

Challenges and opportunities of the sugar cane vinasse. A bibliometric analysis

INGENIERÍA QUÍMICA

Desafíos y oportunidades de la Vinaza de caña de azúcar. Un análisis bibliométrico

¹Lina Julieth Ospina León , ¹Diego Manotas-Duque , ¹Howard Ramírez-Malule ¹

¹Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, Cali, Colombia

howard.ramirez@correounivalle.edu.co, ospina.lina@correounivalle.edu.co, diego.manotas@correounivalle.edu.co

Ospina-León LJ, Manotas-Duque D, Ramírez-Malule H. Desafíos y oportunidades de la Vinaza de caña de azúcar. Un análisis bibliométrico. *Ingeniería y Competitividad*, 2023,25(1); e-30412144 <https://doi.org/10.25100/iyv.v25i1.12144>

Recibido: 27 de abril de 2022 – **Aceptado:** 2 de septiembre de 2022

Abstract

Sugarcane vinasse (SV) is the main by-product of bioethanol production. It is considered a potential pollutant due to its acidity index and the presence of organic components, suspended solids and heavy metals. High levels of SV production are undoubtedly a threat to the environment and the community in general. The aim of this study was to evaluate the main SV dispositions or treatments, in addition to their applications, by using bibliometric maps for metadata analysis. It was found that the studies related to SV were focused in (i) anaerobic digestion (AD), (ii) fertirrigation, (iii) coagulation/flocculation, (iv) algae, microalgae and fungi, and (v) biohydrogen production. Additionally, it was determined that the most effective treatment for SV was AD, reaching 90% chemical oxygen demand removal efficiency and energy recovery between 85 and 95% as biogas. Finally, the challenges and opportunities facing Latin America with the growing production of SV were addressed, as well as a detailed review of its treatment and/or disposal, including optimal conditions for the production of value-added products.

Keywords: sugarcane vinasse, anaerobic digestion, fertirrigation, coagulation/flocculation, biohydrogen, bibliometric analysis.

Resumen

La vinaza de caña de azúcar (VC) es el principal subproducto de la producción de bioetanol. Esta se considera un potencial contaminante debido a su índice de acidez y a la presencia de componentes orgánicos, sólidos en suspensión y metales pesados. Los altos niveles de producción de VC son sin duda una amenaza para el ambiente y la comunidad en general. El objetivo de este estudio fue evaluar las principales disposiciones o tratamientos de VC, además de sus aplicaciones, empleando mapas bibliométricos para el análisis de metadatos. Se encontró que los principales focos de estudio con relación a la VC son: (i) digestión anaeróbica (DA), (ii) fertirrigación, (iii) coagulación/floculación, (iv) algas, microalgas y hongos, y (v) producción de hidrógeno. Adicionalmente, se determinó que el tratamiento más efectivo para VC fue la DA, alcanzando una eficiencia de 90% en la remoción de demanda química de oxígeno y una recuperación energética entre 85 y 95% como biogás. Finalmente, se abordaron los desafíos y oportunidades que

enfrenta Latinoamérica con la creciente producción de VC, así como una revisión detallada de su tratamiento y/o disposición, incluyendo condiciones óptimas para la producción de productos de valor agregado.

Palabras clave: vinaza de caña de azúcar, digestión anaeróbica, fertirrigación, coagulación/floculación, biohidrógeno, análisis bibliométrico.

1. Introducción

La industria azucarera se ha diversificado buscando satisfacer las nuevas necesidades del mundo en términos de energías renovables. En la actualidad, además de azúcar, la agroindustria de la caña produce biocombustibles (bioetanol), cogenera energía a partir de sus residuos agroindustriales (bagazo) y elabora productos de valor agregado como papel, fertilizantes y productos químicos como ácido cítrico, citrato de sodio deshidratado, citrato de calcio, acetato de etilo, entre otros ^(1,2). En el 2019, Brasil se posicionó como el mayor productor de caña de azúcar en el mundo con cerca de 753 megatoneladas producidas. Otros países Latinoamericanos como México, Colombia y Guatemala también se encuentran en el top-10 de productores de caña de azúcar (Figura 1). Particularmente, Colombia produjo cerca de 33 megatoneladas de caña de azúcar ⁽³⁾, de las cuales 23.3 megatoneladas fueron destinadas para producción de azúcar y el valor restante para producción de panela ⁽⁴⁾. Por otro lado, Brasil es el segundo mayor productor de bioetanol a escala mundial, superado solo por Estados Unidos, con la producción de bioetanol proveniente del maíz ⁽⁵⁾. Adicionalmente, Brasil es el mayor productor de bioetanol de caña de azúcar, contribuyendo con el 24% de la producción global de este biocombustible. Por su parte, Colombia contribuyó con el 0.4% de la producción global de bioetanol proveniente de caña ⁽⁶⁾.

Como subproducto de la producción de bioetanol se generan las vinazas, consideradas potenciales contaminantes debido a su alto contenido orgánico y a su índice de acidez, con 15-65 g.L⁻¹ de demanda química de oxígeno (DQO) y pH de 3-5, respectivamente ⁽⁷⁾. En el año 2019 se registró

una producción global de bioetanol de 70 giga litros, de los cuales el 25% proviene de la caña de azúcar ⁽⁶⁾. Esta producción de bioetanol generó probablemente más de 218 giga litros de VC, lo cual sin duda es un desafío en términos ambientales debido a su alta carga contaminante.

La vinaza es un subproducto de la destilación en el proceso de producción de bioetanol. Las características fisicoquímicas de la vinaza dependen principalmente de la materia prima utilizada en la producción de bioetanol. Por ejemplo, las vinazas de maíz, cebada y trigo poseen una alta proporción de sólidos insolubles, por lo que al procesarla puede ser utilizada como alimento para animales, conocido como DDGS (por sus siglas en inglés, distillers dried grains with solubles) ⁽⁸⁾. Entre las materias primas que generan mayor contenido de sólidos solubles se encuentran: caña de azúcar, remolacha azucarera, uva, agave y sorgo dulce ⁽⁹⁾. Las vinazas con sólidos solubles son mezclas contaminantes debido a su alto contenido orgánico y a su índice de acidez ⁽⁷⁾.

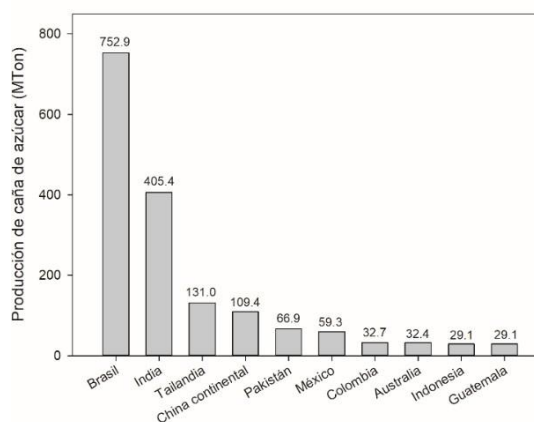


Figura 1. Top-10 de productores de azúcar a nivel mundial y su producción en el año 2019. Fuente: FAO 2021

La VC presenta un olor fuerte debido a su contenido de polifenoles, posee un pH ácido y es altamente corrosiva. La VC es considerada un contaminante debido a la presencia de componentes orgánicos, sólidos en suspensión y metales pesados. Se caracteriza por su color marrón claro, lo que se atribuye a la existencia de compuestos fenólicos, melanoidinas, caramelos, furfurales, pigmentos naturales y productos de degradación de hexosa alcalina y de la reacción de Maillard, lo que provoca un severo deterioro de la calidad de las aguas receptoras ⁽¹⁰⁾. El nitrógeno y el fósforo también contribuyen a los problemas ambientales asociados a la VC debido al alto riesgo de eutrofización ⁽¹¹⁾. La VC genera una gran problemática ambiental ya que la industria de fabricación de etanol produce un alto volumen de vinaza, que varía de 9 a 15 L de vinaza.L-1 de etanol ⁽¹²⁾ (algunas veces se reporta una menor relación, como el caso de Colombia, 3 L.L-1 de vinaza de etanol).

Debido a los altos niveles de producción de vinaza y sus posibles efectos en el ambiente, se han reportado diversos estudios científicos para su tratamiento y aprovechamiento, entre ellos se destacan: digestión anaeróbica (DA) ⁽¹³⁻¹⁶⁾, fertirrigación ^(7,12), coagulación/floculación ^(11,17), microalgas ⁽¹⁸⁾, y la producción de hidrógeno ⁽¹⁹⁻²¹⁾. En este sentido, se han reportado algunas revisiones científicas que abordan tratamientos químicos y biológicos a la VC y la generación de productos de valor agregado a partir de este contaminante ^(10,22). No obstante, no se han reportado estudios que consoliden la información de los tratamientos y la prospectiva nacional/regional de este subproducto mediante el procesamiento de altos volúmenes de artículos científicos relacionados con el tratamiento y las aplicaciones de la VC. En este estudio se llevó a cabo un análisis bibliométrico con miras a determinar las principales tecnologías de tratamiento de VC y sus principales aplicaciones, además se abordaron los desafíos y oportunidades en el ámbito Latinoamericano, buscando

fortalecer la bioeconomía en la región, al emplear procesos y métodos biológicos para proporcionar bienes y servicios de forma sostenible ⁽²³⁾.

