



**REPÚBLICA DEL ECUADOR**

**UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO  
FACULTAD DE POSGRADO**

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y  
POSGRADO**

**INFORME DE INVESTIGACIÓN  
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:**

**MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGÍA**

**TEMA:  
IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE OPCIONES DE  
BIOCOMBUSTIBLES DE SEGUNDA GENERACIÓN PARA LA  
DIVERSIFICACIÓN DE LA MATRIZ ENERGÉTICA EN ECUADOR**

**Autores :**  
CAÑARTE MANRIQUE JUAN PABLO  
CÁCERES AYARZA GONZALO KEVIN

**Director:**  
ING. ALCAZAR ESPINOZA JAVIER MGT.

*Milagro, 2025*

## Derechos de autor

**Sr. Dr.**

**Fabrizio Guevara Viejó**

Rector de la Universidad Estatal de Milagro

Presente.

Yo, **CAÑARTE MANRIQUE JUAN PABLO** en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de este informe de investigación, mediante el presente documento, libre y voluntariamente cedo los derechos de Autor de este proyecto de desarrollo, que fue realizada como requisito previo para la obtención de mi Grado, de **MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGÍA**, como aporte a la Línea de Investigación **AGRONOMÍA Y PRODUCCIÓN DE BIOMASA** de conformidad con el Art. 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, concedo a favor de la Universidad Estatal de Milagro una licencia gratuita, intransferible y exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Conservo a mi favor todos los derechos de autor sobre la obra, establecidos en la normativa citada.

Así mismo, autorizo a la Universidad Estatal de Milagro para que realice la digitalización y publicación de este Proyecto de Investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

El autor declara que la obra objeto de la presente autorización es original en su forma de expresión y no infringe el derecho de autor de terceros, asumiendo la responsabilidad por cualquier reclamación que pudiera presentarse por esta causa y liberando a la Universidad de toda responsabilidad.

Milagro, 22 de junio del 2015

Cañarte Manrique Juan Pablo

1350387674

## Derechos de autor

**Sr. Dr.**

**Fabricio Guevara Viejó**

Rector de la Universidad Estatal de Milagro

Presente.

Yo, **CÁCERES AYARZA GONZALO KEVIN** en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de este informe de investigación, mediante el presente documento, libre y voluntariamente cedo los derechos de Autor de este proyecto de desarrollo, que fue realizada como requisito previo para la obtención de mi Grado, de **MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGÍA**, como aporte a la Línea de Investigación **AGRONOMÍA Y PRODUCCIÓN DE BIOMASA** de conformidad con el Art. 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, concedo a favor de la Universidad Estatal de Milagro una licencia gratuita, intransferible y exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Conservo a mi favor todos los derechos de autor sobre la obra, establecidos en la normativa citada.

Así mismo, autorizo a la Universidad Estatal de Milagro para que realice la digitalización y publicación de este Proyecto de Investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

El autor declara que la obra objeto de la presente autorización es original en su forma de expresión y no infringe el derecho de autor de terceros, asumiendo la responsabilidad por cualquier reclamación que pudiera presentarse por esta causa y liberando a la Universidad de toda responsabilidad.

Milagro, 22 de junio del 2015

Cáceres Ayarza Gonzalo Kevin

0958577710

## **Aprobación del tutor del Trabajo de Titulación**

Yo, **ALCAZAR ESPINOZA JAVIER** en mi calidad de director del trabajo de titulación, elaborado por **CAÑARTE MANRIQUE JUAN PABLO**, cuyo tema es **IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE OPCIONES DE BIOCOMBUSTIBLES DE SEGUNDA GENERACIÓN PARA LA DIVERSIFICACIÓN DE LA MATRIZ ENERGÉTICA EN ECUADOR**, que aporta a la Línea de Investigación **AGRONOMÍA Y PRODUCCIÓN DE BIOMASA**, previo a la obtención del Grado **MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGÍA**. Trabajo de titulación que consiste en una propuesta innovadora que contiene, como mínimo, una investigación exploratoria y diagnóstica, base conceptual, conclusiones y fuentes de consulta, considero que el mismo reúne los requisitos y méritos necesarios para ser sometido a la evaluación por parte del tribunal calificador que se designe, por lo que lo **APRUEBO**, a fin de que el trabajo sea habilitado para continuar con el proceso de titulación de la alternativa de Informe de Investigación de la Universidad Estatal de Milagro.

Milagro, 22 de junio del 2015

Ing. Alcázar Espinoza Javier Mgt.

1203404643

## **Aprobación del tutor del Trabajo de Titulación**

Yo, **ALCAZAR ESPINOZA JAVIER** en mi calidad de director del trabajo de titulación, elaborado por **CÁCERES AYARZA GONZALO KEVIN**, cuyo tema es **IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE OPCIONES DE BIOCOMBUSTIBLES DE SEGUNDA GENERACIÓN PARA LA DIVERSIFICACIÓN DE LA MATRIZ ENERGÉTICA EN ECUADOR**, que aporta a la Línea de Investigación **AGRONOMÍA Y PRODUCCIÓN DE BIOMASA**, previo a la obtención del Grado **MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGÍA**. Trabajo de titulación que consiste en una propuesta innovadora que contiene, como mínimo, una investigación exploratoria y diagnóstica, base conceptual, conclusiones y fuentes de consulta, considero que el mismo reúne los requisitos y méritos necesarios para ser sometido a la evaluación por parte del tribunal calificador que se designe, por lo que lo **APRUEBO**, a fin de que el trabajo sea habilitado para continuar con el proceso de titulación de la alternativa de Informe de Investigación de la Universidad Estatal de Milagro.

Milagro, 22 de junio del 2015

Ing. Alcázar Espinoza Javier Mgt.

1203404643

## Aprobación del tribunal calificador



### VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO FACULTAD DE POSGRADO ACTA DE SUSTENTACIÓN MAESTRÍA EN BIOTECNOLOGÍA

En la Facultad de Posgrado de la Universidad Estatal de Milagro, a los seis días del mes de agosto del dos mil veinticinco, siendo las 12:48 horas, de forma VIRTUAL comparece el/la maestrante, MD CAÑARTE MANRIQUE JUAN PABLO, a defender el Trabajo de Titulación denominado " IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE OPCIONES DE BIOCOMBUSTIBLES DE SEGUNDA GENERACIÓN PARA LA DIVERSIFICACIÓN DE LA MATRIZ ENERGÉTICA EN ECUADOR.", ante el Tribunal de Calificación integrado por: CHENCHE LOPEZ OSCAR MAURICIO, Presidente(a), Dra. NORIEGA VERDUGO DELIA DOLORES en calidad de Vocal; y, Ph.D. VALENZUELA COBOS JUAN DIEGO que actúa como Secretario/a.

Una vez defendido el trabajo de titulación; examinado por los integrantes del Tribunal de Calificación, escuchada la defensa y las preguntas formuladas sobre el contenido del mismo al maestrante compareciente, durante el tiempo reglamentario, obtuvo la calificación de: **97.00** equivalente a: **EXCELENTE**.

Para constancia de lo actuado firman en unidad de acto el Tribunal de Calificación, siendo las 15:00 horas.



CHENCHE LOPEZ OSCAR MAURICIO  
PRESIDENTE/A DEL TRIBUNAL



Dra. NORIEGA VERDUGO DELIA DOLORES  
VOCAL



Ph.D. VALENZUELA COBOS JUAN DIEGO  
SECRETARIO/A DEL TRIBUNAL



MD CAÑARTE MANRIQUE JUAN PABLO  
MAGISTER

## Aprobación del tribunal calificador



### VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO FACULTAD DE POSGRADO ACTA DE SUSTENTACIÓN MAESTRÍA EN BIOTECNOLOGÍA

En la Facultad de Posgrado de la Universidad Estatal de Milagro, a los seis días del mes de agosto del dos mil veinticinco, siendo las 12:48 horas, de forma VIRTUAL comparece el/la maestrante, CACERES AYARZA GONZALO KEVIN, a defender el Trabajo de Titulación denominado " IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE OPCIONES DE BIOCOMBUSTIBLES DE SEGUNDA GENERACIÓN PARA LA DIVERSIFICACIÓN DE LA MATRIZ ENERGÉTICA EN ECUADOR.", ante el Tribunal de Calificación integrado por: CHENCHE LOPEZ OSCAR MAURICIO, Presidente(a), Dra. NORIEGA VERDUGO DELIA DOLORES en calidad de Vocal; y, Ph.D. VALENZUELA COBOS JUAN DIEGO que actúa como Secretario/a.

Una vez defendido el trabajo de titulación; examinado por los integrantes del Tribunal de Calificación, escuchada la defensa y las preguntas formuladas sobre el contenido del mismo al maestrante compareciente, durante el tiempo reglamentario, obtuvo la calificación de: **96.67** equivalente a: **EXCELENTE**.

Para constancia de lo actuado firman en unidad de acto el Tribunal de Calificación, siendo las 15:00 horas.



CHENCHE LOPEZ OSCAR MAURICIO  
PRESIDENTE/A DEL TRIBUNAL



Dra. NORIEGA VERDUGO DELIA DOLORES  
VOCAL



Ph.D. VALENZUELA COBOS JUAN DIEGO  
SECRETARIO/A DEL TRIBUNAL



CACERES AYARZA GONZALO KEVIN  
MAGISTER

## DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado a Dios, quien me ha permitido sonreír ante todos mis logros que son resultado de tu ayuda, que cuando tropiezo, me pones a prueba, aprendo de mis errores y me doy cuenta de lo que pones en frente mío para que mejore como persona y crezca de diversas maneras.

A mi madre Laritza Ayarza Yugcha por guiarme durante toda mi vida por el camino del estudio y la superación, por todo el esfuerzo y sacrificio que ha realizado para que pudiera llegar hasta este punto de mi vida, gracias por todos los consejos, regaños y enseñanzas ya que me ha ayudado a mantenerme motivado en los momentos más difíciles. A mi hermana Jessica por su constante apoyo en mi formación académica.

### *Cáceres Ayarza Gonzalo Kevin*

Con profunda gratitud y sincero aprecio, dedico este trabajo de investigación, A Dios, fuente inagotable de toda sabiduría y fortaleza, y a la vasta energía divina que nos rodea, que guía cada paso e ilumina el camino del conocimiento.

A mi amada familia, cuyo apoyo incondicional, paciencia infinita y amor constante fueron el pilar fundamental que me sostuvo y motivó en cada etapa de este arduo pero gratificante proceso académico.

Finalmente, a la ciencia y la investigación, por ser la luz que impulsa el progreso y la innovación. Que este pequeño aporte contribuya a la construcción de un futuro más sostenible y próspero para nuestro país.

### *Cañarte Manrique Juan Pablo*

## AGRADECIMIENTOS

A lo largo de este camino lleno de aprendizajes, retos y crecimiento personal, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que, de una u otra forma, hicieron posible la realización de esta tesis.

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la fuerza, la salud y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa.

A mi madre por ser mi pilar incondicional, por su amor y su apoyo constante, incluso en los momentos más difíciles. A mi hermana, por su compañía y palabras de aliento que siempre me motivaron a seguir adelante.

Un agradecimiento muy especial a mi compañero de tesis, por su compromiso, responsabilidad y compañerismo a lo largo de este proceso. Gracias por cada hora de trabajo compartido, por las ideas, por el esfuerzo y por el apoyo en los momentos de presión.

A mi tutor, por su guía, paciencia y compromiso con mi formación. Su experiencia y dedicación fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

### *Cáceres Ayarza Gonzalo Kevin*

En primer lugar, agradezco a Dios y a la energía pura y vasta del universo por la fortaleza, la inspiración y la claridad mental que me acompañaron en cada etapa de este proceso.

A mi amada familia, por ser el pilar inquebrantable de mi vida. Su amor incondicional, paciencia infinita y apoyo constante fueron el motor fundamental que me impulsó a superar los desafíos y a persistir en mis metas académicas.

A la Universidad Estatal De Milagro, por abrirme sus puertas y brindarme el espacio y los recursos necesarios para desarrollar esta investigación. A sus distinguidos docentes, cuya sabiduría, guía y dedicación enriquecieron mi formación y despertaron en mí una profunda pasión por el conocimiento.

Un agradecimiento muy especial a mi tutor de tesis, por su invaluable orientación, su experta dirección y su confianza inquebrantable en este proyecto. Su rigor académico y su apoyo fueron cruciales para alcanzar la calidad deseada.

Finalmente, a mi compañero de investigación, por las discusiones enriquecedoras, la colaboración y el apoyo mutuo que hicieron más llevadero y productivo este camino.

### *Cañarte Manrique Juan Pablo*

## RESUMEN

La bioenergía emerge como una alternativa estratégica y viable para Ecuador, fundamental para diversificar su matriz energética, actualmente muy dependiente de la hidroelectricidad y vulnerable a las variaciones climáticas que han causado apagones. El país posee un potencial considerable pero subexplotado en el aprovechamiento de residuos agrícolas y agroindustriales, con un Potencial Eléctrico Energético Equivalente (PEEE) estimado en 2407.68 GWh anuales de cultivos como caña de azúcar, palma aceitera, maíz y arroz. Técnicamente, su factibilidad se demuestra con procesos termoquímicos para biomásas de baja humedad y bioquímicos para las de alta humedad, donde el pretratamiento es crucial para la eficiencia. Financieramente, la bioenergía exhibe un Costo Nivelado de Energía (LCOE) competitivo de 0.097 USD/kWh frente a otras fuentes en el mercado ecuatoriano, identificándose las provincias costeras como Guayas, Los Ríos y el cantón Quinindé en Esmeraldas como las de mayor aptitud para la ubicación de plantas. Su implementación a gran escala ofrece beneficios como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la generación de empleo rural y el fomento de una economía circular. Sin embargo, persisten desafíos importantes, incluyendo la competencia de los combustibles fósiles, la falta de inventarios detallados de biomasa, la escasa promoción tecnológica y la limitada inversión de capital, complejizados por la incertidumbre regulatoria y fiscal, a pesar de que la Ley de Competitividad Energética de 2024 prioriza la biomasa de desechos sólidos orgánicos y fija un "Precio Preferente" para la autogeneración.

