

Aprovechamiento de residuos agrícolas para producción de electricidad en Latinoamérica: Revisión literaria de casos exitosos en México, Colombia y Brasil

(Agricultural Waste for Electricity Production in Latin America: A Literature Review of Successful Cases in Mexico, Colombia, and Brazil)

Yulissa del Cisne Marín Apolo, María Eliza Vega Iñiguez, Danny Ochoa-Correa
Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador
yulissa.marin@ucuenca.edu.ec, eliza.vegai@ucuenca.edu.ec, danny.ochoac@ucuenca.edu.ec

Resumen: En América Latina, diversos residuos ofrecen oportunidades para la generación de energía eléctrica, promoviendo una matriz energética más sostenible. Ante esta realidad, varios países de la región se encuentran en una transición energética y con investigaciones encaminadas hacia este objetivo. La investigación reportada en este artículo persigue ofrecer un panorama general acerca de la disponibilidad de residuos agrícolas para la generación de electricidad. La investigación se enfoca en tres países latinoamericanos: México, Colombia y Brasil; líderes en este avance. El objetivo principal es evaluar la viabilidad y el grado de aprovechamiento de los recursos energéticos derivados de residuos agrícolas en cada país, mediante un análisis comparativo de datos sobre bioenergía. La metodología incluye una revisión bibliográfica, enfocada en la cantidad y tipo de residuos agrícolas en cada país, así como la revisión de proyectos existentes en materia de bioenergía. Se obtuvo que México produjo entre 17,5-58,1 millones de toneladas anuales de residuos agrícolas; Colombia, alrededor de 21,54 millones de toneladas; y Brasil, con 798,34 millones de toneladas, siendo este último con la mayor cantidad debido a su extensión territorial. Este estudio ha revelado que, aunque Brasil y México utilizan eficientemente recursos como el bagazo de caña, y Colombia el aceite de palma para generar electricidad, aún hay áreas de mejora en el manejo de los residuos.

Palabras clave: biomasa, residuos agrícolas, energía eléctrica.

Abstract: In Latin America, various wastes offer opportunities for the generation of electric energy, promoting a more sustainable energy matrix. Given this reality, several countries in the region are undergoing an energy transition and are conducting research aimed at this objective. The research reported in this article seeks to provide an overview of the availability of agricultural waste for electricity generation. The research focuses on three Latin American countries: Mexico, Colombia and Brazil; leaders in this advancement. The main objective is to evaluate the viability and degree of use of energy resources derived from agricultural waste in each country, through a comparative analysis of data on bioenergy. The methodology includes a bibliographic review, focused on the quantity and type of agricultural waste in each country, as well as a review of existing bioenergy projects. It was found that Mexico produced between 17.5-58.1 million tons of agricultural waste annually; Colombia, around 21.54 million tons; and Brazil, with 798.34 million tons, the latter having the largest amount due to its territorial extension. This study has revealed that, although Brazil and Mexico efficiently use resources such as sugarcane bagasse, and Colombia uses palm oil to generate electricity, there are still areas for improvement in waste management.

Keywords: biomass, agricultural residues, electricity.

1. INTRODUCCIÓN

Ante la creciente conciencia mundial sobre la necesidad de transitar hacia fuentes de energía sostenibles, América Latina emerge como un territorio estratégico para la exploración de alternativas que reduzcan la dependencia de los combustibles fósiles. Pese a los avances globales en la transición hacia energías sostenibles, los desafíos persisten, especialmente en los países en vías de desarrollo de América Latina. En este escenario, la biomasa proveniente de residuos agrícolas se presenta como una fuente potente de energía, con un gran potencial para contribuir a la generación eléctrica en la región.

América Latina está transitando hacia las energías renovables debido a sus vastos recursos. Los países sudamericanos cuentan con un potencial de energía renovable que sería suficiente para cubrir la demanda energética local actual y futura [1]. La región tiene un potencial técnico para residuos agrícolas y agroindustriales de 3 EJ/año (exajulio por año), similar al obtenido para el sureste asiático [2]. La gestión adecuada de estos residuos es crucial para abordar los desafíos ambientales y para capitalizar su potencial energético. Sin embargo, aún quedan estudios y avances por realizar en relación con la generación basada en biomasa, para que los países latinoamericanos puedan avanzar hacia una diversificación de su matriz energética y aprovechar plenamente todos sus recursos disponibles.

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de las actividades agrícolas representaron el 21 % del total mundial, situándose como el segundo mayor emisor. Estas emisiones agrícolas provienen de prácticas como la deforestación, las emisiones generadas por el ganado, la gestión de suelos y nutrientes, incluyendo el uso de fertilizantes basados en combustibles fósiles, el empleo de maquinaria agrícola, y la quema de biomasa [3]. No obstante, se espera una reducción significativa de estas emisiones para 2030, mediante acciones como el fortalecimiento del manejo de cultivos y ganado y la generación a partir de energía renovable [4].

Históricamente, tanto en Colombia y Brasil, la generación eléctrica se realiza principalmente a través de la operación de grandes centrales hidroeléctricas [4], [5], a diferencia de México, donde esta actividad depende de fuentes basadas en combustibles fósiles [6]. Dependiendo predominantemente de fuentes hídricas para la generación eléctrica en un país puede presentar desafíos debido a la estacionalidad del recurso. Por otro lado, un país que basa mayoritariamente su producción de electricidad en combustibles fósiles necesita avanzar hacia un modelo energético sostenible. Resulta, por tanto, menester encontrar un equilibrio en la matriz energética de un país para diversificar las fuentes de generación eléctrica. Esto permitiría reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, al disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, y también el aprovechamiento más eficiente de los recursos disponibles.

En Ecuador, el país cuenta con varias centrales eléctricas que aprovechan residuos agrícolas para la generación eléctrica. Entre las más importantes se encuentran San Carlos (73,60 MW), Ecoelectric (35,20 MW) y Ecudos A-G (27,60 MW), que utilizan los residuos del proceso de producción de azúcar para cogenerar electricidad [7]. Durante seis meses al año, estas centrales operan con turbogeneradores que, además de abastecer los procesos internos de las industrias, inyectan el excedente al Sistema Nacional Interconectado. No obstante, la generación de electricidad mediante biomasa representa solo una fracción mínima dentro de la matriz energética nacional, alcanzando apenas un 1,62 %. Esto indica que, aunque la biomasa contribuye a la conformación de la oferta de generación eléctrica, su impacto en la producción total de Ecuador es limitado. Esta realidad resalta la necesidad de fortalecer y ampliar el uso de la biomasa como una alternativa viable dentro del contexto energético ecuatoriano, con el objetivo de diversificar aún más la matriz energética y reducir la dependencia de fuentes convencionales.

En el contexto latinoamericano, el reciente interés en la biomasa como recurso energético alternativo ha llevado a un creciente esfuerzo por encontrar soluciones sostenibles que impulsen

el acceso a la electricidad y fomenten prácticas de explotación energética respetuosas con el medio ambiente. Países líderes en este ámbito, como México, Colombia y Brasil, han sido pioneros en el desarrollo de iniciativas que aprovechan la biomasa para aplicaciones de generación eléctrica.

Este artículo presenta los resultados de una exhaustiva prospección de la literatura enfocada en explorar el potencial de los residuos agrícolas para la producción de bioenergía en México, Colombia y Brasil, con énfasis en la cuantificación de la biomasa disponible y la evaluación de tecnologías para su conversión en electricidad. El estudio responde a tres preguntas clave: disponibilidad y tipos de residuos agrícolas, tecnologías empleadas para su aprovechamiento y el grado de integración en las matrices energéticas nacionales, comparando su desempeño con otras fuentes renovables. Al analizar las características y desafíos específicos de cada país, esta investigación busca aportar al estado del conocimiento general sobre la biomasa tomando como base países líderes en América Latina en este tópico y, además, ofrecer perspectivas prácticas que impulsen la adopción de enfoques sostenibles en la matriz energética en un ámbito regional, nacional y local.

2. METODOLOGÍA

América Latina cuenta con varias zonas donde las condiciones ambientales, climáticas, de terreno y otras características favorecen el uso de la biomasa como una fuente de energía prometedora, impulsada por políticas y programas en varios países. Esta investigación se ha delimitado en Colombia, México y Brasil, tres países latinoamericanos con un gran avance en materia de producción de biocombustibles y una destacada participación en la generación de energía renovable a partir de biomasa. Esta investigación busca responder a las siguientes preguntas clave: ¿Qué tipos y volúmenes de residuos agrícolas están disponibles en cada uno de los tres países seleccionados para la producción de bioenergía? ¿Qué tecnologías están siendo utilizadas actualmente para convertir esos residuos en electricidad y qué nivel de eficiencia y sostenibilidad ofrecen? ¿Cuál es el grado de integración de la generación de bioenergía en las matrices energéticas nacionales de México, Colombia y Brasil, y cómo se compara su desempeño en relación con otros tipos de energías renovables?

