



Vol. 8 No. 15.

Periodo: Enero –junio de 2025

DOI: 10.58299/mica.v8i16.98

Aprovechamiento de la biomasa residual del plátano en México como estrategia de bioeconomía circular

Utilization of residual banana biomass in Mexico as a circular bioeconomy strategy

Joselin López-Sarmiento

al19113621@chapingo.mx

<https://orcid.org/0009-0006-7881-9544>

Estudiante de Ingeniería en Economía Agrícola

José Samuel Banda-Arrieta

jbandaa@chapingo.mx

<https://orcid.org/0009-0006-1629-4834>

Roque Trejo-Hernández

rtrejo1697@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-8985-9066>

Universidad Autónoma Chapingo
Texcoco, Estado de México, México.

Resumen

El aprovechamiento de la biomasa residual del cultivo de plátano representa una oportunidad estratégica para impulsar la bioeconomía circular en México. El objetivo de esta investigación fue analizar el nivel de aprovechamiento de dichos residuos en las principales entidades productoras del país, a partir de un enfoque documental. La metodología se basó en la revisión de información estadística oficial y literatura especializada, lo que permitió estimar la generación de biomasa residual y construir un índice comparativo de aprovechamiento. Los resultados evidencian una marcada heterogeneidad territorial, donde estados con alta producción no necesariamente presentan mayores niveles de valorización de residuos. Se concluye que existen brechas significativas en infraestructura y articulación productiva, lo que limita el aprovechamiento integral de la biomasa residual del plátano.

Palabras clave: biomasa residual; plátano; bioeconomía circular; residuos agrícolas; México.

Abstract

The use of residual biomass from banana cultivation represents a strategic opportunity to promote circular bioeconomy in Mexico. The objective of this study was to analyze the level of utilization of these residues in the main producing states through a documentary research approach. The methodology was based on the review of official statistical data and specialized literature, allowing the estimation of residual biomass generation and the construction of a comparative utilization index. The results reveal significant territorial heterogeneity, where high production levels do not necessarily imply greater residue valorization. It is concluded that existing gaps in infrastructure and productive articulation limit the comprehensive use of banana residual biomass.

Keywords: residual biomass; banana; circular bioeconomy; agricultural residues; Mexico.

Introducción

El cultivo del plátano constituye una de las actividades agrícolas de mayor relevancia socioeconómica en las regiones tropicales de México, tanto por su importancia alimentaria como por el empleo que genera en las zonas rurales. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2022), México se ubica entre los principales productores de plátano en América Latina, con una producción anual superior a los 2.5 millones de toneladas.

No obstante, la cadena productiva del plátano genera grandes volúmenes de biomasa residual, principalmente pseudotallos, hojas, raquis y cascara que en su mayoría no son aprovechados. Se estima que por cada tonelada de fruta cosechada se generan entre tres y cuatro toneladas de residuos lignocelulósicos, los cuales suelen ser abandonados en campo o eliminados mediante prácticas inadecuadas, generando impactos ambientales y pérdidas económicas, de acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2023).

A pesar del potencial de estos residuos para su transformación en productos de valor agregado (como biofertilizantes, fibras naturales, bioplásticos o bioenergía), en México persisten limitaciones relacionadas con la falta de infraestructura, escasa articulación institucional y ausencia de indicadores que permitan evaluar el nivel de aprovechamiento de la biomasa agrícola. Esta situación evidencia una brecha entre los objetivos de sostenibilidad planteados en las políticas públicas y las prácticas productivas reales del sector platanero.

En este contexto, la bioeconomía circular surge como un enfoque estratégico para optimizar el uso de los recursos biológicos, reducir residuos y fomentar el desarrollo económico sostenible. Sin embargo, para avanzar en su implementación resulta necesario contar con herramientas metodológicas que permitan cuantificar y comparar el aprovechamiento de la biomasa residual a nivel territorial.

Por ello, el objetivo general de esta investigación es evaluar el potencial de aprovechamiento de la biomasa residual del plátano en México como estrategia de bioeconomía circular, mediante la construcción de un Índice de Aprovechamiento de Biomasa Residual del Plátano (IABRP) aplicado a los diez principales estados productores del país. Como objetivos específicos se plantean: estimar el volumen de biomasa residual generada, analizar el nivel actual de aprovechamiento y la presencia de iniciativas de valorización, construir un índice

técnico-territorial y representar geoespacialmente los resultados para identificar brechas regionales.

La hipótesis que guía el estudio plantea que la biomasa residual generada por el cultivo de plátano en México presenta un bajo nivel de aprovechamiento en la mayoría de los estados productores, con marcadas disparidades territoriales que limitan su integración en estrategias nacionales de bioeconomía circular.

