

Generación eléctrica con biogás de vinaza de caña en Colombia

Electricity generation with biogas from sugarcane vinasse in Colombia

Jorge E. Infante-Cuan¹  Sergio D. Martínez-Campo¹  María M. Sierra-Carrillo¹ 
Leandro R. Rozo-Martínez²  Patricia Milena Muñoz Prada² 

¹Fundação Universidade Federal do ABC, Santo André, Brasil.

²Universidad Cooperativa de Colombia UCC, Santa Marta, Colombia.

³Corporación Universitaria Minuto de Dios UNIMINUTO, Colombia.

⁴Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia.

Resumen

Introducción: El consumo de bioenergía ha experimentado un aumento en los últimos años, lo que ha contribuido a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En particular, los residuos de caña de azúcar han sido evaluados en diversos estudios como una fuente potencial de energía renovable. La industria azucarera genera principalmente azúcar y etanol, y por cada litro de etanol producido, se generan entre 10 y 15 litros de vinaza. Este residuo es altamente contaminante y, aunque tradicionalmente se utiliza en fertirrigación o se desecha, presenta un alto potencial para la producción de biogás.

Objetivos: El objetivo principal de este trabajo fue evaluar el potencial de generación de electricidad a partir de la vinaza producida en plantas de etanol en Colombia, así como calcular las emisiones de CO₂ evitadas al sustituir el uso de electricidad local mediante esta fuente de energía renovable.

Materiales y Métodos: Se evaluaron cuatro escenarios distintos en función del porcentaje de jugo de caña utilizado para la producción de etanol. Para cada escenario, se calculó el potencial de generación eléctrica a partir del biogás producido por la biodigestión de vinaza. Además, se estimaron las emisiones de CO₂ evitadas mediante la comparación con la electricidad proveniente de fuentes locales convencionales.

Resultados: Los resultados obtenidos en los diferentes escenarios muestran que el potencial de generación eléctrica varía entre 249.840,36 MWh/año y 437.156,37 MWh/año, dependiendo del porcentaje de jugo de caña utilizado para la producción de etanol. Las emisiones de CO₂ evitadas fluctúan entre 31.475,26 y 55.081,70 toneladas de CO₂/año. Estos resultados indican que la generación de electricidad a partir de la vinaza tiene un impacto significativo en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con la electricidad local convencional.

Conclusiones: La valorización de la vinaza de caña de azúcar para la generación de electricidad representa un avance significativo hacia la producción de energía eléctrica limpia en el sector azucarero. Los resultados muestran que este enfoque no solo tiene un alto potencial para la generación de energía renovable, sino que también contribuye de manera importante a la reducción de las emisiones de CO₂, lo que mejora la sostenibilidad del sector.

Palabras clave: Metano, biodigestor, energía, producción sostenible, fuente renovable, sostenibilidad

Abstract

Introduction: The consumption of bioenergy has increased in recent years, contributing to the reduction of greenhouse gas (GHG) emissions. In particular, sugarcane waste has been evaluated in several studies as a potential source of renewable energy. The sugar industry primarily produces sugar and ethanol, and for each liter of ethanol produced, between 10 and 15 liters of vinasse are generated. This residue is highly polluting and, although it is traditionally used for fertigation or disposed of, it holds significant potential for biogas production.

Objectives: The main objective of this study was to assess the electricity generation potential from vinasse produced in ethanol plants in Colombia and calculate the CO₂ emissions avoided by substituting local electricity use with this renewable energy source.

Materials and Methods: Four different scenarios were evaluated based on the percentage of sugarcane juice used for ethanol production. For each scenario, the electricity generation potential from biogas produced by vinasse biodigestion was calculated. Additionally, the CO₂ emissions avoided were estimated by comparing the use of vinasse-based electricity with local conventional electricity sources.

Results: The results from the different scenarios show that the electricity generation potential ranges between 249,840.36 MWh/year and 437,156.37 MWh/year, depending on the percentage of sugarcane juice used for ethanol production. CO₂ emissions avoided ranged from 31,475.26 to 55,081.70 tons of CO₂/year. These results indicate that electricity generation from vinasse has a significant impact on reducing greenhouse gas emissions compared to local conventional electricity.

Conclusions: The valorization of sugarcane vinasse for electricity generation represents a significant step forward in the production of clean electricity in the sugar sector. The results show that this approach not only has high potential for renewable energy generation but also contributes significantly to reducing CO₂ emissions, enhancing the sustainability of the sector.

Keywords: Methane, biodigester, energy, sustainable production, renewable source, Sustainability.

¿Cómo citar?

Infante-Cuan JE, Martínez-Campo SD, Sierra-Carrillo MM, Rozo-Martínez LR, Muñoz P. Generación eléctrica con biogás de vinaza de caña en Colombia. Ingeniería y Competitividad, 2025, 27(2)e-20214813

<https://doi.org/10.25100/iyc.v27i2.14813>

Recibido: 19/03/25

Revisado: 09/04/25

Aceptado: 28/04/25

Español Online: 19/09/25

Correspondencia



infante.cuan@ufabc.edu.br



CrossMark



Contribución a la literatura

El estudio se realizó para evaluar el potencial de generación de electricidad a partir del biogás producido mediante la biodigestión anaeróbica de la vinaza, un subproducto altamente contaminante generado en la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar en Colombia. La motivación principal es doble: (1) encontrar una alternativa sostenible para el tratamiento de la vinaza, cuya disposición inadecuada puede causar graves impactos ambientales, como la contaminación de las aguas subterráneas y la desertificación del suelo; y (2) contribuir a la transición energética del país mediante la recuperación de residuos agroindustriales, en consonancia con los principios de la bioeconomía circular y los compromisos climáticos de Colombia.