**Palabras clave:** Bioenergía, Residuos agrícolas, Ecuador, Generación eléctrica, Matriz energética, Costo Nivelado de Energía (LCOE), Generación distribuida

## ABSTRACT

Bioenergy is emerging as a strategic and viable alternative for Ecuador, crucial for diversifying its energy matrix. Currently, this matrix relies heavily on hydroelectricity, making it vulnerable to climate variations that have caused blackouts. The country possesses considerable yet underexploited potential in utilizing agricultural and agro-industrial waste, with a national Equivalent Electrical Energy Potential (PEEE) estimated at 2407.68 GWh annually from key crops like sugarcane, oil palm, corn, and rice. Technically, its feasibility is demonstrated through thermochemical processes for low-moisture biomass and biochemical processes for high-moisture biomass, where pretreatment is crucial for efficiency. Financially, bioenergy shows a competitive Levelized Cost of Energy (LCOE) of 0.097 USD/kWh compared to other sources in the Ecuadorian market. Coastal provinces such as Guayas, Los Ríos, and the Quinindé canton in Esmeraldas have been identified as the most suitable areas for strategically locating bioenergy plants. Large-scale implementation promises benefits like reducing greenhouse gas emissions, generating rural employment, and fostering a circular economy. Nevertheless, significant challenges persist, including competition from fossil fuels, a lack of detailed biomass inventories, insufficient technological promotion, and limited capital investment. These hurdles are further complicated by regulatory and fiscal uncertainty, despite the 2024 Energy Competitiveness Law prioritizing biomass from organic solid waste and establishing a "Preferential Price" for self-generation.

**Keywords:** Bioenergy, Agricultural waste, Ecuador, Electricity generation, Energy matrix, Levelized Cost of Energy (LCOE), Distributed generation

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Fuentes de energía eléctrica a nivel mundial. Recogido de: (IRENA, s/f-c).....	2
Ilustración 2 Comparación de la Capacidad Eléctrica por MW entre Sudamérica y Asia. Elaboración propia. Fuente: (IRENA, s/f-b) .....	3
Ilustración 3 Clasificación de la biomasa. Elaboración propia. Fuente (Fernández et al., 2015) .....	14
Ilustración 4 Madurez Tecnológica de la Biomasa a lo largo del Tiempo. Recogido de: (Tech Solutions, s/f).....	17
Ilustración 5 Clasificación de los Procesos de Transformación de biomasa. Elaboración propia. Fuente: (Secretaría de Energía, s/f).....	18
Ilustración 6 Crecimiento energético anual de la biomasa en 2023. Recogido de: (María Eliza & Yulissa del Cisne, s/f) .....	34
Ilustración 7 Producción útil de residuos en toneladas de cada cultivo seleccionado. Elaboración propia. Recogido de:(María Eliza & Yulissa del Cisne, s/f)	35
Ilustración 8 Producción Mensual Neta - Por Tipo de Tecnología: 2910.66 GWh. Recogido de: (CENACE, s/f) .....	38
Ilustración 9 Estimación de la biomasa residual útil, en toneladas, por cultivo específico. Elaboración propia. Fuente: (María Eliza & Yulissa del Cisne, s/f) .....	45
Ilustración 10 Periodo de cosecha de los cultivos seleccionados. Recogido de: (María Eliza & Yulissa del Cisne, s/f) .....	47
Ilustración 11 Distribución espacial y la producción anual en toneladas de los cultivos clave ecuatorianos. a) caña de azúcar, b) arroz, c) palma aceitera y d) maíz duro seco. Recogido de: (María Eliza & Yulissa del C	

isne, s/f).....	51
Ilustración 12 Localización de plantas de generación eléctrica a partir de residuo de palma africana. Recogido de: (Sagastume Gutiérrez et al., 2020).....	52
Ilustración 13 Flujograma PRISMA.....	59
Ilustración 14 Mapeo de los artículos revisados en la plataforma Research Rabbit.	
*VERDE: Artículos en revisión *CELESTE: Artículos con conexiones según Autor, Temática Metodología, similares.....	60

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Producción anual de cultivos en toneladas. Elaboración propia. Fuente: (María Eliza & Yulissa del Cisne, s/f) .....	44
--	----

## INDICE

Derechos de autor .....	II
Derechos de autor .....	III
Aprobación del tutor del Trabajo de Titulación .....	IV
Aprobación del tutor del Trabajo de Titulación .....	V
Aprobación del tribunal calificador .....	VI
Aprobación del tribunal calificador .....	VII
AGRADECIMIENTOS .....	IX
RESUMEN.....	X
ABSTRACT .....	XI
LISTA DE ILUSTRACIONES .....	
LISTA DE TABLAS .....	
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I: PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN .....	6
1.1    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	6
1.2    DELIMITACION DEL PROBLEMA.....	7
1.3    FORMULACION DEL PROBLEMA.....	8
1.4    PREGUNTAS DE INVESTIGACION.....	8
1.5    OBJETIVOS:.....	8
1.5.1    Objetivo Principal: .....	8
1.5.2    Objetivos específicos: .....	9
1.6    HIPOTESIS .....	9
1.7    JUSTIFICACION .....	9
CAPITULO II: MARCO TEORICO .....	11
2.1    Antecedentes.....	11
2.2    Biomasa como Fuente para la Generación de Electricidad.....	11
2.3    Bioenergía para la Descentralización de la Generación Eléctrica .....	12
2.4    Caracterización Físicoquímica y Tipológica de la Biomasa.....	14
2.5    Tecnologías de conversión energética de la biomasa .....	16
2.6    Procesos Termoquímicos: .....	20
2.6.1    Gasificación .....	20
2.6.2    Combustión Directa .....	20
2.6.3    Pirólisis .....	21
2.6.4    Licuefacción Hidrotermal .....	22

2.6.5	Torrefacción.....	23
2.7	Procesos Bioquímicos/Biológicos:.....	23
2.7.1	Fermentación.....	24
2.7.2	Digestión Anaeróbica .....	24
2.7.3	Digestión Aeróbica .....	25
2.7.4	Hidrólisis Enzimática .....	26
2.7.5	Transesterificación.....	27
2.7.6	Hidrogenación.....	27
2.8	PRETRATAMIENTO DE BIOMASA .....	28
2.8.1	Pretratamiento Físico .....	29
2.8.2	Pretratamiento Químico .....	29
2.8.3	Pretratamiento físico-químico .....	30
2.8.4	Pretratamiento biológico .....	30
2.8.5	Pretratamiento con Solventes más limpios.....	31
2.9	Importancia de la Eliminación de Lignina .....	31
2.10	Consideraciones Económicas .....	32
2.11	Composición de la Biomasa .....	32
2.12	Impacto General .....	32
2.13	Experiencias Previas en América Latina y Ecuador.....	32
2.14	Situación Energética en Ecuador.....	35
2.15	Marco Regulatorio y Políticas Energéticas .....	39
2.16	Autogeneración como Modelo Alternativo de Delegación .....	39
2.17	Impacto de las Políticas Fiscales y la Inversión Extranjera Directa (IED).....	40
2.18	La Ley de Competitividad Energética.....	41
2.19	Potencial Energético de Residuos Agrícolas .....	43
2.19.1	Clasificación y Cuantificación de Residuos .....	43
2.19.2	Cálculo de potencial energético.....	47
2.19.3	Determinación del Potencial Energético de la Biomasa y los ajustes por contenido Hídrico .....	47
2.19.4	Obtención del Potencial Energético.....	48
2.20	Distribución geográfica del residuo .....	50
2.21	Costo de inversion.....	52
CAPITULO III: METODOLOGIA .....		54
3.1	Tipo y diseño de investigación.....	54
3.2	Población y la muestra .....	54
3.2.1	Características de la población.....	54

3.2.2	Delimitación de la población .....	55
3.3	Criterios de inclusión .....	55
3.3.1	Operación usada:.....	56
3.4	Criterios de exclusión .....	56
3.4.1	Operación usada:.....	56
3.5	Tipo de muestra .....	57
3.6	Tamaño de la muestra .....	57
3.7	Proceso de selección de la muestra .....	57
3.8	Métodos y técnicas .....	58
3.9	Procesamiento estadístico de la información .....	60
CAPITULO IV: RESULTADOS .....		62
4.1	Fuentes de Biomasa y Potencial Energético en Ecuador .....	62
4.2	Viabilidad Económica y Costos .....	63
4.3	Ubicación Estratégica de Plantas.....	64
4.4	Beneficios e Impactos de la Bioenergía .....	64
4.5	Desafíos y Marco Regulatorio.....	65
CAPITULO V: DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		67
5.1	DISCUSIÓN.....	67
5.2	CONCLUSIONES.....	68
5.3	RECOMENDACIONES.....	70
BIBLIOGRAFÍA .....		71

## INTRODUCCIÓN

En los últimos diez años, la producción de energía renovable a nivel mundial ha crecido en promedio un 16%, con Asia a la cabeza de este incremento. Dentro de las energías renovables, la bioenergía se ha vuelto una opción muy prometedora. (Vega et al., 2024)

Esto se debe a su capacidad para transformar residuos orgánicos de distintas fuentes en electricidad sostenible, lo que también ayuda a disminuir la cantidad de residuos y las emisiones contaminantes. Actualmente, la capacidad de bioenergía instalada en el mundo tiene a China a la cabeza, seguida de Brasil, Estados Unidos e India. En América Latina y el Caribe, Brasil se destaca como el principal productor de bioenergía, aunque otros países de la región han tenido un crecimiento más lento en este sector en comparación con el promedio mundial. (Vega et al., 2024)

En 2024, la bioenergía, que engloba biocombustibles sólidos, biogás, residuos municipales renovables y biocombustibles líquidos (biodiésel y bioetanol), representó el 1.57% de la capacidad total instalada para la generación de electricidad a nivel global, según se muestra en la ilustración 1. Esta detalla el uso de diversas fuentes de energía para la generación eléctrica, desglosadas por su capacidad instalada en megavatios (MW) y tipo de tecnología. (IRENA, s/f-c)

## Fuentes de energía eléctrica a nivel mundial

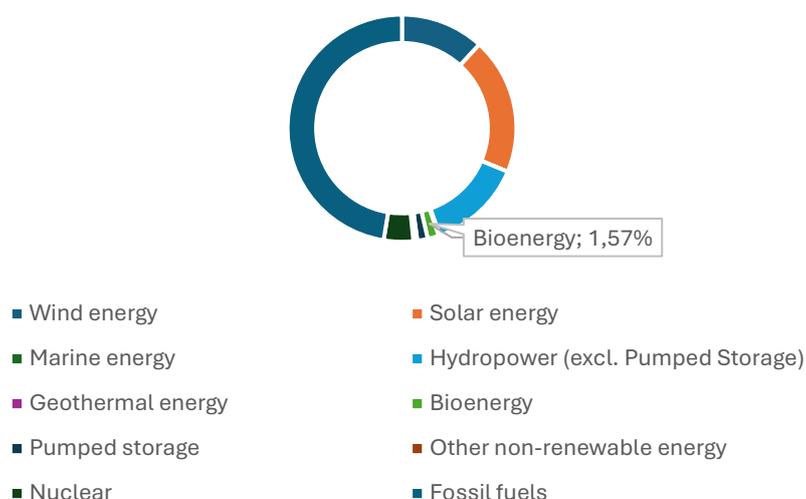


Ilustración 1 Fuentes de energía eléctrica a nivel mundial. Recogido de: (IRENA, s/f-c)

La bioenergía constituye un proceso intrincado que convierte la biomasa en diversas formas de energía, empleando para ello una variedad de materias primas y métodos tecnológicos. Un área con enorme potencial de crecimiento es el uso de residuos agrícolas, que actualmente representan menos del 3% de la producción total de bioenergía. Se estima que el aprovechamiento de los residuos de los principales cultivos a nivel mundial podría generar entre 4.3 y 9.4 mil millones de toneladas de biomasa anualmente, lo que se traduciría en un potencial energético teórico de entre 17.8 y 82.3 exajulios (EJ). (WBA - World Bioenergy Association, s/f) Optimizar la generación de energía a partir de estos residuos agrícolas podría cubrir aproximadamente del 3% al 14% del suministro energético global. (WBA - World Bioenergy Association, s/f)

Entre 2013 y 2024, Asia ha sido la región con mayor crecimiento en la generación de bioenergía, experimentando un impresionante aumento del 1172.40%. En contraste, Sudamérica ha mostrado un crecimiento del 171.51% en el mismo periodo, lo que resalta la disparidad en el desarrollo de la bioenergía entre ambas regiones, como se ilustra en la ilustración 2. (IRENA, s/f-b) Si bien Brasil ha sido líder en el ámbito bioenergético de

Sudamérica, Ecuador dispone de una vasta capacidad aún no explorada para transformar una diversidad de residuos en electricidad.