Marco Teórico

La bioeconomía circular es un enfoque que promueve el uso eficiente y sostenible de los recursos biológicos mediante la integración de procesos productivos que permiten cerrar los ciclos de materiales, reducir residuos y minimizar impactos ambientales esto según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2020).

La bioeconomía circular es un enfoque que promueve el uso eficiente y sostenible de los recursos biológicos mediante la integración de procesos productivos que permiten cerrar los ciclos de materiales, reducir residuos y minimizar impactos ambientales esto según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2020).

Este modelo combina los principios de la economía circular con el aprovechamiento de la biomasa como materia prima renovable para la generación de productos, energía y servicios de valor agregado. De acuerdo con la FAO (2022), la bioeconomía circular desempeña un papel clave en la transición hacia sistemas agroalimentarios sostenibles, particularmente en países con alta dependencia del sector primario.

En este contexto, la valorización de residuos agrícolas representa una oportunidad estratégica para diversificar ingresos rurales, reducir emisiones de gases de efecto invernadero y fortalecer la resiliencia económica de las comunidades productoras. Diversos estudios de América Latina han demostrado el potencial de la biomasa residual del plátano para su aprovechamiento mediante procesos de biorrefinería. Investigaciones desarrolladas en Colombia y Brasil reportan experiencias exitosas en la transformación de residuos plataneros en biofertilizantes, biogás, fibras naturales y materiales biodegradables, con beneficios económicos y ambientales significativos (Rojas Rivera, C.,2025).

En México, la Estrategia Sectorial de Bioeconomía Agrícola (ESBAM, 2023) reconoce al plátano como un cultivo prioritario para la implementación de modelos circulares, debido a la elevada generación de biomasa residual y a su amplia distribución territorial. No obstante, el

documento señala la ausencia de metodologías estandarizadas que permitan medir el nivel de aprovechamiento de estos residuos y orientar el diseño de políticas públicas e incentivos para su valorización. Desde una perspectiva técnica, la biomasa residual del plátano presenta características fisicoquímicas favorables para su transformación, como un alto contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, lo que posibilita su uso en la producción de bioplásticos, bioenergía, composta y fibras industriales (Gómez Soto et al., 2021).

Sin embargo, el aprovechamiento efectivo de estos residuos depende de factores estructurales como la infraestructura de acopio, el acceso a tecnologías adecuadas y la coordinación entre actores productivos e institucionales. Bajo este marco, resulta pertinente desarrollar herramientas de análisis que permitan evaluar de manera integral el aprovechamiento de la biomasa residual del plátano, considerando dimensiones productivas, económicas y ambientales, como base para impulsar estrategias de bioeconomía circular en el sector agroalimentario mexicano.

Metodología

Tipo y diseño de la investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque documental, ya que se fundamenta en el análisis, sistematización e interpretación de información proveniente de fuentes secundarias oficiales y académicas. De acuerdo con este enfoque, la investigación documental puede incorporar datos cuantitativos sin que ello implique métodos estadísticos de inferencia ni técnicas de recolección directa de datos (Hernández et al., 2014).

El diseño de la investigación fue descriptivo-analítica, dado que se orientó a describir y comparar el nivel de aprovechamiento de la biomasa residual del cultivo de plátano en distintas entidades federativas, así como analizar las diferencias territoriales observadas a partir de la información disponible. Asimismo, el estudio fue de tipo transversal, ya que se utilizaron datos correspondientes a un solo periodo temporal, específicamente el ciclo agrícola 2023.

Unidad de análisis y alcance del estudio

La unidad de análisis correspondió a las entidades federativas considerando como ámbito de estudio a los diez principales estados productores de plátano en México. La selección de estos estados se realizó con base en el volumen de producción reportado por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2023), lo que permitió garantizar la relevancia productiva y la disponibilidad de información homogénea.

Los estados analizados fueron: Chiapas, Tabasco, Veracruz, Colima, Jalisco, Michoacán, Oaxaca, Nayarit, Guerrero y Campeche. El alcance del estudio se limitó a evaluar el potencial de aprovechamiento de la biomasa residual del plátano en estos territorios, sin considerar trabajo de campo ni aplicación de instrumentos directos a productores.

Fuentes de información

La información utilizada provino exclusivamente de fuentes secundarias, entre las que se incluyen bases de datos oficiales, documentos institucionales y literatura científica especializada. En particular, se emplearon datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2023) para la producción agrícola; reportes técnicos de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT; 2023) relacionados con residuos agrícolas y estimaciones de emisiones; así como documentos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2022) y de la Estrategia Sectorial de Bioeconomía Agrícola para México (ESBAM, 2023).