El marco metodológico diseñado para este estudio consiste en la recopilación de información que aborde el potencial de generación de energía a partir de residuos agrícolas en los países seleccionados por medio de una revisión exhaustiva de la literatura. En esta, se realizó un análisis del potencial energético, considerando la cantidad y tipo de residuos generados y su idoneidad para la generación de bioenergía. Además, se examinó las tecnologías actuales de generación eléctrica a partir de biomasa en cada país, evaluando su eficiencia y sostenibilidad.

La revisión de literatura se tomó como fuentes de consulta bases de datos prestigiosas como: Researchgate, Scopus, Google Academic y ScienceDirect. Se utilizaron los términos de búsqueda: “BIOMASA”, “BIOMASS”, “BIOENERGÍA”, “BIOENERGY”, “BIOCOMBUSTIBLE”, “BIOFUEL”, complementados con el nombre de los tres países seleccionados. La búsqueda se realizó en el periodo comprendido entre 2010 y 2024. La Figura 1 muestra la secuencia de búsqueda seguida para la selección de los estudios, la cual revela que inicialmente, se identificaron 98 estudios mediante la búsqueda en bases de datos. Después de aplicar criterios de exclusión, como la falta de referencia a los países seleccionados o la limitada accesibilidad al contenido, se redujo el número a 58 estudios. Finalmente, tras una revisión más detallada del título, resumen e introducción de los estudios, se seleccionaron 28 estudios para el análisis final.

La secuencia de búsqueda y filtrado de estudios siguió un proceso estructurado y riguroso, similar al que se utiliza en las revisiones sistemáticas de literatura mediante el método PRISMA (Elementos Preferidos para Reportar Revisiones Sistemáticas y Metaanálisis). No obstante, es importante señalar que la revisión reportada en este artículo no tiene el carácter de una revisión

sistemática estricta. Se aplicó periféricamente algunos aspectos del método PRISMA, como la organización del proceso de búsqueda y la creación de un diagrama de flujo que visualiza los pasos seguidos para seleccionar y excluir estudios. Esta estructura aporta transparencia y rigor, permitiendo que el lector entienda claramente cómo se llevó a cabo la revisión.

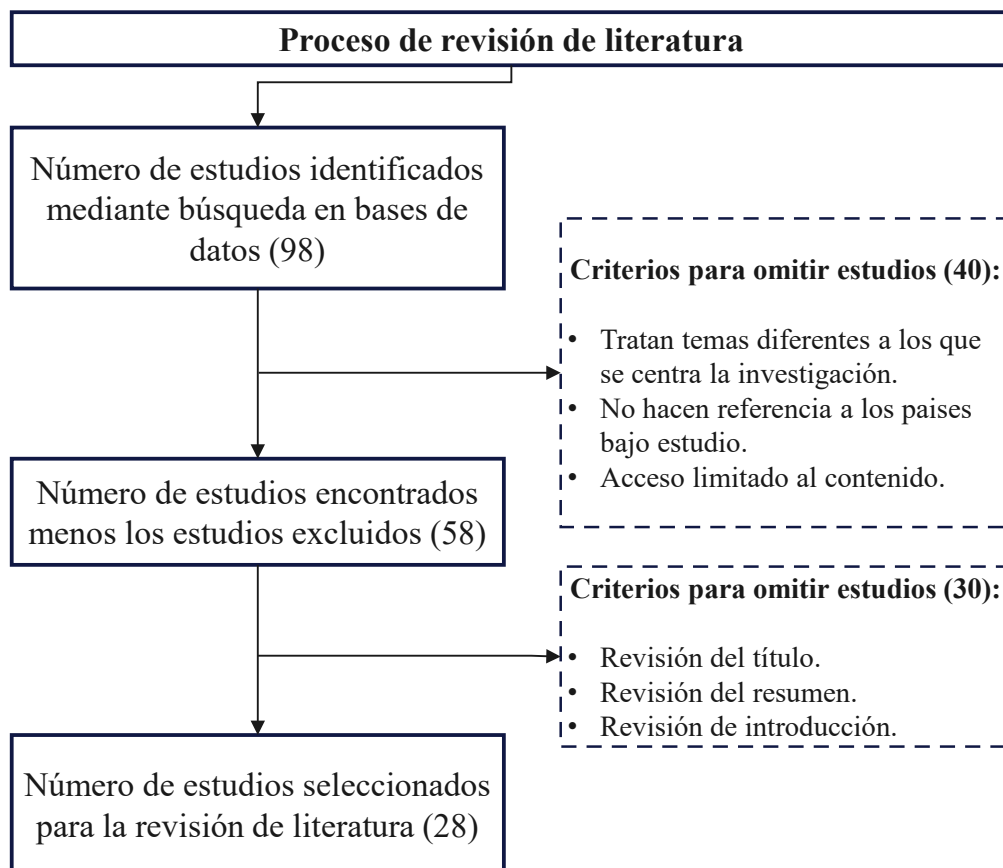


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso seguido para la selección de estudios.

La revisión de literatura basada en los 28 estudios seleccionados presenta una distribución interesante en términos de temporalidad y tipo de fuente. En cuanto a los artículos por año (Figura 2(a)), se observan dos recursos de actualidad, 2024. Las estadísticas también muestran una concentración significativa en 2023, con 9 artículos, mientras que años como 2009, 2010, 2013 y 2016 tienen solo 1 artículo cada uno. Esto sugiere que, en el último año ha habido un creciente interés reciente en la investigación sobre bioenergía y biomasa en los tres países objetivo. Respecto al tipo de obras bibliográficas cuya estadística se ilustra en la Figura 2(b), se aprecia que en la muestra seleccionada predominan los artículos de revista, con 15 ítems, lo que resalta el valor de la literatura revisada por pares en este campo. Además, se incluyen 7 reportes, 2 libros, y una menor cantidad de notas de prensa y artículos de conferencias, reflejando una amplia variedad de fuentes de información.

En términos de la aplicación de la biomasa por país, el mapa de la Figura 3 muestra que Colombia lidera la temática con 7 estudios, seguida de Brasil con 6 y México con 5; también se incluyen trabajos de otras regiones como Costa Rica, Bolivia, Argentina, Chile y Ecuador, lo que demuestra un enfoque geográficamente diverso. La frecuencia de estudios en Colombia, Brasil y México refleja su papel clave en la investigación y desarrollo de la bioenergía en América Latina.

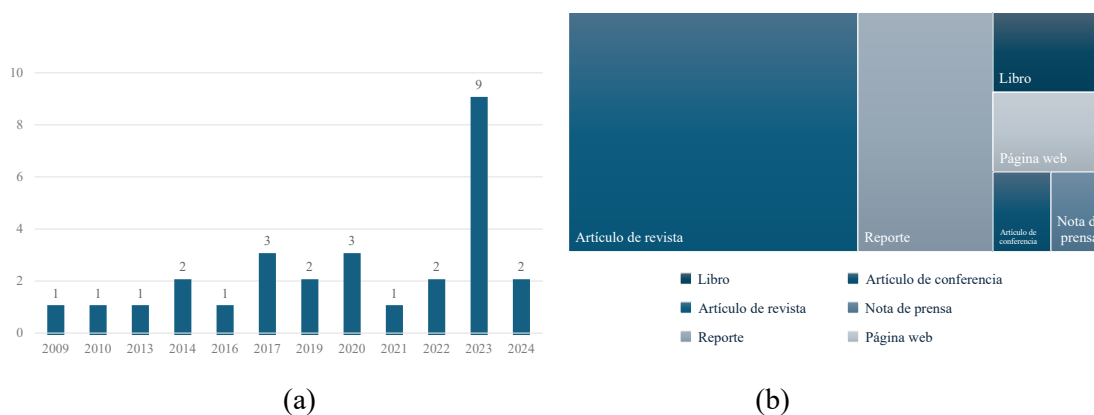


Figura 2. Estadísticas bibliométricas: a) Publicación de obras por año, b) Distribución de publicaciones por fuente.



Figura 3. Investigación y aplicación de soluciones basadas en biomasa para producción de electricidad por país.

La Tabla 1 presenta un resumen de los ítems seleccionados para la revisión de la literatura, cuya discusión se presenta en las siguientes subsecciones. En esta tabla se ofrece información detallada sobre el título de cada obra, los autores, un resumen conciso de los temas abordados, el año de publicación, el país de enfoque y los resultados más relevantes.

Tabla 1. Resumen de la literatura consultada para el proceso de síntesis.