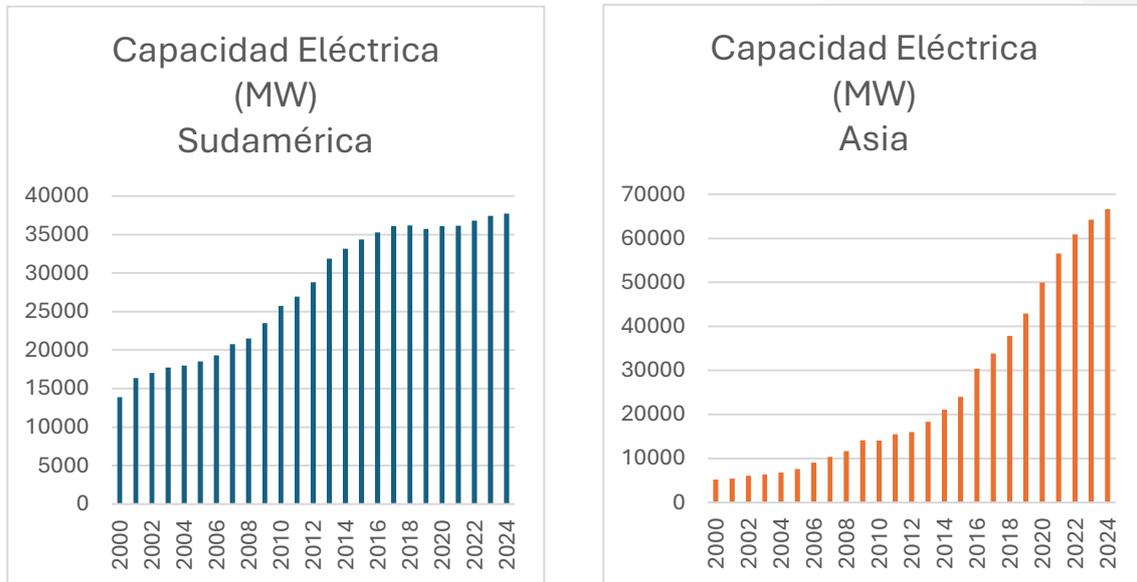


Ilustración 2 Comparación de la Capacidad Eléctrica por MW entre Sudamérica y Asia. Elaboración propia. Fuente: (IRENA, s/f-b)

América Latina posee condiciones climáticas, ambientales y geográficas altamente favorables para el desarrollo de la bioenergía. Gracias a estas características, sumadas a las políticas y programas nacionales que buscan impulsar el uso de biomasa para producir biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos, la región se posiciona estratégicamente para transformar sus recursos naturales en una fuente de energía sostenible. La Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA) estima que la región tiene un potencial técnico de 3 EJ/año de residuos agrícolas y agroindustriales, una cifra comparable con la del sudeste asiático. (IRENA, s/f-b)

Considerando la matriz energética de Ecuador, que principalmente depende de la hidroelectricidad, la fluctuación climática del país subraya la urgencia de diversificar sus fuentes de energía. En este contexto, la biomasa emerge como una alternativa estratégica prometedora, dada la vasta cantidad de residuos que podrían transformarse en bioenergía.

A pesar de este potencial, la materialización de la bioenergía en Ecuador se topa con impedimentos importantes entre estos se cuentan la intensa competencia de los combustibles fósiles, cuyo costo es bajo, la falta de registros detallados sobre la disponibilidad y la ubicación de la biomasa, el apoyo insuficiente a las tecnologías de conversión energética, y la limitada inversión de capital en este ámbito. (Peláez-Samaniego y J. L. Espinoza Abad, s/f) Al agregar esta energía renovable no solo contribuiría a aminorar la dependencia hidroeléctrica y a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también impulsaría la generación de empleo en zonas rurales y robustecería la seguridad energética del país. (Peláez-Samaniego y J. L. Espinoza Abad, s/f) Este panorama resalta la necesidad de fomentar prácticas sostenibles para el uso de los recursos naturales en la producción energética, tanto a nivel regional como en naciones con singularidades ambientales y rasgos económicos como los de Ecuador.

La generación distribuida se presenta como una alternativa eficaz para diversificar las fuentes de energía y fortalecer la infraestructura eléctrica existente. Este enfoque, que implica producir energía en menor escala y cerca de los puntos de consumo, ofrece una oportunidad significativa para integrar fuentes renovables como la bioenergía. (García-Saldarriaga & Rodríguez-Gámez, 2022) Al operar a una escala reducida y cercano a donde se demanda la energía, es adecuado para incorporar tecnologías de energía renovable, incluida la bioenergía, en la situación energética ecuatoriana. (García-Saldarriaga & Rodríguez-Gámez, 2022) De esta manera, no solo se facilita la explotación de los recursos naturales propios del país, como los subproductos agrícolas, sino que también se logra una producción energética más flexible y adaptada a las necesidades locales de consumo.

La combinación de la bioenergía con sistemas de generación distribuida podría mejorar notablemente la eficiencia en el manejo energético. (Blanco-Orozco, 2021) Además, esta estrategia ofrece ventajas considerables, como la reducción de las pérdidas energéticas durante el transporte, una mayor variedad en las fuentes de energía utilizadas y el fomento de un modelo de desarrollo sostenible que aprovecha las características únicas y los recursos naturales de Ecuador. (García-Saldarriaga & Rodríguez-Gómez, 2022)

## **CAPITULO I: PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Dado que Ecuador se apoya principalmente en combustibles fósiles y necesita diversificar su suministro energético, ha crecido el interés por los biocombustibles de segunda generación. Estos se obtienen de fuentes no alimentarias, como desechos agroindustriales y forestales, y representan una opción más limpia y sostenible. Pero su puesta en marcha presenta varios obstáculos, entre ellos la carencia de una infraestructura apropiada, la necesidad de políticas estables y el desconocimiento sobre sus efectos ambientales a largo plazo. (Ramos Rivadeneira et al., 2023)

La matriz energética ecuatoriana enfrenta un reto considerable debido a su gran dependencia de la energía hidroeléctrica, siendo vulnerable a los cambios climáticos, provocando interrupciones eléctricas generalizadas que afectan tanto la vida cotidiana como la economía. Por lo que la implementación de biocombustibles de segunda generación se perfila como una solución prometedora para diversificar la matriz energética y reducir el uso de combustibles fósiles. (Rojas-Asuero et al., s/f)

Para comprender el verdadero impacto ambiental de estos biocombustibles, es crucial realizar un análisis de ciclo de vida (ACV) que abarque desde la obtención de las materias primas hasta su consumo final, evaluando todos los impactos asociados. Investigaciones sugieren que el desarrollo de estos biocombustibles podría ser una estrategia eficaz para disminuir los apagones y garantizar un suministro de energía más constante e independiente de las condiciones climáticas. (German, 2021).

## 1.2 DELIMITACION DEL PROBLEMA

Esta investigación con el propósito de revisar el estado del arte se dedica a evaluar el potencial de los subproductos agrícolas en Ecuador para su aprovechamiento energético. Por lo que esta revisión se enfoca en organizar la información ya existente y en entender cuántos residuos de biomasa se producen en las zonas agrícolas más importantes del país, además de calcular cuánta energía se podría obtener de ellos.

Los resultados de esta revisión bibliográfica son esenciales para orientar pasos futuros, como la creación de un mapeo detallado con ubicaciones precisas que señale sitios estratégicos para próximos proyectos de bioenergía. Esto considerará factores cruciales como el acceso a carreteras, la cercanía a las redes eléctricas y las características del relieve del terreno. También la información recopilada en esta literatura ayuda a realizar una primera evaluación sobre si es viable, técnica y económicamente, transformar estos residuos en electricidad. Esto implica establecer el costo nivelado de la energía (LCOE) y realizar un ejercicio de benchmarking comparativo con otras tecnologías de generación energética presentes en el panorama nacional, así como con los costos de producción de biomasa en diversos contextos geográficos y económicos a escala global.

El diseño de este estudio busca producir resultados de aplicabilidad directa, tanto en el ámbito de la ingeniería como en la formulación de políticas energéticas. La finalidad última de esta investigación es coadyuvar a la transición y diversificación de la matriz energética ecuatoriana mediante la integración de soluciones energéticas sostenibles fundamentadas en el vasto potencial de la biomasa local.

### **1.3 FORMULACION DEL PROBLEMA**

¿Cuál es el estado del arte actual de las opciones de biocombustibles de segunda generación técnica, económica y ambientalmente aplicables en Ecuador para la diversificación y fortalecimiento de su matriz de generación eléctrica?

### **1.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACION**

¿Cuáles son las materias primas residuales agrícolas y no alimentarias con mayor potencial para la producción de biocombustibles de segunda generación en Ecuador?

¿Qué tecnologías de conversión son las más estudiadas y prometedoras para transformar estas materias primas en biocombustibles aptos para la generación eléctrica en contextos similares a Ecuador?

¿Qué desafíos técnicos se han documentado en la implementación de estas tecnologías para la generación eléctrica a gran escala o distribuida?

¿Cómo se compara el costo nivelado de la energía (LCOE) de la generación eléctrica a partir de biocombustibles de segunda generación con el de la energía hidroeléctrica y otras fuentes convencionales y renovables en el contexto ecuatoriano?

¿Cuáles son los criterios de sostenibilidad que deben considerarse al evaluar la implementación de estas opciones en Ecuador?

¿Qué barreras socioeconómicas limitan la adopción a gran escala de estas tecnologías en las condiciones específicas de Ecuador?

### **1.5 OBJETIVOS:**

#### **1.5.1 Objetivo Principal:**

Sintetizar el estado del arte sobre las opciones de biocombustibles de segunda generación aplicables en Ecuador para la generación eléctrica.

### **1.5.2 Objetivos específicos:**

- Revisar fuentes potenciales de biomasa lignocelulósica disponibles en el país, evaluando su potencial energético.
- Describir principales tecnologías de conversión termoquímicas y bioquímicas para la producción de biocombustibles de segunda generación
- Identificar los impactos y beneficios ambientales, sociales y económicos, asociados a la implementación de proyectos de bioenergía basados en biocombustibles de segunda generación en contextos similares al ecuatoriano.
- Comparar experiencias internacionales aplicables a Ecuador.

### **1.6 HIPOTESIS**

Dado que la presente investigación se enmarca en un enfoque metodológico descriptivo y documental, no se ha formulado una hipótesis de trabajo. El propósito central de este estudio es compilar, analizar y sintetizar la información disponible sobre las opciones de biocombustibles de segunda generación aplicables en Ecuador para la generación eléctrica, identificando tendencias, oportunidades y limitaciones. Este abordaje exploratorio y sintético se guía por la pregunta principal y los objetivos específicos de investigación, los cuales delinearán claramente el alcance y las metas del estudio.

### **1.7 JUSTIFICACION**

La investigación acerca del avance de los biocombustibles de segunda generación en Ecuador adquiere una relevancia estratégica fundamental. Esto se debe a la necesidad de transformar la composición energética del país y reducir su notable desventaja a las variaciones hidrológicas, que proviene de su dependencia de la generación hidroeléctrica. (Naranjo-Silva, 2024) Este estudio brindará una contribución significativa al

conocimiento sobre fuentes de energía alternativas y renovables, al ofrecer información basada en datos y análisis detallados. Estos elementos servirán de base para formular políticas energéticas más efectivas y duraderas. En este escenario, los subproductos agrícolas se presentan como una fuente desaprovechada con un alto potencial inherente para impulsar la generación distribuida. Esto no solo ayudaría a disminuir la dependencia de fuentes tradicionales, sino que también favorecería la creación de empleos en el sector rural, promovería un desarrollo socioeconómico sostenible en las comunidades agrícolas y colaboraría activamente en la atenuación de los impactos del cambio climático.

Este proyecto se dedica a la evaluación de la integración sistémica de la bioenergía en la matriz eléctrica, aprovechando los recursos locales para generar electricidad. Mediante la valorización energética de lo que previamente se consideraba un residuo, se confiere un valor añadido a un desecho, y además se optimizan los protocolos de conversión energética a través de la implementación de tecnologías de vanguardia. Esto conduce a un aumento de la eficiencia en la producción de energía distribuida y a la entrega de un suministro energético más resistente y asequible.

## **CAPITULO II: MARCO TEORICO**

### **2.1 Antecedentes**

La Agenda 2030 de las Naciones Unidas, junto con sus Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), dados a conocer por la ONU en 2016, presenta una perspectiva amplia y detallada sobre el ámbito energético. El documento enfatiza que el Desarrollo Sostenible es un anhelo que concierne a todas las naciones, puesto que integra inherentemente los aspectos económicos, sociales y ambientales. El plan proyectado para el 2030 busca un cambio en el modelo de desarrollo actual, dando prioridad a la protección del medio ambiente. (Salvatierra Hansen Vik et al., s/f).

El Objetivo de Desarrollo Sostenible número 7 (ODS 7) aborda de manera específica la "Energía asequible y no contaminante". Su principal propósito es asegurar que toda la población tenga acceso a energía que sea accesible, segura, sostenible y moderna. (Salvatierra Hansen Vik et al., s/f)

Se reconoce que la energía es un fundamento irremplazable para el avance de los países, por lo que contar con energía sostenible se vuelve esencial, ya que, en el panorama mundial actual, la energía tiene el poder de transformar la vida de las personas, las organizaciones económicas y el estado del planeta. Esto conlleva a garantizar que todos puedan acceder a servicios energéticos actuales, mejorar su eficiencia y aumentar el uso de fuentes renovables. (Vélez Pizarro et al., 2024).