2. Metodología

La base de datos Scopus fue seleccionada como fuente de información debido a que es una de las bases de datos científicas más amplias y confiables sobre información científica multidisciplinaria ⁽²⁴⁾. Los resultados se obtuvieron de una búsqueda de documentos en la que el título del artículo, el resumen y/o las palabras claves coincidían con los términos de búsqueda. Estos resultados se limitaron por tipo de documento a artículos de investigación y artículos de revisión publicados hasta el año 2020.

La estrategia de búsqueda sistemática empleada consistió en la recolección de datos partiendo de la temática general a lo particular, por lo que el primer término de búsqueda corresponde a la sustancia de estudio proveniente de cualquier fuente, es decir vinaza, seguida de la consulta de información sobre dicha sustancia proveniente de la fuente de interés, es decir VC. Se emplearon operadores lógicos para afinar los resultados del buscador a la temática abordada. Más adelante, para encontrar los temas de estudio y tratamientos de VC, se empleó el software VOSviewer 1.6.16, el cual proporciona un mapa basado en datos bibliográficos. El tipo de análisis realizado fue de coocurrencia tomando como unidad de análisis las palabras claves del autor. Cabe aclarar que se modificó la duplicidad para algunos términos, como se presenta en la Tabla 1 (ver esquema 1).

La información recolectada de la base de datos Scopus para el análisis en el software VOSViewer incluyó: (i) información de la cita, (ii) información bibliográfica, (iii) resumen y palabras clave y (iv) detalles de financiación. Finalmente, mediante el análisis de la información recolectada, se determinaron los campos de estudio en tratamientos de VC.

Posteriormente, se recolectó información específica para cada tipo de tratamiento reportado.

- **Búsqueda #1: Vinasse**

La primera ecuación de búsqueda empleada corresponde a: TITLE-ABS-KEY (vinasse) AND DOCTYPE (ar OR re) AND PUBYEAR < 2021. Se registraron 1,272 documentos.

- **Búsqueda #2: “Sugarcane vinasse” AND NOT tequila AND NOT beet**

La segunda búsqueda realizada corresponde a: TITLE-ABS-KEY ("sugarcane vinasse" AND NOT tequila AND NOT beet) AND DOCTYPE (ar OR re) AND PUBYEAR < 2021. Se obtuvieron 152 documentos. El operador lógico “AND NOT” fue utilizado para excluir estudios relacionados con tequila o beet.

- **Búsqueda #3: “Sugarcane vinasse” AND “nombre del tratamiento”**

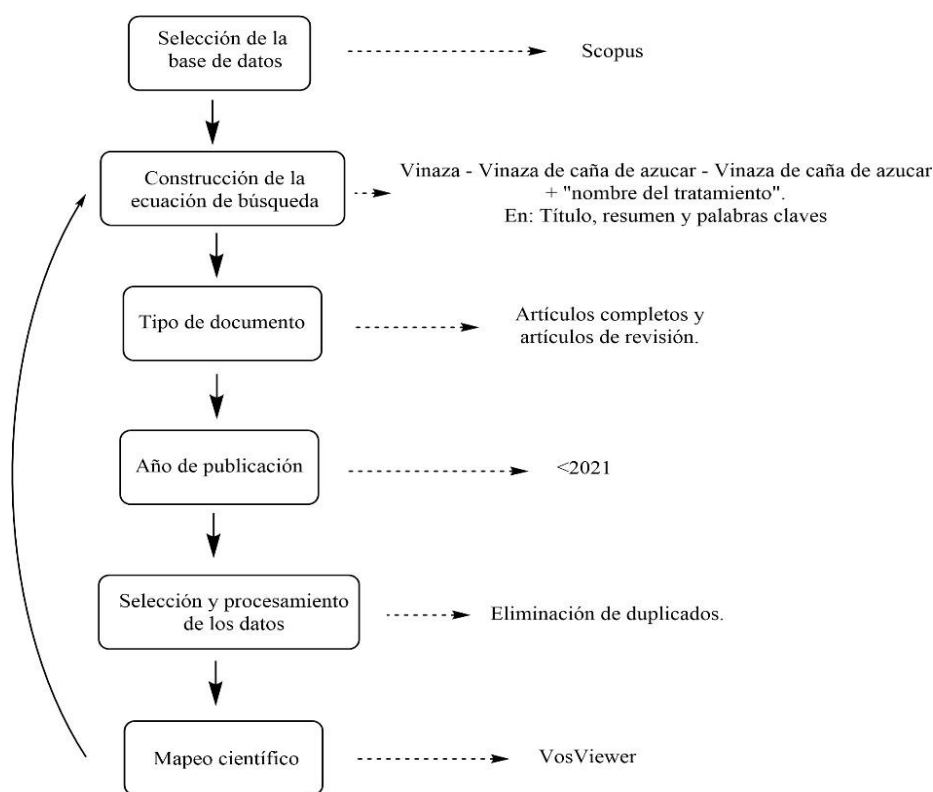


Figura 1. Proceso general de la metodología.

Empleado el análisis de coocurrencia de los resultados de la Búsqueda #2 (Figura 2), se determinaron los 5 principales tratamientos de VC. Con esta información se limitaron los criterios de búsqueda teniendo en cuenta el

nombre o la frase representativa al tipo de tratamiento. Los términos utilizados para cada una de las búsquedas consecuentes fueron: (i) anaerobic digestion, (ii) fertirrigation, (iii) coagulation/flocculation, (iv) microalgae o algae, (v) hydrogen production (Tabla 2).

Tabla 1. Eliminación de duplicidad de términos en redes bibliométricas.

Búsqueda	Término	Términos agrupados
1	<i>bioethanol</i>	<i>ethanol, bioethanol.</i>
	<i>biohydrogen</i>	<i>hydrogen, biohydrogen.</i>
	<i>Biomethane</i>	<i>methane, biomethane.</i>
	<i>Sugarcane</i>	<i>sugarcane, sugar cane.</i>
	<i>Vinasse</i>	<i>vinasse, vinasses.</i>
2	<i>fertirrigation</i>	<i>fertigation, fertirrigation.</i>
	<i>biohydrogen</i>	<i>hydrogen, biohydrogen, bio-hydrogen, hydrogen production.</i>
	<i>Methane</i>	<i>methane, methane production.</i>
	<i>sugarcane vinasse</i>	<i>sugarcane vinasse, sugar cane vinasse, vinasse, stillage, raw sugarcane vinasse.</i>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Resultados de búsqueda para los diferentes tratamientos a VC.

Ecuación de búsqueda	No. de documentos
TITLE-ABS-KEY ("sugarcane vinasse" AND "anaerobic .digestion" AND NOT <i>tequila</i> AND NOT <i>beet</i>) AND DOCTYPE (<i>ar</i> OR <i>re</i>) AND PUBYEAR < 2021	39
TITLE-ABS-KEY ("sugarcane vinasse" AND "fertirrigation" AND NOT <i>tequila</i> AND NOT <i>beet</i>) AND DOCTYPE (<i>ar</i> OR <i>re</i>) AND PUBYEAR < 2021	9
TITLE-ABS-KEY ("sugarcane vinasse" AND "coagulation/flocculation" AND NOT <i>tequila</i> AND NOT <i>beet</i>) AND DOCTYPE (<i>ar</i> OR <i>re</i>) AND PUBYEAR < 2021	6
TITLE-ABS-KEY ("sugarcane vinasse" AND "microalgae" OR "algae" AND NOT <i>tequila</i> AND NOT <i>beet</i>) AND DOCTYPE (<i>ar</i> OR <i>re</i>) AND PUBYEAR < 2021	11
TITLE-ABS-KEY ("sugarcane vinasse" AND "hydrogen production" AND NOT <i>tequila</i> AND NOT <i>beet</i>) AND DOCTYPE (<i>ar</i> OR <i>re</i>) AND PUBYEAR < 2021	24

Fuente: Elaboración propia.