Nº	Título	Autores	Resumen	Año	País	Ref.
1	Holistic assessment of Brazil's bioenergetic potential	De Sousa, Silva Lora, De Lisboa, Filho, Del Olmo	Análisis de uso energético de residuos agrícolas y forestales, excretas animales y otros en Brasil.	2023	Brasil	[27]
2	The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. The case of Colombia	Sagastume Gutiérrez, Cabello Eras, Hens, Vandecasteele	Potencial energético de residuos agrícolas y ganaderos en Colombia usando combustión y digestión anaeróbica.	2020	Colombia	[4]
3	Agricultural residue-based bioenergy: Regional potential and scale-up strategies	IRENA	Estimación de residuos agrícolas para bioenergía en diversas regiones del mundo.	2023	-	[2]

4	Assessment of energy production potential from agricultural residues in Bolivia	Morato, Vaezi, Kumar	Cuantificación de residuos agrícolas en Bolivia para generación de energía.	2019	Bolivia	[1]
5	The nexus of renewable energy-agriculture-environment in BRICS	Liu, Zhang, Bac	Relación entre energía renovable, agricultura y emisiones de CO2 en los países BRICS.	2017	BRICS	[3]
6	GIS-based modeling of residual biomass availability for energy and production in Mexico	Lozano-García, Santibañez-Aguilar, Lozano, Flores-Tlacuahuac	Modelo SIG para identificar áreas con potencial energético de biomasa en México.	2020	México	[8]
7	Annual biomass variation of agriculture crops and forestry residues, and seasonality of crop residues for energy production in Mexico	Honorato-Salazar, Sadhukhan	Análisis de biomasa de cultivos y residuos para energía en México.	2020	México	[6]
8	Evaluation of Potential Substrates for Biogas Production in Colombia using Anaerobic Digestion Systems	Ramón, Vásquez, Delgado, Domínguez-Carvajal, Mosquera-Mena, Molina, Peñuela-Vásquez	Identificación de sustratos para biogás en Colombia usando digestión anaeróbica.	2023	Colombia	[10]
9	Evaluación de diferentes métodos para la transformación de la pulpa de café en abono orgánico en fincas cafeteras	Moreno Clavijo, Romero Jiménez	Métodos para convertir pulpa de café en abono orgánico en fincas.	2016	Colombia	[9]
10	Biogas Production from Anaerobic Co-digestion of Palm Oil Mill Effluent and Empty Fruit Bunches	Saelor, Kongjan, O-Thong	Producción de biogás a partir de efluentes de aceite de palma y racimos vacíos.	2017	Tailandia	[11]
11	Renewable energy statistics 2023	IRENA	Estadísticas globales de energía renovable en la última década.	2023	-	[18]
12	Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad	Rincón, Silva	Fuentes y sostenibilidad de la bioenergía en la región iberoamericana.	2014	Colombia	[5]
13	Biofuel production in Latin America: A review for Argentina, Brazil, Mexico, Chile, Costa Rica and Colombia	Vega, Bautista, Campos, Daza, Vargas	Revisión de biocombustibles en Argentina, Brasil, México, Chile, Costa Rica y Colombia.	2024	-	[12]
14	Produção e uso de biocombustíveis no Brasil	Vidal	Brasil como productor destacado de etanol y biodiésel.	2019	Brasil	[17]

15	Atlas de los biocombustibles líquidos 2021-2022	Torroba, Orozco	Atlas del potencial de biocombustibles en América Latina.	2022	-	[26]
16	Biomass as energy source in Brazil	Lora, Andrade	Potencial de biomasa como fuente de energía en Brasil.	2009	Brasil	[28]
17	Biorefinery study of availability of agriculture residues and wastes for integrated biorefineries in Brazil	Forster-Carneiro, Berni, Dorileo, Rostagno	Residuos agrícolas en Brasil para integrar en biorrefinerías.	2013	Brasil	[15]
18	Censo Agro 2017	IBGE	Censo Agro 2017: residuos agrícolas y potencial energético en Brasil.	2017	Brasil	[14]
19	Conversión energética de la Biomasa: bases para su aprovechamiento	Manrique, Aien, Salvo, Binda, Subelza, Mosconi, Balderrama	Tecnologías de conversión energética de la biomasa en América Latina.	2023	-	[13]
20	Informe de Avance Proyectos de Generación - Julio 2023	UPME	Actualización de proyectos energéticos en Colombia.	2023	Colombia	[32]
21	Plataforma Nacional de Energía, Ambiente y Sociedad	Conahcyt	Repositorio nacional de energía y cambio climático en México.	2023	México	[19]
22	Atlas del potencial energético de la Biomasa residual en Colombia	SIAME	Atlas del potencial energético de biomasa en Colombia.	2023	Colombia	[21]
23	Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico	Valdez-Vazquez, Acevedo-Benítez, Hernández-Santiago	Residuos agrícolas en México para bioenergía mediante combustión y fermentación.	2010	México	[25]
24	Global Electricity Review 2021	Ember	Disminución del uso de carbón impulsada por energía eólica y solar.	2021	-	[29]
25	Technologies for biogas to electricity conversion	Kabeyi, Olanrewaju	Conversión de biogás a electricidad mediante diversas tecnologías.	2022	-	[24]
26	Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa	Arauzo, Bimbela, Ábrego, Sánchez, Gonzalo	Tecnologías para valorizar la biomasa y diversificación energética.	2014	España	[23]
27	Informe Perspectiva Sectorial - Energía	Castro, Mojica	Perspectiva del sector energético colombiano en 2023.	2023	Colombia	[31]

28	Plan Maestro de Electricidad – Ministerio de Energia y Minas	No Author	Plan maestro para la implementación de energías renovables en Ecuador.	2024	Ecuador	[7]
----	--	-----------	--	------	---------	-----

2.1. Residuos agrícolas disponibles para aprovechamiento energético

• México

En México, los residuos agrícolas se clasifican en primarios y secundarios. Los primeros son restos vegetales en el campo después de la cosecha del producto principal, como paja, tallos y hojas. Los segundos son residuos procesados, como cáscaras, cascarillas, bagazo, mazorcas de maíz y cascarilla de café [8].

En este país, la disponibilidad total de residuos varía entre 17,5 y 58,1 millones de toneladas de materia seca al año, divididas en 14,5 a 50,7 millones de toneladas para residuos primarios y 3,0 a 7,4 millones de toneladas para residuos secundarios. Destacan los residuos de maíz y sorgo, representando un 43,9 % y 31,3 %, respectivamente del total de residuos primarios. Le siguen en importancia los residuos de caña de azúcar (9,9 %), trigo (7,7 %), cebada (1,8 %) y fréjol (1,2 %) [6]. En cuanto a los residuos secundarios, maíz y caña de azúcar representan el 53,8 % y 40,7 %, respectivamente, seguidos, en menor medida, por residuos de café (2,1 %) y bagazo de agave (1,8 %). El maíz es el cultivo más importante en México y, por lo tanto, produce la mayor cantidad de residuos brutos disponibles [6].

En México, cuatro productos principales ocupan más del 80 % de la superficie dedicada al cultivo: la caña de azúcar, maíz, trigo y sorgo. En la Tabla 2 se detallan los datos en toneladas de materia seca por año (tMS/año) para cada uno de estos cultivos durante la temporada de lluvias. La Figura 4 presenta la distribución y la cantidad de residuos agrícolas primarios de estos productos en el territorio.

Tabla 2. Residuos del sector agrícola disponibles más importantes en México.

Residuo	Producción (tMS/año)
Caña	15,00
Maíz	44,00
Trigo	5,02
Sorgo	4,50

Fuente: [6].

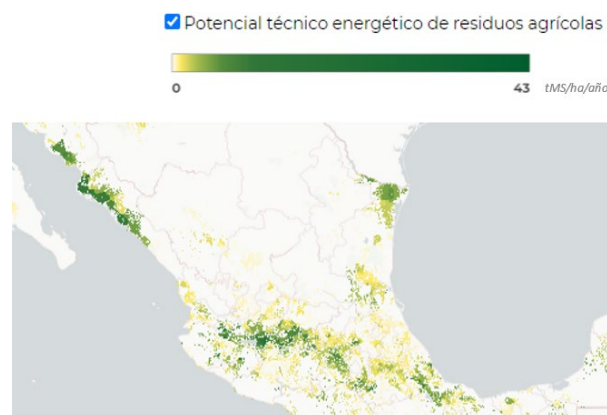


Figura 4. Potencial energético de residuos agrícolas en toneladas de materia seca por hectárea por año. Fuente: [6].

- **Colombia**

Según Sagastume et al. [4], la disponibilidad de residuos agrícolas para aplicaciones energéticas está condicionada por los procedimientos de cosecha. Aunque algunos residuos, como los de caña de azúcar, caña de panela, plátano, banano, papa, arroz, café, entre otros, se suelen utilizar para enriquecer el suelo, otros, como la paja de caña de azúcar, tienen potencial como biomasa. Sin embargo, la recolección a largo plazo de residuos agrícolas con fines energéticos es limitada. Por otro lado, los residuos agroindustriales están totalmente disponibles para aplicaciones energéticas, dependiendo de la cantidad de la producción agrícola [4].

En Colombia, los principales cultivos generadores de residuos agrícolas y agroindustriales incluyen la caña de azúcar, el plátano, el arroz, el banano, la piña, el maíz, el aceite de palma, el café, la papa y la yuca. Sin embargo, no todos estos residuos están completamente disponibles para su uso energético. Entre los cultivos mencionados, los que más residuos ofrecen para aprovechamiento energético son el banano, con $5642,133 \times 10^3$ t/año; el café, con $4133,800 \times 10^3$ t/año; la piña, con $5199,200 \times 10^3$ t/año; y el aceite de palma, con $3726,100 \times 10^3$ t/año disponibles. Estos hallazgos destacan la importancia de identificar las fuentes más relevantes de residuos con potencial energético. Los resultados expuestos en el estudio de Sagastume Gutiérrez et al. [4] en lo que respecta a la cantidad de residuos disponibles en el sector agrícola y agroindustrial para su aprovechamiento energético se sintetizan en la Tabla 3 y en la Figura 5.