### **2.2 Biomasa como Fuente para la Generación de Electricidad**

La bioenergía se conceptualiza como la forma de energía obtenida a partir de la biomasa, material de origen orgánico que emana de ciclos biológicos y que ostenta un considerable potencial como recurso energético renovable. (Peláez-Samaniego y J. L. Espinoza Abad, s/f) Este sustrato biológico facilita la producción de diversas

manifestaciones energéticas, tales como electricidad, combustibles biológicos o biogás, a través de la aplicación de distintos procesos de transformación termoquímicos y bioquímicos.

La producción de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de biomasa puede materializarse a través de múltiples vías tecnológicas. Entre las aplicaciones de mayor prevalencia se encuentran la combustión directa del residuo de biomasa en sistemas de calderas, lo que resulta en la generación de vapor para el accionamiento de turbinas acopladas a generadores eléctricos. Otra metodología significativa es la gasificación de biomasa, la cual produce un gas de síntesis (syngas), combustible que posteriormente es incinerado en motores de combustión interna o turbinas de gas para la consecución de energía eléctrica.

La finalidad primordial de la adopción de biocombustibles radica en la disminución de las emisiones de GEI, al posibilitar la sustitución de una fracción del consumo de hidrocarburos fósiles, empleados históricamente en la motorización del sector transporte y en la generación de energía eléctrica. Pese a este beneficio ambiental, el cultivo de biomasa con propósitos energéticos introduce una rivalidad por los recursos terrestres frente a la producción de alimentos, constituyendo un punto de controversia significativo en la agenda pública. (Salinas Callejas & Quezada, 2009)

### **2.3 Bioenergía para la Descentralización de la Generación Eléctrica**

Constituyendo una opción sostenible, la generación distribuida alimentada por bioenergía se distingue por producir electricidad en la proximidad de los usuarios, capitalizando recursos de biomasa de origen local. Esta metodología elude la dependencia de vastas redes de transmisión, facilitando así el acceso a la energía en poblaciones rurales y aisladas, donde la inseguridad energética es prevalente. Según (Mohammed et al.,

2014), los beneficios asociados a este paradigma de generación son diversos y substanciales. En primer lugar, promueve la simplicidad tanto en la planificación como en la ejecución, demandando una infraestructura mínima y permitiendo un despliegue ágil. En segundo lugar, confiere una eficiencia energética superior a través de la integración de la producción eléctrica con servicios térmicos. Adicionalmente, se observa una reducción de la tensión sobre los sistemas centrales, lo que prolonga la vida útil de las instalaciones troncales. Provee, además, una independencia energética a las comunidades rurales, al asegurar un suministro autónomo y estable libre de combustibles importados. Contribuye también a la optimización de la gestión de la demanda en zonas específicas. Finalmente, se caracteriza por un aprovechamiento eficiente del espacio, ya que las instalaciones de generación distribuida de biomasa requieren una superficie menor en comparación con las centrales convencionales de gran envergadura, lo que favorece su integración en entornos rurales.

Los hallazgos de (Blanco-Orozco, 2021) revelan que, si bien la generación eléctrica a partir de biomasa gasificada es técnicamente viable en regiones con potencial de residuos agrícolas, como los departamentos de Chinandega y León en Nicaragua, su rentabilidad económica actual es limitada. El estudio subraya que los elevados costos de inversión inicial asociados a las centrales de biomasa impiden su competitividad frente a la red eléctrica existente. Por consiguiente, se enfatiza la necesidad imperativa de un robusto respaldo gubernamental y el diseño de políticas públicas favorables que establezcan un marco financiero propicio para catalizar la inversión privada en esta clase de tecnologías de energía renovable. Esta conclusión resalta que, a pesar de la factibilidad tecnológica, la viabilidad comercial depende críticamente de un entorno de soporte político y económico que mitigue las barreras de inversión inicial. (Blanco-Orozco, 2021)

## 2.4 Caracterización Físicoquímica y Tipológica de la Biomasa

Debido a la naturaleza heterogénea de la biomasa, la definición de este recurso se extiende a múltiples categorías que difieren en propiedades intrínsecas. En consecuencia, la comunidad científica ha elaborado diversas taxonomías, fundamentadas en criterios específicos que son de particular interés para la investigación y las aplicaciones energéticas. En la imagen se presenta, por tanto, como un compendio de los criterios clasificatorios más pertinentes identificados por estos autores, con el fin de proporcionar una visión sinóptica y clarificar los modelos de clasificación propuestos.



Ilustración 3 Clasificación de la biomasa. Elaboración propia. Fuente (Fernández et al., 2015)

En la literatura se establece una distinción fundamental en la categorización de la biomasa, dividiéndola en biomasa natural y biomasa residual. (Instituto Nacional de Preinversión, s/f) Mientras que la primera se origina de forma inherente en los ecosistemas, como los bosques, la biomasa residual constituye un coproducto de diversas actividades antropogénicas, que abarcan los sectores agrícola, ganadero, forestal e industrial (Instituto Nacional de Preinversión, s/f) (Serrano et al., s/f).

Dentro de la biomasa residual, se reconocen dos subcategorías principales: la biomasa residual seca, que se deriva de recursos generados por la actividad agrícola, forestal, la industria agroalimentaria y la industria maderera; y la biomasa residual húmeda, compuesta por vertidos biodegradables, tales como aguas residuales industriales y desechos agrícolas con alto contenido de humedad. (Vega et al., 2024)

La biomasa residual representa un recurso renovable de considerable valor estratégico, dado que no compite directamente por el acceso a recursos hídricos o edáficos con los cultivos destinados al consumo humano. Su aprovechamiento implica la valorización de subproductos que, de otro modo, serían desechados o requerirían un consumo adicional de recursos para su transporte o eliminación, frecuentemente mediante combustión ineficiente.

Independientemente de su origen o tipo, la biomasa está constituida primariamente por celulosa, hemicelulosa y lignina. (Instituto Nacional de Preinversión, s/f) La proporción de estos componentes macromoleculares puede fluctuar significativamente en función de la especie vegetal o el tipo de biomasa de la que se derive. (Vega et al., 2024)

Para diferenciar los distintos tipos de biomasa, se implementan procedimientos de caracterización destinados a desvelar su composición y, en consecuencia, optimizar los métodos para la liberación de su energía química, ya sea con fines de generación energética (eléctrica o térmica) o para la separación de compuestos químicos específicos. Este proceso analítico evalúa una serie de parámetros críticos. Entre los físicos se incluyen el tamaño y la distribución de partículas, las densidades (de partícula, a granel, específica), la porosidad y el área superficial. Los componentes del análisis proximal abarcan el contenido de humedad, cenizas, materia volátil y carbono orgánico total. A esto se suma el análisis elemental, que cuantifica el carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre.

Un indicador energético clave es el poder calorífico, que expresa la energía térmica liberada durante la combustión. Además, la relación carbono/nitrógeno y un análisis microbiológico para la identificación de cepas bacterianas son evaluaciones pertinentes que informan sobre el potencial de la biomasa en diversos procesos de transformación. (Tech Solutions, s/f)

## **2.5 Tecnologías de conversión energética de la biomasa**

Las tecnologías empleadas en la transformación de la biomasa varían considerablemente en términos de eficiencia de conversión y en los productos generados, dependiendo del proceso adoptado. La selección idónea de estos procesos y sus respectivas tecnologías está intrínsecamente ligada a los parámetros obtenidos de la caracterización de la biomasa. La inherente diversidad de las biomásas conduce a una proliferación de procesos y tecnologías. Así, mientras ciertas tecnologías han logrado una implementación a gran escala, otras que parecen sumamente promisorias aún se encuentran en fases de investigación y desarrollo, como la escala de laboratorio o planta piloto. Este estadio de desarrollo incipiente a menudo se traduce en costos de implementación poco definidos o considerablemente más elevados en comparación con las opciones ya maduras. Para proporcionar una referencia clara sobre el estado de desarrollo y los costos se muestra la madurez tecnológica de estas soluciones.

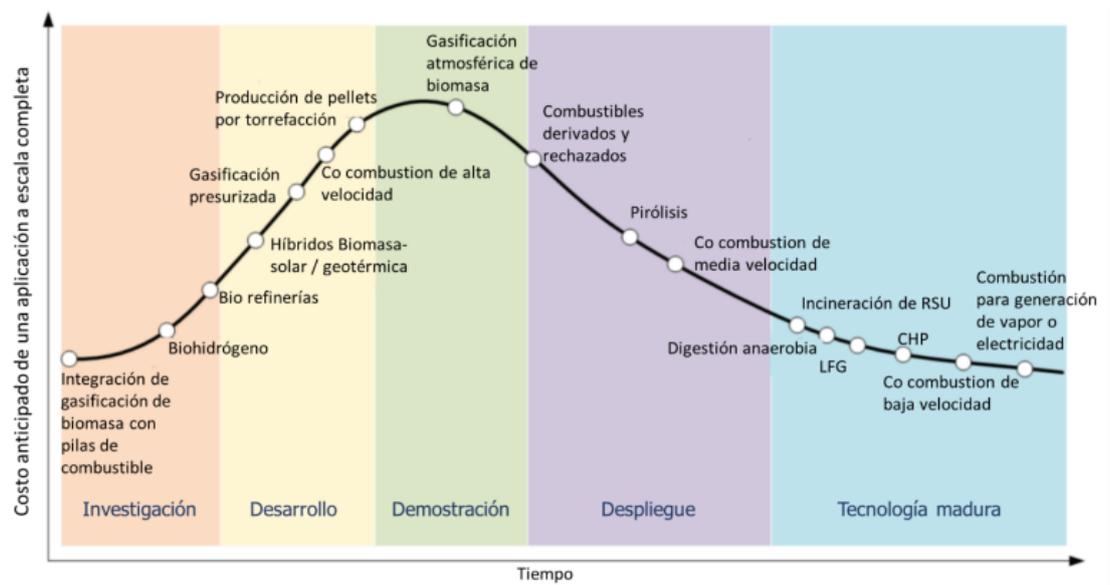


Ilustración 4 Madurez Tecnológica de la Biomasa a lo largo del Tiempo. Recogido de: (Tech Solutions, s/f)

La distinción entre los procesos presentados se fundamenta en la modalidad de transformación de la biomasa, abarcando metodologías físicas, bioquímicas las cuales involucran la acción de especies biológicas o microbiológicas, y bioquímicas. A continuación, se describe una clasificación de estos procesos de conversión, idóneos para cada tipo de biomasa y su potencial reactor.

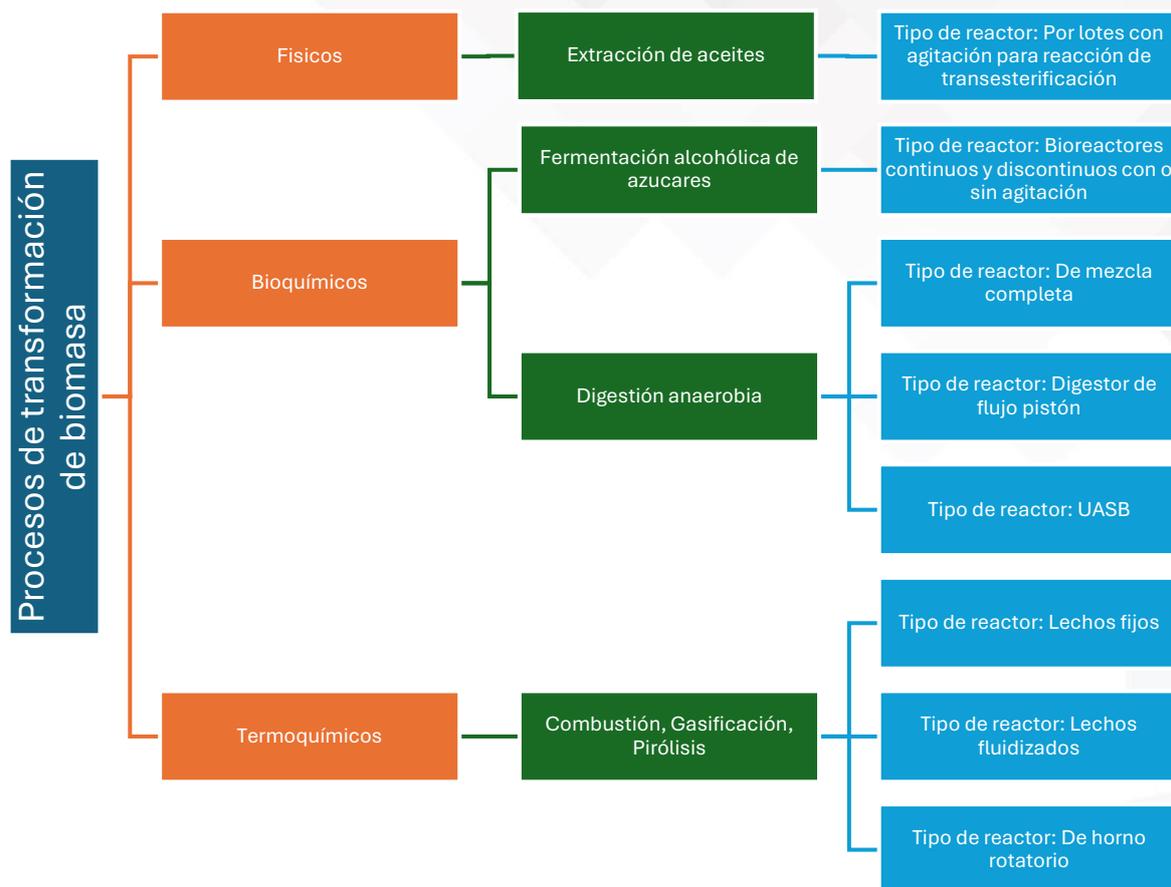


Ilustración 5 Clasificación de los Procesos de Transformación de biomasa. Elaboración propia.  
Fuente: (Secretaría de Energía, s/f)