3. Resultados

3.1. Vinaza y vinaza de caña de azúcar

La Figura 2 muestra la evolución de estudios científicos relacionados con vinaza y VC (hasta el año 2020). El primer registro de vinaza encontrado en la base de datos Scopus fue en el año 1963. No obstante, es en la década de los 80 donde las investigaciones comienzan a ser continuas, debido a que en esta década se popularizaron los primeros tratamientos o usos alternativos de vinazas, como lo son la fertirrigación y el compostaje ⁽¹²⁾. Por otro lado, se puede apreciar un incremento - desde el año 2007 - en la producción científica relacionada a la vinaza. A partir de ese momento, la curva que representa el número de documentos publicados aumenta exponencialmente. Esto puede estar relacionado con que la producción mundial de etanol como combustible para producir gasohol se triplicó entre los años 2000 y 2007, pasando de 17 mil a más de 52 mil millones de litros. Además, se encontró que del año 2007 a 2008, el porcentaje de etanol en el uso mundial de combustible tipo gasolina pasó del 3,78% al 5,46% ⁽²⁵⁾, ocasionando retos de producción para la industria alcoholera y un foco de estudio para los investigadores.

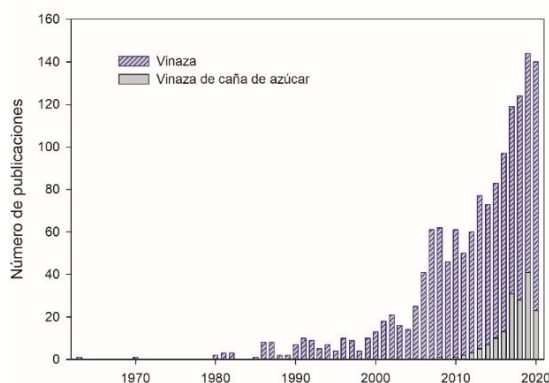


Figura 2. Evolución de la producción científica relacionada a la vinaza y VC, y sus tratamientos en función del tiempo.

Por otro lado, en el año 2008 se encuentra el primer registro - según Scopus - de investigación relacionada a la VC. Cabe resaltar que, para ambas curvas, los registros más altos se alcanzan en el año 2019. Posterior a estos valores, se puede apreciar un descenso en el número de publicaciones. En este punto cabe mencionar que el primer registro de producción de alcohol a partir de caña de azúcar en Colombia es del último trimestre del año 2005, en donde se alcanzó una producción de 27,034 mil L de alcohol. Para el año 2021 la producción de alcohol en Colombia alcanzó los 323,841 L ⁽⁴⁾.

La Figura 3 muestra una red bibliométrica de coocurrencias de palabras claves para estudios relacionados con vinaza (búsqueda #1), donde se encontró que de 3,120 palabras claves 42 cumplen con el umbral mínimo de 10 ocurrencias. Por otro lado, la Figura 4 representa el análisis de coocurrencia correspondiente a estudios que involucran VC (búsqueda #2), en el que se estipuló el mínimo número de ocurrencia de 3, obteniendo que de 503 palabras claves 30 cumplen este umbral.

A partir de esta segunda red bibliométrica es posible dividir en grupos (clusters) los estudios en torno a la VC, uno de ellos relacionado con las rutas metabólicas de la acidogénesis, reactores termofílicos, producción de biohidrógeno y fermentación oscura; el segundo grupo está relacionado a las rutas metabólicas metanogénicas y modelos de digestión anaeróbica, en otras palabras, a la producción de biogas metano a partir de VC; un tercer grupo está enfocado al uso de la VC en las mismas biorefinerías de caña de azúcar para fertirrigación o compostaje. Por otro lado, y sin interacciones con los anteriores grupos, se pueden apreciar dos diferentes ramas de estudio, los cuales se ha decidido agrupar como algas, microalgas y hongos, y floculación/cuagulación.

ambientales; sin embargo, la vinaza tiene una baja relación carbono-nitrógeno, por lo que deben añadirse sustancias complementarias, por ejemplo, estiércol animal, residuos industriales orgánicos y fertilizantes calcáreos, para mejorar el rendimiento de la producción de biogás ⁽²²⁾. El proceso de DA consiste en la biodegradación de la carga orgánica de la vinaza para producir principalmente biogás y vinaza biodigerida, la cual posteriormente es usada como fertilizante. En la actualidad, los tratamientos anaerobios a las vinazas son ampliamente empleados ya que logran una eficiencia de 90% de eliminación de DQO y entre 85 a 95% de recuperación de energía en forma de biogás ⁽²⁶⁾. Una vez purificado el biogás producido, este posee un valor calorífico similar al del gas natural, con la ventaja de ser renovable y fácilmente disponible ⁽¹²⁾. Sin embargo, el contenido de melanoidinas y compuestos fenólicos presentes en la vinaza puede inhibir la actividad microbiana anaerobia, representando un serio problema para los tratamientos biológicos. Es importante mencionar que las melanoidinas, pigmentos recalcitrantes que le dan el color marrón a la vinaza, son difícilmente degradables por DA, por lo que comúnmente se emplean tratamientos fisicoquímicos para refinar los tratamientos anaerobios ⁽⁹⁾.

Ferraz et al. evaluaron el comportamiento de los reactores metanogénicos termófilos de flujo ascendente (conocidos como UASB, por sus siglas en inglés) que operaron continuamente en sistemas de una (UASB I) y dos etapas (UASB II) durante 180 días. Su máximo rendimiento en la producción de metano fue 250.9 NmL CH₄ g⁻¹ DQO_{removido} y 316.0 NmL CH₄ g⁻¹ DQO_{removido} para los sistemas UASB I y UASB II, respectivamente, lo que corresponde al 71.7% y 90.3% del máximo rendimiento teórico de producción de metano (350 NmL CH₄ g⁻¹ DQO_{removido}). Además, los autores reportaron que la producción de energía en el sistema de dos etapas fue 25.7% mayor que la del sistema de una sola

etapa, lo que indica la necesidad de una fase acidogénica para mejorar tanto la eliminación de materia orgánica como la extracción de energía. Además, en el sistema de dos etapas, la remoción de DQO total y soluble fue de 74.6% ± 0.3 y 96.1 ± 1.7%, respectivamente, a una tasa de carga orgánica de 25 Kg DQO m⁻³ d⁻¹ ⁽¹³⁾.

Fuess et al. reportan que la DA de VC en sistemas de dos fases es un método eficaz para reducir la carga orgánica y eliminar los efectos negativos de la disposición directa al medio ambiente de sulfuros (HS⁻/S⁻²/H₂S), provenientes de la biodigestión de una fase en presencia de sulfato, sulfito o tiosulfato ^(27,28). Además, recomiendan prestar especial atención al uso de altas dosis de compuestos alcalinizantes basados en sodio en las plantas de DA, debido a la posibilidad de que se produzca una sodificación del suelo al utilizar la vinaza biodigerida en fertirrigación. Por esto, recomiendan una continua y adecuada caracterización de VC para garantizar su reutilización ⁽²⁷⁾.

Recientemente, y gracias a los avances tecnológicos, se han desarrollado investigaciones que modelan el comportamiento de los reactores acidogénicos durante el procesamiento de la VC; por ejemplo, el estudio realizado por Couto et al., donde emplearon como modelo base el ADM1. Los autores adecuaron el modelo ADM1 para que se ajustara a los datos experimentales de la DA en un reactor acidogénico. Los autores eliminaron ciertas rutas metabólicas del modelo original, como las que involucran la metanogénesis. Además, agregaron dos nuevas rutas metabólicas, Acetato + Lactato → Butirato + Hidrógeno y Glicerol → Butirato + Hidrógeno. Este modelamiento se llevó a cabo empleando el software Matlab®, lo que muestra una ruta en la caracterización de la DA de VC y un avance significativo para la automatización de estos procesos a gran escala ⁽²⁹⁾. Cabe mencionar que la producción de biohidrógeno en la fase acidogénica puede desempeñar un papel

importante en la mejora del rendimiento energético de la DA en sistemas combinados, aunque la mayor parte del potencial energético se deriva de una conversión más eficiente de la materia orgánica en metano ⁽³⁰⁾.

Parsaee et al. en el año 2019, estimaron un potencial de producción de biogás a partir de VC de 407.68 giga litros. Este potencial puede considerarse como una fuente significativa de energía renovable ⁽²²⁾.

3.2.2. Fertirrigación

La fertirrigación pretende aumentar el rendimiento del cultivo y disminuir parcial o totalmente el uso de fertilizantes químicos comerciales ^(12,31). Esta técnica comenzó en la década de 1950, pero se popularizó cerca del año 1980 ^(12,32); se destaca que, de todas las alternativas de aplicación para la vinaza, es la más comúnmente usada por su bajo costo, aplicación rápida y aparente beneficio.

Entre los fertilizantes químicos a los que se les disminuye su uso con la práctica de fertirrigación con VC se encuentra el sulfato de amonio, el fertilizante de fosfato, la urea y el cloruro de potasio, fertilizante importado de alto costo ⁽³³⁾. La fertirrigación proporciona a las cosechas cerca de 1050, 90 y 3100 g.m⁻³ de nitrógeno, fósforo y potasio, respectivamente ⁽³⁴⁾. En este punto cabe mencionar que el potasio es el mineral más importante para el crecimiento de los cultivos de caña de azúcar, siendo el nutriente más absorbido durante el crecimiento de la planta ⁽¹⁶⁾.

