

Artículo de Revisión

Subproductos generados en el tratamiento y valorización de residuos sólidos urbanos dentro del concepto de biorrefinería: una revisión sistemática

Byproducts generated in the treatment and valorization of urban solid waste within the concept of biorefinery: A systematic review

Jairo Smith Triviño Pineda

<https://orcid.org/0000-0002-0966-6373>

Magister en Ciencias Biológicas en formación – Universidad de la Amazonia. Email: jairo05_35_30@hotmail.com

*(Autor para correspondencia)

Claudia Yolanda Reyes

<https://orcid.org/0000-0002-3929-0565>

Pós Graduação em Geologia - Universidade Federal Da Bahia. Email: cl.reyes@udla.edu.co

Javier Eduardo Sánchez Ramírez

<https://orcid.org/0000-0002-6793-0603>

Doctorado Ingeniería Química - Universidad de Valencia. Investigador del Dpto I+D DAM

Email: jesr18@hotmail.com

Fecha de recibido: 29/10/2020

Fecha de revisión: 10/03/2021

Fecha de aprobación: 18/05/2021

DOI: 10.25054/22161325.2783

Resumen

Esta revisión tiene como objetivo recopilar y resumir las investigaciones llevadas a cabo actualmente asociadas a la obtención de subproductos generados a partir de los residuos sólidos urbanos (RSU) empleando diversos procesos dentro del concepto de las biorrefinerías. Se realizó una búsqueda bibliográfica utilizando la base de datos científicas más conocida de los cuales se incluyeron artículos en inglés y español publicados entre julio de 2008 a junio de 2020. Se descartaron los artículos de años anteriores, artículos que no informan acerca de subproductos, informes de los temas y capítulos de libros. Se encontró que la mayoría de los estudios que analizan la producción de los subproductos se han realizado en modo discontinuo a partir de la obtención de un solo producto, por lo que no se enmarcan en el concepto de biorrefinería. Como hallazgo principal, esta revisión muestra que a partir de los RSU se pueden generar varios productos que tienen un gran valor tanto para la fabricación de productos como en el comercio. Con esta revisión se proporcionan nuevos conocimientos alternos para implementar el desarrollo y la implementación de una biorrefinería a gran escala usando como materia prima los RSU que están compuestos principalmente por proteínas, ácidos acético, lignina, entre otros, ya que, por medio de varios procesos bioquímicos, es posible obtener compuestos de valor añadido tales como biocombustibles, productos químicos y nutrientes tales como biogás, bioetanol, biohidrógeno, ácido láctico, ácidos grasos volátiles, biofertilizantes y enmiendas agrícolas. Se recomiendan más investigaciones al respecto para lograr impactos positivos ambientales, ecológicos, sociales, económicos y técnicos.

Palabras clave: Biocombustibles; productos químicos; biofertilizantes; economía sostenible; economía sustentable; economía circular.

Abstract

This review aims to compile and summarize the research currently carried out associated with obtaining byproducts generated from urban solid waste (MSW) using various processes within the concept of biorefineries. A bibliographic search was carried out using the scientific database of which articles in English and Spanish published between July 2008 and June 2020 were included. Articles from previous years, which do not inform about by-products, reports of the topics, and book chapters were dismissed. It was found that most of the studies that analyze the production of byproducts have been carried out in a discontinuous way from the obtaining of a single product, so they are not framed within the concept of biorefinery. As a main finding, this review shows that various products can be generated from MSW have great value for both product manufacturing and trade. This review provides new alternative knowledge to implement the development and implementation of a large-scale biorefinery using MSW as raw material, which is mainly composed of proteins, acetic acids, lignin, among others, since, through various processes biochemicals, it is possible to obtain biofuels, chemicals, and nutrients such as biogas, bioethanol, biohydrogen, lactic acid, volatile fatty acids, biofertilizers and agricultural amendments. Further research is recommended in this regard to achieve positive environmental, ecological, social, economic, and technical impacts.

Keywords: Biofuels; Chemicals, Biofertilizers; Sustainable Economy; Sustainable Economy; Circular Economy.

1. Introducción

Durante los últimos 30 años, el aumento exponencial de la población humana ha causado de forma directa un incremento en la generación de residuos sólidos urbanos (RSU), debido al crecimiento de las urbes, al desarrollo económico y los patrones de consumo. Se han originado grandes problemas medio ambientales, además de la insostenibilidad del sistema de energías basados en los combustibles fósiles. Debido a esto se ha avanzado a nivel mundial en la reutilización o el aprovechamiento del flujo de residuos sólidos urbanos (RSU), y así se ha convertido en una de las áreas de investigación más importantes en los últimos años debido a los problemas en la disposición final, la recolección y el reciclaje de estos residuos (Tyagi *et al.*, 2018). A nivel mundial la producción de residuos municipales está alrededor de 2.000 millones de t/año y para el año 2050 se estima que llegará a los 4.200 millones de t/año (T. Gu *et al.*, 2019). La mayoría de estos residuos son biodegradables de origen orgánico o más conocido como fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU) con un porcentaje entre el 34-53 %, presentan una composición distribuida de la siguiente manera: residuos de la fabricación de alimentos 39 %, desechos domésticos de la preparación de alimentos, sobrantes y comida caducada 42 % y por último residuos de restaurantes y establecimientos de comida 19 % (Abad *et al.*, 2019).

Todos estos residuos que no son gestionados adecuadamente tienen un efecto negativo para el medio ambiente; a nivel mundial son responsables de más del 70 % del gas de efecto invernadero emitido en el planeta, principalmente en forma de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) (Deus *et al.*, 2020; Oertel *et al.*, 2016; Ramos, 2011; Yu *et al.*, 2013). Por lo anterior, es necesario buscar alternativas de aprovechamiento que permitan un tratamiento eficiente y una valorización en productos químicos, nutrientes y combustibles indispensables para la humanidad, además de generar una economía sostenible y circular de base biológica y ayudar a la conservación de los ecosistemas para reducir la explotación de los recursos naturales (Cerdeira *et al.*, 2018; Wainaina *et al.*, 2019).

En los datos mencionados por diversos autores se revela la necesidad de estudiar diversas tecnologías económicamente asequibles y técnicamente viables que hasta la fecha han sido poco estudiadas para el tratamiento y reutilización de estos residuos. En este sentido, uno de los subproductos que puede ser obtenido es el bioetanol. Se estima que la demanda nacional colombiana de etanol para mayo del 2019 fue de aproximadamente 65.911.903 litros (FNB, 2020), y que con procesos biotecnológicos se pudo generar 319.142 L/día por cada 258 toneladas de residuos

sólidos. Por otra parte, en Colombia, en febrero de 2020 la producción de gas fue de 1.143 MPCD (Grupo Bancolombia, 2020), pero que durante el proceso de fermentación anaerobio se podría producir 13,90 m³/ día. Otros procesos biotecnológicos se pueden emplear para aprovechar los RSU y obtener alcoholes comerciales tales como el bioetanol o para la producción de biogás mediante procesos anaerobios que permite aprovechar este biogás para producir energía o calor, o biometano para uso vehicular o inyección a la red de gas natural.