La diversidad en los tipos de biomasa se refleja en la variabilidad de su potencial energético, el cual se libera al someterse a procesos de conversión. Los constituyentes elementales fundamentales de la biomasa incluyen principalmente carbono, oxígeno e hidrógeno. La conversión energética de este material orgánico se ejecuta a través de dos grandes grupos de procesos: los de naturaleza termoquímica y los de naturaleza bioquímica (o biológica). En comparación, los procesos termoquímicos son generalmente más eficientes, caracterizándose por sus cortos periodos de reacción y una alta efectividad en la conversión de energía. (Vega et al., 2024)

Las tecnologías para la conversión energética de la biomasa se clasifican principalmente en procesos termoquímicos y bioquímicos/biológicos. Los procesos termoquímicos transforman la biomasa mediante la aplicación de calor y son generalmente más eficientes por sus cortos tiempos de reacción y alta eficacia de

conversión. (Situmorang et al., 2020) Dentro de esta categoría, la gasificación convierte la biomasa en gas de síntesis a altas temperaturas; la combustión directa genera calor y electricidad por quema; la pirólisis descompone la biomasa en bio-óleo, syngas y carbón en ausencia de oxígeno; la licuefacción hidrotermal produce combustibles líquidos bajo alta presión y temperatura en ambiente acuoso; y la torrefacción mejora la densidad energética de la biomasa al eliminar humedad y volátiles mediante calentamiento en atmósfera inerte. Por otro lado, los procesos bioquímicos/biológicos emplean microorganismos para la conversión: la fermentación transforma azúcares en etanol y otros biocombustibles; la digestión anaeróbica descompone materia orgánica sin oxígeno para producir biogás; la digestión aeróbica descompone materia orgánica con oxígeno, útil para tratamiento de residuos y enmienda de suelos; la hidrólisis enzimática utiliza enzimas para simplificar biomasa compleja antes de la fermentación; la transesterificación convierte grasas y aceites en biodiésel; y la hidrogenación satura grasas o aceites para mejorar el biodiésel.

La selección adecuada de la tecnología de conversión de la energía de la biomasa es fundamental para optimizar la producción energética. Esta elección se basa principalmente en el contenido de humedad y las características específicas de la biomasa. Mientras que los procesos bioquímicos son los preferidos para biomásas con alta humedad, los procesos termoquímicos son ideales para biomásas con bajo contenido de humedad. Comprender estas distinciones puede conducir a una producción de energía más eficiente a partir de residuos agrícolas, agroindustriales y ganaderos. (Sagastume Gutiérrez et al., 2020)

## **2.6 Procesos Termoquímicos:**

### **2.6.1 Gasificación**

La gasificación es un proceso termoquímico que convierte la biomasa sólida en gas de síntesis (syngas) en un ambiente controlado y con bajo oxígeno, lo que la convierte en una alternativa energética sostenible. La biomasa, como los residuos agroindustriales del maíz, presenta un alto contenido de humedad y baja densidad, características que influyen en su potencial energético y eficiencia de conversión. El proceso de gasificación puede alcanzar una eficiencia exergética de aproximadamente el 35%, produciendo syngas compuesto principalmente por monóxido de carbono, hidrógeno y metano, al mismo tiempo que genera residuos que deben ser gestionados para minimizar el impacto ambiental. Tecnológicamente, la gasificación es madura y reconocida como una solución de transición entre fuentes de energía renovables y no renovables; si bien los costos iniciales pueden ser elevados, los beneficios a largo plazo derivados del aprovechamiento de la biomasa pueden compensar estos gastos. La disponibilidad de biomasa como materia prima es considerable, especialmente a partir de residuos agrícolas. Desde el punto de vista ambiental, la gasificación reduce las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles fósiles y apoya a las economías locales al proporcionar una fuente de energía sostenible y disminuir los costos de gestión de residuos asociados a los residuos agrícolas. (Sofan German et al., 2024)

### **2.6.2 Combustión Directa**

La combustión directa de biomasa, como la paja, implica la quema de materiales orgánicos para generar calor o electricidad, caracterizándose por sus propiedades físicas como el contenido de humedad y la densidad, y su composición química principalmente de carbono, hidrógeno y oxígeno. La eficiencia de la combustión directa es de alrededor del 35%, mientras que la gasificación puede alcanzar hasta el 60%,

produciendo energía térmica y CO<sub>2</sub> como subproductos; la gasificación, además, genera syngas y menos emisiones. El proceso requiere condiciones controladas para una combustión óptima y genera residuos sólidos y emisiones, lo que exige una gestión cuidadosa para minimizar el impacto ambiental. Tecnológicamente, la combustión directa está bien establecida, mientras que la gasificación es emergente, ofreciendo potencialmente una mejor eficiencia a largo plazo a pesar de costos iniciales más elevados. La viabilidad de la energía de biomasa se basa en la disponibilidad de materias primas, como la gallinaza, y puede mejorar las economías locales al crear empleos y promover prácticas sostenibles, contribuyendo a una economía circular al tiempo que reduce la dependencia de combustibles fósiles y disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero. (Barahona Marin & Santacruz Hurtado, 2025)

### **2.6.3 Pirólisis**

La pirólisis es un proceso termoquímico que descompone material orgánico a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, produciendo productos sólidos, líquidos y gaseosos, y es cada vez más reconocida por su potencial para convertir residuos en recursos valiosos. La biomasa, que sirve como materia prima para la pirólisis, exhibe características físicas variables como el contenido de humedad y el tamaño de partícula, lo que puede afectar la eficiencia del proceso. Químicamente, la biomasa se compone de carbohidratos, lignina y proteínas, lo que influye en el contenido energético y los tipos de productos generados; por ejemplo, la biomasa de la industria alimentaria puede producir bio-óleo rico en ácidos grasos y compuestos fenólicos. La eficiencia de la pirólisis depende de parámetros operativos como la temperatura y la velocidad de calentamiento, con temperaturas más altas generalmente mejorando el rendimiento del bio-óleo, particularmente de materias primas como los residuos de cervecería y de patata. El proceso genera bio-óleo, biocarbón y syngas, requiriendo condiciones óptimas para

maximizar el rendimiento y la calidad del producto, al tiempo que produce residuos sólidos y gases que pueden ser gestionados o utilizados. (Sanchez-Hervas et al., 2023)

La pirólisis puede alcanzar una alta eficiencia de conversión, produciendo productos de alto valor energético adecuados para calefacción y generación de electricidad. La tecnología es madura, con costos de operación y mantenimiento establecidos, y se beneficia de una amplia disponibilidad de materiales de desecho orgánicos, como residuos agrícolas e industriales, como materia prima. Medioambientalmente, la pirólisis contribuye a la mitigación del cambio climático al reducir las emisiones y mejorar la calidad del suelo mediante la aplicación de biocarbón, al tiempo que promueve prácticas de gestión sostenible de residuos que pueden impulsar las economías locales y mejorar la seguridad energética. (Gosgot Angeles et al., 2021)

#### **2.6.4 Licuefacción Hidrotermal**

La Licuefacción Hidrotermal (HTL) es un proceso que transforma biomasa húmeda en biocrudo y otros productos mediante altas temperaturas (250-350°C) y presiones (120-200 bar), destacándose por operar en presencia de agua como solvente sin necesidad de secado previo, lo que la diferencia de la pirólisis. La eficiencia del proceso, que produce principalmente biocrudo, gases y biocarbón, está influenciada por las propiedades físicas (humedad, densidad) y químicas (celulosa, hemicelulosa, lignina) de la biomasa, y por las condiciones operativas de alta temperatura y presión. Aunque la HTL aún está en desarrollo, su viabilidad es prometedora; a pesar de los altos costos iniciales de instalación, estos se ven compensados por la eliminación de la fase de secado y la amplia disponibilidad de biomasa como materia prima. Ambientalmente, contribuye a la reducción de residuos y gases de efecto invernadero, mientras que socialmente puede impulsar economías rurales y prácticas sostenibles, siempre que no compita con la producción de alimentos o cause deforestación. (Bautista-Peñuelas, 2023)

### 2.6.5 Torrefacción

Proceso termoquímico que somete la biomasa a calentamiento, generalmente a temperaturas que oscilan entre los 200°C y 300°C, dentro de una atmósfera inerte, es decir, en ausencia de oxígeno. Esta operación tiene como efecto la eliminación de la humedad y de compuestos volátiles, lo que resulta en un producto final con una mayor densidad energética. Esta técnica, aplicable a biomásas como los residuos de café que poseen alta porosidad y granularidad, incrementa su densidad energética mediante la reducción de materiales volátiles y un aumento del carbono fijo y del poder calorífico. La eficiencia de la torrefacción varía con la temperatura (por ejemplo, a 275 °C, los residuos de café mostraron una pérdida de masa del 26.6%), generando principalmente biocarbón, bio-óleo y gases, y requiriendo condiciones óptimas, como 275 °C para los residuos de café, para maximizar la densidad energética del producto, aunque también produce residuos gaseosos y líquidos que pueden ser gestionados o utilizados. Tecnológicamente, la torrefacción es una opción prometedora para la valorización de la biomasa con aplicaciones semi-industriales, y su viabilidad económica depende de los costos de la materia prima y la eficiencia del proceso, beneficiándose de la amplia disponibilidad de biomasa como residuos de café y aserrín. Además, esta técnica contribuye a reducir la huella de carbono al mejorar la eficiencia de la combustión y disminuir emisiones, lo que a su vez impulsa las economías locales y minimiza los problemas de gestión de residuos, fomentando así prácticas sostenibles. (Jaramillo et al., 2022)

### 2.7 Procesos Bioquímicos/Biológicos:

Estos métodos emplean microorganismos para transformar la biomasa en energía, e incluyen:

### 2.7.1 Fermentación

La fermentación es un proceso metabólico que, mediante microorganismos como levaduras y bacterias, convierte azúcares en ácidos, gases o alcohol, siendo fundamental en la producción de alimentos, bebidas y biocombustibles, con tipos específicos como la fermentación alcohólica (etanol y CO<sub>2</sub>), láctica (ácido láctico) y acética (ácido acético). Las propiedades físicas de la biomasa, como su textura (fibrosa o granular) y contenido de humedad, influyen directamente en la eficiencia, mientras que su composición química, rica en carbohidratos, proteínas y lípidos, determina el contenido energético y la idoneidad para el proceso. La eficiencia de la conversión se ve afectada por factores como la temperatura y el pH, con rendimientos teóricos de etanol del 0.51 kg por kg de glucosa (90-95% reales debido a la formación de biomasa), produciendo principalmente etanol, CO<sub>2</sub> y biomasa bajo condiciones controladas y anaeróbicas, y generando residuos que requieren gestión. Tecnológicamente, la fermentación es una tecnología madura con amplia investigación en cinética y modelado, especialmente con levaduras como *S. cerevisiae*, cuya viabilidad económica depende de los costos de la materia prima y la escala de producción, siendo crucial la disponibilidad de biomasa adecuada. Dentro del aspecto socioambiental, contribuye a la reducción de emisiones de GEI al producir energías renovables, pero esto genera desafíos ligados al uso del suelo y la seguridad alimentaria, pudiendo generar empleo local pero también conflictos por la asignación de cultivos. (Delgado Noboa, 2023)

### 2.7.2 Digestión Anaeróbica

Es un método donde, sin la presencia de oxígeno, microorganismos desintegran materia orgánica para producir biogás y biofertilizantes. Las características físicas de la biomasa, como su tamaño, forma, nivel de humedad y densidad son clave para la eficacia del proceso. Por su parte, su composición química a base de carbohidratos, proteínas y

lípidos afecta el metabolismo de los microbios y los productos finales, como el metano y el dióxido de carbono. La efectividad de este método de conversión, que funciona bajo condiciones controladas de temperatura y pH, mejora al mantener un ambiente sin oxígeno dentro de los digestores, generando biogás (rico en metano) y fertilizantes orgánicos nutritivos y beneficiosos para el suelo.

Además, el proceso disminuye la cantidad de residuos al producir un digestato que puede utilizarse como fertilizante. Esta tecnología ya está consolidada en el campo agrícola e industrial, aunque implica una inversión inicial bastante fuerte, se compensa con costos operativos reducidos, dado que produce energía y fertilizantes renovables, aprovechando la gran disponibilidad de biomasa, como desechos agrícolas y orgánicos. La conversión anaeróbica contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero al capturar metano y promueve prácticas agrícolas sostenibles. (Torres & Alexander, 2024).