Actualmente, esta práctica es muy cuestionada ya que se conoce que la disposición directa de vinaza al ambiente puede contaminar suelos y aguas subterráneas, debido a la presencia de sólidos disueltos y a su contenido orgánico, que podría ser nocivo y contaminante bajo ciertas condiciones ⁽³⁵⁾. Las vinazas también contienen compuestos fitotóxicos, antibacterianos y recalcitrantes, tales

como fenoles, polifenoles y metales pesados, que generan efectos negativos en microorganismos y plantas ^(9,36). En un estudio genómico a las bacterias presentes en la VC, Cassman et al. expresaron su preocupación al encontrar bacterias portadoras de genes de resistencia a los antibióticos (ARGs por sus siglas en inglés), los cuales pueden ser transferidos a otras bacterias del suelo. Este resultado plantea la realización de nuevos estudios sobre el destino de los ARGs ⁽³⁷⁾.

Coopersucar, una de las cooperativas de productores de caña de azúcar en el estado de Sao Paulo, indica que dosis de 300 m³.ha⁻¹ de vinaza con niveles de potasio entre 3 y 4 kg por m³ de vinaza, independientemente del tipo de suelo, no altera sus propiedades físicas, químicas y biológicas ⁽¹²⁾. En Colombia, la aplicación de los productos derivados de la vinaza para compostaje debe cumplir con las características estipuladas en la Norma Técnica NTC (ICONTEC) 5167 2011-03-23, en donde se anuncian los criterios de aceptación o rechazo en Kg.m⁻³ y los métodos de determinación de fósforo, potasio, calcio, magnesio, sodio, hierro, metales pesados como arsénico, cadmio, cromo, entre otros ^(38,39).

Diversos estudios plantean que fracciones pequeñas pero significativas de N agrícola aplicado a la tierra supera las necesidades de los cultivos. Este excedente de N puede provocar acumulación del mismo en los suelos, desplazamiento hacia aguas superficiales y posteriormente a aguas subterráneas; además del ingreso a la atmósfera a través de la volatilización de amoníaco NH₃ y la producción de óxido nitroso N₂O. Esta disposición atmosférica de nitrógeno puede ocasionar fuertes efectos en la estructura de los ecosistemas terrestres y marinos ^(9,40).

Carvalho et al. evaluaron diferentes fuentes de fertilizantes de N (orgánicas, sintéticas y sus combinaciones) para cultivos de caña de azúcar, encontrando que el promedio de emisiones de

N₂O por N aplicado fue del 0.60%, lo que es 40% menor al factor de emisión (FE) estipulado por el IPCC (1%). Sin embargo, el promedio de emisiones de N₂O por N aplicado, por combinación de fertilizante de nitrogenado, como nitrato de amonio, sulfato de amonio o urea, con VC (práctica común en Brasil) fue de 1.12%, con una gran variación (0.13-3.03%)⁽⁴¹⁾. Estas mayores emisiones de N₂O asociadas a la aplicación de vinaza en los campos de caña de azúcar están probablemente relacionadas a la estimulación de los microbios del suelo con las cargas de carbono orgánico y nitrógeno que aumentan la actividad microbiana con el incremento de los nitrificantes y las comunidades heterótrofas disminuyendo así, la disponibilidad de oxígeno y potenciando la producción de N₂O⁽³⁷⁾.

Otros estudios presentan diferentes tasas de emisiones de N₂O frente a la VC empleada como fertilizante orgánico. Lisboa et al. reportan que en aplicaciones de 100 m³.ha⁻¹ de VC el factor de emisión es de 1.225% de N₂O por N aplicado⁽⁴²⁾. Siqueira Neto et al. reportan emisiones de 0.65 ± 0.29% de N₂O por N aplicado, para tasas de VC desde 150 hasta 300 m³.ha⁻¹, mientras que reporta un factor de emisión de 0,46 ± 0,33 % para fertilizantes nitrogenados⁽⁴³⁾. Por su parte, Lourenço et al. encontraron que las emisiones de N₂O por fertilización con VC y VC concentrada eran dependientes a la humedad del suelo; los factores de emisión promedio para la VC y la VC concentrada fueron de 0.66% y 0.34%, respectivamente, mientras que las emisiones por fertilizantes nitrogenados variaron de 0.07 a 0.51%⁽⁴⁴⁾. Yang et al. mostraron que la suplementación de fertilizante sintético de N con enmiendas orgánicas, como la VC, aumentó significativamente la emisión media de N₂O en comparación con el uso exclusivo del fertilizante sintético, los factores de emisión promedio para los fertilizantes sintéticos, enmiendas orgánicas, y la combinación de ambos, fueron de 1.09%, 1,19% y 2.47%⁽⁴⁵⁾. Por otro lado, De Oliveira et

al. encontraron que la aplicación de 200 m³.ha⁻¹ de VC triplicó las emisiones de CO₂, además presentan factores de emisión de N₂O de 0.68% y 0.44% para áreas quemadas y no quemadas, respectivamente. En este estudio la DQO de la VC empleada era baja, de 1.19±0.11 g.L⁻¹⁽⁴⁶⁾. En concordancia con los anteriores autores se puede concluir que, los valores de emisiones más elevados se alcanzaron cuando se combinaron los fertilizantes nitrogenados con VC sin tener en cuenta estrategias de mitigación como el manejo del pH del suelo y de enmiendas orgánicas, en cuanto a dosis y momento de aplicación, claves en la mitigación de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI).

El monitoreo por 15 años, de áreas en Brasil en donde se realiza fertirrigación, evidencia una conservación de la fertilidad de la tierra, pero un aumento de NO₃ en las aguas subterráneas⁽⁷⁾. Con respecto a la carga orgánica aplicada al suelo, Fuess et al. reportaron que puede alcanzar de 2.0 a 2.5 ton DBO.ha⁻¹ para cosechas de suelos fertiirrigados y no fertiirrigados, respectivamente. Además, encontraron que el rango de carga orgánica aplicada al suelo con vinazas biodigeridas en sistemas monofásicos era de 1.2 a 2.7 ton DQO.ha⁻¹, mientras que la máxima aplicación de carga orgánica por vinazas biodigeridas en sistemas de dos fases era de 1.2 ton DQO.ha⁻¹⁽²⁷⁾.

3.2.3. Coagulación/floculación

Los procesos de coagulación/floculación son tecnologías fisicoquímicas alternativas para disminuir el fuerte nivel de contaminación de la vinaza. Esta tecnología es comúnmente usada en el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales, así como en aguas subterráneas contaminadas con metales, presentando una implementación y operación simple, además de una remoción eficiente en cuanto a fósforo, nitrógeno, DQO, demanda biológica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos totales y color. Por lo

anterior, múltiples investigadores se han enfocado en los tratamientos fisicoquímicos de la VC, encontrando que en condiciones óptimas, la coagulación/floculación con cloruro de hierro proporciona un ligero aumento en la biodegradabilidad del efluente, logrando remociones moderadas de carbono orgánico total (30.5%), DBO (27.9%) y DQO (43.6%) ⁽¹¹⁾.

Otros estudios plantean la combinación de tratamientos fisicoquímicos como tecnologías de adsorción, coagulación-floculación, ozonización, oxidación electroquímica y electrocoagulación. Por ejemplo, la tasa de eliminación de turbidez para la técnica de electrocoagulación con carbón Areca fue alta (99%). Sin carbono, el valor fue del 69.4% de DBO y del 75.5% de DQO en 60 min ⁽⁹⁾.

También se ha evaluado la capacidad de reducción del contenido de sólidos y otros parámetros de la vinaza empleando electrodisolución de hierro y floculación química a través de etapas separadas. De esta manera fue posible disminuir 84% los sólidos totales, 54% DQO, 88% el carbono orgánico disuelto, y 76% el color ⁽⁴⁷⁾.

Krishna Prasad et al. emplearon el diseño de experimentos Box-Behnken para encontrar el punto óptimo de remoción de color para la electrocoagulación de aguas residuales de destilerías usando ánodos de hierro. Los autores encontraron que la eliminación real del color en las condiciones optimizadas fue del 93,5%, lo que confirma la proximidad de la respuesta prevista (95%) mediante la metodología de la superficie de respuesta. Afirmaron que la eficiencia del proceso de electrocoagulación está fuertemente influenciada por la densidad de corriente, la dilución y el tiempo del proceso ⁽¹⁷⁾.