Esta revisión consolida de forma resumida la investigación asociada a los subproductos más importantes generados a partir de los RSU y que están siendo obtenidos en la actualidad a diferentes escalas o niveles de tecnología (Technology Readiness Levels - TRL) como es el biogás, biometano, bioetanol, biohidrógeno, ácidos grasos volátiles, ácido láctico, biofertilizantes o enmiendas agrícolas, basados en un concepto novedoso como es la biorrefinería y la economía circular (Duan *et al.*, 2020; Grima & Singh, 2020).

2. Metodología de revisión sistemática

Para la revisión realizada, se implementó la metodología de revisión bibliográfica sistemática, sobre la producción de subproductos de valor añadido generados a partir de los residuos sólidos urbanos aplicando el concepto de biorrefinería, siguiendo las directrices para la realización de revisiones sistemáticas de literatura. Se seleccionaron artículos que describen algunos de los diferentes productos que pueden ser empleados para el aprovechamiento o valorización de los RSU, ya sea en forma de biocombustibles, productos químicos o nutrientes como los biofertilizantes. La revisión incluye artículos en inglés y español publicados entre julio de 2008 a junio de 2020. No se han considerado los siguientes artículos: a) publicados antes de julio de 2008; b) artículos sin información de subproductos; c) informes generales sobre el tema; d) capítulos de libro (Figuras 1 y 2).

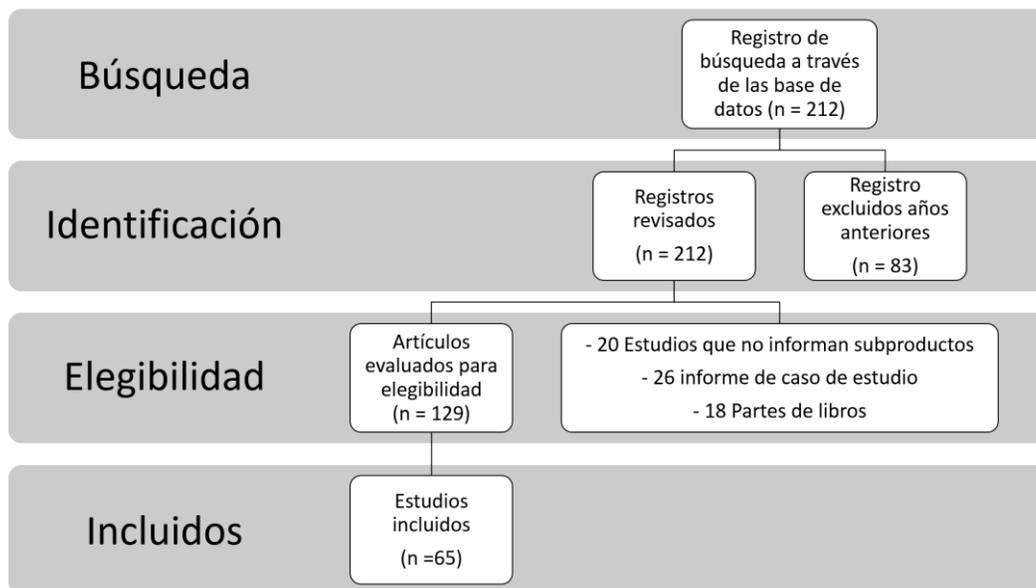


Figura 1. Diagrama de flujo de búsqueda, identificación, elegibilidad y selección final de textos. Fuente: Autoría propia (2020).

La búsqueda inicial arrojó 212 resultados; al final, siguiendo los criterios de identificación y elegibilidad, resultaron seleccionados 64 artículos.

La búsqueda de artículos o revisión bibliográfica se realizó empleando diversas bases de datos entre las que se encuentran Dialnet, Sciencedirect, Google Scholar y Academic. Los términos más buscados fueron “Bioethanol from Solid Waste”, “Organic Fraction of Solid Waste”, “Anaerobic Digestion” “Biorrefinery” y “Urban Solid Waste”.

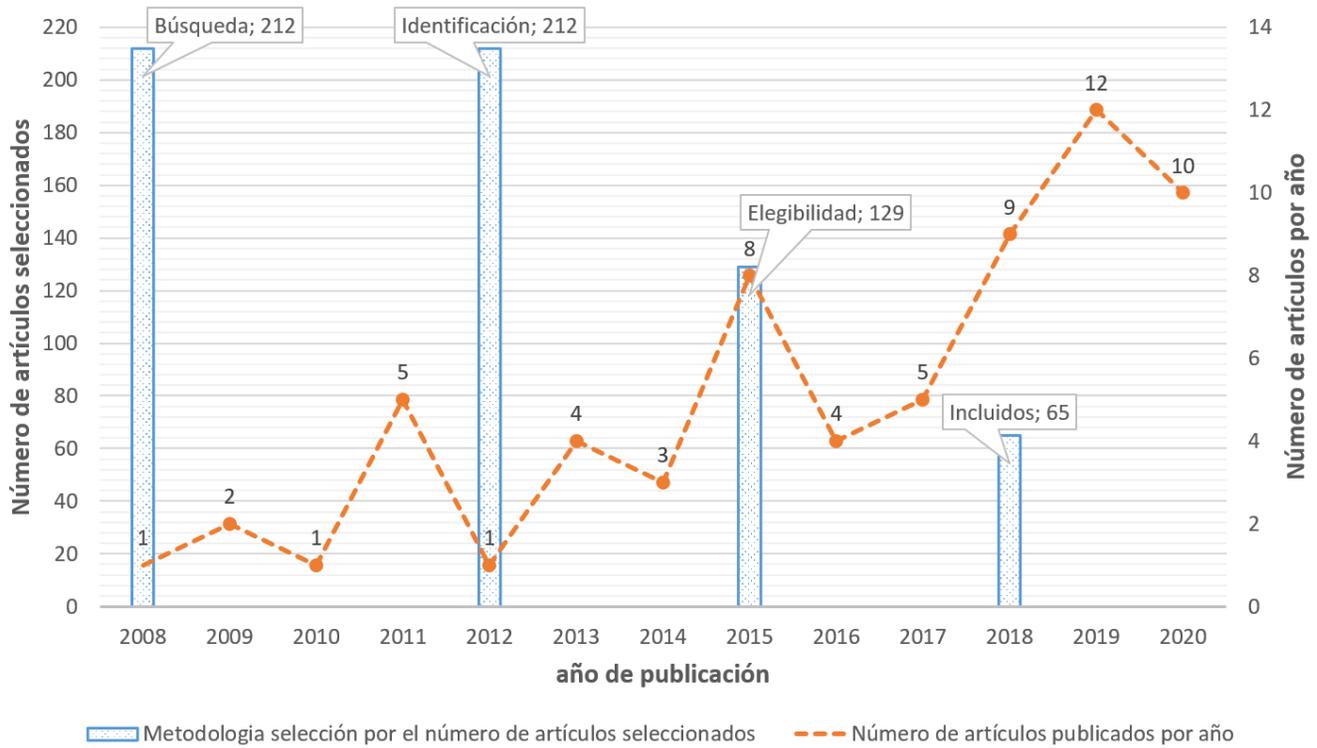


Figura 2. Gráfica de artículos por año, selección de textos y línea temporal. Fuente: Autoría propia (2020).