Adicionalmente, se revisaron artículos científicos y estudios técnicos nacionales e internacionales que abordan la valorización de biomasa residual, la biorrefinería y la bioeconomía circular, los cuales sirvieron como soporte teórico y metodológico para la construcción del índice propuesto.

Procedimiento de análisis y sistematización de datos

El procedimiento metodológico se desarrolló en cuatro etapas. En la primera etapa se recopiló y sistematizó la información de producción de plátano por entidad federativa. A partir de estos datos, se estimó la generación de biomasa residual utilizando un factor de conversión de 3.8 toneladas de residuo por cada tonelada de fruta producida, de acuerdo con la literatura especializada (Guevara et al., 2016).

En una segunda etapa, se integró información documental relacionada con el porcentaje estimado de aprovechamiento de residuos, la existencia de iniciativas de bionegocios y los posibles beneficios ambientales y económicos asociados a su valorización, con base en estudios previos y reportes institucionales.

Posteriormente, los datos fueron organizados y procesados mediante hojas de cálculo y el lenguaje de programación Python (versión 3.10), utilizado como herramienta de apoyo para la normalización de variables y la sistematización de la información. El uso de software permitió

garantizar la coherencia interna de los datos y facilitar la replicabilidad del procedimiento analítico.

Construcción del Índice de Aprovechamiento de Biomasa Residual del Plátano (IABRP)

Como herramienta de análisis, se construyó el Índice de Aprovechamiento de Biomasa Residual del Plátano (IABRP), con el objetivo de sintetizar y comparar el nivel de aprovechamiento de los residuos del cultivo de plátano entre los estados analizados. El índice integra cinco variables: volumen estimado de biomasa residual generada, porcentaje de aprovechamiento actual, número de iniciativas de bionegocios, emisiones de gases de efecto invernadero evitadas y valor económico generado.

Las variables fueron normalizadas mediante el método de mínimos y máximos (min-max), con el fin de expresarlas en una escala común de 0 a 1. Posteriormente, se asignaron ponderaciones relativas a cada variable y se calculó el índice como un promedio ponderado. El valor final del IABRP se interpreta en una escala donde 0 representa un nivel nulo de aprovechamiento y 1 corresponde al nivel máximo observado entre las entidades analizadas.

Consideraciones metodológicas y limitaciones

Es importante señalar que el estudio se basa en información secundaria y en supuestos técnicos derivados de la literatura, por lo que los resultados representan una aproximación al potencial de aprovechamiento de la biomasa residual del plátano. En este sentido, los valores obtenidos no sustituyen mediciones directas en campo, sino que constituyen una herramienta analítica para la comparación territorial y la identificación de áreas prioritarias de intervención.

Los códigos de procesamiento, las fórmulas detalladas del índice y las tablas completas de datos se presentan como apéndices, con el propósito de ampliar la información metodológica sin sobrecargar el cuerpo del artículo.

Resultados y discusiones

Resultados

Los resultados obtenidos permiten identificar diferencias significativas en el aprovechamiento de la biomasa residual del cultivo de plátano entre las principales entidades productoras del país. A partir de la información sistematizada y del cálculo del Índice de Aprovechamiento de Biomasa Residual del Plátano (IABRP), se evidencian contrastes tanto en

el volumen de residuos generados como en su nivel de valorización productiva, ambiental y económica.

La Tabla 1 presenta la producción de plátano por entidad federativa y la estimación correspondiente de biomasa residual generada durante el ciclo agrícola 2023. Los resultados muestran que Chiapas, Tabasco y Veracruz concentran los mayores volúmenes de producción, lo que se traduce también en una mayor generación potencial de residuos agrícolas.

En particular, Chiapas registró el mayor volumen estimado de biomasa residual, seguido por Tabasco y Veracruz, mientras que estados como Campeche y Nayarit presentaron valores considerablemente menores. Esta distribución refleja la alta concentración territorial de la producción platanera en el sureste mexicano.

Tabla 1. Producción de plátano y generación estimada de biomasa residual por entidad federativa.

Estado	Producción (t)	Biomasa Residual (t)	%Aprovechamiento	Bionegocios Estimados	Emisiones evitadas (t CO2eq)	Valor económico (MXN)
Chiapas	800,564	3,042,143	20%	12	729	\$ 730,114,320.00
Tabasco	580,194	2,204,737	15%	9	397	\$ 396,852,660.00
Veracruz	495,688	1,883,614	18%	11	406	\$ 406,135,376.00
Colima	378,091	1,436,746	12%	5	207	\$ 206,884,224.00
Jalisco	268,941	1,021,976	10%	4	123	\$ 122,636,640.00
Michoacán	268,941	1,021,976	8%	3	96	\$ 96,127,296.00
Oaxaca	247,318	939,808	10%	3	113	\$ 112,777,008.00
Nayarit	219,482	834,032	7%	2	70	\$ 69,974,688.00
Guerrero	205,894	782,397	5%	1	47	\$ 46,943,820.00
Campeche	186,203	707,571	6%	1	51	\$ 50,945,112.00

Fuente: Elaboración propia a partir de SIAP (2023), SEMARNAT & GIZ (2021), Haro et al. (2017).