3.2.4. Algas, microalgas y hongos

Se ha comprobado que los tratamientos con microalgas remueven materia orgánica residual, color y nutrientes de la vinaza, mejorando este residuo para la fertirrigación de la tierra. Además, recientes estudios plantean el cultivo de hongos como alternativa para la eliminación de melanoidinas, DQO y DBO, con el potencial de producir sustratos ricos en proteínas para alimentación animal o recuperar algún subproducto valioso fúngico específico ⁽¹⁶⁾.

Francisca Kalavathi et al. reportaron una degradación de 5% de melanoidina utilizando la cianobacteria *Oscillatoria boryana*. Además, descubrieron que el organismo liberaba peróxido de hidrógeno, iones hidroxilo y oxígeno molecular durante la fotosíntesis, lo que resulta en una decoloración del 60% en las vinazas diluidas. Este estudio también sugirió que las cianobacterias podrían usar melanoidina como la principal fuente de nitrógeno ⁽⁴⁸⁾.

De Mattos & Bastos plantearon el uso de vinaza como medio de crecimiento para el cultivo del alga verde heterotrófica *Desmodesmus* sp, obteniendo como resultado la remoción de 52.1 y 36.2% de nitrógeno y DQO, respectivamente ⁽¹⁸⁾.

Karimi et al. evaluaron el desempeño de cinco cepas de biomasa fúngica de hongos filamentosos comestibles: *Aspergillus oryzae*, *Neurospora intermedia*, *Rizhopus oryzae*, *Monascus purpureus* y *Fusarium venenatum*, cultivados en vinaza, como fuentes alternativas de proteínas para la producción de harina de pescado como alimento para peces. Se observó que la vinaza al 5% con un pH inicial de 5-6.5 puede soportar rendimientos de biomasa fúngica de 34.3 ± 2.4 - 118.5 ± 3.9 g de biomasa seca L-1 para *A. Oryzae*, *N. intermedia* y *R. oryzae*. Se obtuvieron altos contenidos de proteína de aproximadamente 44.7, 57.6 y 50.9% (p.p-1), y contenidos de grasa de 7.0, 3.5 y 5.5% (p.p-1) para *A. oryzae*, *N.*

intermedia y *R. oryzae*, respectivamente ⁽⁴⁹⁾. Cabe mencionar que el uso de VC como alimento animal, de manera similar a las condiciones aplicadas a la industria del DDGS en EE. UU., puede no ser adecuado con la composición original de la VC, debido a su bajo contenido proteico y exceso de azufre. Por lo que una oportunidad es utilizar la biomasa rica en proteína cultivada en vinaza como alimento animal. La utilización de proteína fúngica cultivada en VC podría proporcionar materia prima para un mercado similar al de la harina de soja, generando al menos USD 9,5 millones anuales para las plantas de etanol ⁽³²⁾.

Recientemente se han desarrollado diferentes estudios de producción de bioplásticos a partir de subproductos de refinerías de caña de azúcar. De Paula et al. sintetizaron el bioplástico - polihidroxicanoato (PHA) - empleando *Burkholderia glumae* MA13 y utilizando como sustrato sacarosa, xilosa, melaza, VC, hidrolizado de bagazo, extracto de levadura, autolisado de levadura y levadura seca inactivada. Los autores encontraron que el mejor medio de crecimiento microbiano y de síntesis del polímero fue la melaza de caña de azúcar sin pretratamiento y que la adición de un 25% (v.v-1) de VC a los medios de cultivo que contenían melaza no fue perjudicial y dio lugar a un contenido máximo de polímeros similar, del 44,8%, y a un rendimiento máximo de PHA de 0.18 g.g-1, a 34°C. Por lo tanto, lo califican como una posible alternativa a la inadecuada eliminación de VC a los cuerpos de agua y suelos ⁽⁵⁰⁾.

3.2.5. Producción de biohidrógeno

La producción de biohidrógeno es una de las alternativas favorables para el tratamiento de aguas residuales. Esta alternativa puede mitigar las emisiones de GEI y es una forma limpia y prometedora de energía para las próximas décadas, ya que sólo produce vapor de agua como producto de su combustión y no da lugar a la

formación de CO, CO₂ e hidrocarburos que contribuyan al efecto invernadero ⁽⁵¹⁾. El hidrógeno se puede producir por fermentación oscura de VC en biorreactores anaeróbicos acidogénicos ⁽²⁹⁾. Debido a que la VC tiene el potencial de producir hidrógeno y metano, la aplicación directa de la vinaza al suelo podría contemplarse una pérdida de energía ⁽⁵²⁾.

El pH inicial se considera como uno de los parámetros más importantes que afectan el rendimiento de la fermentación oscura, ya que influye en las actividades de las bacterias productoras de hidrógeno y puede afectar directamente las vías metabólicas y la absorción de nutrientes por parte de los microorganismos ⁽⁵¹⁾.

Algunos autores han informado que las condiciones termofílicas proporcionan tasas y rendimientos más altos de producción de hidrógeno. Este es el caso reportado por Koyama et al., quienes estimaron los parámetros cinéticos de la fase acidogénica de la DA termofílica utilizando reactores horizontales, concluyendo que la VC podría potencialmente usarse en sistemas productores de hidrógeno con biomasa inmovilizada en su pH original, lo que indica que no hay costos adicionales de insumos. Además, la fermentación termofílica también puede disminuir los efectos negativos que son causados por la presión parcial de hidrógeno en la fase líquida y la inhibición de microorganismos autóctonos ⁽⁵³⁾.

Por su parte, Santos et al. evaluaron la producción de hidrógeno en VC bajo condiciones anaeróbicas termofílicas, encontrando que la producción de hidrógeno fue inhibida por concentraciones elevadas de ácidos grasos volátiles (AGV) (3,7 y 3,0 g.L-1 de ácidos butírico y acético, respectivamente) ⁽²¹⁾.

Otra fuerte tendencia en la producción de biohidrógeno a partir de VC es el uso de

consorcios microbianos mixtos. Las investigaciones se han enfocado en caracterizar el comportamiento de la fermentación con VC como sustrato evaluando el efecto de la temperatura, concentración, pretratamiento y pH; la mayoría de los microorganismos empleados pertenecen al género *Pseudomonas*, y la especie *Saccharomyces cerevisiae* ^(19,26,51). Lazaro et al. encontraron que el incremento en la concentración de VC no tuvo un impacto significativo en el rendimiento de hidrógeno, pero tuvo un impacto positivo en el potencial de producción y en la tasa de producción de hidrógeno.

Durante la evaluación de la producción de biohidrógeno a partir de VC en un reactor de lecho fluidizado sin control de pH se encontró que la producción de biohidrógeno mediante DA de VC puede lograrse sin pretratamiento de alcalinización ⁽²⁰⁾. Sin duda, la producción de biohidrógeno empleando VC como sustrato ha

tomado gran relevancia en la comunidad científica.

Recientemente, la producción de AGV por fermentación utilizando residuos agroindustriales ha ido ganando protagonismo debido a su amplio rango de uso en las industrias farmacéuticas, alimentarias, químicas y de materias primas valiosas para productos como el biogás. Se encontró que el pH óptimo para la producción de hidrógeno es diferente que el pH óptimo para producir AGV; con pH igual a 6 se incrementó la producción de hidrógeno, mientras que con un pH de 7 se favoreció la producción de AGV (principalmente acético, butírico y propiónico) ⁽⁵¹⁾.

La Figura 5 muestra las alternativas de uso, disposición y/o aprovechamiento de la VC. La Tabla 3 presenta una comparación de los tratamientos de VC abordados en este estudio.

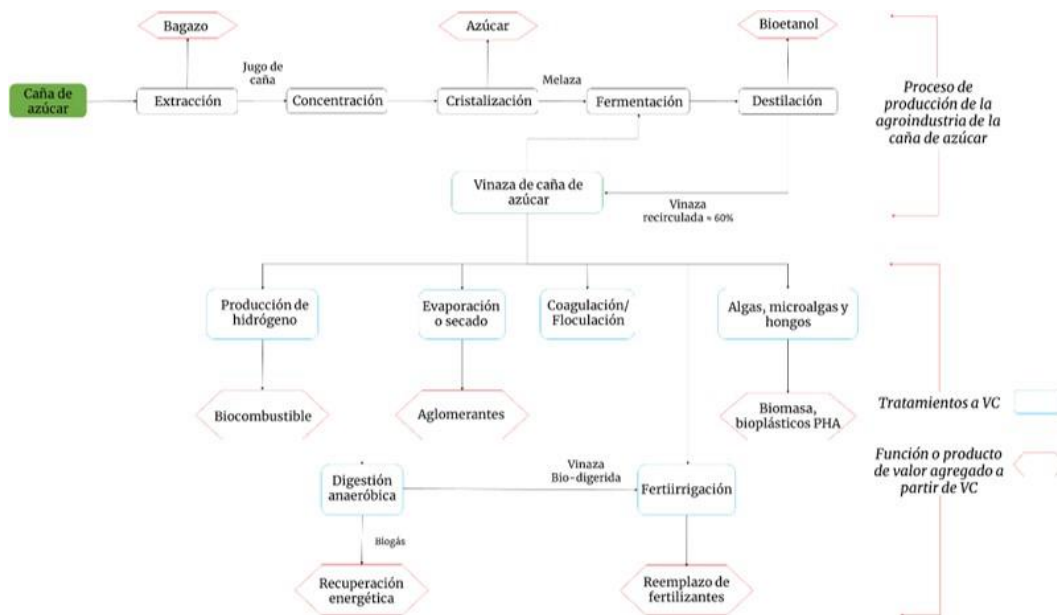


Figura 5. Diagrama de flujo de diferentes alternativas de uso o disposición de la VC.