Las barras de color azul representan el diagrama de flujo de búsqueda siguiendo los criterios de identificación y elegibilidad y selección final de los artículos. La línea punteada indica el número de artículos que fueron seleccionados y clasificados por año con un mínimo de 1 y un máximo de 12 artículos por año que fueron publicados.

3. Resultados

3.1. Características de los RSU

Los residuos sólidos urbanos de rellenos sanitarios consisten esencialmente en residuos agrícolas e industriales, como madera, papel, residuos biomasa verde, residuos domésticos, vidrio y cuero; además de residuos electrónicos, como computadores, teléfonos, refrigeradores, televisores. También se incluye la actividad de construcción, donde se encuentran residuos de demolición; por último, los residuos médicos (Khalil *et al.*, 2019).

Los residuos agrícolas están compuestos por diferentes materiales que se pueden dividir en: celulosa (Ce), hemicelulosa (HCe) y lignina (Lig). Ce y HCe se pueden digerir fácilmente en el proceso de digestión anaerobia (DA) ya que son compuestos biodegradables (Almmani, 2020), mientras que los materiales que contienen Lig no son biodegradables por lo que requirieren un pretratamiento para facilitar su degradación (Sahito & Mahar, 2014). Los pretratamientos como la trituración lo que buscan es disminuir su tamaño, aumentar el área de superficie y descomponer en compuestos más simples son de forma mecánica, térmica y biológica (Lalak *et al.*, 2016). No obstante, los elevados costos y las condiciones precisas limitan su aplicación. Por ese motivo el tratamiento que ha

demostrado buenos resultados es el tratamiento químico, con la ayuda de agentes ácidos, básicos y oxidantes (Almomani, 2020; Lalak *et al.*, 2016).

Los residuos de vidrio son un material no degradable, por lo que en la gestión de los recursos se presentan impactos negativos. Los residuos de vidrio presentan gran variación de tipo y composición química, además, terminan en vertederos (Gao *et al.*, 2020). Por consiguiente, se ha incrementado un gran interés en la reutilización de los residuos de vidrio aplicados en la construcción, debido a los beneficios de la reducción en el consumo de los recursos naturales, los costos generales en los materiales de construcción entre otras (Bravo *et al.*, 2015).

Los desechos domésticos están compuesto por desechos de alimentos, desechos de jardín, estiércol de animal, fangos de planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y desechos agrícolas, por tal razón son susceptibles a ser tratados mediante procesos biológicos debido a su alto componente orgánico y sus características tanto física como químicas (L. Zhang *et al.*, 2019). Por ejemplo, en el caso de los desechos de alimentos, en términos generales se refiere a los alimentos que son rechazados, no se comen o se pierden durante etapas de producción, procesamiento, transporte y consumo de la materia prima. Dependiendo de los hábitos de alimentación de las personas varía en las regiones y países, siendo los componentes principales el arroz, verduras, carne, fideos, huevos, entre otros. Presentan una heterogeneidad en su composición basada en carbohidratos, lípidos y proteínas, que hacen que ciertos procesos biotecnológicos sean viables técnicamente, tal es el caso del proceso de la digestión anaerobia (Ravindran & Sekaran, 2010).

En el caso de los desechos de jardín, se hace referencia a hojas, pastos y madera que, por lo general se acumulan en ciudades y pueblos. Comúnmente contienen celulosa, hemicelulosa, y lignina, por lo cual se debe realizar un pretratamiento que permita facilitar la hidrólisis enzimática de estos residuos antes de ser valorizados; algunos pretratamientos pueden ser físicos, químicos o biológico (Li *et al.*, 2015).

Respecto al estiércol de animal, se refiere a las heces de animales, que se presentan de dos formas: la primera conocida como estiércol de corral sólido; la segunda, como purín de estiércol líquido. El estiércol de diferentes animales generalmente muestra diversas características y por lo tanto puede necesitar una adecuación inicial antes de ser llevado a procesos de valorización como es el caso de la digestión anaerobia, que permite producir biogás a partir de residuos orgánicos (Li *et al.*, 2015).

Los fangos de PTAR son un subproducto del proceso secundario de tratamientos aeróbicos de aguas residuales. Por el alto contenido de agua residual, la operación de digestión anaerobia implica altos costos de operación, pero se presenta una sostenibilidad en el tiempo debido a los subproductos como el biogás, bioetanol, biofertilizantes, entre otros, que se obtienen en el proceso de DA (S. Zhang *et al.*, 2015). Es de destacar que el contenido de nutrientes es relativamente alto por lo que resulta una relación muy baja de C/N.

Por último, los desechos agrícolas se refieren a los residuos que se generan en la producción de alimentos como la paja de arroz, rastrojo de maíz, pulpa de café, etc. Al igual que los desechos de jardín, estos residuos generan algunos problemas importantes dentro del proceso de digestión anaeróbica, por lo cual es necesario realizar un pretratamiento para descomponer el alto contenido de estructuras lignocelulosas de los mismos, con el fin de que los polímeros de azúcares se vuelvan biodisponibles para los organismos responsables de degradar la materia orgánica hasta metano dentro del proceso de DA (Li *et al.*, 2016).

Los residuos electrónicos y eléctricos consisten en los dispositivos que se desechan por estar dañados o han cumplido con su vida útil y son arrojados en los basureros. Por consiguiente, los residuos tanto eléctricos como electrónicos han aumentado rápidamente debido a la disminución en los costos de adquisición, lo que ha llevado a un alto consumo (y posterior descarte) de estos productos. A nivel mundial se alcanzaron 41,8 millones de t/año de residuos en el 2014 y que cada vez va en aumento (Ongondo *et al.*, 2011). Por lo tanto, al realizarse una gestión inadecuada de los residuos eléctricos y electrónicos genera un problema medioambiental, debido a una gran variedad de sustancias tóxicas presentes en los dispositivos. Es indispensable realizar una investigación sobre el bioprocésamiento de los residuos eléctricos y electrónicos ya que la forma habitual de gestión es inadecuada (İşildar *et al.*, 2019).

A continuación, se presentan las principales características del proceso de digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos y del biogás como subproducto obtenido dentro del proceso.

3.2. Proceso de digestión anaerobia (DA)

La DA es un proceso de tratamiento ampliamente estudiado como un concepto de ingeniería bien constituido, que se puede emplear para tratar diferentes tipos de residuos con el fin de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y producir biocombustibles, nutrientes, enzimas y demás. Sin embargo, depende mucho de la descomposición y degradación de la materia orgánica, como es el caso de los RSU que, mediante procesos biológicos en presencia y ausencia de oxígeno, se transforman en sustancias estables que podrían usarse como fertilizantes en los cultivos, para mejorar las cualidades en los diferentes tipos de suelos (Wainaina *et al.*, 2020). Además, en el proceso de DA se produce biogás rico en metano y dióxido de carbono, el cual puede emplearse en el transporte como combustible o en la producción de energía después de un proceso de limpieza (Soobhany, 2019).