### **2.7.3 Digestión Aeróbica**

Es un proceso que utiliza microorganismos en presencia de oxígeno para descomponer materiales orgánicos, del cual se puede obtener biogás y biofertilizantes. La biomasa, que incluye residuos agrícolas y alimentarios con variaciones en tamaño, humedad y densidad, así como una composición química de carbohidratos, proteínas, grasas y lignina, influye en la eficiencia del proceso. Esta conversión es eficiente en descomponer compuestos orgánicos complejos en CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y calor, una eficiencia potenciada por el oxígeno que soporta el crecimiento microbiano, generando principalmente biofertilizantes y CO<sub>2</sub>, y calor que puede ser aprovechado. Las condiciones óptimas incluyen suministro adecuado de oxígeno, temperatura y niveles de humedad para maximizar la actividad microbiana, con residuos menos dañinos que en procesos anaeróbicos al consistir primariamente en CO<sub>2</sub> y agua. Tecnológicamente, es

una práctica madura y rentable, especialmente en el sector agrícola, dada la amplia disponibilidad de materias primas orgánicas; y ambientalmente, reduce el uso de vertederos y las emisiones de gases de efecto invernadero, promoviendo la sostenibilidad y la fertilidad del suelo, lo que a su vez impulsa la productividad agrícola, la seguridad alimentaria y la creación de empleo en la gestión de residuos y energías renovables. (Torres & Alexander, 2024)

#### **2.7.4 Hidrólisis Enzimática**

La hidrólisis enzimática de la biomasa es un proceso fundamental para convertir materiales lignocelulósicos en biocombustibles, aprovechando la compleja estructura de la biomasa, compuesta por celulosa, hemicelulosa y lignina, cuya resistencia a la degradación presenta un desafío. La eficiencia del proceso, que produce principalmente azúcares fermentables para bioetanol u otros biocombustibles, depende de la optimización de factores como la concentración enzimática, la temperatura y el pH, y puede requerir pretratamiento de la biomasa para mejorar la accesibilidad. Aunque la tecnología está avanzando, especialmente en Europa con sus biorrefinerías, aún se encuentra en desarrollo en otras regiones. Se están investigando métodos para disminuir los altos costos de producción de enzimas y los tratamientos previos. Esta tecnología ayuda a mitigar el cambio climático al disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles fósiles, pero requiere una gestión cuidadosa para evitar efectos perjudiciales en el uso del suelo y la diversidad biológica. Incrementaría la oportunidad de empleos en el campo y promueve la seguridad energética, pero es fundamental garantizar que no afecte la producción de alimentos ni el bienestar de las comunidades. (Luzardo Gorozabel et al., 2023).

### 2.7.5 Transesterificación

Es un procedimiento químico que convierte aceites y grasas en biodiésel, su importancia radica en la capacidad de generar este combustible a partir de diversas fuentes de biomasa, como aceites vegetales y grasas de origen animal. Las características físicas de la biomasa, tales como su densidad, el nivel de humedad y la viscosidad, afectan directamente la eficacia del proceso, por ejemplo, los aceites menos viscosos suelen ser más fáciles de transformar. La eficiencia de este método depende del tipo de aceite, la proporción de alcohol respecto al aceite y el catalizador empleado, siendo los sistemas de flujo continuo los que sobresalen por su mayor rendimiento y mejor manejo de los factores del proceso. El proceso produce principalmente biodiésel y glicerol como subproducto, y genera residuos como jabones que requieren gestión. Tecnológicamente, la transesterificación está bien establecida, con investigación enfocada en mejorar la eficiencia y reducir costos, y los sistemas continuos ganan terreno por sus ventajas sobre los procesos por lotes. Aunque la inversión inicial en sistemas continuos puede ser alta, ofrecen ahorros a largo plazo; la disponibilidad de materias primas sostenibles, como aceites de cocina usados y aceites no comestibles, es clave para la viabilidad y sostenibilidad del biodiésel. Ambientalmente, la producción de biodiésel reduce las emisiones de GEI en comparación con los combustibles fósiles, aunque sus beneficios dependen de la sostenibilidad de las materias primas utilizadas; socialmente, su uso puede impactar el suministro de alimentos y el uso del suelo, por lo que es vital equilibrar las necesidades energéticas con las demandas agrícolas para un desarrollo sostenible. (Alzate-León et al., 2024)

### 2.7.6 Hidrogenación

La hidrogenación de biomasa es un proceso químico que transforma materiales orgánicos en hidrógeno y otros productos valiosos, utilizando típicamente gas hidrógeno

en sus reacciones. La biomasa, compuesta por materia vegetal, residuos agrícolas o animales con variaciones en humedad, densidad y tamaño de partícula, y una composición química de carbohidratos, lignina y proteínas, influye directamente en la eficiencia y complejidad del proceso. La eficacia de esta conversión busca maximizar la producción de hidrógeno con mínima energía, generando también biocombustibles y otros hidrocarburos, dependiendo de las condiciones de alta temperatura, presión y los catalizadores utilizados; a su vez, produce residuos que requieren gestión. Aunque la tecnología de hidrogenación de biomasa aún está en desarrollo, con algunos métodos ya comerciales y otros en fase piloto, su viabilidad económica está sujeta a los costos de la materia prima, la tecnología de procesamiento y la infraestructura necesaria, beneficiándose de la abundancia de biomasa como fuente sostenible. Desde una perspectiva ambiental, la hidrogenación puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles fósiles, siempre que el origen de la biomasa sea sostenible; socialmente, puede generar empleo en zonas rurales y contribuir a la seguridad energética, pero exige un equilibrio entre la producción de alimentos y las necesidades energéticas para evitar conflictos por el uso del suelo. (Salamanca de Federico, 2024)

## **2.8 PRETRATAMIENTO DE BIOMASA**

El objetivo principal del pretratamiento es mejorar la accesibilidad de la biomasa para los procesos de conversión posteriores. Esto implica romper la estructura compleja de la biomasa para facilitar su conversión en formas de energía como biogás o biocombustibles. (Serrano et al., s/f) En el contexto de la biomasa lignocelulósica por ejemplo se busca aumentar la accesibilidad de la celulosa y hemicelulosa en la biomasa lignocelulósica para procesos posteriores como la digestión anaeróbica. (Carreño-Vesga, s/f)

### 2.8.1 Pretratamiento Físico

Es realizado a base de trituración o astillado de biomasa para reducir el tamaño de partícula, esto aumenta el área de superficie, disminuye el grado de polimerización y mejora las propiedades de flujo, lo cual es esencial para una digestión efectiva. (Rajendran et al., 2018)

- **Secado Natural:** Aprovecha la energía del sol y las temperaturas del entorno para disminuir el nivel de humedad sin generar gastos extra de energía.
- **Secado Forzado:** Requiere el empleo de energía externa para evaporar la humedad de la biomasa, lo cual eleva considerablemente el consumo energético, por lo que potencialmente disminuiría la eficiencia energética global.

El secado natural, que utiliza el calor y la radiación solar propios de cada zona, es una opción con mucho potencial ya que no implica gastos adicionales de energía. Su principal inconveniente es el tiempo prolongado que toma para que los residuos alcancen el nivel de humedad ideal para su conversión energética, lo que lo diferencia del secado forzado, el cual, reduce drásticamente el tiempo de procesamiento, pero genera un consumo significativo de energía, lo que compromete la eficiencia final del proceso de generación energética. (Serrano et al., s/f)

### 2.8.2 Pretratamiento Químico

Este método a menudo utiliza soluciones alcalinas para eliminar la lignina, haciendo que los carbohidratos sean más accesibles. La efectividad de este enfoque puede depender del contenido de lignina de la biomasa; los cultivos herbáceos y los residuos agrícolas son más adecuados que las maderas duras. (Baruah et al., 2018)

- **Tratamientos Alcalinos y Ácidos:** Estos métodos implican el uso de productos químicos para descomponer la lignina y la hemicelulosa, haciendo que la celulosa

sea más accesible. Pueden mejorar eficazmente la digestibilidad de la biomasa, pero también pueden conducir a la formación de subproductos tóxicos que pueden inhibir la digestión .

- **Tratamientos Oxidativos:** Estos implican el uso de agentes oxidantes para modificar la estructura de la biomasa, lo que puede mejorar la liberación de azúcares fermentables. (Ana María Espinosa-Negrín, Lisbet Mailin López-González, Neybis Lourdes Casdelo-Gutiérrez, s/f)

### 2.8.3 Pretratamiento físico-químico

El pretratamiento físico-químico representa una estrategia dual que, mediante la aplicación de temperaturas de entre 50 y 250°C, logra la ruptura de los enlaces de hidrógeno e incrementa la superficie disponible de la biomasa. Es crucial considerar el factor tiempo, ya que una exposición prolongada al calor puede resultar en la formación excesiva de inhibidores. (Wilson & Novak, 2009)

### 2.8.4 Pretratamiento biológico

Mediante la acción de microorganismos (bacterias y hongos) o enzimas, los pretratamientos biológicos ofrecen mejoras significativas en la producción de metano, con rendimientos que superan entre el 10% y el 100% los de la biomasa sin tratar. La principal ventaja de estos procesos radica en su carácter respetuoso con el medio ambiente, pues requieren menos energía, operan bajo condiciones más suaves y evitan la generación de sustancias tóxicas. Sin embargo, su implementación puede verse limitada por la necesidad de extensas áreas estériles y el alto costo asociado a las enzimas. (Brémond et al., 2018)

### **2.8.5 Pretratamiento con Solventes más limpios**

Los pretratamientos de biomasa basados en solventes limpios son métodos innovadores que buscan mejorar la eficiencia de la conversión de biomasa y, al mismo tiempo, reducir el impacto ambiental, empleando solventes más ecológicos, menos tóxicos y más rentables que las alternativas tradicionales. Entre los tipos clave se encuentran los Líquidos Iónicos (ILs), que son sales orgánicas líquidas a bajas temperaturas, capaces de disolver selectivamente lignina y hemicelulosa para aislar celulosa pura; sus ventajas incluyen ser recuperables, no inflamables y de baja volatilidad, aunque son costosos y pueden ser tóxicos para microorganismos y enzimas. Los Solventes Eutécticos Profundos (DES), considerados un tipo de líquido iónico, se forman de mezclas con puntos de fusión bajos, derivan de fuentes naturales no tóxicas, son económicos, fáciles de formular y efectivos para fragmentar la biomasa y facilitar la producción de químicos valiosos. Finalmente, los Fluidos Supercríticos (SCF), como el CO<sub>2</sub> supercrítico, exhiben propiedades de gas y líquido, pueden difundirse en sólidos y alterar la estructura de la biomasa; son no tóxicos, no inflamables y tienen bajas condiciones críticas, lo que los hace económicos, y el CO<sub>2</sub> supercrítico en particular mejora la accesibilidad enzimática al romper las paredes celulares, aunque no solubiliza la lignina. (Ana María Espinosa-Negrín, Lisbet Mailin López-González, Neybis Lourdes Casdelo-Gutiérrez, s/f)

## **2.9 Importancia de la Eliminación de Lignina**

La lignina actúa como una barrera protectora alrededor de la celulosa y hemicelulosa, dificultando el acceso de las enzimas a estos carbohidratos. Un pretratamiento eficaz puede mejorar significativamente la digestibilidad de la biomasa al romper esta barrera, lo que aumenta los rendimientos de biogás. (Carreño-Vesga, s/f)

## **2.10 Consideraciones Económicas**

Si bien el pretratamiento es esencial para mejorar la producción de biogás, también puede ser costoso debido a los requisitos de energía y la necesidad de equipos especializados. (Maurya et al., 2015)

## **2.11 Composición de la Biomasa**

La biomasa lignocelulósica está estructurada a partir de hemicelulosa, celulosa y lignina. Comprender esta composición es vital para seleccionar los métodos de pretratamiento apropiados, ya que la estructura y el contenido de estos componentes influyen en la eficiencia de la producción de biogás. (Amin et al., 2017)

## **2.12 Impacto General**

La incorporación del pretratamiento en el proceso de digestión anaeróbica se reconoce como un paso crítico que puede conducir a mayores rendimientos de biogás y a una conversión de biomasa más eficiente, convirtiéndolo en un foco clave en la investigación de bioenergía. (Carreño-Vesga, s/f)

## **2.13 Experiencias Previas en América Latina y Ecuador**

En Ecuador, iniciativas como las plantas San Carlos (73.60 MW), Ecoelectric (35.20 MW) y Ecados A-G (27.60 MW) utilizan principalmente residuos de la producción de azúcar para cogenerar electricidad a la red nacional durante seis meses al año. Sin embargo, la contribución actual de la biomasa en Ecuador es limitada, representando solo el 1.62% de su matriz energética total. A nivel regional, Brasil destaca significativamente, generando alrededor de 798.34 millones de toneladas de residuos agrícolas anualmente y obteniendo el 7.7% de su electricidad de esta fuente, superando ampliamente a México y Colombia, que se mantienen por debajo del 2%. A pesar de la baja contribución actual en algunos países, el potencial técnico de la biomasa en América Latina se estima en 3

exajulios por año, lo cual es vital para satisfacer las demandas energéticas y enfrentar los desafíos ambientales. (Del Cisne Marín-Apolo et al., 2025)

Ingenios ecuatorianos como Valdez y San Carlos aprovechan parte de los residuos de caña de azúcar para su generación interna de energía, sin embargo, existe un considerable excedente de biomasa sin explotar en Milagro. A pesar de los desafíos inherentes a la conversión de biomasa sólida en electricidad (bajo poder calorífico, alta humedad), su uso es estratégico para estabilizar la red y asegurar un suministro energético gestionable, diferenciándose de otras renovables. En el ámbito internacional, Chile se presenta como un mercado atractivo para la biomasa cañera ecuatoriana debido a su creciente demanda de energías renovables y sus limitaciones en la producción de biomasa agrícola, lo que ha llevado a la subutilización de sus propias plantas de biomasa. Lo que sustenta una opción viable y potencial de uso de la biomasa de caña de azúcar para contribuir tanto a la generación energética local como a la exportación. (Davila et al., 2024)

En Ecuador, diversos cultivos como la caña de azúcar, banano, palma aceitera, maíz, arroz, plátano, cacao, piña y café, a pesar de no ser las fuentes de biomasa predominantes en la actualidad, poseen un considerable potencial para su aprovechamiento energético. Esto se debe a la significativa cantidad de residuos que generan y a que, en conjunto, ocupan la mayor parte de la superficie cultivada del país, lo que sugiere una importante oportunidad para la diversificación de la matriz energética nacional. (SIPA, s/f) La combinación estratégica de los residuos agrícolas existentes en el territorio nacional y un óptimo sistema de almacenamiento permite vislumbrar un notable potencial teórico para lograr una generación de energía constante a lo largo de todo 1 año.