Tabla 3. Comparación de tratamientos a vinazas de caña de azúcar.

Tratamiento	%DQO removido	%DBO removido	%Color removido	Ref.
DA	90	-	Difícil de degradar	(9)
Coagulación/ Floculación	43.6	27.9	93.5	(9,17)
Microalgas	36.2	-	52	(18)
Producción de hidrógeno	31.3	-	-	(51)

Fuente: Elaboración propia con base en la información recolectada durante la investigación

3.3. Tratamientos y usos alternativos de VC en Colombia

El manejo actual de la vinaza en el sector agroindustrial de Colombia incluye las siguientes alternativas:

- La mayor parte de la agroindustria de la caña de azúcar emplea la vinaza como humectante de pilas de material en el proceso de compostaje. La vinaza generada en las plantas de alcohol es enviada a la planta de compostaje junto con otros materiales resultantes de los procesos de fabricación de azúcar como cachaza, ceniza y bagazo, para darles tratamiento. La vinaza aporta, además de carbono orgánico, elementos como potasio y nitrógeno (aunque en menor proporción que la urea que aporta 44% más nitrógeno), esto permite el reciclaje de nutrientes en la cadena productiva a través de la aplicación del compost en el campo.
- Algunos ingenios azucareros utilizan mezclas de nitrógeno y vinaza para hacer fertirriego. Esta práctica está regulada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca.
- Producción de vinaza seca, la cual puede ser utilizada como agente plastificante en la

fabricación de concretos y es insumo para la fabricación de fertilizantes. Esta tecnología solo se emplea en una de las siete plantas productoras de etanol de caña de azúcar, y es considerada una innovación tecnológica por Colciencias (actualmente MinCiencias).

La Tabla 4 resume el uso de la vinaza producida en las plantas de etanol de caña de azúcar en Colombia. Solo en Colombia, se producen cerca de 6.5 millones de litros de VC aproximadamente por día. Lo cual, sin duda, es un desafío en términos ambientales.

Las destilerías de etanol del Valle del Cauca producen menores volúmenes de vinaza, de 1 a 3 L.L-1 de etanol, en comparación con la industria de caña de azúcar brasileña, que produce de 9 a 14 L.L-1 de etanol ⁽⁵⁵⁾. Es válido aclarar que, para la región industrial del valle del río cauca, con la resolución 0081 de 2012 se reglamenta el uso, manejo, aplicación y almacenamiento de VC, impidiendo así su descarga directa sobre cuerpos de agua.

En países Latinoamericanos se han abordado otros estudios que no se presentan en las redes bibliométricas, como lo es la combustión de VC en calderas modificadas para dicho propósito, que permite recuperar energía química mediante su

transformación a energía térmica y eléctrica ⁽⁵⁶⁾; la producción de proteína unicelular mediante fermentación aeróbica con *Cándida utilis*, agregando una mezcla de amonio, urea y extracto de malta a la VC para incrementar el crecimiento de biomasa en el menor tiempo posible ⁽⁵⁷⁾; y el tratamiento de VC con agua super crítica como

alternativa para disposición o aprovechamiento, convirtiendo la materia orgánica de la VC en materiales carbonosos de alta área superficial efectiva ⁽⁵⁸⁾. También se encontraron registros de la práctica de incineración a VC, pero este proceso requiere elevados costos y genera gran contaminación atmosférica ⁽⁵⁹⁾.

Tabla 4. Manejo de las vinazas en las plantas productoras de etanol de caña de azúcar en Colombia y producción de vinazas en $L\text{ día}^{-1}$, tomando una producción de vinaza $3L.L^{-1}$ de etanol.

Planta	Ubicación	Capacidad de producción de etanol ($L.\text{día}^{-1}$)	Uso	Producción estimada de VC
Ingenio Risaralda	Risaralda	100,000	Compostaje	300,000
Ingenio Riopaila Castilla	Valle del Cauca	400,000	Fertilizante	1,200,000
Bioenergy	Meta	504,000	Fertilizante	1,512,000
Ingenio Providencia	Valle del Cauca	300,000	Compostaje	900,000
Manuelita	Valle del Cauca	250,000	Producción de vinaza seca	750,000
Ingenio Mayagüez	Valle del Cauca	250,000	Compostaje	750,000
Incauca	Cauca	350,000	Compostaje	1,050,000

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Federación Nacional de biocombustibles ⁽⁵⁴⁾.

3.4. Análisis de patentes de vinazas

Según la base de datos Wizdom, 1,815 investigadores de 59 países han realizado estudios con relación a vinazas. Siendo Brasil el principal país en investigación de Vinaza, con 316 publicaciones realizadas por 791 investigadores.

La Figura 6 presenta los mapas de densidades de investigación y de patentes de vinazas a nivel global. La base de datos Wizdom reporta 415 inventores de 982 organizaciones en 72 países. Siendo China y los Estados Unidos los países con mayor número de patentes registradas (1,711 y 355 patentes, respectivamente). Lo anterior se puede presentar ya que, aunque Brasil es el mayor cultivador de caña de azúcar y productor de

bioetanol a partir de esta materia prima, y mantiene un nivel investigativo destacado en relación con las VC, los países más desarrollados como China y EE. UU. lideran proyectos con una alta inversión interna en investigación.

La Figura 7 presenta el registro de temáticas abordadas en las patentes relacionadas con vinazas. Entre los productos desarrollados se destacan los fertilizantes orgánicos, el alimento animal y el biogás. Cabe recordar que son las vinazas con sólidos insolubles las que comúnmente se emplean como alimento animal. Esta información coincide, en gran parte, con los resultados encontrados en este trabajo mediante análisis bibliométrico

(a)

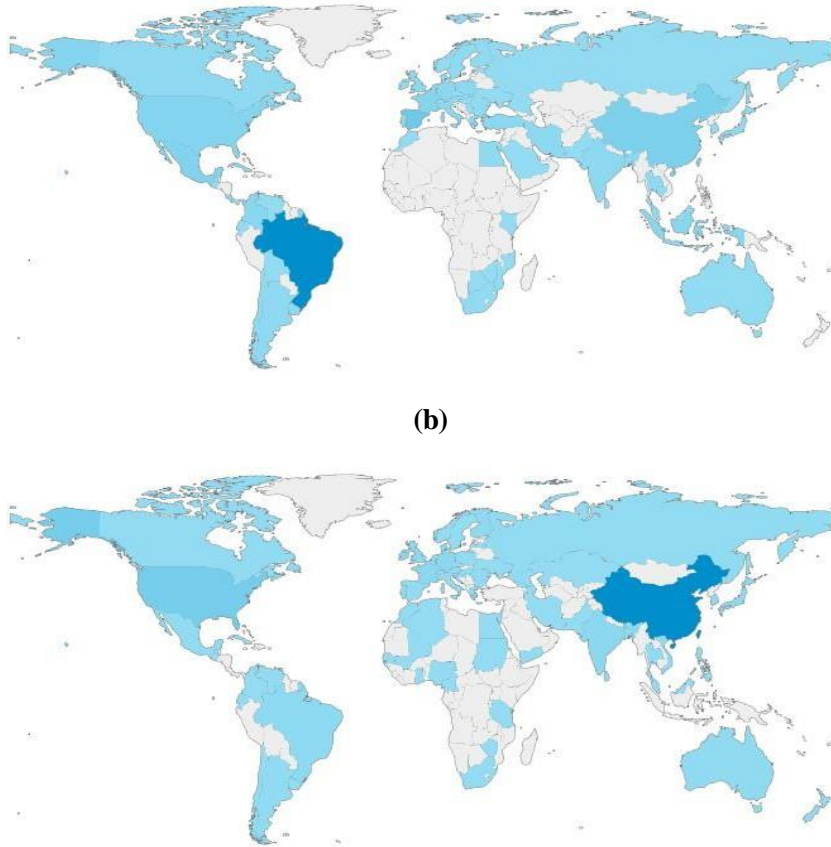


Figura 6. (a). Mapa de densidad de investigación de Vinazas. (b). Mapa de densidad con relación a patentes de Vinazas. Fuente: ⁽⁶⁰⁾



Figura 7. Registro de patentes con relación a Vinazas. Amarillo: Alimentos, Morado: Sustancias químicas, Verde: Especies, Azul: Otros. Fuente: ⁽⁶⁰⁾

4. Conclusiones

Se evidencia un aumento en la producción científica relacionada a la VC debido al interés de

las grandes potencias como EE. UU. y China en desarrollar de manera eficaz alternativas que mitiguen la posible contaminación de este subproducto y puedan generar productos de valor

agregado como biogás, biohidrógeno, AGV, alimento para animales, fertilizantes y plastificantes. Dentro de los países Latinoamericanos, Brasil es el país que más ha contribuido en la producción científica relacionada con la VC y sus posibles tratamientos. Este estudio encontró que los principales tratamientos de VC se pueden agrupar en cinco grupos: DA, fertirrigación, coagulación/floculación, algas, microalgas y hongos, y producción de hidrógeno. Siendo los tratamientos más sonados en la actualidad la DA y la producción de hidrógeno, que entre sí están estrechamente relacionados.