Se sabe que estas tecnologías pueden tener influencia en el alcance de los objetivos de una economía circular y la recuperación de corrientes residuales, por lo que se enmarcan dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. Asimismo, la DA es una tecnología adecuada para el tratamiento de los RSU a diferencia del manejo habitual de los mismos, que son arrojados a los vertederos o incinerados. Por este motivo, este tipo de tecnologías es una solución alternativa para el tratamiento de los RSU, con el fin de disminuir el impacto generado en el medio ambiente causado principalmente por el uso excesivo de los combustibles fósiles (L. Zhang *et al.*, 2019). Como ejemplo destacado, en Europa, para la producción de biofertilizantes se reciclan 60 millones de toneladas de RSU, lo cual ahorra un valor aproximado de un millón de toneladas de nitrógeno y alrededor de 20 millones de toneladas de carbono orgánico (Paes *et al.*, 2019).

Actualmente, la mayoría de los nutrientes se pierden a través de los desechos orgánicos de los vertederos. A modo de ejemplo, en promedio el 5 % de los países europeos reciclan, y si se estima un mayor reciclaje de los RSU, con un 30 % se podrían reemplazar los fertilizantes químicos que se aplican al suelo; es decir, 1,8 millones de t/año de fertilizantes de fosfato. Este dato es de gran importancia para Colombia como país agropecuario, dado que se disminuirían los costos de producción y los agricultores tendrían mayores ganancias en sus cultivos (Paes *et al.*, 2019).

Por medio de tecnologías de procesamiento y valorización, los RSU pueden ser aprovechados de diferentes maneras (ver Figura 3) como biofertilizantes, biocombustibles, energía, entre otras, con el consecuente beneficio ambiental, social y económico. En el caso de los cultivos, los microorganismos presentes en el suelo son sintetizadores de alta especificidad; por tanto, se necesita poca purificación antes del uso final en la aplicación de la técnica de procesamiento biológico como es la DA. De este modo, es viable la producción de energía y nutrientes en unión con la estabilización de grandes proporciones de desechos sólidos orgánicos como opción sostenible para transformar materiales y combustibles renovables en una economía circular (Antoniou *et al.*, 2019).

El diagrama (Figura 3) muestra que los RSU pueden ser valorizados en forma de biocombustibles tales como biogás, bioetanol, biohidrógeno y también en productos químicos como los ácidos grasos volátiles (AGV), ácido láctico (AL) o en nutrientes como los biofertilizantes.

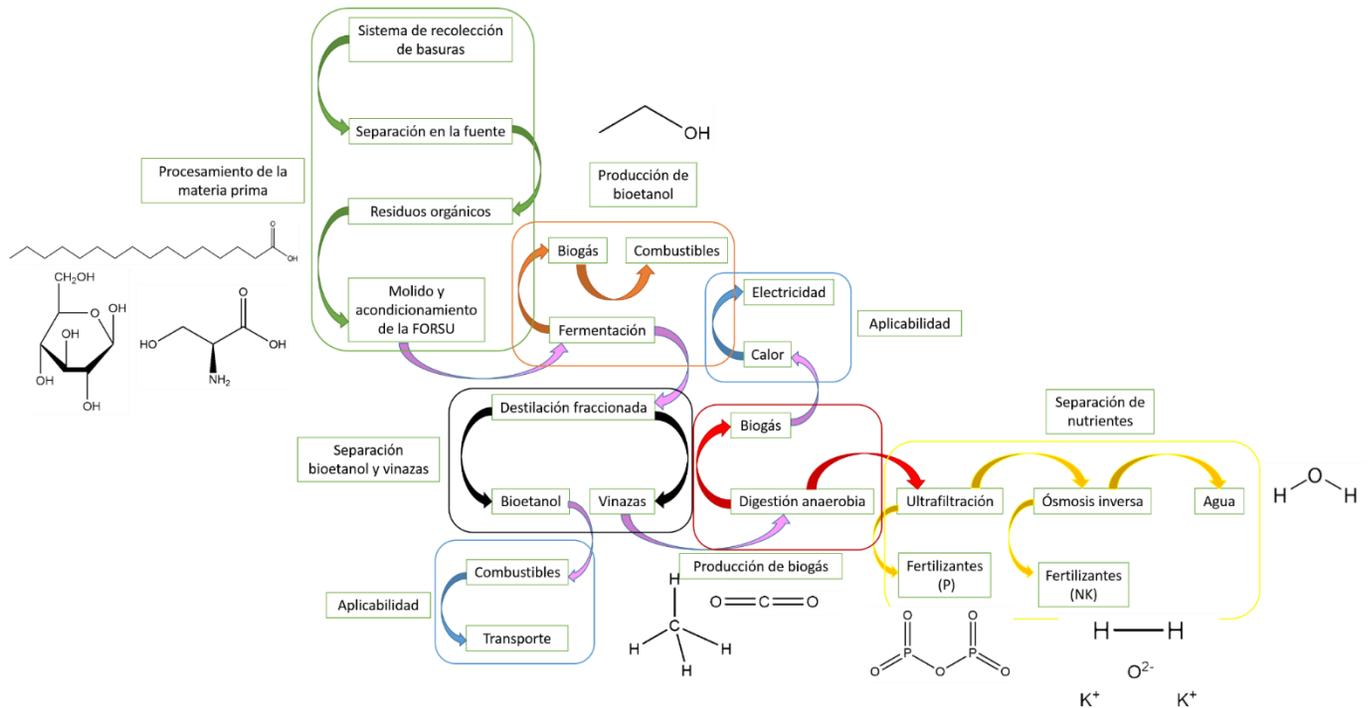


Figura 3. Proceso de biorrefinería para el aprovechamiento de residuos sólidos urbanos. Fuente: Autoría propia (2020).

La DA puede llevarse a cabo en condiciones mesófilas y termófilas, por lo que el proceso de DA comprende 4 pasos: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Karouach *et al.*, 2020). En la primera etapa de DA, la hidrólisis, grandes moléculas orgánicas tales como los lípidos, proteínas, polisacáridos, ácidos nucleicos y grasas son absorbidas y utilizadas directamente por los microorganismos como sustrato o fuente de alimento (Adekunle & Okolie, 2015). Los microorganismos presentes en este proceso son *Bacteroides*, *Clostridium* y bacterias facultativas como *Streptococci* (Parra Huertas, 2015).

En la segunda etapa de DA, la acidogénesis, los monómeros que fueron producto en la etapa anterior de hidrólisis son adsorbidos por bacterias facultativas y degradados en ácidos orgánicos como ácido propiónico, ácido butírico, ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno (Arango Bedoya & Sanchez Sousa, 2009). Cuanto mayor es la concentración de hidrógeno mayor es el producto final en la etapa de fermentación. Se puede notar que en el proceso de fermentación los carbohidratos (monosacáridos, disacáridos y polisacáridos), ácidos grasos y los aminoácidos son transformados en alcoholes y ácidos orgánicos (Parra Huertas, 2015).

La tercera etapa, la acetogénesis, consiste en que los productos que se obtuvieron en la fase anterior se consumen como sustrato por otros microorganismos para convertirlos en sustratos metanogénicos, alcoholes y ácidos grasos volátiles, los cuales son oxidados en acetato, dióxido de carbono e hidrógeno, para el caso de los (AGV) son oxidados obteniendo acetato e hidrógeno (Parra Huertas, 2015).