Los resultados más relevantes incluyen:

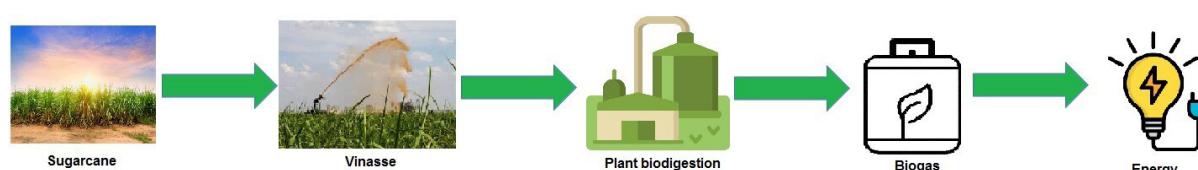
Se analizaron cuatro escenarios con diferentes porcentajes de jugo de caña de azúcar utilizado para la producción de etanol (40 %, 50 %, 60 % y 70 %). Se estimó que la generación anual de electricidad podría oscilar entre 249.840 MWh/año (escenario 1) y 437.156 MWh/año (escenario 4), lo que representa entre el 0,31 % y el 0,54 % del consumo eléctrico nacional de Colombia en 2022.

Se estimó que las emisiones de CO₂ evitadas oscilarían entre 31.475 y 55.081 toneladas al año, equivalentes al 0,018 % y el 0,031 % de la meta nacional de reducción de emisiones para 2030.

Estos resultados contribuyen a lo siguiente:

Este trabajo proporciona evidencia técnica para respaldar las políticas públicas de valorización de residuos, planificación energética y estrategias de mitigación del cambio climático. También proporciona una base metodológica replicable para otros países o regiones con una producción significativa de caña de azúcar. Finalmente, promueve la transición hacia una bioeconomía circular, donde los residuos industriales se transforman en recursos energéticos, reduciendo tanto el impacto ambiental como la dependencia de los combustibles fósiles.

Graphical Abstract



Introducción

La sociedad actual se enfrenta a problemas como la generación y acumulación de residuos, el cambio climático y el agotamiento de los combustibles fósiles, por lo que se está desarrollando e implementando un concepto llamado bioeconomía circular (1). Este concepto se define como la valorización de subproductos para la producción de productos de valor añadido a partir de biomasa con una reducción de la generación de residuos (2). Hoy en día, entre las muchas fuentes de energía renovables, la caña de azúcar es uno de los cultivos más importantes del mundo y un importante contribuyente a la diversificación energética y al desarrollo sostenible (3).

Este cultivo se ha extendido por todo el mundo, particularmente en países tropicales y subtropicales (4). Se estima que la producción de caña de azúcar rondará los 2.100 millones de toneladas en 2025 (5). En Colombia, entre 2010 y 2019, la superficie sembrada de caña de azúcar superó las 200.000 hectáreas, con un máximo de 243.232 en 2017 y un mínimo de 241.205 en 2019 (6). En los últimos años, la industria de la caña de azúcar en Colombia ha avanzado hacia la valorización de residuos industriales (7). Por ejemplo, en 2022, la agroindustria de la caña de azúcar colombiana tuvo una producción de: 23 millones de toneladas de caña de azúcar, 2,09 millones de toneladas de azúcar, 1.745 GWh de energía producida a partir del bagazo de caña de azúcar y 347 millones de litros de bioetanol a partir de la caña de azúcar (8). Desde la perspectiva de la bioeconomía circular, la generación de subproductos y residuos del procesamiento de la caña de azúcar ha planteado algunas preocupaciones ambientales (9), debido al hecho de que el procesamiento de la caña de azúcar genera numerosos desechos, incluidos el bagazo y la vinaza (5,10).

La producción de bioetanol genera un residuo llamado vinaza. Este residuo se produce en el proceso de fermentación-destilación del bioetanol a una tasa de entre 10 y 15 L por litro de bioetanol producido (11–13). Sus principales características son su color marrón oscuro (14), es altamente contaminante debido a su bajo pH (alrededor de 4), alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO) (45.000 a 60.000 mg/L) (15), alta demanda química de oxígeno (DQO) (71.400 a 134.400 mg/L) (16), alto contenido en potasio (3.600 mg/L) y cantidades significativas de nitrógeno, fósforo y micronutrientes (17,18). Las prácticas actuales para el manejo de la vinaza incluyen: compostaje, fertirrigación, producción de energía, medio de cultivo de microalgas y materia prima para la producción ganadera y avícola (14).

Entre ellas, la más común es la fertirrigación, que consiste en la aplicación directa de vinaza sin tratar en la naturaleza al suelo (11). Esta técnica es ampliamente aplicada debido a sus bajos costos de inversión y mantenimiento en comparación con otras alternativas (19). Sin embargo, la eliminación de vinaza en la naturaleza puede provocar la contaminación de las aguas subterráneas y la desertificación del suelo debido al alto contenido de DQO (18,20). Por lo tanto, es de gran importancia la implementación de tecnologías para el uso, tratamiento y disposición adecuada de la vinaza, con el objetivo de mejorar su uso y/o utilizarla para obtener otros productos de interés económico (13,21,22).