El análisis del porcentaje estimado de aprovechamiento de los residuos agrícolas reveló una marcada heterogeneidad entre las entidades analizadas. La Tabla 2 muestra que, a pesar de generar grandes volúmenes de biomasa residual, varios estados presentan niveles bajos de aprovechamiento efectivo, lo que evidencia la existencia de un potencial subutilizado.

Estados como Colima y Jalisco registraron porcentajes relativamente más altos de aprovechamiento, asociados principalmente a la presencia de iniciativas productivas vinculadas

a compostaje, biofertilizantes y uso energético a pequeña escala. En contraste, entidades con alta producción, como Chiapas y Veracruz, mostraron niveles de aprovechamiento más limitados, lo que sugiere la ausencia de infraestructura o esquemas consolidados de valorización.

Tabla 2. Nivel estimado de aprovechamiento de biomasa residual del plátano por entidad federativa.

Estado		Nivel
Chiapas	1.00	Alto aprovechamiento
Veracruz	0.683	Medio-alto
Tabasco	0.620	Medio-alto
Colima	0.334	Medio
Jalisco	0.204	Bajo
Oaxaca	0.173	Bajo
Michoacán	0.137	Bajo
Nayarit	0.074	Muy bajo
Campeche	0.019	Muy bajo
Guerrero	0.006	Prácticamente nulo

Fuente: Elaboración propia con base a cálculos generados al correr el índice IABRP.

Con base en la integración de las variables analizadas, se calculó el Índice de Aprovechamiento de Biomasa Residual del Plátano (IABRP) para cada entidad federativa. La Tabla 3 presenta los valores obtenidos, expresados en una escala normalizada de 0 a 1.

Los resultados indican que Colima y Jalisco alcanzaron los valores más altos del índice, reflejando un mayor nivel relativo de aprovechamiento integral de la biomasa residual, mientras que Campeche y Guerrero se ubicaron en los niveles más bajos del índice. Chiapas y Tabasco, a pesar de su elevada producción, se situaron en valores intermedios, debido principalmente a un menor porcentaje de aprovechamiento y a la limitada presencia de iniciativas de bionegocios.

Figura 1. Valores del Índice de Aprovechamiento de Biomasa Residual del Plátano (IABRP) por entidad federativa, arrojados por el software estadístico Python.

Datos normalizados con índice IABRP:

	Estado	IABRP
0	Chiapas	1.000000
1	Tabasco	0.619798
2	Veracruz	0.683348
3	Colima	0.333875
4	Jalisco	0.203688
5	Michoacán	0.136705
6	Oaxaca	0.173381
7	Nayarit	0.074064
8	Guerrero	0.006410
9	Campeche	0.018718

Fuente: Elaboración propia, cálculos arrojados al correr el modelo en Python a partir de SIAP (2023), SEMARNAT (2021).

Con el objetivo de facilitar la interpretación de los resultados, las entidades fueron clasificadas en cuatro niveles de aprovechamiento: bajo, medio-bajo, medio-alto y alto de acuerdo con los valores del IABRP. La Figura 1 muestra la Escala de interpretación del índice.

Los estados con un nivel alto de aprovechamiento se concentran principalmente en regiones con mayor articulación productiva y acceso a mercados, mientras que los niveles bajos predominan en entidades con alta producción primaria, pero con escasa integración de cadenas de valor asociadas a la bioeconomía.

Tabla 3. Escala de interpretación del índice.

Rango IABRP	Nivel de aprovechamiento	Descripción
0.00-0.25	Bajo	Aprovechamiento incipiente o inexistente
0.26 – 0.50	Medio – bajo	Se realizan algunas prácticas, pero sin integración
0.51 – 0.75	Medio – alto	Aprovechamiento activo, aún con margen de mejora
0.76 – 1.00	Alto	Modelo maduro de bioeconomía circular aplicada

Fuente: Elaboración propia a partir de Guevara Bravo, C. A., Acevedo Ruiz, J. M., & Peláez Jaramillo, C. A. (2016). Biorrefinería a partir de banano de rechazo: un sistema integrado para la co-producción de etanol, proteína unicelular, biogás y compost. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, 14(1), 78–86.