Y en la última etapa, la metanogénesis, también conocida como fermentación de metano, es la reacción bioquímica más lenta con unas condiciones estrictas, donde se produce metano y dióxido de carbono a partir de productos intermedios (Adekunle & Okolie, 2015).

En resumen, para el manejo de los RSU la DA es el proceso óptimo porque disminuye los problemas de salud pública por contaminación, sin perjudicar a las comunidades por sus malos olores, al mismo tiempo reduce los incontrolados manejos de lixiviados sin llegar a contaminar el agua, se evitan así las enfermedades de tipo diarreicas agudas como el parasitismo intestinal. Se reduce además la proliferación de vectores que transmiten enfermedades como la malaria y el dengue. A continuación, se realizará un breve análisis de algunos subproductos obtenidos en la valorización de RSU.

3.2.1. Biogás

3.2.2. Biohidrógeno

El agotamiento de las fuentes de hidrocarburos, energías no renovables y la contaminación ambiental por los gases de efecto invernadero han desencadenado una búsqueda de fuentes alternativas como el hidrógeno, que actualmente se destaca debido a que se ha considerado como un sustituto de estos combustibles fósiles, ya que se ostenta la densidad de energía gravimétrica más alta con cero emisiones de carbono en la combustión y mayor eficiencia en el transporte de energía (Ren *et al.*, 2011; Trad *et al.*, 2015; Wang & Wan, 2008, 2009). En comparación con el metano, el hidrógeno tiene un poder calorífico superior (120 a 50 MJ/kg) (Liu *et al.*, 2013). El hidrógeno se puede producir mediante procesos fisicoquímicos, pero estos métodos como la gasificación de carbón y el reformado con vapor exigen onerosas condiciones de operación extrema de presión y temperatura. Por tal motivo, los procesos de bioconversión anaeróbica de materiales orgánicos se considera que facilitan una forma dispersa para almacenar energía con un potencial de aplicación muy amplio en el tema del transporte (Liu *et al.*, 2013).

Las áreas de aplicaciones incluyen la producción de productos electrónicos, el procesamiento de acero y la hidrogenación de grasas y aceites. Los parámetros importantes para la biosíntesis de hidrógeno es el nivel de pH óptimo de 5,5, la temperatura debe estar en el rango de temperatura mesofílica y termofílica y el diseño apropiado del biorreactor para suministrar las propiedades hidrodinámicas. Es importante mencionar que los AGV en ciertas concentraciones pueden afectar la producción de hidrógeno pero pueden ser eliminadas con el uso de biorreactores de membrana (Ren *et al.*, 2011; Trad *et al.*, 2015; Wang & Wan, 2008, 2009).

3.2.3. Acido grasos volátiles (AGV)

Los AGV son ácidos carboxílicos alifáticos de cadena corta (constan de 2 a 6 átomos de carbono) que se forman como intermediarios durante el proceso de DA. Implica una serie de etapas en las que la materia orgánica se rompe por microorganismos en ausencia de oxígeno y así se genera biogás. Además, los AGV se producen en la etapa intermedia entre acidogénesis y acetogénesis. En el caso de la industria del petróleo, se utiliza la síntesis de AGV. Ahora con esta revisión se evidencia que es posible reemplazarlos con FORSU; se logra así crear una ruta de economía circular. Los parámetros importantes para la producción de AVG de base biológica son la optimización de las condiciones de operación para que se logren rendimientos máximos: por una parte, el pH no debe superar los 10 ni estar por debajo de 5,5; por otra parte, la temperatura debe encontrarse en condiciones termofílica, así se puede producir hasta 10 veces más AGV en comparación con las condiciones mesófilas, la tasa de carga orgánica inicial de 4,1 a 48,2 g VS / L. El tiempo de retención depende del tipo de sustrato debido a su tasa de hidrólisis, se ha demostrado que la concentración más alta de AGV se logró después de 15 días (Atasoy *et al.*, 2018)

Para la producción de productos bioquímicos solubles encontramos los AGV que se han basado principalmente en fuentes petroquímicas no renovables, lo que provoca graves efectos negativos para la salud y el medio ambiente. Las emisiones causadas por la producción de ácido acético en la industria petroquímica están alrededor de los 3,3 t CO_{2eq}/t por la incineración sin recuperación de energía (Atasoy *et al.*, 2018).

En la actualidad, debido al enorme potencial como fuente de carbono renovable, la producción y recuperación de los AGV ha atraído mucha atención, porque a partir de su transformación se obtiene una amplia gama de productos de tipo industrial, farmacéutico, alimentario, químico así como materia prima indispensable para la producción de

biodiesel (Lord *et al.*, 2016), bioplásticos (Fradinho *et al.*, 2014), biohidrógeno (Bittencourt *et al.*, 2018), electricidad generada por celdas microbianas (Begum *et al.*, 2017; Zheng *et al.*, 2017).

El proceso de digestión anaeróbica involucra una serie de etapas, en las cuales la materia orgánica es degradada por la comunidad microbiana en ausencia de oxígeno y conduce a la producción de AGV. La producción de AGV se puede promover acortando el tiempo de reacción para evitar la producción de metano, aumentando el pH a 8.0 o por debajo de 6.0 para inhibir el crecimiento de metanógenos en la producción de metano (Atasoy *et al.*, 2018).

Existe una variedad de AGV en el mercado que incluyen ácido acético, propiónico, butírico, caproico, valérico y fórmico (Atasoy *et al.*, 2018). En la industria química, el ácido acético tiene el mayor uso en la fabricación de pinturas, caucho, plásticos, fibras sintéticas, agentes de acabado textil, pesticidas, emulsiones poliméricas y componentes clave de los recubrimientos de papel. También es un agente aromatizante, regulador de la acidez y utilizado como conservante. En las industrias de alimentos y bebidas, las bacterias que producen ácido acético son del género en la familia *Acetobacteriaceae*, así como otras de *Acetobacter*, *Gluconacetobacter* y *Gluconobacter* (Atasoy *et al.*, 2018). El ácido propiónico se utiliza como sales de calcio y sodio, herbicidas, fragancias, emulsiones, disolventes ecológicos para formulaciones de pinturas, fragancias de frutas artificiales, etc. Además, también se puede utilizar como conservante para alimentos especialmente pan y otros productos horneados, alimentación animal o como sal de amonio (Atasoy *et al.*, 2018). El ácido butírico es una valiosa fuente de biodiesel y, a su vez, se utiliza en el sector de alimentación animal tanto como complemento como antibiótico, por sus propiedades antipatógenas. El ácido butírico se produce como producto final de la fermentación del azúcar por bacterias anaeróbicas. Las especies que más utilizan en el proceso de producción de base biológica son *Propionibacterium freudenreichii*, *Propionibacterium acidipropionici*, *Propionibacterium thoenii*, *Propionibacterium shermanii*, y *Propionibacterium jensenii* (Atasoy *et al.*, 2018).

Estas soluciones mixtas de los AGV también se pueden utilizar para la desnitrificación biológica y la eliminación de fósforo en el tratamiento de aguas residuales, asimismo en la biosíntesis de alcoholes mixtos y la producción de plásticos biodegradables. Además pueden ser utilizados como fuente de carbono para bioprocésamiento de biodiesel, a partir de celdas de combustibles microbianos (Rama *et al.*, 2019).