Actualmente se están evaluando alternativas para gestionar e incluso valorizar este subproducto (23). Una alternativa interesante al tratamiento de la vinaza es la digestión anaeróbica, que

permite recuperar parte de su contenido energético gracias a la producción de biogás (24). Este proceso biológico, bien documentado en la literatura, degrada una alta concentración de materia orgánica en ausencia de oxígeno, a través de cuatro etapas principales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (25,26). El proceso de digestión anaeróbica para la producción de biogás utilizando vinaza de caña de azúcar como materia prima tiene la ventaja de degradar una alta concentración de materia orgánica, además, es un enfoque bien documentado y prometedor para la bioeconomía y la bioenergía debido a su amplia variedad de aplicaciones (27,28). El uso de la vinaza como sustrato en el proceso de digestión anaeróbica ha sido ampliamente estudiado (16,29,30). Los principales productos finales que se obtienen de la digestión anaeróbica son el biogás y los fertilizantes, que pueden utilizarse para la recuperación de energía y la enmienda del suelo, respectivamente (1).

El biogás se compone principalmente de metano (CH₄) (45-70%), dióxido de carbono (CO₂) (25-55%) y trazas de otros compuestos (nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, azufre y vapor de agua) (31). Se puede utilizar como combustible alternativo, sustituyendo al bagazo como fuente de energía en calderas para la producción de electricidad y, si se mejora (contenido de metano >97%, v/v), se puede utilizar como combustible en vehículos o inyectar en redes de gas natural (32-34).

La eficiencia de la producción de biogás depende de factores como la temperatura, el pH, la relación carbono-nitrógeno (C/N) y la presencia de inhibidores como sulfatos o metales pesados (35). Se utilizan principalmente dos rangos de temperatura: mesófilo (35-40 °C) y termófilo (50-60 °C). Aunque las condiciones termófilas permiten mayores rendimientos de biogás, requieren mayores insumos energéticos (36). Mantener unas condiciones óptimas es clave para evitar la inhibición microbiana y maximizar la producción de biogás (37).

La implementación de la digestión anaeróbica para valorizar la vinaza también contribuye significativamente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El uso del biogás evita las emisiones de metano procedentes de la descomposición anaeróbica natural de la vinaza y sustituye a las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles (38). Además, la integración de sistemas de digestión anaeróbica en la agroindustria azucarera puede fortalecer su autosuficiencia energética, reducir costos y generar ingresos adicionales a través de la comercialización de excedentes de electricidad o biometano (39). Estas acciones están alineadas con las políticas nacionales e internacionales de sostenibilidad, mejorando la competitividad del sector (40).

Con base en lo anterior, el objetivo de este estudio fue determinar el potencial de generación de electricidad a partir de biogás proveniente de la biodigestión de la vinaza producida durante la destilación de bioetanol en el sector energético azucarero en Colombia, y calcular la cantidad de emisiones evitadas al no utilizar electricidad local. Por lo tanto, la evaluación de la generación de electricidad a partir de biogás derivado de la biodigestión de la vinaza de caña de azúcar podría ser una ruta tecnológica para fortalecer el concepto de bioeconomía circular.

Material y métodos

La producción primaria de caña de azúcar en Colombia se ubica en 30 municipios del Valle del Cauca, 9 en el Cauca, 5 en Caldas y otros 5 en Risaralda, así como 1 en el Quindío. Gracias al clima privilegiado de la región, y a diferencia de lo que ocurre en el resto del mundo (con excepción de Hawái y el norte de Perú), la caña de azúcar se puede sembrar y cosechar durante todos los meses del año (8). La producción agroindustrial de azúcar se lleva a cabo en 12 ingenios con una capacidad instalada de molienda de 94.000 toneladas por día, donde 6 de los 12 ingenios también producen bioetanol.

Tabla 1. Capacidad de molienda instalada para los diferentes molinos

Destilería	Capacidad de molienda instalada (t/d)
Riopaila Castilla*	17,600
Incauca*	17,000
Manuelita*	11,500
Providencia*	10,000
Mayagüez*	10,000
Central Castilla	8,000
La Cabaña	5,200
Risaralda*	5,000
Pichichí	4,400
Carmelita	2,500
San Carlos	2,000
María Luisa	800
Total	94,000

* Producir bioetanol

Una de las características más importantes del sector azucarero-energético es la posibilidad de producir azúcar o bioetanol de forma flexible en una misma planta industrial. Dependiendo de las demandas del mercado, la producción de azúcar y bioetanol tiene un impacto en la producción de vinaza y, en consecuencia, en el volumen de biogás resultante de su biodigestión.

Durante el procesamiento de la caña de azúcar, es necesario definir la cantidad de cada producto a producir. Esta definición tiene lugar inmediatamente después de la extracción del jugo de caña de azúcar, con la determinación de cuánto jugo se utilizará para la producción de azúcar y cuánto se utilizará para la producción de bioetanol, es decir, en este punto se define la mezcla de producción de la planta. La misma se convierte en un factor de interferencia directa en el potencial de producción de electricidad a partir del biogás extraído de la vinaza (41).

Para desarrollar este trabajo se realizó una revisión bibliográfica, incluyendo artículos técnicos, libros, sitios web e informes de la industria. Para el desarrollo de las simulaciones se utilizó una hoja de cálculo de estimación secuencial utilizando el software Excel. La metodología utilizada para calcular el potencial de generación de electricidad a partir de biogás siguió el mismo método utilizado por (42,43). El desarrollo de los cálculos se basó en la capacidad instalada de molienda de molinos productores de bioetanol en Colombia. En el desarrollo de las simulaciones se consideraron cuatro escenarios de producción de electricidad a partir de biogás derivado de la biodigestión de la vinaza de caña de azúcar en Colombia:

- a) Potencial de producción de energía eléctrica cuando el 40% del jugo de caña se utiliza para la producción de etanol (Escenario 1).
- b) Potencial de producción de energía eléctrica cuando el 50% del jugo de caña se utiliza para la producción de etanol (Escenario 2).
- c) Potencial de producción de energía eléctrica cuando el 60% del jugo de caña se utiliza para la producción de etanol (Escenario 3).
- d) Potencial de producción de energía eléctrica cuando el 70% del jugo de caña se utiliza para la producción de etanol (Escenario 4).