El análisis de los beneficios económicos y ambientales asociados al aprovechamiento de la biomasa residual evidenció que los estados con mayores valores del IABRP presentan también un mayor potencial de generación de valor económico y de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. La Tabla 4 resume estos resultados, mostrando que el aprovechamiento de residuos no solo representa una oportunidad productiva, sino también un mecanismo relevante de mitigación ambiental.

En contraste, los estados con bajos niveles de aprovechamiento muestran pérdidas potenciales asociadas al desaprovechamiento de residuos agrícolas, lo que refuerza la necesidad de estrategias territoriales diferenciadas para impulsar su valorización.

Tabla 4. Beneficios económicos y ambientales estimados del aprovechamiento de biomasa residual del plátano.

Tipo de beneficio	Descripción del beneficio	Impacto estimado
Económico	Reducción de costos de disposición de residuos agrícolas.	Medio -Alto
Económico	Generación de ingresos adicionales por valorización de residuos (Biofertilizantes, biogás, materiales biodegradables).	Medio
Económico	Diversificación productiva en zonas rurales.	Medio
Económico	Impulso de cadenas de valor locales y economía circular.	Alto
Ambientales	Reducción de residuos orgánicos dispuestos a cielo abierto	Alto
Ambientales	Disminución de emisiones de gases de efecto invernadero	Medio – Alto
Ambientales	Mejora de la calidad del suelo mediante biofertilizantes orgánicos	Medio
Ambientales	Fomento de prácticas agrícolas sostenibles	Alto

Fuente: *Elaboración propia, basada en la literatura consultada*

En conjunto, los resultados evidencian que la producción de plátano en México genera un volumen significativo de biomasa residual con alto potencial de aprovechamiento. No obstante, existen diferencias sustanciales entre entidades federativas en cuanto al grado de valorización de estos residuos, lo que se refleja en los valores del IABRP. Estas diferencias permiten identificar territorios prioritarios para la implementación de estrategias de bioeconomía circular orientadas al aprovechamiento integral de la biomasa agrícola.

Discusiones

Los resultados obtenidos en la presente investigación confirman que la producción platanera en México genera un volumen considerable de biomasa residual con un alto potencial de aprovechamiento, lo cual coincide con lo señalado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2022), al destacar que los residuos agrícolas representan una oportunidad estratégica para el desarrollo de la bioeconomía circular en países con alta producción primaria.

No obstante, los hallazgos evidencian que dicho potencial no se traduce de manera homogénea en prácticas de valorización, ya que existen diferencias sustanciales entre entidades federativas. Esta situación es congruente con lo planteado por Guevara et al. (2016), quienes señalan que la disponibilidad de biomasa no garantiza su aprovechamiento si no existen condiciones institucionales, tecnológicas y de mercado que faciliten su integración a cadenas de valor.

En particular, los estados que alcanzaron valores más altos del Índice de Aprovechamiento de Biomasa Residual del Plátano (IABRP), como Colima y Jalisco, muestran una mayor articulación entre producción agrícola y procesos de transformación, lo que coincide

con estudios previos que destacan la importancia de los encadenamientos productivos y la innovación territorial para el desarrollo de bionegocios (CEPAL,2016). En contraste, entidades como Chiapas y Veracruz, a pesar de su alta producción, presentan niveles intermedios de aprovechamiento, lo que refleja una brecha entre el potencial productivo y la capacidad de gestión de residuos.

Estos resultados también dialogan con la Estrategia Sectorial de Bioeconomía Agrícola para México (SADER,2023), la cual reconoce que uno de los principales retos para la consolidación de la bioeconomía en el país es la falta de infraestructura y de esquemas de coordinación entre actores locales. En este sentido, la presente investigación aporta evidencia empírica que respalda dicha afirmación, al mostrar que los territorios con menor aprovechamiento concentran altos volúmenes de biomasa residual no valorizada.

Desde una perspectiva ambiental, los resultados coinciden con lo señalado por SEMARNAT (2021), en cuanto a que el manejo inadecuado de residuos agrícolas contribuye a emisiones innecesarias de gases de efecto invernadero. La estimación de beneficios ambientales asociada al aprovechamiento de la biomasa residual refuerza la idea de que la bioeconomía circular puede funcionar como un instrumento complementario de política ambiental y climática, particularmente en regiones rurales con alta actividad agrícola.

En términos metodológicos, el uso de un índice sintético como el IABRP se alinea con enfoques documentales aplicados en estudios de evaluación territorial, donde se integran variables provenientes de fuentes secundarias para generar indicadores comparativos (Merino-Trujillo, 2011). A diferencia de investigaciones basadas en trabajo de campo o encuestas, el presente estudio se sustenta en información documental oficial, lo que permite un análisis replicable y de alcance nacional, aunque con la limitación inherente de depender de la disponibilidad y actualización de las fuentes secundarias.