3.2.4. Ácido láctico (AL)

El ácido láctico es un carboxilato con un gran potencial de mercado, que se puede utilizar para producir ácido acrílico, polímeros biodegradables, ácido pirúvico, etc. (Bonk *et al.*, 2017; Phanthumchinda *et al.*, 2018). Uno de los factores más importantes en la producción de ácido láctico es el pH, la temperatura, la concentración de nitrógeno (Alves de Oliveira *et al.*, 2018). En el procesamiento de los RSU, con la FORSU, utilizando microbios *Lactobacilli* como *acidophilus*, *caei*, *thermophilus*, entre otros (Castillo Martínez *et al.*, 2013). Durante la fase acidogénica se logra una acumulación de ácido láctico hasta el 74,3% en un reactor de lecho de lixiviado (X. Y. Gu *et al.*, 2018; Probst *et al.*, 2015).

3.2.5. Bioetanol

El etanol es otro compuesto que está ampliando su espacio para convertirse en el combustible alternativo más adecuado para los motores de combustión interna, porque se puede producir a partir de la biomasa y reduce las emisiones de NOx por su mayor calor latente de vaporización. Es obtenido mediante procesos biológicos como la fermentación en condiciones anaerobias de los RSU, pero esta estructura debe ser pretratada para romper las estructuras complejas de lignina-carbohidrato. Es importante aclarar que la producción de bioetanol depende de la eficiencia de la conversión del almidón en azúcares. Otro punto es que se ha detectado el 33,8 % de eficiencia en la producción de bioetanol durante la DA termofílica de la glucosa (F. Zhang *et al.*, 2015). Una de las propuestas es aumentar la concentración de etanol proporcionando unas altas presiones parciales de H₂ en el espacio superior de los reactores de acidificación (Zhou *et al.*, 2018). Durante la producción de etanol se produce acetona y butano a partir de glucosa por algunas especies en el género *Clostridium acetobutylicum* y *beijerinckii* (Yen *et al.*, 2011).

3.2.6. Biofertilizantes

Existen diversos biofertilizantes que puede ser separados mediante ultrafiltración. Se puede obtener nutrientes como el fósforo (P) y con aplicación de osmosis inversa se puede obtener nitrógeno (N) y potasio (K). La DA se considera uno de los tratamientos biológicos más rentables en el tratamiento de los RSU, ya que son utilizados como fertilizantes o enmiendas orgánicas para la agricultura (Thiriet *et al.*, 2020), para mantener la riqueza del suelo y llegar a la reconstrucción de los mismos cuando están bajos de nutrientes. De esta manera, se está centrando en recibir las mejores herramientas biológicamente sostenibles y socialmente aceptables que refuerzan la recuperación de forma potencial de nutrientes con la menor carga de contaminación (Soobhany, 2019).

4. Conclusiones

Esta revisión presenta información detallada de diversos procesos que pueden ser empleados como una alternativa viable para el tratamiento de RSU mediante el concepto de biorrefinería, enfocado en el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos con un impacto ambiental, social, económico y técnico positivo. Las ventajas ambientales en términos de la biorrefinería se basan en la disminución del uso de la tierra y la protección del agua, suelo y ecosistemas traen beneficios ecológicos evidentes como la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, en comparación con las técnicas actualmente usadas. En el caso del sector social se genera un mayor número de empleos, desarrollo del sector y demás. Los beneficios económicos se presentan en tener nuevas oportunidades para desarrollar organizaciones y disminuir los costos en los rellenos sanitarios. La biorrefinería se refiere a procesos bioquímicos que utilizan materia residual a base de biomasa como materia prima ilimitada para la producción de biocombustibles, productos químicos y nutrientes. La biorrefinería es una visión innovadora en comparación con procesos anteriores, según lo revisado en la literatura reciente.

La implementación y desarrollo de las biorrefinerías es un tema de gran importancia económica, ambiental y social. El concepto de biorrefinería aplicado a los residuos sólidos urbanos se considera un método con un gran potencial ya que permite realizar el reciclaje y valorización de recursos en forma de subproductos de valor añadido o energía, todo estos basado en un modelo de economía circular. Actualmente se debe apoyar la transición hacia un futuro sostenible y la descarbonización de la economía. A pesar de que se han construido varias biorrefinerías a gran escala, es necesario realizar mejoras para apoyar la creación de tecnologías eficientes y económicamente viables, con el fin de generar impactos positivos y sostenibles. La formación del conocimiento interdisciplinario entre los expertos académicos, la industria, los políticos y la comunidad son importantes para el desarrollo tecnológico con políticas sostenibles con el medio ambiente y promover la creación de nuevas biorrefinerías comerciales para el futuro. Los resultados de este trabajo son una herramienta útil para conocer las diferentes plataformas para la biorrefinería de residuos sólidos, dedicada a la valorización de los residuos sólidos urbanos en forma de biocombustibles y bioproductos, mediante la integración de varios bioprocesos.

5. Agradecimientos

El autor agradece a todos los colegas e investigadores del grupo de investigación Agroindustria-USCO, CESURCAFÉ: Centro Surcolombiano de Investigación en Café y el grupo materiales, ambiente y desarrollo- MADE por las sugerencias constructivas y su ayuda.

6. Referencias bibliográficas

Abad, V., Avila, R., Vicent, T., & Font, X. (2019). Promoting circular economy in the surroundings of an organic fraction of municipal solid waste anaerobic digestion treatment plant: Biogas production impact and economic