La selección de estos porcentajes responde a varias razones técnicas y estratégicas. En primer lugar, estos valores permiten modelar diferentes niveles de industrialización en el sector azucarero, reflejando tanto las prácticas actuales como las posibles expansiones de la capacidad de producción de etanol en Colombia. Además, el estudio busca analizar cómo el aumento de la proporción de jugo de caña de azúcar utilizado para etanol impactaría directamente en la cantidad de vinaza disponible para la biodigestión y, en consecuencia, en el potencial de generación de electricidad y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Este enfoque por fases permite evaluar la naturaleza progresiva de los beneficios energéticos y ambientales, proporcionando insumos valiosos para la formulación de políticas públicas, la planificación energética y la promoción de tecnologías de aprovechamiento de desechos agroindustriales como estrategias para cumplir con los compromisos climáticos nacionales.

Potencial de generación de energía eléctrica

El volumen de producción de etanol se calculó a partir de la ecuación 1.

$$VED = (TD * Mix) * TEP \quad (1)$$

Dónde:

VED = Volumen de producción de etanol m³/d; TD = capacidad de molienda de caña de azúcar t/d;
Mezcla = porcentaje de etanol a producir y TEP = tasa de producción de etanol producido (litros) por tonelada de caña de azúcar.

El volumen de vinaza producida se calculó a partir de la ecuación 2.

$$VVG = VED * TPV \quad (2)$$

Dónde:

VVG = Volumen de vinaza producido en m³/d y TPV = tasa de producción en m³ de vinaza por m³ de etanol producido.

El contenido de carga orgánica en la vinaza viene dado por la ecuación 3.

$$CO = VVG * COD \quad (3)$$

Dónde:

CO = carga orgánica (kg DQO/d) y DQO = demanda química de oxígeno en mg/l.

La producción de biogás a partir de biodigestión anaeróbica utilizando un biodigestor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) viene dada por la ecuación 4.

$$PB = CO * E * F \quad (4)$$

Dónde:

PB = Producción de biogás en Nm³/d; E = eficiencia de eliminación de DQO del proceso y F = factor de conversión de biogás por DQO eliminado;

La cantidad de energía procedente del biogás se puede calcular a partir de la ecuación 5.

$$GEB = PB * LCBP \quad (5)$$

Dónde:

GEB = cantidad de energía de biogás en kcal/d; y LCBP = menor poder calorífico del biogás en kcal/Nm³.

Es importante tener en cuenta que los cálculos de la producción de biogás, la carga orgánica y la cantidad de energía de biogás están referenciados a la producción diaria. Para el desarrollo de este estudio se asumió que la planta funcionaba los 365 días del año. Las tres formas más comunes de utilizar el biogás de vinaza para obtener energía son: a) generación de energía térmica; b) uso automotriz; y c) generación de energía eléctrica. Para este estudio, el objetivo es identificar el potencial de generación de electricidad a partir del biogás vinaza, por lo que no se analizaron las otras formas de aprovechamiento de esta fuente de energía.

La cantidad de energía eléctrica que se producirá por la combustión del biogás depende del tipo de turbina/equipo que se utilizará en el proceso y viene dada por la ecuación 6.

$$PEEB = GEB * E1 \quad (6)$$

Dónde:

PEEB = cantidad de energía eléctrica generada a partir de la combustión de biogás en kcal/d y E1 = eficiencia de la turbina de gas.

Emisiones de GEI evitadas

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) evitadas indican la reducción potencial de las emisiones de GEI de la instalación de producción, teniendo en cuenta la producción de metano para estimar la reducción de las emisiones de GEI. Las emisiones de GEI evitadas de la electricidad se estimaron utilizando la ecuación 7 (44).

$$A_{GHG} = PEEB * EF \quad (7)$$

Dónde:

AGHG = emisiones evitadas y EF: factor de emisión en toneladas de CO₂/MWh para la generación eléctrica colombiana en 2021.

Resultados y discusión

Debido a la dificultad de obtener algunos de los datos necesarios para realizar los cálculos basados en la naturaleza y el proceso de producción de biogás vinaza, fue necesario predefinir algunos parámetros. Las principales variables utilizadas para estimar la cantidad de etanol, la cantidad de vinaza, la cantidad de biogás y la cantidad de energía eléctrica producida por la combustión de biogás se encuentran en la tabla 2

Tabla 2. Parámetros utilizados para el estudio

Variable	Valor
Tasa de producción de etanol	0,08 L/tonelada de caña de azúcar (41).
Tasa de producción de vinaza	11,5 m ³ de vinaza/m ³ de etanol (41).
Demanda química de oxígeno	40.000 mg/L (45).
Eficiencia de la eliminación de DQO en el proceso	70%
Factor de conversión de biogás por DQO eliminado	0,45 m ³ /kg
Menor poder calorífico del biogás	5.100 kcal/Nm ³ (45).
Eficiencia de las turbinas de gas	35% (46).
Factor de conversión	0,001163 kWh/kcal.
Factor de emisión	0,126 kg CO ₂ /kWh (47).

Utilizando las ecuaciones 1 a 6 y la información de la Tabla 1, fue posible calcular las variables necesarias para estimar la cantidad de energía eléctrica producida por la combustión de biogás. En las Tablas 3 - 6 se muestran los resultados del cálculo de las variables utilizadas en esta etapa de la investigación para los 4 escenarios estudiados.