Al realizar la comparación entre cada uno de los tratamientos se encontró que el más eficiente en la degradación de la materia orgánica de la VC fue la DA, obteniendo valores superiores al 90% en la remoción de DQO. Además, teniendo en cuenta la generación de biogás, lo que es un beneficio económico ambientalmente atractivo, y a su vez la producción de vinaza biodigerida en mejores condiciones para fertirrigación, se determina que el tratamiento más adecuado para la VC fue la DA.

Considerando la cantidad de alternativas de aprovechamiento de la vinaza que se presentan en el artículo, es importante el desarrollo de un modelo de comparación de alternativas que permita cuantificar los beneficios y costos marginales derivados de comparar las alternativas, en función de aspectos como su nivel de relación, vida útil y potencial de desarrollo económico.

Adicionalmente, Colombia ha definido la hoja de ruta de producción de hidrógeno, que marca el inicio de la transición energética del país, y que tiene como objetivo disminuir las emisiones de GEI en un 51% en 2030 respecto al escenario de referencia, y alcanzar carbono-neutralidad en 2050. En ese sentido, alternativas como la producción de biohidrógeno a partir de VC podrían ser eventualmente favorecidas en el

mediano-largo plazo mediante políticas de estímulo estatal.

5. Financiación

Esta investigación no ha recibido financiación externa.

6. Referencias

- (1). Procaña. Subproductos y derivados de la Caña [Internet]. 2015 [cited 2021 Apr 18]. <https://procana.org/site/subproductos-y-derivados-de-la-cana/>
- (2). Mejía R. Colombia tiene la mayor productividad azucarera [Internet]. 2017 [cited 2020 May 27]. <https://www.larepublica.co/economia/colombia-tiene-la-mayor-productividad-azucarera-2482881>
- (3). FAOSTAT [Internet]. [cited 2021 Sep 1]. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>
- (4). Asocaña. Balance azucarero colombiano Asocaña 2000 - 2021 (toneladas). [Internet]. 2022 [cited 2021 Dec 3]. <https://www.asocana.org/modules/documentos/vistadocumento.aspx?id=5528>
- (5). U.S. Department of Energy. Alternative Fuels Data Center: Maps and Data - Global Ethanol Production by Country or Region [Internet]. 2020 [cited 2021 Sep 6]. <https://afdc.energy.gov/data/10331>
- (6). OECD. OECD iLibrary | OECD-FAO Agricultural Outlook (Edition 2019) [Internet]. oecd-library.org. 2020 [cited 2021 Apr 18]. https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/data/oecd-agriculture-statistics/oecd-fao-agricultural-outlook-edition-2020_4919645f-en?parentId=http%3A%2F%2Finstance.metastore.ingenta.com%2Fcontent%2Fcollection%2Fagr-data-en

- (7). Carrilho ENVM, Labuto G, Kamogawa MY. Destination of Vinasse, a Residue From Alcohol Industry: Resource Recovery and Prevention of Pollution [Internet]. *Environmental Materials and Waste: Resource Recovery and Pollution Prevention*. Elsevier Inc.; 2016. 21–43 p. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-803837-6.00002-0>
- (8). Lammens TM, Franssen MCR, Scott EL, Sanders JPM. Availability of protein-derived amino acids as feedstock for the production of bio-based chemicals. Vol. 44, *Biomass and Bioenergy*. 2012. p. 168–81.
- (9). España-Gamboa E, Mijangos-Cortes J, Barahona-Perez L, Dominguez-Maldonado J, Hernández-Zarate G, Alzate-Gaviria L. Vinasses: Characterization and treatments. *Waste Manag Res*. 2011;29(12):1235–50.
- (10). Hoarau J, Caro Y, Grondin I, Petit T. Journal of Water Process Engineering Sugarcane vinasse processing : Toward a status shift from waste to valuable resource . A review. *J Water Process Eng [Internet]*. 2018;24(January):11–25. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.05.003>
- (11). Prazeres AR, Lelis J, Alves-Ferreira J, Carvalho F. Treatment of vinasse from sugarcane ethanol industry: H₂SO₄, NaOH and Ca(OH)₂ precipitations, FeCl₃ coagulation-flocculation and atmospheric CO₂ carbonation. *J Environ Chem Eng*. 2019;7(4).
- (12). Christofolletti CA, Escher JP, Correia JE, Marinho JFU, Fontanetti CS. Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. *Waste Manag [Internet]*. 2013;33(12):2752–61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.005>
- (13). Ferraz N, Koyama MH, Araújo MM De, Zaiat M. Thermophilic anaerobic digestion of raw sugarcane vinasse *Ant o*. 2016;89.
- (14). Eduardo C, Silva DF, Karla A, Abud DS. Anaerobic biodigestion of sugarcane vinasse under mesophilic conditions using manure as inoculum Biodigestão anaeróbica da vinhaça de cana-de-açúcar em condições mesófilas usando esterco como inóculo. 2016;11.
- (15). Wilkie AC, Riedesel KJ, Owens JM. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. *Biomass and Bioenergy*. 2000;19(2):63–102.
- (16). de Godoi LAG, Camiloti PR, Bernardes AN, Sanchez BLS, Torres APR, da Conceição Gomes A, et al. Seasonal variation of the organic and inorganic composition of sugarcane vinasse: main implications for its environmental uses. *Environ Sci Pollut Res*. 2019 Oct 1;26(28):29267–82.
- (17). Krishna Prasad R, Ram Kumar R, Srivastava SN. Design of optimum response surface experiments for electro-coagulation of distillery spent wash. *Water Air Soil Pollut*. 2008;191(1–4):5–13.
- (18). de Mattos LFA, Bastos RG. COD and nitrogen removal from sugarcane vinasse by heterotrophic green algae *Desmodesmus* sp. *Desalin Water Treat*. 2016 Apr 26;57(20):9465–73.
- (19). Lazaro CZ, Perna V, Etchebehere C, Varesche MBA. Sugarcane vinasse as substrate for fermentative hydrogen production: The effects of temperature and substrate concentration. *Int J Hydrogen Energy*. 2014 Apr 15;39(12):6407–18.
- (20). GOIS GNSB, MACÊDO W V., PEITER FS, CHAVES TC, SALES VCR, BARBOSAP AMA, et al. Evaluation of Biohydrogen Production From Sugarcane Vinasse in an Anaerobic Fluidized Bed Reactor Without Ph Control. *Lat Am Appl Res*. 2021;51(1):63–9.
- (21). Santos SC, Rosa PRF, Sakamoto IK, Amâncio Varesche MB, Silva EL. Hydrogen production from diluted and raw sugarcane

