata, C., Dhar, S., Ray, S., & Das, D. (2023). Biohydrogen production from starchy wastewater in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor: Possibilities toward circular bioeconomy. *Environmental Technology & Innovation*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103044>
- Mahmudul, H. M., Rasul, M. G., Akbar, D., Narayanan, R., & Mofijur, M. (2021). A comprehensive review of the recent development and challenges of a solar-assisted biodigester system. *Sci Total Environ*, 753, 141920. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141920>
- Manish, S., & Banerjee, R. (2008). Comparison of biohydrogen production processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(1), 279-286. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.07.026>
- Martínez, G., Martínez, M., & López, A. (2022). Hidrógeno: tecnologías de producción, almacenamiento y aplicaciones. *CienciAcierta*.
- Martins das Neves, L. C., Converti, A., & Vessoni Penna, T. C. (2009). Biogas Production: New Trends for Alternative Energy Sources in Rural and Urban Zones. *Chemical Engineering & Technology*, 32(8), 1147-1153. <https://doi.org/10.1002/ceat.200900051>
- Mazloomi, K., & Gomes, C. (2012). Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3024-3033. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.028>
- Mohanakrishna, G., Srikanth, S., & Pant, D. (2016). Bioprocesses for Waste and Wastewater Remediation for Sustainable Energy. In *Bioremediation and Bioeconomy* (pp. 537-565). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802830-8.00021-6>
- Mohanakrishna, G., & Modestra, J. A. (2023). Value addition through biohydrogen production and integrated processes from hydrothermal pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol*, 369, 128386. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128386>
- Monlau, F., Barakat, A., Trably, E., Dumas, C., Steyer, J.-P., & Carrère, H. (2013). Lignocellulosic Materials Into Biohydrogen and Biomethane: Impact of Structural Features and Pretreatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 43(3), 260-322. <https://doi.org/10.1080/10643389.2011.604258>
- Morales, S., Acosta, P., Hernandez, M., & Dávila, J. (2014). Producción de biohidrógeno en un reactor continuo UASB. *Revista Cubana de Química*.
- Moreno-Andrade, I., Berrocal-Bravo, M. J., & Valdez-Vazquez, I. (2022). Biohydrogen production from food waste and waste activated sludge in codigestion: influence of organic loading rate and changes in microbial community. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 98(1), 230-237. <https://doi.org/10.1002/jctb.7238>
- Ngoc Bao Dung, T., Lay, C.-H., Nguyen, D. D., Chang, S. W., Rajesh Banu, J., Hong, Y., & Park, J.-H. (2023). Improving the biohydrogen production potential of macroalgal biomass through mild acid dispersion pretreatment. *Fuel*, 332. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125895>
- 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/10.1016/j.fuproc.2005.11.003>

- Niño-Navarro, C., Chairez, I., Torres-Bustillos, L., Ramírez-Muñoz, J., Salgado-Manjarrez, E., & García-Peña, E. I. (2016). Effects of fluid dynamics on enhanced biohydrogen production in a pilot stirred tank reactor: CFD simulation and experimental studies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(33), 14630-14640. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.236>
- Obulisamy, P. K., Chakraborty, D., Selvam, A., & Wong, J. W. (2016). Anaerobic co-digestion of food waste and chemically enhanced primary-treated sludge under mesophilic and thermophilic conditions. *Environ Technol*, 37(24), 3200-3207. <https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1181112>
- Oncel, S. S. (2015). Biohydrogen from Microalgae, Uniting Energy, Life, and Green Future. In *Handbook of Marine Microalgae* (pp. 159-196). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-800776-1.00011-x>
- Ortiz Rabell, G., Alfaro Cruz, M. R., & Juárez-Ramírez, I. (2022). Photochemistry of ZnO/GeO₂ film for H₂ production. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 433. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2022.114185>
- Özgür, E., Mars, A. E., Peksel, B., Louwerse, A., Yücel, M., Gündüz, U., Claassen, P. A. M., & Eroğlu, İ. (2010). Biohydrogen production from beet molasses by sequential dark and photofermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(2), 511-517. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.10.094>
- Page, M. J., Moher, D., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hrobjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., . . . McKenzie, J. E. (2021). PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n160. <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>
- Parra, R. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria.
- Patel, A. K., Vaisnav, N., Mathur, A., Gupta, R., & Tuli, D. K. (2016). Whey waste as potential feedstock for biohydrogen production. *Renewable Energy*, 98, 221-225. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.039>
- Patel, S. K. S., Kalia, V. C., & Lee, J. K. (2023). Integration of biogas derived from dark fermentation and anaerobic digestion of biowaste to enhance methanol production by methanotrophs. *Bioresour Technol*, 369, 128427. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128427>
- Patel, S. K. S., Das, D., Kim, S. C., Cho, B.-K., Kalia, V. C., & Lee, J.-K. (2021). Integrating strategies for sustainable conversion of waste biomass into dark-fermentative hydrogen and value-added products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111491>
- Puhulwella, R. G., Beckers, L., Delvigne, F., Grigorescu, A. S., Thonart, P., & Hilgsmann, S. (2014). Mesophilic biohydrogen production by *Clostridium butyricum* CWBI1009 in trickling biofilter reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(30), 16902-16913. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.08.087>
- Rambabu, K., Bharath, G., Thanigaivelan, A., Das, D. B., Show, P. L., & Banat, F. (2021). Augmented biohydrogen production from rice mill wastewater through nano-metal oxides assisted dark fermentation. *Bioresour Technol*, 319, 124243. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124243>
- Rasul, M. G., Hazrat, M. A., Sattar, M. A., Jahirul, M. I., & Shearer, M. J. (2022). The future of hydrogen: Challenges on production, storage and applications. *Energy Conversion and Management*, 272. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116326>