Tabla 3. Resultados para el escenario 1

Destilería	VED (m ³ /d)	VVG (m ³ /d)	CO (kg DQO/d)	PB (Nm ³ /d)	GEB (kcal/d)	PEEB (MWh/d)
Riopaila Castilla	563.2	6,470.8	259,072	81,607.68	416,199,168	169.41
Incauca	544	6,256	250,240	78,825,6	402,010,560	163.64
Manuelita	368	4,232	169,280	53,323.2	271,948,320	110.70
Providencia	320	3,680	147,200	46,368	236,476,800	96.26
Mayagüez	320	3,680	147,200	46,368	236,476,800	96.26
Risaralda	160	1,840	73,600	23,184	118,238,400	48.13

Tabla 4. Resultados para el escenario 2

Destilería	VED (m ³ /d)	VVG (m ³ /d)	CO (kg DQO/d)	PB (Nm ³ /d)	GEB (kcal/d)	PEEB (MWh/d)
Riopaila Castilla	704	8,096	323,840	102,009.6	520,428,960	211.77
Incauca	680	7,820	312,800	98,532	502,513,200	204.55
Manuelita	460	5,290	211,600	66,654	339,935,400	138.37
Providencia	400	4,600	184,000	57,960	295,596,000	120.32
Mayagüez	400	4,600	184,000	57,960	295,596,000	120.32
Risaralda	200	2,300	92,000	28,980	147,798,000	60.16

El potencial de generación eléctrica para el Escenario 1 fue de 249.8403,64 MWh/año, el Escenario 2 puede producir 312.254,55 MWh/año, lo que supone un 25% más que en el Escenario 1. El Escenario 3 puede producir 374.705,46 MWh/año, un 20% y un 50% superior al Escenario 2 y al Escenario 1 respectivamente. Por último, el escenario 4 puede producir 437.156,37 MWh/año, lo que supone un 75%, 40% y un 16,7% superior a los escenarios 1, 2 y 3 respectivamente. En la Figura 1 se muestra el potencial de generación eléctrica para los diferentes escenarios estudiados.

Tabla 5. Resultados para el escenario 3

Destilería	VED (m³/d)	VVG (m³/d)	CO (kg DQO/d)	PB (Nm³/d)	GEB (kcal/d)	PEEB (MWh/d)
Riopaila Castilla	844.80	9,715.20	388,608	122,411.52	624,298,752	254.12
Incauca	816	9,384	375,360	118,298.40	603,015,840	245.46
Manuelita	552	6,384	253,920	79,984.80	407,922,480	166.04
Providencia	480	5,520	220,800	69,552	354,715,200	144.39
Mayagüez	480	5,520	220,800	69,552	354,715,200	144.39
Risaralda	240	2,760	110,400	34,776	177,357,600	72.19

Tabla 6. Resultados para el escenario 4

Destilería	VED (m³/d)	VVG (m³/d)	CO (kg DQO/d)	PB (Nm³/d)	GEB (kcal/d)	PEEB (MWh/d)
Riopaila Castilla	985.6	11,344.4	453,376	142,813.44	728,348,544	296.47
Incauca	952	10,948	437,920	137,944.8	703,518,480	286.37
Manuelita	644	7,406	296,240	93,315.6	475,909,560	193.72
Providencia	560	6,440	257,600	81,144	413,834,400	168.45
Mayagüez	560	6,440	257,600	81,144	413,834,400	168.45
Risaralda	280	3,220	128,800	40,572	206,917,200	84.23

La población en Colombia en 2022 fue de 51.609.000 y el consumo per cápita de electricidad fue de 1.568,3 kWh, por lo que la electricidad generada en los escenarios 1, 2, 3 y 4 podría abastecer el 0,31%, 0,39%, 0,46% y 0,54% respectivamente de la demanda de consumo eléctrico en Colombia. En un estudio realizado por Melo et al. (48) se analizó el potencial eléctrico de la vinaza derivada del biogás en el estado de São Paulo, estimando una producción de 9.928 GWh/año en un escenario conservador y de 15.675 GWh/año en un escenario optimizado. Esto representa aproximadamente el 0.0064% y el 0.0101% del potencial de generación eléctrica instalado en el estado, respectivamente. Marcucci y cols. (49) estimó que la digestión y co-digestión de la vinaza en el estado de Paraná podría generar entre 36.695 y 47.245 MWh/año, lo que representa entre el 0,1% y el 0,13% del consumo eléctrico del estado.

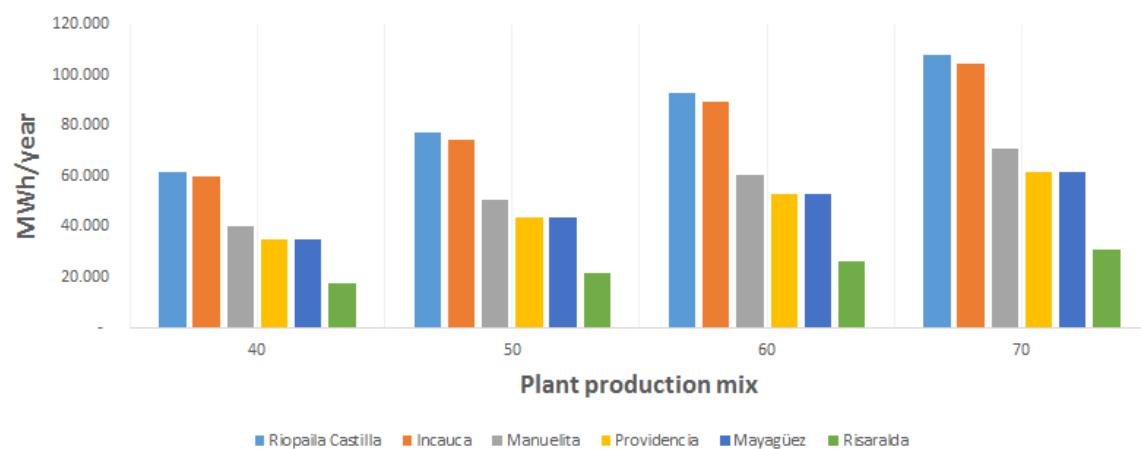


Figura 1. Producción de energía eléctrica para diferentes escenarios

En la Tabla 6 se muestran las emisiones anuales de CO₂ evitadas para todos los escenarios estudiados.