Tabla 3. Residuos del sector agrícola disponibles para aprovechamiento energético en Colombia.

Cultivo	Residuos agrícolas disponibles (10^3 t/año)	Residuos agroindustriales (10^3 t/año)	Total de residuos (10^3 t/año)
Caña de azúcar	0,000	7,993	7,993
Plátano	571,350	0,014	571,364
Papas	0,000	0,023	0,023
Arroz	0,000	0,509	0,509
Yuca	1182,560	0,344	1182,904
Banano	320,130	5322,003	5642,133
Maíz	679,500	0,000	679,500
Aceite de palma	0,000	3726,100	3726,100
Panela de caña	0,000	370,600	370,600
Cítricos	0,000	9,400	9,400
Café	2329,100	1804,700	4133,800
Piña	5015,700	183,500	5199,200
Tomate	0,000	11,400	11,400

Fuente: [4].

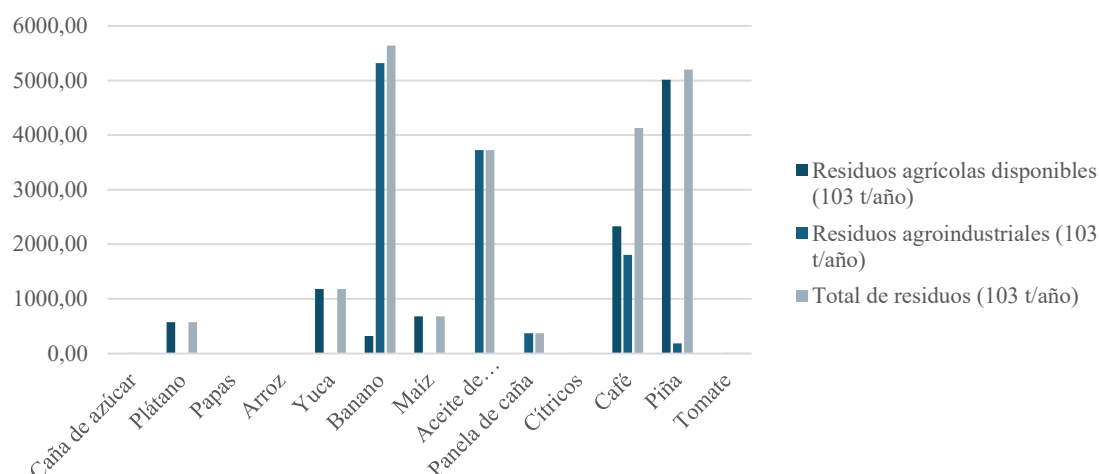


Figura 5. Disponibilidad de residuos agrícolas para aprovechamiento energético Colombia (103 t/año) [4].

La industria del café en particular es una de las más importantes del país, reportando una producción de 13,8 millones de sacos de café entre los años 2017-2018, según la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia [9]. Esta actividad agroindustrial genera grandes cantidades de pulpa y mucílago, con altos contenidos de azúcar, que son un potencial sustrato para la producción de biogás por medio de digestión anaerobia [10].

Asimismo, la industria del aceite de palma genera una gran cantidad de subproductos, tales como fibras (12 %), almendras o cascarones de palma (5 %), racimos vacíos o raquis (23 %), y aguas residuales de cada racimo de frutas frescas procesadas [11]. Otro importante residuo de esta actividad es el efluente de molino de aceite de palma (POME, por sus siglas en inglés). Se estima que, por cada tonelada de racimos frescos de frutas procesadas, se producen de 0,5 a 0,7 m³ de POME. Este subproducto se ha implementado como materia prima para la producción de biogás a nivel industrial en países con una alta producción de aceite de palma, como Malasia e Indonesia. Bajo condiciones específicas de temperatura, se puede llegar a producir 28 m³ de biogás a partir de 1 m³ de POME [10]. El cultivo de aceite más utilizado para la producción de biodiesel es la palma africana, con un área potencial de cultivo de 150000 hectáreas. Estudios internacionales afirman que el biodiesel producido en Colombia se encuentra entre los mejores del mundo [12].

• Brasil

Los residuos agrícolas emergen como una opción con alto potencial para obtener bioenergía en la actualidad. Con millones de toneladas de desechos disponibles anualmente, provenientes de la producción agroindustrial, estos recursos son accesibles y continuos. Una gestión eficiente ofrece oportunidades de reutilización sin generar costos adicionales. Es importante tener en cuenta un estudio de la viabilidad de los residuos agrícolas como fuente de bioenergía, considerando el potencial energético de la materia, el territorio y las características climáticas de la región. En algunos casos, una fracción del residuo se queda en el terreno para mejorar su mantenimiento [13].

De acuerdo con la actualización (2021-2022) anual del Atlas Nacional de Brasil Milton Santos 2010, con mapas elaborados con información del IBGE y otras instituciones públicas [14] se obtuvo información de datos estadísticos de productos agrícolas. La Tabla 4 resume los principales datos de producción de cultivos y residuos [14], [15].

Tabla 4. Cultivos y residuos del sector agrícola disponibles en Brasil.

Cultivo/Residuo	Producción (10⁶ t/año)	Coefficiente de Residuo (CR)	Cantidad de Residuo (10⁶ t/año)
Caña de azúcar/bagazo	638,70	0,90	574,83
Maíz/tallo, mazorca	39,30	1,00	39,30
Soja/tallos	103,20	1,40	144,48
Arroz/paja, cascarilla	11,10	1,70	18,87
Algodón/ramas	3,70	2,45	9,07
Trigo/paja	4,70	1,30	6,11
Yuca/tallo, ramas	6,60	0,80	5,28
Café/cascarilla	1,90	0,21	0,40

Fuente: [14], [15].

Según estadísticas a nivel mundial [16], Brasil es el mayor productor de azúcar y el segundo productor de etanol, consolidándose como líder latinoamericano en la producción de energía a partir de biomasa de caña de azúcar. Para este país, se tiene que la producción del biodiesel usa como principal materia prima la soya, aunque también ricino, sésamo, girasol, o palma aceitera. En las regiones sur y centro-oeste del país existe la mayor producción de soya, lo que concentra la mayor producción de biodiesel en estas áreas [17]. La agroindustria de la soya en Brasil involucra empresas que participan desde la producción hasta la comercialización, siendo así que varias de estas empresas son grandes productoras de biodiesel.

Brasil, gracias a la gran biodiversidad y oportunidades para el trabajo agrícola, posee un gran potencial como productor de bioetanol de primera y segunda generación, siendo la caña de azúcar su principal materia prima. Sin embargo, el desarrollo del bioetanol de caña de azúcar se encuentra limitado por la competencia con otros cultivos alimenticios y la necesidad de expandir los territorios de cultivo [12].

2.2. Potencial energético a partir de residuos agrícolas

• México

En la literatura revisada se discute la variación en el potencial bioenergético total en México, que varía de 313,4 a 1039,4 PJ/año (Petajoules por año), debido a la variación en la producción de cultivos y la disponibilidad de residuos [8]. De forma general, en la Tabla 5 se utiliza la unidad MtMS/a, que corresponde a millones de toneladas de materia seca por año. Esta tabla ofrece una visión general del potencial energético de la biomasa, desglosada por tipo, facilitando así la evaluación de la capacidad energética de cada categoría [5].

Según estudios revisados, la caña de azúcar es el producto con mayor potencial para generación eléctrica, así como para pilas de combustible de hidrógeno en México. Datos actualizados por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) revelan que el bagazo de caña en México cuenta con una capacidad de generación de energía de 816 MW en 2022. Además, se estima un potencial de generación de bioenergía de 984 MW, una capacidad de 66 MW de biogás y 918 MW de biocombustibles sólidos y residuos renovables para el mismo año [18].

Pese a que México se ubica dentro de los 13 mayores productores de alimentos en el mundo y cuenta con 818 tipos de productos que generan significantes cantidades de residuos orgánicos, apenas se aprovecha el 0,4 % de su capacidad total de 86154 MW para bioenergía [19]; una muestra de que el potencial energético basado en residuos agrícolas está claramente subutilizado en México.

Tabla 5. Potencial energético de acuerdo con el tipo de biomasa en México.

Tipo	Producción (MtMS/a)	Potencial energético (PJ/año)
Residuos industriales de cultivos (bagazo y otros)	29	431
Residuos agrícolas de cosechas (RAC)	13	227
Residuos de cultivos alimenticios y forrajeros	15	114
Residuos agrícolas de cosechas de cultivos dedicados	8	86
Caña de azúcar para etanol	206	338
Aceite de palma aceitera para biodiesel	13	121

Fuente: [5].