- Regueira-Marcos, L., García-Depraect, O., & Muñoz, R. (2023). Elucidating the role of pH and total solids content in the co-production of biohydrogen and carboxylic acids from food waste via lactate-driven dark fermentation. *Fuel*, 338. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127238>
- Ren, N., Li, J., Li, B., Wang, Y., & Liu, S. (2006). Biohydrogen production from molasses by anaerobic fermentation with a pilot-scale bioreactor system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(15), 2147-2157. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.02.011>
- Rethlefsen, M. L., Kirtley, S., Waffenschmidt, S., Ayala, A. P., Moher, D., Page, M. J., Koffel, J. B., & Group, P.-S. (2021). PRISMA-S: an extension to the PRISMA Statement for Reporting Literature Searches in Systematic Reviews. *Syst Rev*, 10(1), 39. <https://doi.org/10.1186/s13643-020-01542-z>
- Rivera-Salvador, V., Aranda-Barradas, J. S., Robles-Martínez, F., Espinosa-Solares, T., & Toledo, J. U. (2009). EL MODELO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA IWA-ADM1: UNA REVISIÓN DE SU EVOLUCIÓN.
- Rodríguez, J., & Sánchez, Y. (2021). *Diseño de un sistema híbrido para producción de hidrógeno* Industriales ETSIIJ].
- Rojas, M., Huerta, G., & Gómez, J. (2012). FERMENTACIÓN ANAEROBIA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOHIDRÓGENO EN UN REACTOR UASB MEDIANTE LA RUTA DEL ETANOL. *Revista Cubana de Química*.
- Romero, A., Jobbágy, M., Laborde, M., Baronetti, G., & Amadeo, N. (2014). Ni(II)–Mg(II)–Al(III) catalysts for hydrogen production from ethanol steam reforming: Influence of the Mg content. *Applied Catalysis A: General*, 470, 398-404. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2013.10.054>
- Saini, A. K., Radu, T., Paritosh, K., Kumar, V., Pareek, N., Tripathi, D., & Vivekanand, V. (2021). Bioengineered bioreactors: a review on enhancing biomethane and biohydrogen production by CFD modeling. *Bioengineered*, 12(1), 6418-6433. <https://doi.org/10.1080/21655979.2021.1972195>
- Santos, S. C., Ferreira Rosa, P. R., Sakamoto, I. K., Amâncio Varesche, M. B., & Silva, E. L. (2014). Continuous thermophilic hydrogen production and microbial community analysis from anaerobic digestion of diluted sugar cane stillage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(17), 9000-9011. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.241>
- Sarmiento, F., Leigh, J. A., & Whitman, W. B. (2011). Genetic systems for hydrogenotrophic methanogens. *Methods Enzymol*, 494, 43-73. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385112-3.00003-2>
- Seelert, T., Ghosh, D., & Yargeau, V. (2015). Improving biohydrogen production using *Clostridium beijerinckii* immobilized with magnetite nanoparticles. *Appl Microbiol Biotechnol*, 99(9), 4107-4116. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6484-6>
- Seo, J.-W., Ha, S.-B., Song, I.-C., & Kim, J.-Y. (2023). PbS Quantum Dots-Decorated BiVO₄ Photoanodes for Highly Efficient Photoelectrochemical Hydrogen Production. *Nanomaterials*, 13(5), 799.
- Shanmugam, S., Mathimani, T., Rajendran, K., Sekar, M., Rene, E. R., Chi, N. T. L., Ngo, H. H., & Pugazhendhi, A. (2023). Perspective on the strategies and challenges in hydrogen production from food and food processing wastes. *Fuel*, 338. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127376>
- Sheng, T., Zhao, L., Gao, L., Liu, W., Wu, G., Wu, J., & Wang, A. (2018). Enhanced biohydrogen production from nutrient-free anaerobic fermentation medium with edible fungal pretreated rice straw. *RSC Adv*, 8(41), 22924-22930. <https://doi.org/10.1039/c8ra03361g>
- Show, K.-Y., Yan, Y., & Lee, D.-J. (2019). Bioreactor and Bioprocess Design for Biohydrogen Production. In *Biohydrogen* (pp. 391-411). <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64203-5.00016-2>