Tabla 6. Emisiones de GEI evitadas para los escenarios estudiados.

Parámetros	Unidades	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Electricidad de GEI evitada	Tonelada CO ₂ /año	31,475.26	39,344.07	47,212.89	55,081.70

Para 2030, Colombia se ha comprometido a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un 51% como parte del Acuerdo de París, lo que significa que Colombia tiene como objetivo emitir un máximo de 169,4 millones de toneladas de dióxido de carbono para ese año, y para 2050 se espera alcanzar la neutralidad de carbono para 2050. Los resultados del estudio muestran que las emisiones de dióxido de carbono evitadas para los escenarios estudiados varían entre 31.475,26 y 55.081,70 toneladas de dióxido de carbono al año, equivalentes a 0,018 y 0,031% de la meta propuesta por el gobierno colombiano. El estudio de Bernal y cols. (50) evaluó la viabilidad económica, el potencial energético y evitó el CO₂ emisiones asociadas a la combustión de biogás producido a partir de vinaza en Brasil. Los resultados mostraron que la generación de electricidad a partir de biogás vinaza podría evitar más del 2,12% del CO₂ de la industria nacional₂. Emisiones.

Conclusiones

El potencial de generación de electricidad a partir de biogás derivado de la biodigestión de la vinaza de caña de azúcar es una fuente de energía renovable, que reduce la presión sobre las fuentes no renovables. La electricidad producida en el escenario 4 (cuando el 70% del jugo de la caña de azúcar se utilizará para la producción de etanol) es de 437.156,37 MWh/año, lo que podría sustituir el 0,54% de la demanda eléctrica en Colombia. Las emisiones de GEI evitadas con la implementación de la digestión anaerobia para el tratamiento de la vinaza y la posterior producción de energía eléctrica representan entre el 0,018 y el 0,031% de la meta propuesta por el gobierno colombiano para reducir las emisiones de GEI. El trabajo futuro puede centrarse en la evaluación

de objetivos económicos y/o en la evaluación de otras materias primas para la producción de electricidad.

Declaración de contribución de autoría de CreditT

Conceptualización - Ideas: Jorge Eduardo Infante Cuan, Sergio Daniel Martínez Campo, Patricia Milena Muñoz Prada. **Curación de datos:** Jorge Eduardo Infante Cuan, María Margarita, Rosa Sierra Carrillo. **Ánálisis formal:** Jorge Eduardo Infante Cuan, Sergio Daniel Martínez Campo. **Investigación:** Jorge Eduardo Infante Cuan, Leandro Raúl Rozo Martínez. **Metodología:** Jorge Eduardo Infante Cuan, Sergio Daniel Martínez Campo, María Margarita Rosa Sierra Carrillo. **Dirección de Proyecto:** Jorge Eduardo Infante Cuan, Sergio Daniel Martínez Campo. **Recursos:** Jorge Eduardo Infante Cuan, Sergio Daniel Martínez Campo. **Software:** Jorge Eduardo Infante Cuan, Leandro Raúl Rozo Martínez. **Supervisión:** Jorge Eduardo Infante Cuan, Sergio Daniel Martínez Campo. **Validación:** Jorge Eduardo Infante Cuan, María Margarita Rosa Sierra Carrillo, Patricia Milena Muñoz Prada. **Visualización:** Jorge Eduardo Infante Cuan. **Redacción - borrador original - Elaboración:** Jorge Eduardo Infante Cuan, Leandro Raúl Rozo Martínez, Patricia Milena Muñoz Prada. **Redacción - revisión y edición - Elaboración:** Jorge Eduardo Infante Cuan, Sergio Daniel Martínez Campo, María Margarita Rosa Sierra Carrillo, Leandro Raúl Rozo Martínez, Patricia Milena Muñoz Prada.

Financiación: no declara. **Conflicto de intereses:** no declara. **Aspecto ético:** no declara.

References

1. Tena M, Buller LS, Sganzerla WG, Berni M, Forster-Carneiro T, Solera R, et al. Techno-economic evaluation of bioenergy production from anaerobic digestion of by-products from ethanol flex plants. 2022; 309:122171. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122171>
2. Stegmann P, Londo M, Junginger M. The circular bioeconomy: Its elements and role in European bioeconomy clusters. Resources, Conservation & Recycling: X , 2020;6:100029. <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2019.100029>
3. Bechara R, Gomez A, Saint-Antonin V, Schweitzer JM, Maréchal F, Ensinas A. Review of design works for the conversion of sugarcane to first and second-generation ethanol and electricity. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018; 91:152-64. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.020>
4. Wani AK, Rahayu F, Fauziah L, Suhara C. Advances in safe processing of sugarcane and bagasse for the generation of biofuels and bioactive compounds. Journal of Agriculture and Food Research. 2023;12:100549. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100549>
5. Almeida RPA, Cordeiro GC. Sustainable approach to simultaneously improve the pozzolanic activity of sugarcane bagasse ash and the vinasse fertilization potential. Cleaner Engineering and Technology 2023;13:100617. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100617>
6. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. [citado 6 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://www.minagricultura.gov.co/paginas/default.aspx>