La generación de energía eléctrica a partir de biomasa en Ecuador exhibe una marcada variabilidad estacional, intrínsecamente ligada a ciclos agrícolas como la zafra de la caña de azúcar, que provee el bagazo como combustible principal. Históricamente, y como ilustran los patrones de crecimiento mensual del año 2023, la producción de biomasa muestra un comportamiento altamente inestable: periodos de nula o mínima generación se alternan con picos de crecimiento extraordinario concentrados entre junio y enero. Esta dependencia estacional confiere a la biomasa un rol de contribución intermitente, lo que la limita como fuente de carga base, a pesar de su potencial para complementar la matriz energética durante su periodo de disponibilidad óptima. (Agencia de Regulación y Control de Electricidad, s/f)

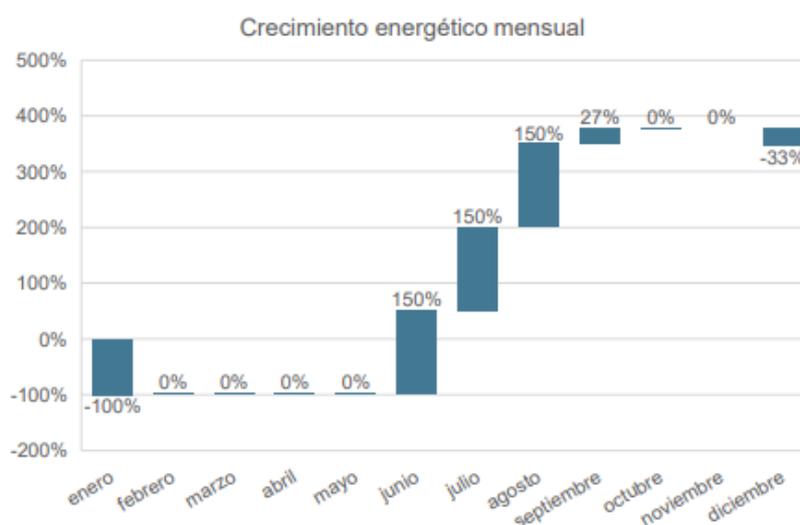


Ilustración 6 Crecimiento energético anual de la biomasa en 2023. Recogido de: (María Eliza & Yulissa del Cisne, s/f)

En la situación actual, reflejada en los datos de principios de 2025, la biomasa continúa manifestando esta inestabilidad inherente. Para abril de 2025, su participación en la producción mensual neta fue del 0.00%, y los datos de crecimiento energético mensual desde finales de 2024 hasta principios de 2025 revelan caídas drásticas (hasta -100% en enero de 2025) y periodos de nulo crecimiento. Esto confirma que, fuera de su

ciclo de producción primaria, la biomasa no está contribuyendo significativamente a la

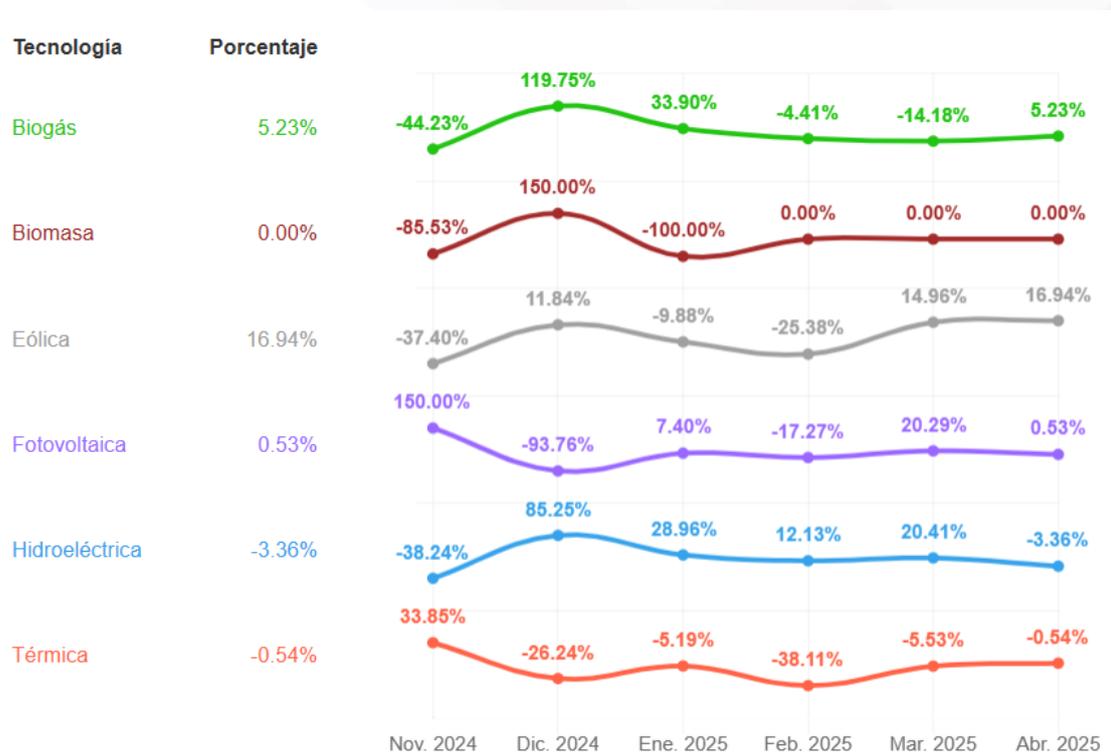


Ilustración 7 Producción útil de residuos en toneladas de cada cultivo seleccionado. Elaboración propia. Recogido de: (María Eliza & Yulissa del Cisne, s/f)

matriz energética. En el año 2024 la sequía sufrida por el país mermó la capacidad hidroeléctrica, la imposibilidad de la biomasa para sostener una producción estable, debido a sus propias limitaciones de recurso, subraya la necesidad crítica de diversificar y explorar fuentes de biomasa menos variables o con ciclos de disponibilidad complementarios. (CENACE, s/f)

## 2.14 Situación Energética en Ecuador

El panorama energético ecuatoriano se caracteriza por una marcada dependencia de la energía hidráulica, que conforma aproximadamente el 80% de su matriz, exponiendo al país a una considerable vulnerabilidad ante variaciones climáticas como las sequías prolongadas que afectan la generación hidroeléctrica. Históricamente, los sistemas hidroeléctricos han representado una parte muy significativa de la matriz energética del

país, llegando a ocupar el 95% de la red energética en el año 2050 en algunas proyecciones teóricas. (Castro Yupangui, s/f)

A pesar de contar con abundantes recursos naturales, Ecuador enfrenta desafíos sustanciales en infraestructura y en la diversificación de sus fuentes de energía, manifestados en problemas de suministro y elevados costos de importación de combustibles fósiles. Esta situación se agrava por la inestabilidad energética regional en Sudamérica, donde naciones vecinas como Argentina y Brasil también experimentan dificultades ligadas a la inversión insuficiente y la volatilidad de los precios de los hidrocarburos. El cambio climático intensifica estos retos al impactar directamente la disponibilidad hídrica, crucial para la producción hidroeléctrica. (Chamorro & Mera, 2025)

La preponderancia de la generación hidroeléctrica en la matriz energética ecuatoriana introduce una inherente vulnerabilidad frente a las fluctuaciones climáticas, notablemente las sequías prolongadas. Pese a su naturaleza renovable y su rol dominante en la producción eléctrica, esta dependencia conlleva riesgos para la estabilidad del suministro. La disponibilidad de los recursos hídricos, esenciales para la operación de las centrales, está directamente ligada a las dos estaciones climáticas del país (húmeda y seca). Si bien las cuencas del Amazonas y del Pacífico, que abastecen las hidroeléctricas, presentan una complementariedad parcial en sus flujos, la uniformidad no es total. Consecuentemente, durante la temporada seca (octubre-marzo), la reducción de las precipitaciones disminuye el caudal de los ríos, comprometiendo la capacidad de generación y provocando inestabilidad en la provisión de energía. (Barros López & Troncoso Salgado, s/f)

Ecuador ha experimentado periodos de racionamiento energético durante 2023 y 2024, con interrupciones del servicio que alcanzaron hasta diez horas diarias. Esta

situación se atribuye directamente a la incapacidad de las principales centrales hidroeléctricas de la vertiente amazónica, como el complejo Paute, para mantener niveles de generación adecuados. Las causas principales de esta insuficiencia radican en la incidencia de sequías abruptas y el estiaje prolongado, condiciones que se han visto agravadas por fenómenos climáticos como El Niño. Dicha coyuntura ha puesto de manifiesto un desequilibrio crítico entre la capacidad de generación eléctrica disponible y la demanda energética del país. (Torres Moyano et al., 2025)

La cuenca del río Paute ostenta una relevancia estratégica para el sector energético ecuatoriano, dado que sus complejos hidroeléctricos (Mazar, Molino, Sopladora) suministran aproximadamente el 38% de la demanda energética nacional. La influencia del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en las sequías que afectan esta cuenca se manifiesta de manera heterogénea, generando impactos desiguales en distintas áreas y siendo modulada por factores como los patrones de viento y la humedad. Se ha observado que las sequías vinculadas al ENOS, aunque menos recurrentes, tienden a ser de mayor severidad, como se evidenció en los eventos de 2016 y 2023, donde la combinación de baja humedad y la presencia del ENOS agudizó considerablemente las condiciones. (Romo Iglesias, 2025)

Para 2030, se proyecta una demanda de 47 TWh, lo que exige una planificación energética sostenible, Ecuador ha incursionado en estrategias de expansión mediante proyectos hidroeléctricos y el fomento de energías renovables no convencionales (ERNC), como la solar y la eólica. Si bien la energía solar ha mostrado un crecimiento notable, alcanzando una potencia efectiva de 26.74 MW a finales de 2024, su contribución al Sistema Nacional Interconectado (SNI) sigue siendo modesta, representando solo el 3% de la capacidad instalada. Esta fuente posee un vasto potencial en diversas regiones, aunque su despliegue se ve obstaculizado por desafíos inherentes a la intermitencia, la

necesidad de sistemas de almacenamiento y complejidades en la integración a la red. En cuanto a la energía eólica, el país cuenta con parques como El Villonaco (16.5 MW) y los ubicados en las Islas Galápagos (San Cristóbal 2.4 MW, Baltra 2.25 MW). Paralelamente, la capacidad termoeléctrica instalada asciende a 3,438.65 MW; sin embargo, su aporte real ha sido limitado (695 MW en septiembre de 2024), debido en parte a la obsolescencia de muchas de sus centrales. La carencia de una planificación energética a largo plazo ha impedido una respuesta eficaz a los desafíos, lo que subraya la imperante necesidad de estimular la inversión en tecnologías de generación limpias. (Chamorro & Mera, 2025)

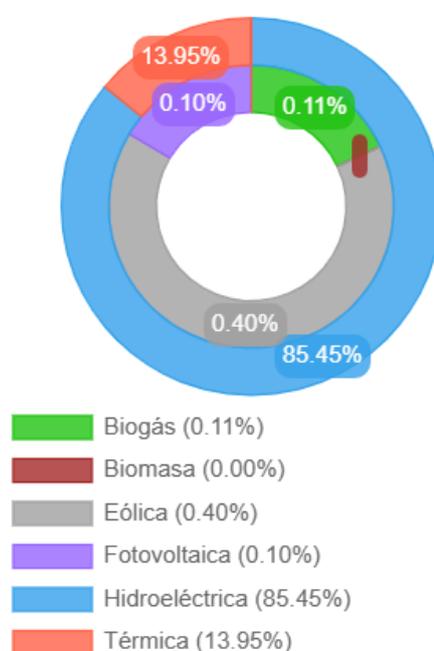


Ilustración 8 Producción Mensual Neta - Por Tipo de Tecnología: 2910.66 GWh. Recogido de: (CENACE, s/f)

## **2.15 Marco Regulatorio y Políticas Energéticas**

De acuerdo con la Constitución de la República del Ecuador, el sector eléctrico se clasifica como estratégico, reservando su gestión de manera exclusiva al Estado. No obstante, la misma Constitución prevé la posibilidad de que el Estado delegue excepcionalmente la administración de estos sectores estratégicos a la iniciativa privada. La dirección, planificación, ejecución, regulación, control y administración del servicio público de energía eléctrica son responsabilidades que recaen en el Estado, y se ejercen a través de entidades como el Ministerio de Energía y Minas (MEM) y la Agencia de Regulación y Control Competente (ARCERNNR o ARCONEL). Por su parte, el Operador Nacional de Electricidad (CENACE) desempeña un rol crucial al coordinar la operación del Sistema Nacional Interconectado (SNI) y gestionar las transacciones dentro del Mercado Mayorista Ecuatoriano de Electricidad (MME). (Sanmartín González, 2022)

Aunque la delegación de responsabilidades en el sector eléctrico ecuatoriano a la esfera privada se ha canalizado históricamente mediante licitaciones públicas, estos procesos han estado plagados de significativos retrasos. Dichas demoras se han originado en la inestabilidad institucional, las barreras regulatorias, la burocracia inherente y la descoordinación. A pesar de este contexto desafiante, el año 2023 se destacó por la materialización de diez contratos de concesión para proyectos de generación eléctrica basados en energías renovables. Entre estos logros se cuentan iniciativas como el Proyecto Aromo (solar, 200 MW), Villonaco III (eólica, 110 MW), y diversos proyectos pertenecientes al Bloque ERNC de 500 MW, que abarcan tecnologías solares e hidráulicas. (Sanmartín González, 2022)