- factors. *Bioresource Technology*, 283(February), 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.064>
- Adekunle, K. F., & Okolie, J. A. (2015). A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(10), 205–212. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102224>
- Almomani, F. (2020). Prediction of biogas production from chemically treated co-digested agricultural waste using artificial neural network. *Fuel*, 280(April), 118573. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118573>
- Alves de Oliveira, R., Komesu, A., Vaz Rossell, C. E., & Maciel Filho, R. (2018). Challenges and opportunities in lactic acid bioprocess design—From economic to production aspects. *Biochemical Engineering Journal*, 133, 219–239. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.03.003>
- Antoniou, N., Monlau, F., Sambusiti, C., Ficara, E., Barakat, A., & Zabaniotou, A. (2019). Contribution to Circular Economy options of mixed agricultural wastes management: Coupling anaerobic digestion with gasification for enhanced energy and material recovery. *Journal of Cleaner Production*, 209, 505–514. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.055>
- Arango Bedoya, O., & Sanchez Sousa, L. (2009). Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea en sistemas anaerobios tipo uasb. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial: BSAA*, 7(2), 24–31.
- Aryal, N., Kvist, T., Ammam, F., Pant, D., & Ottosen, L. D. M. (2018). An overview of microbial biogas enrichment. *Bioresource Technology*, 264(June), 359–369. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.013>
- Atasoy, M., Owusu-Agyeman, I., Plaza, E., & Cetecioglu, Z. (2018). Bio-based volatile fatty acid production and recovery from waste streams: Current status and future challenges. *Bioresource Technology*, 268, 773–786. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.042>
- Begum, S., Anupaju, G. R., Sridhar, S., Bhargava, S. K., Jegatheesan, V., & Eshtiaghi, N. (2017). Evaluation of single and two stage anaerobic digestion of landfill leachate : effect of ph and initial organic loading rate on volatile fatty acid (VFA) and biogas production. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.069>
- Bittencourt, E., Cristine, A., Rosa, D., Bianchi, A., Medeiros, P., Kaur, S., Larroche, C., & Ricardo, C. (2018). Screening and bioprospecting of anaerobic consortia for biohydrogen and volatile fatty acid production in a vinasse based medium through dark fermentation. *Process Biochemistry*, November 2017, 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2018.01.012>
- Bonk, F., Bastidas-Oyanedel, J. R., Yousef, A. F., Schmidt, J. E., & Bonk, F. (2017). Exploring the selective lactic acid production from food waste in uncontrolled pH mixed culture fermentations using different reactor configurations. *Bioresource Technology*, 238, 416–424. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.057>
- Bravo, M., De Brito, J., Pontes, J., & Evangelista, L. (2015). Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *Journal of Cleaner Production*, 99(2015), 59–74. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.012>
- Castillo Martinez, F. A., Balciunas, E. M., Salgado, J. M., Domínguez González, J. M., Converti, A., & Oliveira, R. P. de S. (2013). Lactic acid properties, applications and production: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 30(1), 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.11.007>
- Cerda, A., Artola, A., Font, X., Barrera, R., Gea, T., & Sánchez, A. (2018). Composting of food wastes: Status and challenges. *Bioresource Technology*, 248, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.133>
- Deus, R. M., Mele, F. D., Bezerra, B. S., & Battistelle, R. A. G. (2020). A municipal solid waste indicator for

- environmental impact: Assessment and identification of best management practices. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118433. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118433>
- Duan, Y., Pandey, A., Zhang, Z., Awasthi, M. K., Bhatia, S. K., & Taherzadeh, M. J. (2020). Organic solid waste biorefinery: Sustainable strategy for emerging circular bioeconomy in China. *Industrial Crops and Products*, 153(March), 112568. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112568>
- FAO, MINENERGIA, PNUD, & GEF. (2011). Manual del Biogás. *Proyecto CHI/00/G32*, 120. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>
- FNB. (2020). *Estadística de la Demanda Nacional de Alcohol Carburante (Etanol)*. Federación Nacional de Biocombustibles. [https://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-produccion-titulo-Alcohol_Carburante_\(Etanol\).htm](https://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-produccion-titulo-Alcohol_Carburante_(Etanol).htm)
- Fradinho, J. C., Oehmen, A., & Reis, M. A. M. (2014). Photosynthetic mixed culture polyhydroxyalkanoate (PHA) production from individual and mixed volatile fatty acids (VFAs): Substrate preferences and co-substrate uptake. *Journal of Biotechnology*. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2014.05.035>
- Gao, X., Yu, Q., Li, X. S., & Yuan, Y. (2020). Assessing the modification efficiency of waste glass powder in hydraulic construction materials. *Construction and Building Materials*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120111>
- Grima, N., & Singh, S. J. (2020). The self-(in)sufficiency of the Caribbean: Ecosystem services potential Index (ESPI) as a measure for sustainability. *Ecosystem Services*, 42(February), 101087. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101087>
- Grupo Bancolombia. (2020). *Informe especial: el petróleo está en una coyuntura sin precedentes*. <https://www.grupobancolombia.com/wps/portal/empresas/capital-inteligente/actualidad-economica-sectorial/sector-petroleo/petroleo-esta-en-coyuntura-sin-precedentes-por-crisis-mundial#:~:text=Por su parte%2C la producción de gas natural de Colombia,alta des>
- Gu, T., Yin, C., Ma, W., & Chen, G. (2019). Municipal solid waste incineration in a packed bed: A comprehensive modeling study with experimental validation. *Applied Energy*, 247(January), 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.014>
- Gu, X. Y., Liu, J. Z., & Wong, J. W. C. (2018). Control of lactic acid production during hydrolysis and acidogenesis of food waste. *Bioresource Technology*, 247(September), 711–715. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.166>
- Işıldar, A., van Hullebusch, E. D., Lenz, M., Du Laing, G., Marra, A., Cesaro, A., Panda, S., Akcil, A., Kucuker, M. A., & Kuchta, K. (2019). Biotechnological strategies for the recovery of valuable and critical raw materials from waste electrical and electronic equipment (WEEE) – A review. *Journal of Hazardous Materials*, 362(January 2018), 467–481. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.050>
- Karouach, F., Bakraoui, M., El Gnaoui, Y., Lahboubi, N., & El Bari, H. (2020). Effect of combined mechanical–ultrasonic pretreatment on mesophilic anaerobic digestion of household organic waste fraction in Morocco. *Energy Reports*, 6, 310–314. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.11.081>
- Khalil, M., Berawi, M. A., Heryanto, R., & Rizalie, A. (2019). Waste to energy technology: The potential of sustainable biogas production from animal waste in Indonesia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105(February), 323–331. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.011>
- Kummamuru, B. (2017). WBA Global Bioenergy Statistics 2017. *World Bioenergy Association*, 80.

[https://doi.org/10.1016/0165-232X\(80\)90063-4](https://doi.org/10.1016/0165-232X(80)90063-4)

- Lalak, J., Kasprzycka, A., Martyniak, D., & Tys, J. (2016). Effect of biological pretreatment of *Agropyron elongatum* “BAMAR” on biogas production by anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 200, 194–200. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.022>
- Li, K., Liu, R., & Sun, C. (2015). Bioresource Technology Comparison of anaerobic digestion characteristics and kinetics of four livestock manures with different substrate concentrations. *Bioresource Technology*, 198, 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.151>
- Li, K., Liu, R., & Sun, C. (2016). A review of methane production from agricultural residues in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 857–865. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.103>
- Liu, Z., Zhang, C., Lu, Y., Wu, X., Wang, L., Wang, L., Han, B., & Xing, X. H. (2013). States and challenges for high-value biohythane production from waste biomass by dark fermentation technology. *Bioresource Technology*, 135, 292–303. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.027>
- Lord, D., Hernandez, R., Todd, W., Zappi, M., Revellame, E., Holmes, W., & Mondala, A. (2016). Extent of inhibition and utilization of volatile fatty acids as carbon sources for activated sludge microbial consortia dedicated for biodiesel production. *Renewable Energy*, 96, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.068>
- Maldonado, R., Acosta, B., Osorio, J., Soto, D., & Zeppieri, S. (2014). Selection and design of a scheme of CH₄-CO₂ separation of a biogas stream. *Revista de La Facultad de Ingeniería*, 29(1), 115–126.
- Oertel, C., Matschullat, J., Zurba, K., Zimmermann, F., & Erasmi, S. (2016). Greenhouse gas emissions from soils—A review. *Chemie Der Erde*, 76(3), 327–352. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002>
- Ongondo, F. O., Williams, I. D., & Cherrett, T. J. (2011). How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes. *Waste Management*, 31(4), 714–730. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.023>
- Paes, L. A. B., Bezerra, B. S., Deus, R. M., Jugend, D., & Battistelle, R. A. G. (2019). Organic solid waste management in a circular economy perspective – A systematic review and SWOT analysis. *Journal of Cleaner Production*, 239, 118086. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118086>
- Parra Huertas, R. A. (2015). Anaerobic digestión: biotechnological mechanisms in waste water treatments and their application in food industry. *Producción + Limpia*, 10(2), 142–159. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1909-04552015000200014
- Phanthumchinda, N., Thitiprasert, S., Tanasupawat, S., Assabumrungrat, S., & Thongchul, N. (2018). Process and cost modeling of lactic acid recovery from fermentation broths by membrane-based process. *Process Biochemistry*, 68, 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2018.02.013>
- Probst, M., Walde, J., Pümpel, T., Wagner, A. O., & Insam, H. (2015). A closed loop for municipal organic solid waste by lactic acid fermentation. *Bioresource Technology*, 175, 142–151. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.034>
- Rama, M., Cort, A., García-guaita, F., & Gonz, S. (2019). *Embedding environmental, economic and social indicators in the evaluation of the sustainability of the municipalities of Galicia (northwest of Spain)*. 234. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.158>
- Ramírez Jaime, A. (2013). *Membranas compuestas base polimérica: preparación, caracterización y estudios para la separación de gases*. 114.