- vinasse under thermophilic anaerobic conditions. *Int J Hydrogen Energy*. 2014;39(18):9599–610.
- (22). Parsaee M, Kiani Deh Kiani M, Karimi K. A review of biogas production from sugarcane vinasse. *Biomass and Bioenergy* [Internet]. 2019;122(January):117–25. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.034>
- (23). Asociación Geoinnova. La Bioeconomía como base de un desarrollo sostenible [Internet]. 2018 [cited 2021 Apr 18]. <https://geoinnova.org/blog-territorio/la-bioeconomia-como-base-de-un-desarrollo-sostenible/>
- (24). Prankutè R. Web of science (Wos) and scopus: The titans of bibliographic information in today's academic world. *Publications*. 2021;9(1).
- (25). UNEP. Towards sustainable production and use of resources: Assessing biofuels. 2009; http://www.unep.fr/scp/rpanel/pdf/Assessing_Biofuels_Full_Report.pdf
- (26). Pant D, Adholeya A. Biological approaches for treatment of distillery wastewater: A review. *Bioresour Technol*. 2007;98(12):2321–34.
- (27). Fuess LT, Garcia ML, Zaiat M. Seasonal characterization of sugarcane vinasse: Assessing environmental impacts from fertirrigation and the bioenergy recovery potential through biodigestion. *Sci Total Environ* [Internet]. 2018;634:29–40. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.326>
- (28). Moraes BS, Zaiat M, Bonomi A. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. 2015;44:888–903. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.023>
- (29). Couto PT, Eng F, Naessens W, Nopens I, Zaiat M, Ribeiro R. Modelling sugarcane vinasse processing in an acidogenic reactor to produce hydrogen with an ADM1-based model. *Int J Hydrogen Energy* [Internet]. 2020;45(11):6217–30. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.206>
- (30). Tadeu L, Sayuri L, Kiyuna M, Djalma A, Ferraz N, Felix G, et al. Thermophilic two-phase anaerobic digestion using an innovative fixed-bed reactor for enhanced organic matter removal and bioenergy recovery from sugarcane vinasse. *Appl Energy* [Internet]. 2017;189:480–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.071>
- (31). Camargo J, Pereira N, Cabello P, Teran F. Viabilidade da aplicação do método respirométrico de Bartha para a análise da atividade microbiana de solos sob aplicação de vinhaça. *Eng Ambient Pesqui e Tecnol*. 2009;6(2).
- (32). Reis CER, Hu B. Vinasse from sugarcane ethanol production: Better treatment or better utilization? *Front Energy Res*. 2017;5(APR):1–7.
- (33). CVC. CVC ACOMPAÑA A INGENIOS AZUCAREROS EN EL PROCESO DE APLICACIÓN DE VINAZAS | Portal CVC [Internet]. 2021 [cited 2022 Jan 18]. <https://www.cvc.gov.co/boletin-prensa-234-2021>
- (34). Silalertruksa T, Pongpat P, Gheewala SH. Life cycle assessment for enhancing environmental sustainability of sugarcane biorefinery in Thailand. *J Clean Prod* [Internet]. 2017;140:906–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.010>
- (35). Fuess LT, Rodrigues IJ, Garcia ML. Fertirrigation with sugarcane vinasse: Foreseeing potential impacts on soil and water resources through vinasse characterization. *J Environ Sci Heal - Part A Toxic/Hazardous Subst Environ Eng* [Internet]. 2017;52(11):1063–72. <https://doi.org/10.1080/10934529.2017.1338892>
- (36). Christofolletti CA, Ansoar-Rodríguez Y, Guedes TA, Fontanetti CS. Comet assay and

- micronucleus tests on *Oreochromis niloticus* (Perciforme: Cichlidae) exposed to raw sugarcane vinasse and to physicochemical treated vinasse by pH adjustment with lime (CaO). *Chemosphere* [Internet]. 2017;173:494–501. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.025>
- (37). Cassman NA, Lourenço KS, Do Carmo JB, Cantarella H, Kuramae EE. Genome-resolved metagenomics of sugarcane vinasse bacteria. *Biotechnol Biofuels* [Internet]. 2018;11(1):1–16. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1036-9>
- (38). Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC]. Norma Técnica Colombiana [NTC] 5167. Icontec Int [Internet]. 2011;(571):1–51. www.icontec.org
- (39). Corporacion Autonoma Regional del Valle del Cauca. Resolucion 0081 de 2012 - Reglamentacion Vinazas. 2012. p. 27.
- (40). Paerl HW. Coastal eutrophication in relation to atmospheric nitrogen deposition: Current perspectives. *Ophelia*. 1995;41(1):237–59.
- (41). Carvalho JLN, Oliveira BG, Cantarella H, Chagas MF, Gonzaga LC, Lourenço KS, et al. Implications of regional N₂O–N emission factors on sugarcane ethanol emissions and granted decarbonization certificates. *Renew Sustain Energy Rev*. 2021;149(July 2020).
- (42). Lisboa CC, Butterbach-Bahl K, Mauder M, Kiese R. Bioethanol production from sugarcane and emissions of greenhouse gases - known and unknowns. *GCB Bioenergy*. 2011;3(4):277–92.
- (43). Siqueira Neto M, Galdos M V., Feigl BJ, Cerri CEP, Cerri CC. Direct N₂O emission factors for synthetic N-fertilizer and organic residues applied on sugarcane for bioethanol production in Central-Southern Brazil. *GCB Bioenergy*. 2016;8(2):269–80.
- (44). Lourenço KS, Rossetto R, Vitti AC, Montezano ZF, Soares JR, Sousa R de M, et al. Strategies to mitigate the nitrous oxide emissions from nitrogen fertilizer applied with organic fertilizers in sugarcane. *Sci Total Environ* [Internet]. 2019;650:1476–86. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.037>
- (45). Yang L, Deng Y, Wang X, Zhang W, Shi X, Chen X, et al. Global direct nitrous oxide emissions from the bioenergy crop sugarcane (*Saccharum* spp. inter-specific hybrids). *Sci Total Environ* [Internet]. 2021;752:141795. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141795>
- (46). De Oliveira BG, Carvalho JLN, Cerri CEP, Cerri CC, Feigl BJ. Soil greenhouse gas fluxes from vinasse application in Brazilian sugarcane areas. *Geoderma*. 2013;200–201:77–84.
- (47). Cardona C, Machuca-Martínez F, Marriaga-cabrales N. Treatment of vinasse by using electro-dissolution and chemical flocculation. *Ing y Compet*. 2013;15(2):191–200.
- (48). Francisca Kalavathi D, Uma L, Subramanian G. Degradation and metabolization of the pigment - Melanoidin in distillery effluent by the marine cyanobacterium *Oscillatoria boryana* BDU 92181. *Enzyme Microb Technol*. 2001;29(4–5):246–51.
- (49). Karimi S, Soofiani NM, Lundh T, Mahboubi A, Kiessling A, Taherzadeh MJ. Evaluation of filamentous fungal biomass cultivated on vinasse as an alternative nutrient source of fish feed: Protein, lipid, and mineral composition. *Fermentation*. 2019;5(4).
- (50). de Paula CBC, de Paula-Elias FC, Rodrigues MN, Coelho LF, de Oliveira NML, de Almeida AF, et al. Polyhydroxyalkanoate Synthesis by *Burkholderia glumae* into a Sustainable Sugarcane Biorefinery Concept. *Front Bioeng Biotechnol*. 2021;8(January):1–14.

- (51). Magrini FE, de Almeida GM, da Maia Soares D, Fuentes L, Etchebehere C, Beal LL, et al. Effect of different heat treatments of inoculum on the production of hydrogen and volatile fatty acids by dark fermentation of sugarcane vinasse. *Biomass Convers Biorefinery*. 2020;
- (52). Djalma Nunes Ferraz Júnior A, Wenzel J, Etchebehere C, Zaiat M. Effect of organic loading rate on hydrogen production from sugarcane vinasse in thermophilic acidogenic packed bed reactors. *Int J Hydrogen Energy*. 2014 Oct 13;39(30):16852–62.
- (53). Koyama MH, Araújo Júnior MM, Zaiat M, Ferraz Júnior ADN. Kinetics of thermophilic acidogenesis of typical Brazilian sugarcane vinasse. *Energy*. 2016;116:1097–103.
- (54). Fedebiocombustibles. Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia [Internet]. 2019 [cited 2020 May 28]. [https://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-produccion-titulo-Alcohol_Carburante_\(Etanol\).htm](https://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-produccion-titulo-Alcohol_Carburante_(Etanol).htm)
- (55). Rueda-Ordóñez DiA, Leal MRLV, Bonomi A, Cortez LAB, Cavalett O, Rincón JM. Simulating scenarios for compost and vinasse use to improve the economics and environmental aspects of representative Colombian sugarcane production systems. *Renew Agric Food Syst*. 2020;35(5):579–93.
- (56). Dirbeba MJ, Brink A, Zevenhoven M, Demartini N, Lindberg D, Hupa L, et al. Characterization of Vinasse for Thermochemical Conversion - Fuel Fractionation, Release of Inorganics, and Ash-Melting Behavior. *Energy and Fuels*. 2019;33(7):5840–8.
- (57). Giraldo, M.V; López PL. Unicellular Protein Production from Agro-Industrial Waste. *VIRTUALPRO*. 2008;
- (58). Goyes A, Bolaños G. Un estudio preliminar sobre el tratamiento de vinazas en agua supercrítica. *XXIII Congr Colomb Ing Química*. 2005;(1):13.
- (59). Castro LEN, Santos JVF, Fagnani KC, Alves HJ, Colpini LMS. Evaluation of the effect of different treatment methods on sugarcane vinasse remediation. *J Environ Sci Heal - Part B Pestic Food Contam Agric Wastes* [Internet]. 2019;54(9):791–800. <https://doi.org/10.1080/03601234.2019.1669981>
- (60). Vinasse - wizdom.ai [Internet]. 2021 [cited 2021 Apr 18]. <https://www.wizdom.ai/topic/vinasse/8936782>