Las plantas de producción de electricidad y/o calor que utilizan de combustible el biogás o bagazo, registran una capacidad instalada que va desde aproximadamente 70 kW hasta los 50 MW [19]. En la Figura 7 se presenta las diferentes centrales eléctricas en operación con generación a partir de biomasa en México, en donde destaca la planta generadora Tampico Renewable Energy con la mayor producción de electricidad (180,33 GWh) proveniente del aprovechamiento del bagazo de caña [20].

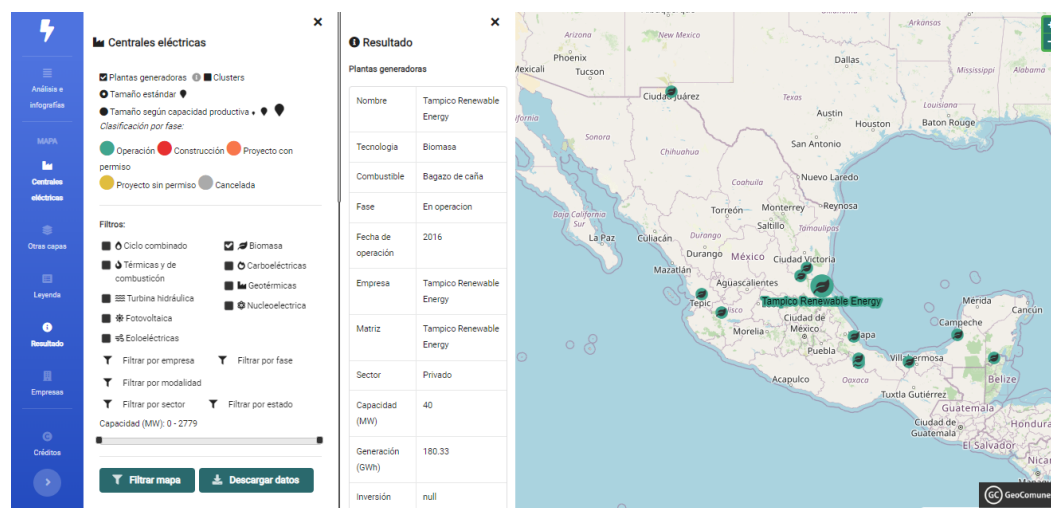


Figura 6. Centrales eléctricas de generación a partir de biomasa en México [20].

• Colombia

Según Sagastume Gutiérrez et al. [4], el potencial energético de los residuos agrícolas varía dependiendo de su contenido de humedad y del método de conversión. Aquellos con menos del 50 % de humedad tienen potenciales energéticos entre 2000 y 6000 kWh/t (kilovatios-hora por tonelada) con combustión directa, mientras que los que tienen más del 50 % de humedad ofrecen entre 100 y 3000 kWh/t con digestión anaeróbica. En general, la combustión directa produce un mayor potencial energético que la digestión anaeróbica para la misma fuente de biomasa. Los resultados de este estudio se sintetizan en la Tabla 5.

El análisis revela que los desechos agrícolas, ganaderos y agroindustriales potencialmente generan entre 60 y 120 GWh de energía mediante combustión directa o digestión anaeróbica. Específicamente, los desechos agrícolas se destacan como una fuente con un enorme potencial energético, capaz de satisfacer significativamente la demanda eléctrica actual en Colombia. En 2022, el país contaba con una capacidad instalada de generación de 9 MW a partir de biogás [18], principalmente generado a partir de estiércol y residuos sólidos municipales. Además, según estadísticas de IRENA [18], se utilizó el bagazo de caña para generar 387 MW de electricidad.

La Figura 7 muestra el mapa del potencial energético municipal anual de los residuos agrícolas, obtenido del Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia [21].

Tabla 6. Potencial energético por residuo en Colombia.

Cultivos	Residuo	Potencial energético (kWh/t)	
		Combustión directa	Digestión anaeróbica
Caña de azúcar	AW	2594,8	803,3
	Bagazo	2062,9	1171,1
	Torta de filtrado	2144,8	1151,1
Plátano	Raquis	-	120,9
	Pseudo-tallo	-	202,5
	Desechos de plátano	-	538,1
	Cáscara	-	280,6
Papas	Tallos y hojas	-	851,6
	Cáscara	-	423,5
Arroz	Tallos	3850,4	1637,7
	Cáscara	4187,5	1277,8
Yuca	Tallos	3716,7	1510,6
	Rizoma	2947,2	1378,0
	Cáscara	-	598,2
	Bagazo	-	362,0
Banano	Raquis	-	120,0
	Pseudo-tallo	-	202,0
	Desechos de plátano	-	538,1
	Cáscara	-	1962,4
Maíz	Rastrojo	3985,3	1831,4
	Mazorca	3939,9	1675,3
	Residuo de la planta	4433,9	1920,9
Aceite de palma	Cáscara	4634,9	592,4
	Fibra	4967,3	1794,0
	Racimos vacíos	5178,9	1849,0
	POME	-	268,4
Panela de caña	AW	2594,8	1171,1
	Bagazo	2062,9	803,3
Cítricos	Cáscara, semillas	3844,4	2755,7
Café	Pulpa	164,7	272,0
	Cascarilla	4386,3	1187,7
Piña	Tallos cortados	4338,0	2126,1
	Rastrojo	4527,8	2022,4
	Corona	4750,0	2491,5
	Núcleo	-	427,3
	Cáscara	-	427,3
Tomate	Hojas	5905,0	1794,3
	Tallo	5893,7	1794,3
	Cáscaras	5718,1	447,4
	Semillas	5928,4	447,4

Fuente: [4].

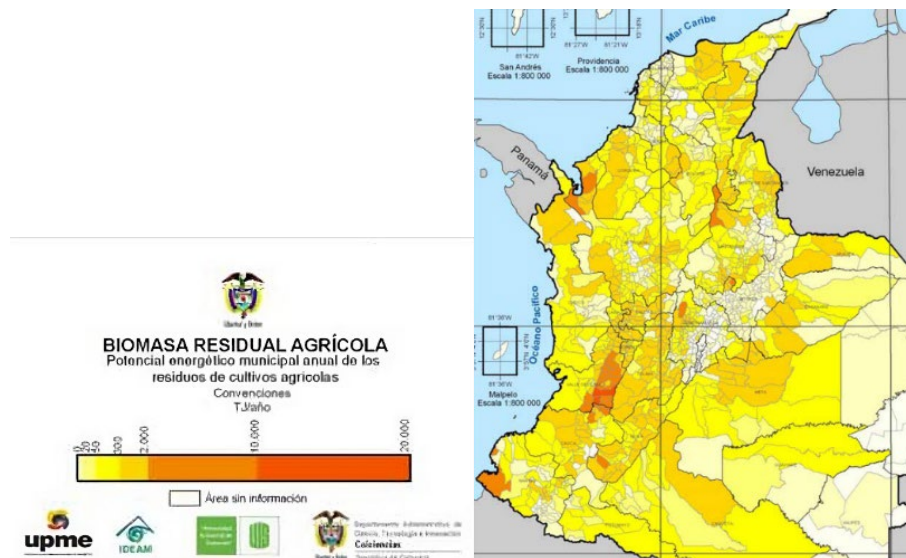


Figura 7. Mapa del potencial energético municipal anual de los residuos agrícolas en Colombia [21].

- **Brasil**

Brasil cuenta con una amplia reserva de energía primaria (13000 PJ), principalmente derivada de biomasa residual, concentrada en restos de cultivos clave como caña de azúcar, maíz y soya en microrregiones del centro-oeste y sureste del país. Asimismo, investigaciones sugieren que la integración de la biomasa como fuente de energía renovable puede beneficiar las actividades agrícolas y reducir impactos ambientales en Brasil [5].

El bagazo de la caña de azúcar representa el mayor porcentaje de la energía obtenida de la biomasa (Figura 8). El biogás, el pasto elefante, carbón vegetal, cáscara de arroz, lejía, aceites vegetales, leña de residuos de madera, el licor negro derivado de la industria de papel, son otros tipos de biomasa que se utilizan en la actualidad para la generación de bioenergía [22].

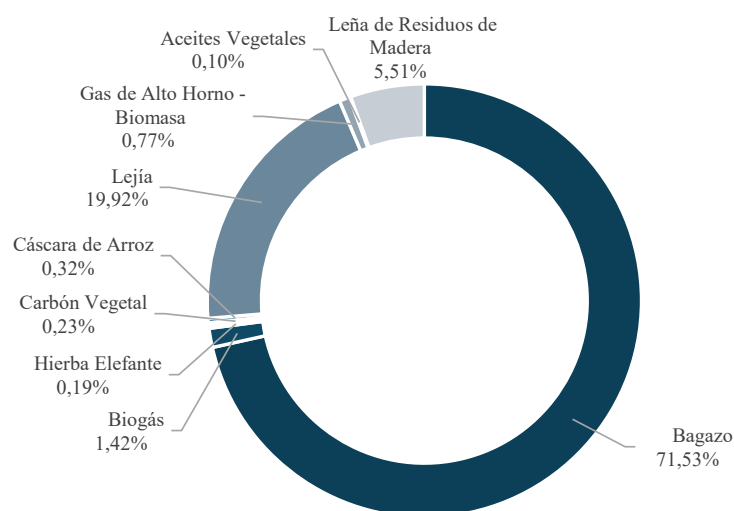


Figura 8. Capacidad instalada de generación eléctrica por tipos de biomasa, 2022 [22].