- Ramos, D. (2011). Analisis del concepto de residuos solidos domiciliarios de Torreón Coahuila. *Tesis de Pregrado*, 11(2), 10–14. <https://doi.org/10.16194/j.cnki.31-1059/g4.2011.07.016>
- Ravindran, B., & Sekaran, G. (2010). Bacterial composting of animal fleshing generated from tannery industries. *Waste Management*, 30(12), 2622–2630. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.07.013>
- Ren, N., Guo, W., Liu, B., Cao, G., & Ding, J. (2011). Biological hydrogen production by dark fermentation: challenges and prospects towards scaled-up production. *Current Opinion in Biotechnology*, 22, 365–370. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2011.04.022>
- Rusmanis, D., Shea, R. O., Wall, D. M., Murphy, J. D., Rusmanis, D., Shea, R. O., Wall, D. M., Murphy, J. D., & Rusmanis, D. (2019). Biological hydrogen methanation systems – an overview of design and efficiency efficiency. *Bioengineered*, 10(1), 604–634. <https://doi.org/10.1080/21655979.2019.1684607>
- Sahito, A. R., & Mahar, R. B. (2014). Enhancing methane production from rice straw co-digested with buffalo dung by optimizing effect of substrate ratio, alkaline doze and particle size. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 24(4), 1076–1084.
- Sarsaiya, S., Jain, A., Kumar, S., & Duan, Y. (2019). Bioresource Technology Microbial dynamics for lignocellulosic waste bioconversion and its importance with modern circular economy , challenges and future perspectives. *Bioresource Technology*, 291(June), 121905. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121905>
- Soobhany, N. (2019). Insight into the recovery of nutrients from organic solid waste through biochemical conversion processes for fertilizer production: A review. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118413. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118413>
- Thiriet, P., Bioteau, T., & Tremier, A. (2020). Optimization method to construct micro-anaerobic digesters networks for decentralized biowaste treatment in urban and peri-urban areas. *Journal of Cleaner Production*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118478>
- Trad, Z., Akimbomi, J., Vial, C., Larroche, C., Taherzadeh, M. J., & Fontaine, J. P. (2015). Development of a submerged anaerobic membrane bioreactor for concurrent extraction of volatile fatty acids and biohydrogen production. *Bioresource Technology*, 196, 290–300. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.095>
- Tyagi, V. K., Fdez-Güelfo, L. A., Zhou, Y., Álvarez-Gallego, C. J., Garcia, L. I. R., & Ng, W. J. (2018). Anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW): Progress and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93(April), 380–399. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.051>
- Varnero, M. T., Carú, M., Galleguillos, K., & Achondo, P. (2012). Tecnologías disponibles para la purificación de biogás usado en la generación eléctrica. *Informacion Tecnologica*, 23(2), 31–40. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000200005>
- Wainaina, S., Awasthi, M. K., Sarsaiya, S., Chen, H., Singh, E., Kumar, A., Ravindran, B., Awasthi, S. K., Liu, T., Duan, Y., Kumar, S., Zhang, Z., & Taherzadeh, M. J. (2020). Resource recovery and circular economy from organic solid waste using aerobic and anaerobic digestion technologies. *Bioresource Technology*, 301, 122778. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122778>
- Wainaina, S., Lukitawesa, Kumar Awasthi, M., & Taherzadeh, M. J. (2019). Bioengineering of anaerobic digestion for volatile fatty acids, hydrogen or methane production: A critical review. *Bioengineered*, 10(1), 437–458. <https://doi.org/10.1080/21655979.2019.1673937>
- Wang, J., & Wan, W. (2008). Effect of temperature on fermentative hydrogen production by mixed cultures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(20), 5392–5397. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.010>

- Wang, J., & Wan, W. (2009). Factors influencing fermentative hydrogen production: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(2), 799–811. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.015>
- Yen, H. W., Li, R. J., & Ma, T. W. (2011). The development process for a continuous acetone-butanol-ethanol (ABE) fermentation by immobilized *Clostridium acetobutylicum*. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 42(6), 902–907. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2011.05.006>
- Yentekakis, I. V., & Goula, G. (2017). Biogas management: Advanced utilization for production of renewable energy and added-value chemicals. *Frontiers in Environmental Science*, 5(FEB). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00007>
- Yu, L., Wang, H., Wang, G., Song, W., Huang, Y., Li, S. G., Liang, N., Tang, Y., & He, J. S. (2013). A comparison of methane emission measurements using eddy covariance and manual and automated chamber-based techniques in Tibetan Plateau alpine wetland. *Environmental Pollution*, 181, 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.06.018>
- Zhang, F., Chen, Y., Dai, K., Shen, N., & Zeng, R. J. (2015). The glucose metabolic distribution in thermophilic (55 °C) mixed culture fermentation: A chemostat study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(2), 919–926. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.098>
- Zhang, L., Loh, K. C., & Zhang, J. (2019). Enhanced biogas production from anaerobic digestion of solid organic wastes: Current status and prospects. In *Bioresource Technology Reports* (Vol. 5). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.07.005>
- Zhang, S., Guo, H., Du, L., Liang, J., Lu, X., Li, N., & Zhang, K. (2015). Influence of NaOH and thermal pretreatment on dewatered activated sludge solubilisation and subsequent anaerobic digestion: Focused on high-solid state. *Bioresource Technology*, 185, 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.02.050>
- Zheng, X., Chen, Y., Wang, X., & Wu, J. (2017). Using mixed sludge-derived short-chain fatty acids enhances power generation of microbial fuel cells. *Energy Procedia*, 105, 1282–1288. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.458>
- Zhou, M., Yan, B., Wong, J. W. C., & Zhang, Y. (2018). Enhanced volatile fatty acids production from anaerobic fermentation of food waste: A mini-review focusing on acidogenic metabolic pathways. *Bioresource Technology*, 248, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.121>

La Revista Ingeniería y Región cuenta con la Licencia
Creative Commons Atribución (BY), No Comercial (NC) y Compartir Igual (SA)