- Show, K. Y., Yan, Y., Ling, M., Ye, G., Li, T., & Lee, D. J. (2018). Hydrogen production from algal biomass - Advances, challenges and prospects. *Bioresour Technol*, 257, 290-300.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.105>
- Singh, N., & Sarma, S. (2022). Biological routes of hydrogen production: a critical assessment. In *Handbook of Biofuels* (pp. 419-434). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822810-4.00021-x>
- Srivastava, R. K., Shetti, N. P., Reddy, K. R., Kwon, E. E., Nadagouda, M. N., & Aminabhavi, T. M. (2021). Biomass utilization and production of biofuels from carbon neutral materials. *Environ Pollut*, 276, 116731. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116731>
- Stenina, I., & Yaroslavl'tsev, A. (2022). Modern Technologies of Hydrogen Production. *Processes*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/pr11010056>
- Tápparo, D. C., Rodríguez-Lázaro, D., Hernández, M., Camargo, A. F., Bonatto, C., Maia, G., Rogoviski, P., Dadamuro, R. D., Soratto, T. A. T., Scapini, T., Stoco, P. H., Wagner, G., Kunz, A., Michelon, W., Viancelli, A., Treichel, H., & Fongaro, G. (2021). Wastewater Treatment for Bioenergy Purposes Using a Metaproteomic Approach. In *Wastewater Treatment* (pp. 253-278). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821881-5.00012-x>
- Tashyrev, V. H. O. H. G. G. O. (2021). Hydrogen Dark Fermentation for Degradation of Solid and Liquid Food Waste. *Energies*, 14, 1831.
- Tezel, E., Figen, H. E., & Baykara, S. Z. (2019). Hydrogen production by methane decomposition using bimetallic Ni-Fe catalysts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(20), 9930-9940. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.151>
- Trchounian, K., Sawers, R. G., & Trchounian, A. (2017). Improving biohydrogen productivity by microbial dark- and photo-fermentations: Novel data and future approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1201-1216. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.149>
- van Renssen, S. (2020). The hydrogen solution? *Nature Climate Change*, 10(9), 799-801. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0891-0>
- Velásquez, E. A. C. M. H. J. C., & Moreno, E. L. (2011). Biocombustibles: búsqueda de alternativas.
- Venkata Mohan, S., Lalit Babu, V., & Sarma, P. N. (2007). Anaerobic biohydrogen production from dairy wastewater treatment in sequencing batch reactor (AnSBR): Effect of organic loading rate. *Enzyme and Microbial Technology*, 41(4), 506-515. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2007.04.007>
- Venkata Mohan, S., Lenin Babu, M., Venkateswar Reddy, M., Mohanakrishna, G., & Sarma, P. N. (2009). Harnessing of biohydrogen by acidogenic fermentation of Citrus limetta peelings: Effect of extraction procedure and pretreatment of biocatalyst. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(15), 6149-6156. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.05.056>
- Venkata Mohan, S., Mohanakrishna, G., Reddy, B. P., Saravanan, R., & Sarma, P. N. (2008). Bioelectricity generation from chemical wastewater treatment in mediatorless (anode) microbial fuel cell (MFC) using selectively enriched hydrogen producing mixed culture under acidophilic microenvironment. *Biochemical Engineering Journal*, 39(1), 121-130. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2007.08.023>
- Wang, A., Sun, D., Cao, G., Wang, H., Ren, N., Wu, W. M., & Logan, B. E. (2011). Integrated hydrogen production process from cellulose by combining dark fermentation, microbial fuel cells, and a microbial electrolysis cell. *Bioresour Technol*, 102(5), 4137-4143. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.137>