2.3. Tecnologías aplicadas para la generación eléctrica a partir de biomasa

Existen diversas alternativas de conversión de residuos para producir energía a partir de fuentes de biomasa, clasificadas en procesos termoquímicos y de bioconversión. Para las fuentes con más del 50 % de humedad, se prefieren los procesos de bioconversión, como la digestión anaeróbica; mientras que, para las fuentes con menos del 50 % de humedad, los procesos termoquímicos, como la combustión de biomasa, son más adecuados [4].

Las tecnologías termoquímicas para la generación de energía eléctrica incluyen la torrefacción (precalentamiento de biomasa a temperaturas entre 200° y 300° C para su posterior combustión), la pirólisis (calentamiento de biomasa en ausencia total de oxígeno) y la gasificación (biomasa sometida a reacciones a altas temperaturas con un agente gasificante), permiten generar energía eléctrica mediante la combustión controlada de biomasa [23].

Las tecnologías de conversión del biogás en electricidad abarcan motores de combustión interna, turbinas y pilas de combustible. Las pilas de combustible aprovechan el hidrógeno verde producido a partir de biogás para generar electricidad, requiriendo un biogás procesado con al menos 65 % de metano y 35 % de CO₂. Otra tecnología, de las más utilizadas, son las turbinas de gas y microturbinas, comúnmente empleadas en aplicaciones a mediana escala, entre 3 y 5 MW, mientras que las turbinas a pequeña escala son viables con potencias entre 30 y 75 kW. Estas opciones tecnológicas permiten aprovechar eficientemente la biomasa y el biogás para la generación de electricidad en diferentes escalas [24].

- **México**

En México, se emplean varias tecnologías para tratar la biomasa, como el ciclo de combustión/vapor, el motor de gasificación/combustión interna y el motor de combustión/Stirling. Las decisiones sobre qué tecnología utilizar dependen del potencial de biomasa disponible y las características de los residuos, como de su nivel de humedad [25]. Se investigan nuevas tecnologías como la hidrólisis y fermentación separadas (SHF), la sacarificación y cofermentación simultáneas (SSCF) y bioprocesamiento consolidado (CBP), esta última considerada más factible al utilizar un solo reactor para las principales etapas del proceso [12].

En cuanto a la producción de bioetanol, se emplea la tecnología de transesterificación, y se están explorando alternativas de catalizadores para reducir costos [25]. Aunque la producción de biogás en México es baja, es relevante por el uso de biodigestores tipo bolsa y estiércol de granjas bovinas como materia prima [12].

- **Colombia**

Actualmente, el país cuenta con nueve plantas de generación de biogás a partir de aceite de palma, representando aproximadamente el 9 % del consumo eléctrico promedio entre 2016 y 2017 mediante la digestión anaeróbica y el 18 % a través de la quema directa [26]. Tres empresas colombianas han desarrollado proyectos de cogeneración utilizando el gas metano de efluentes de aceite de palma, específicamente de POME, generando 8 MW de energía limpia anualmente y obteniendo beneficios económicos por la venta de excedentes [10]. El proyecto más reciente, “Manuelita”, transforma lodo de producción de aceite de palma en biogás con dos biodigestores de flujo continuo que generan 317732 m³ al mes [12].

La transesterificación es la tecnología más utilizada en Colombia para producir biodiesel, mientras que la gasificación y la digestión anaeróbica destacan para la generación de biogás, con cinco sistemas instalados utilizando materias primas como aguas residuales de la producción de cerveza, estiércol de cerdo, pollo y agua, y el lodo de plantas de tratamiento de aguas residuales [12].

- **Brasil**

Es indispensable analizar las características de la biomasa disponible para determinar el proceso óptimo de conversión, ya sea termoquímico, bioquímico o fisicoquímico. En Brasil, la producción de biodiesel se realiza mediante transesterificación alcalina [27], mientras que para el bioetanol se emplea el proceso de fermentación [5]. Brasil es considerado mundialmente como uno de los mayores productores de biogás, con 810 plantas generadoras. Aunque su producción interna es menor en comparación con otros biocombustibles, los residuos agrícolas pasan por un proceso de separación, homogeneización y digestión anaeróbica antes de su utilización. Se usan reactores anaeróbicos de diferentes tecnologías dependiendo de las características de la materia prima. En Brasil, las plantas de biogás mayoritariamente generan electricidad (86 %), energía térmica (10 %), biometano (3 %) y energía mecánica (1 %) [12].

Las tecnologías rentables para la generación de energía a partir de biomasa incluyen el ciclo de vapor, el biodiesel/MCI y la gasificación con combustión interna y motor Stirling. Sin embargo, aún no se ha definido tecnologías óptimas económicamente viables para sistemas de generación a pequeña escala [28].

Según [15], en Brasil, 405 centrales térmicas utilizan el bagazo de caña como combustible, además de 3 centrales que emplean biogás a partir de residuos agrícolas. Dos centrales utilizan hierba elefante, 13 cascarilla y paja de arroz, y una etanol. Otras utilizan el gas de alto horno, el licor negro y, finalmente, 54 basadas en residuos forestales.

2.4. Revisión de la matriz energética de los países de estudio

- **México**

La matriz energética de México ha estado en constante transición, con una histórica dependencia de combustibles fósiles. Hasta 2021, tres cuartos de la electricidad provenían de estos combustibles, con una capacidad instalada de 86154 MW, siendo el 66,9 % de unidades térmicas a base de estos. Las energías renovables representaban una fracción menor, con hidroelectricidad (14,6 %), eólica (8,0 %), fotovoltaica (6,9 %), nuclear (1,8 %), geotérmica (1,3 %) y bioenergía (0,5 %) (Figura 9) [19], [29]. Aunque el uso de carbón ha disminuido, las tecnologías de generación eléctrica con combustibles fósiles siguen predominando en la matriz eléctrica del país. México ha experimentado un aumento del 48,4 % en generación de energías renovables entre 2017 y 2022 [30]. Sin embargo, estos cambios han sido inestables debido a políticas emergentes.

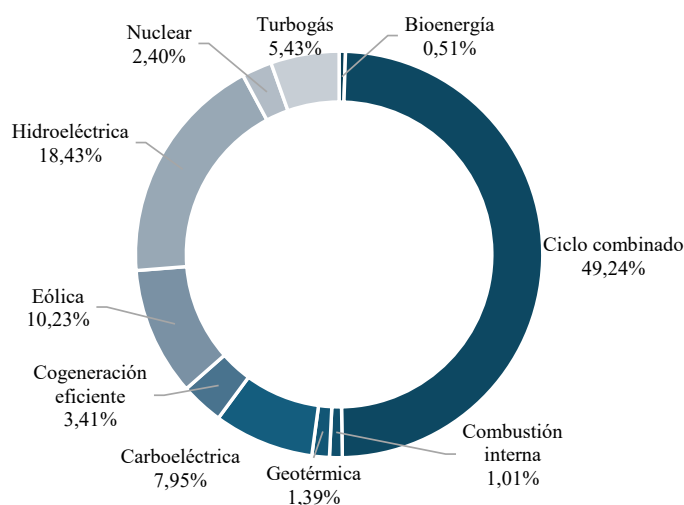


Figura 9. Capacidad instalada según tecnologías de generación [19], [29].

- **Colombia**

Según [31], la capacidad efectiva de generación neta para enero de 2023 fue de 18777 MW, con una predominante participación de energía hidráulica con 66,80 %, un 30,50 % correspondiente a energía térmica, 1,58 % de generación solar y eólica y 1,03 % de cogeneración de calor y electricidad a partir de biomasa (Figura 10). Actualmente, Colombia participa con un 0,80 % de la generación a partir de biomasa a nivel mundial.

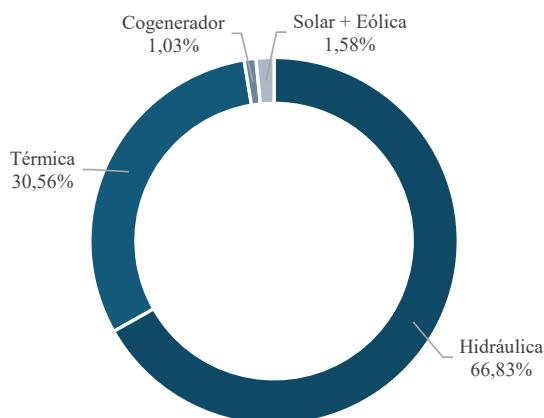


Figura 10. Matriz energética por tipo de tecnología en Colombia 2023 [31].