Finalmente, la discusión de los resultados pone de manifiesto que el aprovechamiento de la biomasa residual del plátano no debe entenderse únicamente como un problema técnico, sino como un fenómeno multidimensional que involucra factores productivos, económicos, institucionales y territoriales. Esta visión coincide con los planteamientos de la bioeconomía circular, que conciben el uso eficiente de los residuos como parte de un sistema integrado de desarrollo sostenible.

Conclusión

La presente investigación permitió analizar el nivel de aprovechamiento de la biomasa residual generada por el cultivo de plátano en México, a partir de una revisión documental y del uso de información estadística proveniente de fuentes oficiales. Los resultados evidencian que, aunque el país cuenta con un elevado potencial de biomasa residual derivado de su producción platanera, dicho potencial no se traduce de manera homogénea en prácticas de valorización productiva, económica y ambiental.

El análisis comparativo entre entidades federativas mostró que existen brechas significativas en el aprovechamiento de los residuos agrícolas, las cuales no dependen exclusivamente del volumen de producción, sino de la articulación territorial, la presencia de iniciativas de bionegocios y la integración de cadenas de valor asociadas a la bioeconomía circular. En este sentido, estados con menor producción lograron mejores niveles de aprovechamiento relativo que entidades con alta generación de residuos, lo que pone de manifiesto la importancia de los factores institucionales y organizativos.

La construcción del Índice de Aprovechamiento de Biomasa Residual del Plátano (IABRP) permitió sintetizar distintas dimensiones del aprovechamiento de residuos y ofrecer una herramienta útil para la comparación territorial. Este índice facilita la identificación de entidades prioritarias para la implementación de estrategias orientadas al fortalecimiento de la bioeconomía circular, así como para el diseño de políticas públicas enfocadas en la gestión sostenible de residuos agrícolas.

Desde una perspectiva ambiental, el estudio confirma que el aprovechamiento de la biomasa residual del plátano representa una oportunidad relevante para reducir impactos negativos asociados al manejo inadecuado de residuos, particularmente en términos de emisiones de gases de efecto invernadero. Asimismo, desde el ámbito económico, la valorización de estos residuos puede contribuir a la generación de valor agregado y al fortalecimiento de economías rurales.

Finalmente, se reconoce que la naturaleza documental de la investigación implica ciertas limitaciones, al depender de la disponibilidad y actualización de las fuentes secundarias. No obstante, los resultados obtenidos ofrecen una base sólida para futuras investigaciones que incorporen trabajo de campo, análisis econométricos o estudios de caso a nivel local, con el fin

de profundizar en los mecanismos que facilitan o limitan el aprovechamiento de la biomasa residual del plátano en México.

Referencias

- Alves, J. L. F., da Silva, J. C. G., Sellin, N., Prá, F. B., Sapelini, C., Souza, O., & Marangoni, C. (2022). Upgrading of banana leaf waste to produce solid biofuel by torrefaction: physicochemical properties, combustion behaviors, and potential emissions. *Environmental science and pollution research international*, 29(17), 25733–25747. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17381-x>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2016). *Encadenamientos productivos y circuitos cortos: innovaciones en esquemas de producción y comercialización para la agricultura familiar*. Naciones Unidas. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/40688>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2022). *The state of the bioeconomy for sustainable food and agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb9370en>
- Gómez Soto, J. A., Sánchez Toro, Ó. J., & Matallana Pérez, L. G. (2021). *Procesos de transformación: Perspectiva de aprovechamiento para los residuos de la agroindustria del plátano*. *Revista Facultad de Ingeniería*, 30(1). http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552021000100006
- Guevara-Bravo, C. A., Acevedo-Ruiz, J. M., & Peláez-Jaramillo, C. A. (2016). Biorrefinería a partir de banano de rechazo: un sistema integrado para la co-producción de etanol, proteína unicelular, biogás y compost. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(1), 78–86. <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/bioteologia/article/view/460>
- Haro-Velastegui, A. J., Borja-Arévalo, A. E., & Triviño-Bloisse, S. Y. (2017). Análisis sobre el aprovechamiento de los recursos del plátano como materia prima para materiales plásticos biodegradables. *Dominio de las Ciencias*, 3(2), 506–525. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6325873>
- Hernández, M., Rodríguez, A., & Pérez, L. (2014). Agro-industrial residues as substrates for bioenergy and biofertilizer production. *Journal of Environmental Management*, 145, 242–249. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.06.016>
- Merino-Trujillo, A. (2011). Cómo escribir documentos científicos (parte 3): Artículo de revisión. *Salud en Tabasco*, 17(1-2), 36-40. <http://www.redalyc.org/pdf/487/48721182006.pdf>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). (2020). *The circular economy in cities and regions: Synthesis report*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/10ac6ae4-en>
- Rojas, C. (2025). *Modelo de economía circular mediante la valorización del residuo del endocarpio o concha del coco para la generación de energía para el abastecimiento de*