7. Rueda-Ordóñez DA, 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.* 2019;35(5):579-93. <https://doi.org/10.1017/S1742170519000188>
8. Asocaña. Asocaña - Sector Agroindustrial de la Caña. 2023 [citado 7 de octubre de 2024]. Sector Agroindustrial de la Caña. Disponible en: <https://asocana.org/publico/info.aspx?Cid=215>
9. Molina-Cortés A, Quimbaya M, Toro-Gomez A, Tobar-Tosse F. Bioactive compounds as an alternative for the sugarcane industry: Towards an integrative approach. *Helion.* 2023;9(2):e13276. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13276>
10. Thomaz EL, Marcatto FS, Antoneli V. Soil erosion on the Brazilian sugarcane cropping system: An overview. *Geography and Sustainability.* 2022;3(2):129-38. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2022.05.001>
11. Bettani SR, De Oliveira Ragazzo G, Leal Santos N, Kieckbusch TG, Gaspar Bastos R, Soares MR, et al. Sugarcane vinasse and microalgal biomass in the production of pectin particles as an alternative soil fertilizer. *Carbohydrate Polymers.* 2019; 203:322-30. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.09.041>
12. Moraes BS, Junqueira TL, Pavanello LG, Cavalett O, Mantelatto PE, Bonomi A, et al. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense? *Applied Energy.* 2014; 113:825-35. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.018>
13. Junior JA, Vieira YA, Cruz IA, Da Silva Vilar D, Aguiar MM, Torres NH, et al. Sequential degradation of raw vinasse by a laccase enzyme producing fungus Pleurotus sajor-caju and its ATPS purification. *Biotechnology Reports* 2020; 25: e00411. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00411>
14. Montoya G, Gutierrez MI, Giraldo JD, Jaramillo LD, Ruiz-Sandoval J, Orozco S, et al. Sustainable sugarcane vinasse biorefinement for trans-aconitic acid-based biopolymer synthesis and bioenergy generation. *Bioresource Technology Reports.* 2021;15:100786. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100786>
15. Soto MF, Diaz CA, Zapata AM, Higuita JC. BOD and COD removal in vinasses from sugarcane alcoholic distillation by Chlorella vulgaris: Environmental evaluation. *Biochemical Engineering Journal.* 2021;176:108191. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108191>
16. Bayu AI, Lestary RA, Dewayanto N, Mellyanawaty M, Wicaksono A, Alvania Kartika RW, et al. Kinetic study of thermophilic anaerobic digestion of sugarcane vinasse in a single-stage continuous stirred tank reactor. *Results in Engineering.* 2022; 14:100432. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100432>
17. Fuess LT, Zaiat M. Economics of anaerobic digestion for processing sugarcane vinasse: Applying sensitivity analysis to increase process profitability in diversified biogas applications. *Process Safety and Environmental Protection.* 2018;115:27-37. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.08.007>

18. Sydney EB, Neto CJD, De Carvalho JC, Vandenberghe LPDS, Sydney ACN, Letti LAJ, et al. Microalgal biorefineries: Integrated use of liquid and gaseous effluents from bioethanol industry for efficient biomass production. *Bioresource Technology*. 2019;292:121955. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121955>

19. Nakashima RN, De Oliveira Junior S. Comparative exergy assessment of vinasse disposal alternatives: Concentration, anaerobic digestion and fertirrigation. *Renewable Energy*. 2020;147:1969-78. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.124>

20. Santos LSRD, Tamashiro JR, Zanelotti DS, Silva LHP, Paiva FFGD, Oliveira DVMD, et al. Treatment of agro-industrial effluents with silver nanoparticles to reduce chemical oxygen demand and microorganisms. *Cleaner Waste Systems* [Internet]. diciembre de 2022 [citado 6 de octubre de 2024];3:100058. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100058>

21. Aragão MS, Menezes DB, Ramos LC, Oliveira HS, Bharagava RN, Romanholo Ferreira LF, et al. Mycoremediation of vinasse by surface response methodology and preliminary studies in air-lift bioreactors. *Chemosphere* [Internet]. abril de 2020 [citado 6 de octubre de 2024];244:125432. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125432>

22. Harirchi S, Etemadifar Z, Yazdian F, Taherzadeh MJ. Efficacy of polyextremophilic Aeribacillus pallidus on bioprocessing of beet vinasse derived from ethanol industries. *Bioresource Technology*. 2020; 313:123662. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123662>

23. Canizales L, Rojas F, Pizarro CA, Caicedo-Ortega NelsonH, Villegas-Torres MF. SuperPro Designer®, User-Oriented Software Used for Analyzing the Techno-Economic Feasibility of Electrical Energy Generation from Sugarcane Vinasse in Colombia. *Processes*. 2020;8(9):1180. <https://doi.org/10.3390/pr8091180>

24. Dias MF, Coltrurato LF, De Oliveira JP, Leite LR, Oliveira G, Chernicharo CA, et al. Metagenomic analysis of a desulphurisation system used to treat biogas from vinasse methanisation. *Bioresource Technology*. 2016; 205:58-66. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.007>

25. Appels L, Baeyens J, Degrève J, Dewil R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2008;34(6):755-81. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>

26. Angelidaki I, Treu L, Tsapekos P, Luo G, Campanaro S, Wenzel H, et al. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnol Adv*. 2018;36(2):452-66. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011>