El gobierno colombiano se planteó como objetivo para el 2023, mediante las resoluciones 40715 de 2019 y 40060 de 2021 del Ministerio de Minas y Energía, que las fuentes renovables no convencionales cubran el 10 % de la demanda final de energía en 2023 [31]. Hasta septiembre de 2023, se registraron un total de 291 proyectos de generación, abarcando tanto energías renovables como no renovables, con una destacada presencia de la energía solar [32]. En la Figura 11 se muestran los proyectos vigentes de generación a partir de energías renovables, según el tipo de tecnología en MW.

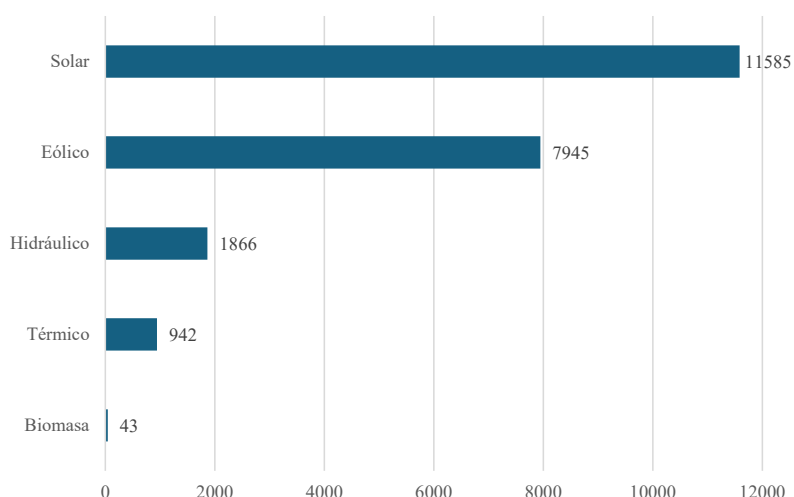


Figura 11. Proyectos vigentes de generación, clasificados por su potencia instalada en MW [32].

El número de proyectos de biomasa, clasificados según su potencia instalada, se muestran en la Tabla 7. Aunque se han iniciado proyectos de biomasa en diversas etapas, desde prefactibilidad

hasta factibilidad, su implementación se ve obstaculizada por desafíos logísticos, lo que dificulta el cumplimiento de los objetivos establecidos.

Tabla 7. Proyectos vigentes de generación eléctrica basada en biomasa.

Rango	Proyectos vigentes
1-10 MW	3
20-50 MW	1
Total	4

Fuente: [32].

• Brasil

Brasil se destaca por su significativa contribución para la generación eléctrica mediante energías renovables, lo que lo posiciona como uno de los líderes en la mitigación de los impactos ambientales asociados al uso de combustibles fósiles. A pesar de ser uno de los mayores consumidores de energía, su matriz energética es una de las menos contaminantes a nivel mundial [33].

La abundancia de recursos naturales en Brasil, junto con su diversidad geográfica, proporciona una amplia gama de residuos agrícolas adecuados para la generación de energía. En general, la biomasa en Brasil presenta un alto potencial y está disponible en todo el país durante todo el año, representando el 7,7 % de la producción total de energía eléctrica en la matriz nacional (ver Figura 12).

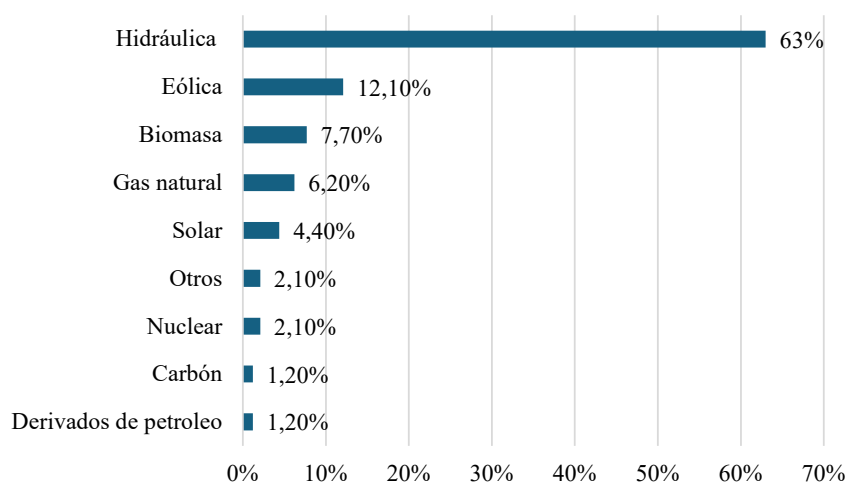


Figura 12. Generación eléctrica por fuente en Brasil, 2022 [34].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El desarrollo de la investigación ha permitido identificar las principales características que poseen México, Colombia y Brasil con respecto a su potencial energético a partir de residuos agrícolas. Se logró identificar que los principales residuos en los tres países se obtienen del maíz, caña de azúcar y trigo para México; banano, aceite de palma y café para el caso de Colombia; y caña de azúcar, soya y maíz para Brasil.

Brasil lidera en la generación de residuos, con 798,34 millones de toneladas anuales, cifra que supera significativamente al caso de México (17,5-58,1 millones t/año) y Colombia (21,535 millones t/año). Esto puede deberse a la gran extensión en territorio de Brasil, motivo por el cual tiene más disponibilidad de recurso que los otros dos países. Asimismo, para el año 2023, se

obtuvo que la capacidad máxima de generación neta de plantas de bioenergía de cada país fue de 984 MW, 397 MW y 17210 MW para México, Colombia y Brasil, respectivamente [18]; sin embargo, el porcentaje de generación a partir de biomasa en Colombia y México es inferior al 2,0 %, mientras que en Brasil representa el 7,7 % de la producción total de energía eléctrica. Estos datos sugieren que Brasil aprovecha de manera más efectiva sus recursos de biomasa en comparación con los otros dos países.

Colombia, posee un importante potencial energético derivado de residuos agrícolas. A pesar de que cuenta con varias plantas de generación de biogás y biodiesel, sería beneficioso para el país aumentar su participación en este sector para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y promover el uso de energías renovables para la generación eléctrica. Aunque la energía hidroeléctrica es la fuente predominante dentro de la matriz energética, Colombia sigue dependiendo en un 30,5 % de generación térmica a base de combustibles fósiles. A partir de la información expuesta en la Tabla 6, Colombia cuenta con un potencial energético teórico de 43,229 MWh a partir de sus residuos agrícolas, mediante digestión anaerobia y 98,759 MWh mediante combustión directa.

México, siendo uno de los principales productores de alimentos, cuenta con un amplio potencial de residuos para la generación de energía a partir de la biomasa. Sin embargo, su matriz energética ha dependido en gran medida de combustibles fósiles, representando más del 60 % de su generación eléctrica. Actualmente, el país está en proceso de transición hacia una matriz energética más limpia, donde las fuentes eólicas y solares están ganando relevancia. Aunque la biomasa tiene una baja participación en la matriz energética actual, se están desarrollando proyectos para potencializar su uso como fuente de energía.

Los tres países han desarrollado amplia experiencia en la producción y comercialización de biodiesel y bioetanol. México está mejorando sus tecnologías para la producción de bioetanol y ya tiene un nivel de desarrollo considerable. Colombia destaca en la producción de biodiesel a partir de palma africana, reconocido por su alta calidad a nivel mundial. Brasil sobresale como uno de los principales productores globales de bioetanol y biogás, principalmente utilizando caña de azúcar.

Este estudio evidencia que los tres países disponen de tecnologías maduras para la producción de biocombustibles, siendo México el que presenta un menor nivel de desarrollo en esta área pese a su gran potencial. Es importante destacar que México, además, emplea menos recursos de residuos agrícolas en comparación con Colombia y Brasil para la producción de biocombustibles. Esto destaca la necesidad de potenciar estrategias de aprovechamiento de biomasa en el sector energético en México para equiparar su posición con otros países en la región.

Las tecnologías empleadas en la generación de energía a partir de biomasa en los tres países incluyen la transesterificación para la generación de biodiesel, fermentación para la obtención de bioetanol, digestión anaeróbica para la obtención de biogás y otros procesos como la gasificación, pirólisis y combustión directa para la conversión en energía eléctrica. El tipo de tecnología que se utilice para la conversión de energía se ve directamente influenciado por la calidad y composición del gas o subproducto generado, además del tamaño, humedad y composición de la partícula de biomasa.

4. CONCLUSIONES

El análisis llevado a cabo ha proporcionado una visión detallada del nivel de desarrollo en tres países latinoamericanos en relación con la utilización de biomasa derivada de residuos agrícolas. Aunque se ha observado un eficiente aprovechamiento de estos recursos para la generación de biocombustibles, se destaca que la matriz energética general de estos países aún muestra una influencia limitada por el uso de biomasa. A pesar de contar con plantas generadoras que emplean de manera efectiva recursos como el bagazo de caña en Brasil y México y el aceite

de palma en Colombia, se identifican importantes oportunidades de mejora en la gestión de residuos.

En México, el potencial bioenergético se estima entre 313,4 y 1039,4 PJ/año, con una producción destacada de 44 millones de toneladas de residuos de maíz. Sin embargo, su integración ha sido limitada por una histórica dependencia del 60 % en combustibles fósiles, y la biomasa representa solo el 0,5 % de su matriz energética. Esto sugiere la necesidad de acelerar los proyectos actuales para mejorar la adopción de esta fuente renovable.