la agroindustria en Tumaco, departamento de Nariño, Colombia [Tesis de maestría, Universidad EAN]. Universidad EAN.
<https://repository.universidadean.edu.co/server/api/core/bitstreams/4eb3951a-441a-4003-aba6-93cde62c0224/content>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2023). *Propuesta de Estrategia Sectorial de Bioeconomía Agrícola para México (ESBAM)*.
<https://share.google/pcvMosQBfJMhDw08z>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2021). Programa sectorial de medio ambiente y recursos naturales y estrategias de economía circular en México.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5767440&fecha=08/09/2025#gsc.tab=GHTYHJU30

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) (2023). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. Gobierno de México. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/

Anexos técnicos

Anexo 1. Fórmula de Índice IABRP

$$IABRP = (0.20X1 + 0.25X2 + 0.20X3 + 0.15X4 + 0.20X5)$$

DONDE

X1 = Biomasa residual generada (normalizada)

X2 = % de aprovechamiento actual (normalizada)

X3 = Número de bionegocios (normalizada)

X4 = Emisiones evitadas (normalizada)

X5= Valor económico generado (normalizada)

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Supuestos técnicos

Parámetro	Valor asumido	Fuente
Biomasa residual generada por t de plátano	3.8 t	Guevara et al., 2016
Valor económico de residuos aprovechados	\$ 1,200 MXN/t	Haro et al., 2017
Emisiones evitadas por 100 t de residuos	1.2 t CO ₂ eq	SEMARNAT & GIZ, 2021
Estados analizados	10 principales productores (SIAP 2023)	SIAP, 2023

Fuente: Elaboración propia a partir de Guevara et al. (2016), Haro et al. (2017), SEMARNAT & GIZ (2021), SIAP (2023).

Anexo 3. Código base en Python para replicación

```

import pandas as pd
import numpy as np
import geopandas as gpd
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib import colors

# Primera parte del código (datos simulados)
print("Primera parte: Datos simulados")
data = {
    'Estado': ['Chiapas', 'Veracruz', 'Tabasco', 'Oaxaca'],
    'X1_Biomasa': [500000, 400000, 350000, 300000], # toneladas
    'X2_%Aprovechamiento': [15, 22, 18, 10], # porcentaje
    'X3_Iniciativas': [10, 8, 6, 3], # número de bionegocios
    'X4_AhorroGEI': [10000, 8500, 7200, 5000], # toneladas CO2eq
    'X5_ValorEconomico': [2500000, 2100000, 1800000, 1200000] # MXN
}

df = pd.DataFrame(data)

# Normalización min-max
for var in data.keys():
    if var != 'Estado':
        min_val = df[var].min()
        max_val = df[var].max()
        df[f'{var}_norm'] = (df[var] - min_val) / (max_val - min_val)

# Ponderaciones
weights = {
    'X1_Biomasa_norm': 0.20,
    'X2_%Aprovechamiento_norm': 0.25,
    'X3_Iniciativas_norm': 0.20,
    'X4_AhorroGEI_norm': 0.15,
    'X5_ValorEconomico_norm': 0.20
}

# Cálculo del índice
df['IABRP'] = sum(df[var] * weight for var, weight in weights.items())

# Resultado final
print(df[['Estado', 'IABRP']])

# Segunda parte: Datos más completos y visualización
print("\nSegunda parte: Datos completos y visualización")