27. Santos PS, Zaiat M, Oller Do Nascimento CA, Fuess LT. Does sugarcane vinasse composition variability affect the bioenergy yield in anaerobic systems? A dual kinetic-energetic assessment. *Journal of Cleaner Production*. 2019;240:118005. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118005>

28. Volpi MPC, Fuess LT, Moraes BS. Anaerobic co-digestion of residues in 1G2G sugarcane biorefineries for enhanced electricity and biomethane production. *Bioresource Technology*. 2021; 330:124999. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124999>

29. Furtado LA, Guerreiro Ribeiro S, Pradelle F, Parise JAR. Modeling and techno-economic analysis of a hybrid sugarcane plant fed by vinasse biogas and bagasse surplus for electricity generation. *Journal of Cleaner Production*. 2023; 413:137511. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137511>

30. De Carvalho JC, De Souza Vandenberghe LP, Sydney EB, Karp SG, Magalhães AI, Martinez-Burgos WJ, et al. Biomethane Production from Sugarcane Vinasse in a Circular Economy: Developments and Innovations. *Fermentation*. 2023; 9(4):349. <https://doi.org/10.3390/fermentation9040349>

31. Zanellati A, Spina F, Poli A, Rollé L, Varese GC, Dinuccio E. Fungal pretreatment of non-sterile maize silage and solid digestate with a *Cephalotrichum stemonitis* strain selected from agricultural biogas plants to enhance anaerobic digestion. *Biomass and Bioenergy*. 2021; 144:105934. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105934>

32. Cevallos-Molina ER, Vélez-Vélez TV, Baquerizo-Crespo RJ, Gómez-Salcedo Y. Anaerobic treatment of sugarcane bagasse. An opportunity for sustainability in rural environments? *Environmental Advances*. 2023; 13:100427. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100427>

33. Orgeda R, Yoshi HCMH, Bonfim-Rocha L, Ravagnani MADSS, Camilo R, Lima OCDM, et al. Techno-economic Assessment of Syngas Production from Sugarcane Vinasse Compared to the Natural Gas Route: A Biorefinery Concept. *Waste Biomass Valor*. 2021;12(2):699-710. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01014-4>

34. Alfonso-Cardero A, Pagés-Díaz J, Contino F, Rajendran K, Lorenzo-LLanes J. Process simulation and techno-economic assessment of vinasse-to-biogas in Cuba: Deterministic and uncertainty analysis. *Chemical Engineering Research and Design*. 2021;169:33-45. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.02.031>

35. Chen Y, Cheng JJ, Creamer KS. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*. 2008;99(10):4044-64. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>

36. Brown D, Li Y. Solid state anaerobic co-digestion of yard waste and food waste for biogas production. *Bioresource Technology*. 2013;127:275-80. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.081>

37. Banks CJ, Cheshire M, Heaven S, Arnold R. Anaerobic digestion of source-segregated domestic food waste: Performance assessment by mass and energy balance. *Bioresource Technology*. 2011;102(2):612-20. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.005>

38. Holm-Nielsen JB, Al Seadi T, Oleskowicz-Popiel P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*. 2009;100(22):5478-84. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.046>

39. Bouallgui H. Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester. *Bioresource Technology*. 2003;86(1):85-9. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00097-4](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00097-4)

40. Scarlat N, Dallemand JF, Fahl F. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy* 2018;129:457-72. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006>

41. de Castro JM. Estudo do potencial de geração de bioeletricidade a partir de biogás proveniente de biodigestão de vinhaça no estado de Minas Gerais. Universidade Federal de Minas Gerais; 2018. <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/RAOA-BCZHRY>

42. Germano B da N. Produção de biogás a partir da vinhaça: uma análise de bem-estar social usando modelagem econômico-hidrológica integrada. Universidade Federal de Pernambuco; 2011. <https://iwra.org/proceedings/congress/resource/PAP00-5529.pdf>

43. Granato EF [UNESP. Geração de energia através da biodigestão anaeróbica da vinhaça. Universidade Estadual Paulista (Unesp); 2003 <http://hdl.handle.net/11449/90820>

44. Silva Dos Santos IF, Braz Vieira ND, De Nóbrega LGB, Barros RM, Tiago Filho GL. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018;131:54-63. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.012>

45. Lamo PD. Sistema Produtor de Gás Metano Através de Tratamento de Efluentes Industriais.

46. Menezes MBCD, Salomon KR. Aproveitamento dos efluentes domésticos para geração de energia em condomínios residenciais de baixa renda. *RDAE*. 2018;66(213):85-99. <https://doi.org/10.4322/dae.2018.034>

47. UPME. Total de emisiones CO2. http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/calculadora.html

48. de Melo LR, Demasi BZ, de Araujo MN, Rogeri RC, Grangeiro LC, Fuess LT. Methane Production from Sugarcane Vinasse Biodigestion: An Efficient Bioenergy and Environmental Solution for the State of São Paulo, Brazil. *Methane*. 2024;3(2):314-30. <https://doi.org/10.3390/methane3020017>

49. Marcucci SMP, Santos EDND, Fuziki MEK, Lenzi GG, Balthazar JM, Tusset AM. Techno-Economic Analysis of Biogas Production with Vinasse and Co-Digestion with Vinasse and Filter Cake for Annexed Plants: Case Study in Paraná State, Brazil. *Biomass*. 2025;5(1):10. <https://doi.org/10.3390/biomass5010010>

50. Bernal AP, Dos Santos IFS, Moni Silva AP, Barros RM, Ribeiro EM. Vinasse biogas for energy generation in Brazil: An assessment of economic feasibility, energy potential and avoided CO2 emissions. *Journal of Cleaner Production*. 2017; 151:260-71. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.064>