Colombia ha logrado avances en la generación de biogás y biodiesel, especialmente a partir del aceite de palma, con una capacidad de 387 MW. A pesar de contar con recursos abundantes, como 5642 millones de toneladas de banano y 4133 millones de toneladas de café, la dominancia de la energía hidráulica (66,8 %) y térmica (30,5 %) sigue restringiendo la diversificación hacia bioenergía.

Brasil lidera la región con 798,34 millones de toneladas de residuos agrícolas al año, consolidándose como el mayor productor de bioenergía, donde el bagazo de caña aporta 574,83 millones de toneladas. La biomasa ya representa el 7,7 % de su matriz energética, aunque aún enfrenta desafíos por la expansión de cultivos y la competencia con cultivos alimenticios.

A partir de los hallazgos, se identificaron tres áreas clave para futuras investigaciones: (1) la optimización de tecnologías de conversión con foco en eficiencia y sostenibilidad; (2) la integración más efectiva de la bioenergía en las matrices energéticas; y (3) la superación de barreras logísticas y regulatorias.

Una gestión más eficiente de estos residuos contribuiría al avance en la generación de energía limpia y diversificación de las matrices energéticas, reduciendo los costos asociados al transporte y la quema de desechos. La colaboración entre los sectores académico, gubernamental e industrial será esencial para desarrollar políticas públicas que fomenten el uso sostenible de la biomasa. Esta investigación se presenta como un referente valioso para futuros estudios orientados a maximizar el aprovechamiento de la biomasa en países latinoamericanos con condiciones similares. Abordar los vacíos de conocimiento identificados mediante estudios específicos sobre nuevas tecnologías y modelos de negocio será crucial para impulsar la adopción de bioenergía. Así, se propone como un punto de partida para explorar enfoques sostenibles que promuevan el desarrollo energético y medioambiental en la región.

AGRADECIMIENTOS: Los autores agradecen a la Universidad de Cuenca por facilitar el acceso al Laboratorio de Micro-Red, Facultad de Ingeniería, en cuyas instalaciones fue realizada la presente investigación. Este trabajo forma parte de las actividades investigativas del proyecto titulado «Promoviendo la sostenibilidad energética: Transferencia de conocimientos en generación solar y micromovilidad eléctrica dirigida a la población infantil y adolescente de la parroquia Cumbe», ganador de la XI Convocatoria de proyectos de servicio a la comunidad organizado por la Dirección de Vinculación con la Sociedad de la Universidad de Cuenca, Ecuador, bajo la dirección de uno de los autores.

REFERENCIAS

- [1] T. Morato, M. Vaezi, and A. Kumar, “Assessment of energy production potential from agricultural residues in Bolivia”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 102, pp. 14–23, mar. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.032>
- [2] International Renewable Energy Agency [IRENA], “*Agricultural residue-based bioenergy: Regional potential and scale-up strategies*”, Abu Dhabi, 2023 [Online]. Available: <https://bit.ly/4fKkEim>

- [3] X. Liu, S. Zhang, and J. Bae, "The nexus of renewable energy-agriculture-environment in BRICS", *Applied Energy*, vol. 204, pp. 489–496, oct. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.077>
- [4] A. Sagastume Gutiérrez, J. J. Cabello Eras, L. Hens, and C. Vandecasteele, "The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. The case of Colombia", *Journal of Cleaner Production*, vol. 269, oct. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122317>
- [5] J. M. Rincón y E. Silva, *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad, Primera*. Bogotá, Colombia: La Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía, 2014.
- [6] J. A. Honorato-Salazar, and J. Sadhukhan, "Annual biomass variation of agriculture crops and forestry residues, and seasonality of crop residues for energy production in Mexico", *Food and Bioproducts Processing*, vol. 119, pp. 1–19, jan. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.10.005>
- [7] Ministerio de Energía y Minas, "Plan Maestro de Electricidad", 2024. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3Z7SXZR>
- [8] D. F. Lozano-García, J. E. Santibañez-Aguilar, F. J. Lozano, and A. Flores-Tlacuahuac, "GIS-based modeling of residual biomass availability for energy and production in Mexico", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 120, mar. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109610>
- [9] N. Moreno Clavijo y A. A. Romero Jiménez, "Evaluación de diferentes métodos para la transformación de la pulpa de café en abono orgánico en fincas cafeteras", Tesis de maestría, Universidad de Manizales, Manizales, Colombia, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/2620>
- [10] A. A. Ramón *et al.*, "Evaluation of Potential Substrates for Biogas Production in Colombia using Anaerobic Digestion Systems", *Ingenieria e Investigacion*, vol. 43, no. 2, mar. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15446/ING.INVESTIG.100834>
- [11] S. Saelor, P. Kongjan, and S. O-Thong, "Biogas Production from Anaerobic Co-digestion of Palm Oil Mill Effluent and Empty Fruit Bunches", *Energy Procedia*, vol. 138, pp. 717–722, oct. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.206>
- [12] L. P. Vega, K. T. Bautista, H. Campos, S. Daza, and G. Vargas, "Biofuel production in Latin America: A review for Argentina, Brazil, Mexico, Chile, Costa Rica and Colombia", *Energy Reports*, vol. 11, pp. 28–38, jun. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.10.060>
- [13] S. Manrique, A. Salvo, C. Binda, C. Subelza, L. Mosconi, y B. Balderrama, *Conversión energética de la Biomasa: bases para su aprovechamiento*, Madrid, España: La Red Iberoamericana de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T), 2023.
- [14] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE], "Censo Agro 2017", 2017. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3CHH5pU>
- [15] T. Forster-Carneiro, M. D. Berni, I. L. Dorileo, and M. A. Rostagno, "Biorefinery study of availability of agriculture residues and wastes for integrated biorefineries in Brazil", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 77, pp. 78–88, aug. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.05.007>

- [16] “Brazil: electricity generated share by source 2022” [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3OpMF2u>
- [17] M. de F. Vidal, “Produção e uso de biocombustíveis no Brasil”, Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste - ETENE, 2019. [Online]. Available: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/914/1/2021_CDS_184.pdf
- [18] International Renewable Energy Agency [IRENA], “Renewable energy statistics 2023”. 2023. [Online]. Available: <https://bit.ly/3COSdBh>
- [19] “Plataforma Nacional de Energía, Ambiente y Sociedad” [En línea]. Disponible en: <https://energia.conacyt.mx/planeas>
- [20] “Alumbrar las contradicciones del Sistema Eléctrico Nacional y de la transición energética” [En línea]. Disponible en: <https://geocomunes.org/Visualizadores/SistemaElectricoMexico>
- [21] “Atlas del potencial energético de la Biomasa residual en Colombia” [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/4g6TrGs>
- [22] “Sistemas de Informaciones Energéticas de Brasil” [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/4iaSLSj>
- [23] J. Arauzo, F. Bimbela, J. Ábrego, J. L. Sánchez y A. Gonzalo, “Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa”, Grupo Español del Carbón, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/108763>
- [24] M. J. B. Kabeyi, and O. A. Olanrewaju, “Technologies for biogas to electricity conversion”, *Energy Reports*, vol. 8, pp. 774–786, dec. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.007>
- [25] I. Valdez-Vazquez, J. A. Acevedo-Benítez, and C. Hernández-Santiago, “Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, núm. 7, pp. 2147–2153, sep. 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.034>
- [26] A. Torroba y R. Orozco, *Atlas de los biocombustibles líquidos 2021-2022*. 3ª ed. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.iica.int/handle/11324/21328>
- [27] L. V. M. De Sousa, E. E. Silva Lora, F. C. De Lisboa, F. B. D. Filho, and O. A. Del Olmo, “Holistic assessment of Brazil’s bioenergetic potential”, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, pp. 675-685, oct. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/bbb.2547>
- [28] E. S. Lora, and R. V. Andrade, “Biomass as energy source in Brazil”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, núm. 4, pp. 777–788, may. 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.12.004>
- [29] “Global Electricity Review 2021” [Online]. Available: <https://bit.ly/4eMyNuc>
- [30] “¿Cómo va México en su transición energética?” [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3Zzy77b>
- [31] A. C. F. Castro y J. L. Mojica, “Informe Perspectiva Sectorial - Energía Actualidad del sector energético colombiano”, Dirección de Sectores y Sostenibilidad, Colombia, Informe, 2023.
- [32] “Informe de Avance Proyectos de Generación - Julio 2023 SUBDIRECCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA – GRUPO DE GENERACIÓN”, Unidad de Planeación Minero Energética, Colombia. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/4iigTT4>

- [33] *“Brasil es el país con la matriz energética menos contaminante del mundo, señala AIE”* [En línea]. Disponible en: <https://www.sela.org/es/prensa/servicio-informativo/20181121/si/26490/brasil>
- [34] "Ministerio de minas y energía Brasil", Ben 2024, SummaryReport 2024, 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEB_Summary_Report_2024.pdf