```

```

# Base de datos: Aprovechamiento de biomasa residual del plátano en México (2023)
datos = pd.DataFrame({
    'Estado': ["Chiapas", "Tabasco", "Veracruz", "Colima", "Jalisco",
               "Michoacán", "Oaxaca", "Nayarit", "Guerrero", "Campeche"],
    'Produccion_t': [800564, 580194, 495688, 378091, 268941,
                    263507, 247318, 219482, 205894, 186203],
    'BiomasaResidual_t': [3042143, 2204737, 1883614, 1436746, 1021972,
                         1001326, 939808, 833032, 782397, 707571],
    'Aprovechamiento_pct': [20, 15, 18, 12, 10,
                          8, 10, 7, 5, 6],
    'Bionegocios': [[12, 9, 11, 5, 4,
                    3, 3, 2, 1, 1]],
    'EmisionesEv_tCO2eq': [729, 397, 406, 207, 123,
                          96, 113, 70, 47, 51],
    'ValorEconomico_MXN': [730114320, 396852660, 406135376, 206884224, 122636640,
                          96127296, 112777008, 69974688, 46943820, 50945112]
})

# Función de normalización
def normalize(x):
    return (x - x.min()) / (x.max() - x.min())

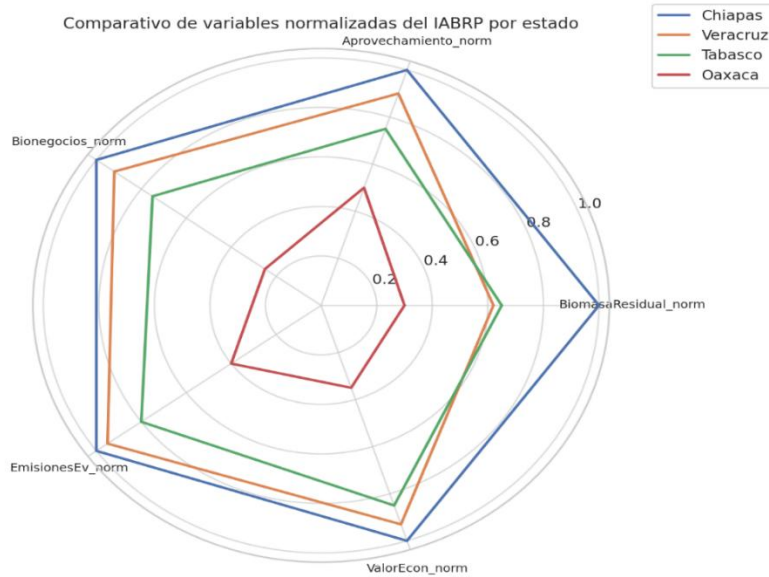
# Normalizar variables y calcular índice
datos_norm = datos.copy()
datos_norm['X1'] = normalize(datos['BiomasaResidual_t'])
datos_norm['X2'] = normalize(datos['Aprovechamiento_pct'])
datos_norm['X3'] = normalize(datos['Bionegocios'])
datos_norm['X4'] = normalize(datos['EmisionesEv_tCO2eq'])
datos_norm['X5'] = normalize(datos['ValorEconomico_MXN'])
datos_norm['IABRP'] = 0.20*datos_norm['X1'] + 0.25*datos_norm['X2']
+ 0.20*datos_norm['X3'] + 0.15*datos_norm['X4'] + 0.20*datos_norm['X5']

# Visualizar tabla
print("\nDatos normalizados con índice IABRP:")
print(datos_norm[['Estado', 'IABRP']])

```

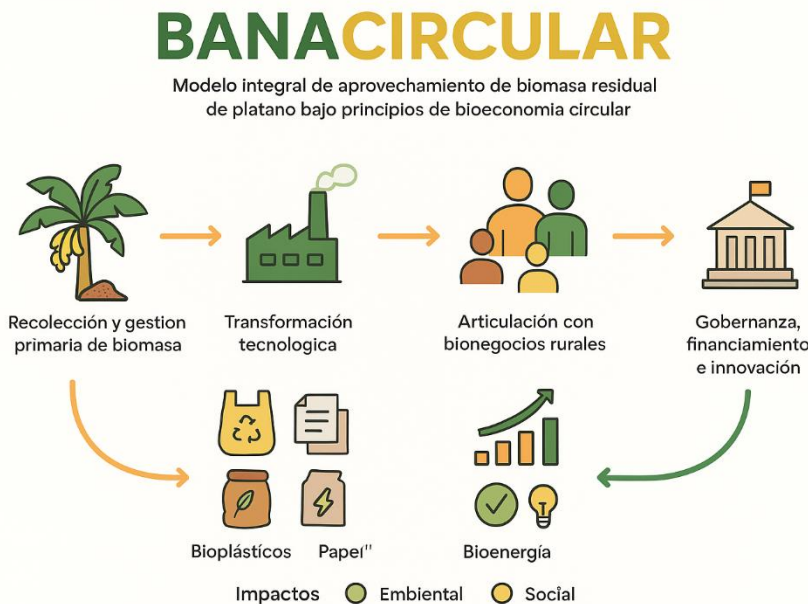
Fuente: Elaboración propia a partir de clases de Estadística y Programación (Universidad Autónoma Chapingo, curso 2024–2025) y del código en Python desarrollado por la autora.

Anexo 4. Gráfico radar comparativo de variables del índice IABRP



Fuente: Elaboración propia con base en resultados del índice IABRP obtenidos a través de la presente investigación.

Anexo 5. Diagrama del modelo BANACIRCULAR



Fuente: Elaboración propia a partir de Gómez Soto, J. A., Sánchez Toro, Ó. J., & Matallana Pérez, L. G. (2021). *Procesos de transformación: Perspectiva de aprovechamiento para los residuos de la agroindustria del plátano*. Revista Facultad de Ingeniería, 30(1).