- Wang, C. C., Chang, C. W., Chu, C. P., Lee, D. J., Chang, B. V., Liao, C. S., & Tay, J. H. (2003). Using filtrate of waste biosolids to effectively produce bio-hydrogen by anaerobic fermentation. *Water Res*, 37(11), 2789-2793. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00004-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00004-6)
- Wang, L., Zhou, Q., & Zheng, G. H. (2006). Comprehensive analysis of the factors for propionic acid accumulation in acidogenic phase of anaerobic process. *Environ Technol*, 27(3), 269-276. <https://doi.org/10.1080/09593332708618640>
- Wang, W., Xie, L., Chen, J., Luo, G., & Zhou, Q. (2011). Biohydrogen and methane production by co-digestion of cassava stillage and excess sludge under thermophilic condition. *Bioresour Technol*, 102(4), 3833-3839. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.012>
- Wang, X., Ding, J., Ren, N.-Q., Liu, B.-F., & Guo, W.-Q. (2009). CFD simulation of an expanded granular sludge bed (EGSB) reactor for biohydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(24), 9686-9695. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.10.027>
- Wu, X., Yang, H., & Guo, L. (2010). Effect of operation parameters on anaerobic fermentation using cow dung as a source of microorganisms. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(1), 46-51. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.10.039>
- Woodward, J., Orr, M., Cordray, K., & Greenbaum, E. (2000). Enzymatic production of biohydrogen.
- Xing, Y., Li, Z., Fan, Y., & Hou, H. (2010). Biohydrogen production from dairy manures with acidification pretreatment by anaerobic fermentation. *Environ Sci Pollut Res Int*, 17(2), 392-399. <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0187-4>
- Yuan, T., Shi, X., Sun, R., Ko, J. H., & Xu, Q. (2021). Simultaneous addition of biochar and zero-valent iron to improve food waste anaerobic digestion. *Journal of Cleaner Production*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123627>
- Zaidi, A. A., Khan, S. Z., Almohamadi, H., Mahmoud, E. R. I., & Naseer, M. N. (2021). Nanoparticles Synergistic Effect with Various Substrate Pretreatment and their Comparison on Biogas Production from Algae Waste. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 16(2), 374-382. <https://doi.org/10.9767/bcrec.16.2.10637.374-382>
- Zaidi, A. A., RuiZhe, F., Malik, A., Khan, S. Z., Bhutta, A. J., Shi, Y., & Mushtaq, K. (2019). Conjoint effect of microwave irradiation and metal nanoparticles on biogas augmentation from anaerobic digestion of green algae. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(29), 14661-14670. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.245>
- Zaidi, A. A., RuiZhe, F., Shi, Y., Khan, S. Z., & Mushtaq, K. (2018). Nanoparticles augmentation on biogas yield from microalgal biomass anaerobic digestion. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(31), 14202-14213. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.132>
- Zainal, B. S., Zaini, S., Zinatizadeh, A. A., Mohd, N. S., Ibrahim, S., Ker, P. J., & Mohamed, H. (2023). Preliminary Investigation of Different Types of Inoculums and Substrate Preparation for Biohydrogen Production. *Fermentation*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/fermentation9020127>
- Zhang, S., Ren, Y., Ma, X., Guan, W., Gao, M., Li, Y.-Y., Wang, Q., & Wu, C. (2021). Effect of zero-valent iron addition on the biogas fermentation of food waste after anaerobic preservation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106013>
- Zhang, T., Liu, H., & Fang, H. H. (2003). Biohydrogen production from starch in wastewater under thermophilic condition. *J Environ Manage*, 69(2), 149-156. [https://doi.org/10.1016/s0301-4797\(03\)00141-5](https://doi.org/10.1016/s0301-4797(03)00141-5)
- Zhang, T., Jiang, D., Zhang, H., Jing, Y., Tahir, N., Zhang, Y., & Zhang, Q. (2020). Comparative study on

bio-hydrogen production from corn stover: Photo-fermentation, dark-fermentation and dark-photo co-fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(6), 3807-3814.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.170>

Zhao, M., Liu, Z., Xu, J., Liu, H., Dai, X., Gu, S., & Ruan, W. (2020). Dosing effect of nano zero valent iron (NZVI) on the dark hydrogen fermentation performance via lake algae and food waste co-digestion. *Energy Reports*, 6, 3192-3199. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.200>

Zhang, X., Zhang, Q., Li, Y., & Zhang, H. (2023). Modeling and optimization of photo-fermentation biohydrogen production from co-substrates basing on response surface methodology and artificial neural network integrated genetic algorithm. *Bioresour Technol*, 374, 128789.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128789>

Zhang, Z., Ai, F., Li, Y., Zhu, S., Wu, Q., Duan, Z., Liu, H., Qian, L., Zhang, Q., & Zhang, Y. (2023). Co-production process optimization and carbon footprint analysis of biohydrogen and biofertilizer from corncob by photo-fermentation. *Bioresour Technol*, 375, 128814.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128814>

Zhu, S., Zhang, Y., Zhang, Z., Ai, F., Zhang, H., Li, Y., Wang, Y., & Zhang, Q. (2023). Ascorbic acid-mediated zero-valent iron enhanced hydrogen production potential of bean dregs and corn stover by photo fermentation. *Bioresour Technol*, 374, 128761.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128761>