## **2.16 Autogeneración como Modelo Alternativo de Delegación**

Complementando los procesos de licitación, la autogeneración ha emergido como una figura atractiva para la inversión privada en proyectos de Energías Renovables No

Convencionales (ERNC). Este mecanismo permite a los usuarios generar su propia energía para el autoconsumo, con la opción de vender los excedentes a la red nacional. El marco legal ecuatoriano, que incluye el Reglamento a la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica (RGLOSPEE) y la Regulación de Autogeneración, provee incentivos y beneficios para los autogeneradores que utilizan ERNC. (Sanmartín González, 2022)

Como incentivo para la generación distribuida y la promoción de energías renovables, se ha definido un "Precio Preferente" de 0.056 USD/kWh por la electricidad sobrante entregada al mercado mayorista. Este esquema tarifario se mantiene durante una década desde la puesta en marcha comercial y beneficia a proyectos basados en fuentes como la solar, eólica, biogás, geotérmica, mareomotriz e hidroeléctrica de hasta 100 MW. (Sanmartín González, 2022)

### **2.17 Impacto de las Políticas Fiscales y la Inversión Extranjera Directa (IED)**

La inversión Extranjera Directa (IED) en el sector energético ecuatoriano se ve limitada principalmente por la incertidumbre regulatoria y fiscal. La estabilidad en las políticas fiscales es vital para atraer capital extranjero, ya que los cambios súbitos pueden desalentar el flujo de inversión. Un análisis sobre la eliminación en 2021 de la exención del Impuesto a la Renta para energías renovables reveló que, aunque la IED no afectaba significativamente la recaudación antes de la medida, su impacto se tornó positivo tras la derogación, lo que sugiere que el incentivo inicial reducía los ingresos fiscales. Esto pone de manifiesto la importancia de que las políticas fiscales busquen un balance entre la captación de inversión y el mantenimiento de la recaudación. Pese a que la IED es crucial para la infraestructura y la diversificación energética, la confianza de los inversionistas

ha declinado, evidenciado por una caída del 56% en la IED del sector durante el primer trimestre de 2023. (Saavedra et al., 2025)

## 2.18 La Ley de Competitividad Energética

Publicada en el Registro Oficial No. 475 el 11 de enero de 2024, una nueva ley representa una respuesta estratégica ante el déficit energético que enfrenta el país. Sus objetivos fundamentales son optimizar la utilización de los recursos energéticos, impulsar la eficiencia y la sostenibilidad, atraer capitales tanto nacionales como extranjeros, y estimular la adopción de tecnologías limpias. Modelos matemáticos de optimización han demostrado que la incorporación de energías renovables (como la eólica) junto con sistemas de almacenamiento (baterías) tiene el potencial de reducir significativamente los costos operativos del sistema eléctrico y, simultáneamente, contribuir a la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Este enfoque legislativo, por ende, se alinea con los principios constitucionales de sostenibilidad y equidad. (Chevez-Barba & Quinatoa-Caiza, 2025)

*“Artículo. (...) - Eficiencia energética en la gestión de desechos sólidos.- La generación de energía eléctrica que utilice como materia prima la fracción orgánica de los desechos sólidos (Biomasa), se priorizará como medida de eficiencia energética en la planificación pública descentralizada.”* (SECRETARIO GENERAL JURÍDICO DE LA PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA DEL ECUADOR & PRESIDENTE CONSTITUCIONAL DE LA REPÚBLICA, s/f)

La normativa legal incentiva la implementación de sistemas de generación distribuida que emplean Energías Renovables No Convencionales (ERNC). Esto posibilita que tanto hogares como empresas produzcan su propia energía, satisfaciendo sus necesidades mediante el uso de fuentes como la solar, la eólica y la biomasa. Esto se

acompaña de un esquema de medición y regulación más adaptable, particularmente favorable para quienes no exportan energía a la red pública. (Chevez-Barba & Quinatoa-Caiza, 2025)

La Regulación Nro. ARCERNNR 005/21 regula los proyectos de autogeneración y cogeneración con potencias que superan 1 MW. Esta normativa define las condiciones específicas para la incorporación de Energías Renovables No Convencionales (ERNC) al sistema, abarcando tecnologías como la biomasa, el biogás, la energía solar, eólica, geotérmica, mareomotriz, y pequeñas centrales hidroeléctricas con potencia de hasta 100 MW. Un beneficio clave que esta regulación ofrece es un precio preferencial por la energía excedente que estos autogeneradores inyectan al mercado mayorista, aplicable durante un periodo de diez años, siempre que los proyectos sean de nueva construcción y cumplan con todos los requisitos legales. En términos operativos, los proyectos de mayor escala sujetos a esta regulación quedan bajo el despacho centralizado del CENACE, mientras que aquellos con excedentes inferiores a 1 MW operan bajo un esquema de autodespacho. (ARCONEL, s/f)

La Regulación Nro. ARCERNNR 008/23 establece los requisitos para poder habilitar, instalar y operar Sistemas de Generación Distribuida para Autoabastecimiento (SGDA), específicamente diseñados para consumidores regulados. Esta normativa limita la potencia de estos sistemas en función de la demanda del consumidor y la capacidad aprobada por la empresa distribuidora. Permite que la propiedad de los SGDA recaiga tanto en el proponente del proyecto como en terceros, siempre y cuando la energía producida se destine exclusivamente al autoabastecimiento del consumidor y se adhiera a la normativa vigente. (ARCONEL, s/f)

La Regulación Nro. ARCERNNR 006/23 se enfoca en los aspectos relacionados con la caracterización de los Sistemas de Generación Distribuida para

Autoabastecimiento (SGDA). Esta normativa aborda la viabilidad de la conexión, los sistemas de medición, el despacho, la operación y el tratamiento comercial de la energía generada. Su aplicación está dirigida específicamente a los consumidores no regulados que buscan sincronizar sus sistemas de generación con la red de distribución eléctrica. (ARCONEL, s/f)

La Regulación Nro. ARCERNNR 002/23 promueve activamente la producción de electricidad a partir de residuos sólidos municipales no peligrosos, en línea con la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica y priorizando la biomasa como fuente renovable. Dicha regulación delinea un marco que incluye normas para la conexión, calificación y calidad, además de establecer precios preferenciales por 15 años. Esto busca fortalecer la sostenibilidad y la eficiencia del sector energético en Ecuador. (ARCONEL, s/f)

## **2.19 Potencial Energético de Residuos Agrícolas**

### **2.19.1 Clasificación y Cuantificación de Residuos**

En el estudio (María Eliza & Yulissa del Cisne, s/f) se analiza el potencial de aprovechamiento de residuos agrícolas en Ecuador, considerando que, en 2023, los cultivos permanentes y transitorios representaron el 17.73% del uso del suelo a nivel nacional, abarcando un total de 38 cultivos principales. Para los fines de esta investigación, se procedió a la selección de ocho cultivos clave, basando esta elección en su relevancia por la producción anual y la cantidad de residuos generados.

Producto	Producción (t)							
	Residuo (%)	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Caña de azúcar	16,00%	7502251	9257700	11016167	11372505	7740492	6253732	6378739
Banano	66,00%	6468924	6583477	6023390	6684916	6078789	7159816	7558208
Palma aceitera	256,23%	2697538	2275948	2446312	2418855	2296402	2049700	2651973
Maíz duro seco	45,00%	1324084	1801766	1304884	1699370	1641131	1413382	1195203
Arroz	134,38%	1350093	1668523	1336502	1504214	1561271	1636349	1944426
Plátano	66,00%	651964	749450	722298	763455	857562	840599	1083683
Cacao	1238,12%	234221	313284	327903	302094	337149	375719	403699
Piña (Fruta fresca)	95,75%	149548	46348	104059	206660	295311	507987	390379

Tabla 1 Producción anual de cultivos en toneladas. Elaboración propia. Fuente: (María Eliza & Yulissa del Cisne, s/f)

En ciertas ocasiones, la proporción de residuos generados puede exceder el 100% de la producción útil de un cultivo, lo cual indica que la cantidad de desechos supera la del producto principal aprovechable. Para ilustrar este fenómeno, se presenta la producción anual de los cultivos seleccionados y el porcentaje de residuos asociados para el periodo comprendido entre 2018 y 2023. No obstante, para los fines de la presente investigación, se incorporaron datos correspondientes a 2024 con el objetivo de actualizar la información provista en el estudio de (María Eliza & Yulissa del Cisne, s/f).

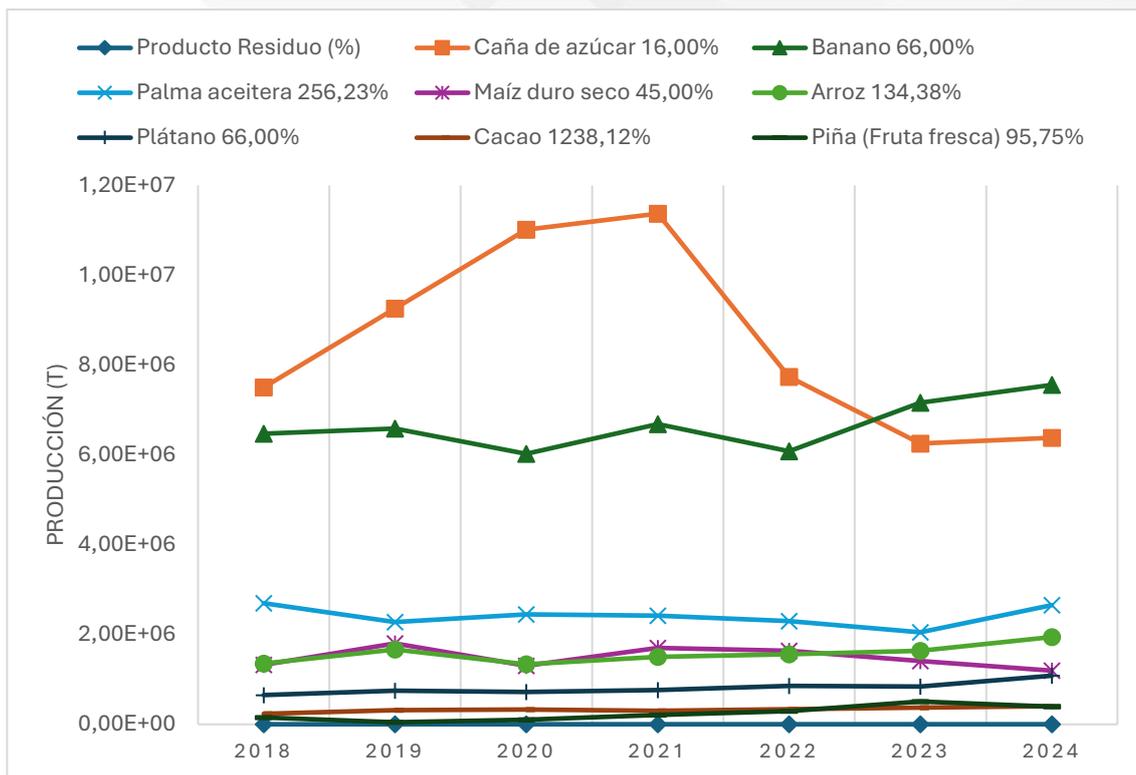


Ilustración 9 Estimación de la biomasa residual útil, en toneladas, por cultivo específico. Elaboración propia. Fuente: (María Eliza & Yulissa del Cisne, s/f)

El estudio analizó los residuos generados por cuatro cultivos principales: palma caña de azúcar, aceitera, maíz duro seco y arroz. La elección de estos se fundamentó en su idoneidad para la generación eléctrica mediante combustión directa, característica atribuida a su bajo contenido de humedad, lo que los convierte en materia prima óptima para procesos termoquímicos de conversión de biomasa a energía. A escala nacional, se estima que la generación anual de residuos aprovechables de estos cuatro cultivos asciende a 3635 millones de toneladas. De esta cantidad total, la investigación considera que el 40% está disponible para fines energéticos, una estimación basada en estudios previos sobre las prácticas agrícolas prevalentes en el país. Se destaca que la biomasa residual es un recurso renovable de gran valor porque su uso no compite directamente por el agua o el suelo con los cultivos dedicados a la producción de alimentos. Específicamente, en 2023, la producción de residuos de estos cultivos seleccionados fue de 1,001 millones de toneladas para la caña de azúcar, 5,252 millones de toneladas para

la palma aceitera, 0,636 millones de toneladas para el maíz duro seco y 2,199 millones de toneladas para el arroz. (María Eliza & Yulissa del Cisne, s/f)

El ciclo de vida de cada cultivo, que es moldeado por su biología intrínseca, las condiciones climáticas imperantes, la ubicación geográfica, las variedades específicas y las técnicas de cultivo empleadas, es un factor determinante en la disponibilidad de biomasa. A partir de la estacionalidad inherente a cada especie vegetal, es factible identificar los meses precisos en los que se dispone de biomasa residual, ya sea directamente de la cosecha (como residuos agrícolas) o a través de los procesos agroindustriales subsiguientes. (Quezada & Gómez Live, 2020)

La Ilustración 10 sintetiza los periodos de recolección a lo largo del año para los cultivos de interés previamente definidos. Esta información reviste una importancia capital para la planificación energética, dado que de ella dependen la cuantificación de las reservas de almacenamiento necesarias y sus consecuentes implicaciones logísticas y económicas, considerando tanto las demandas de suministro de biomasa como el cultivo seleccionado y los meses de operación previstos para la planta de generación. (Quezada & Gómez Live, 2020)

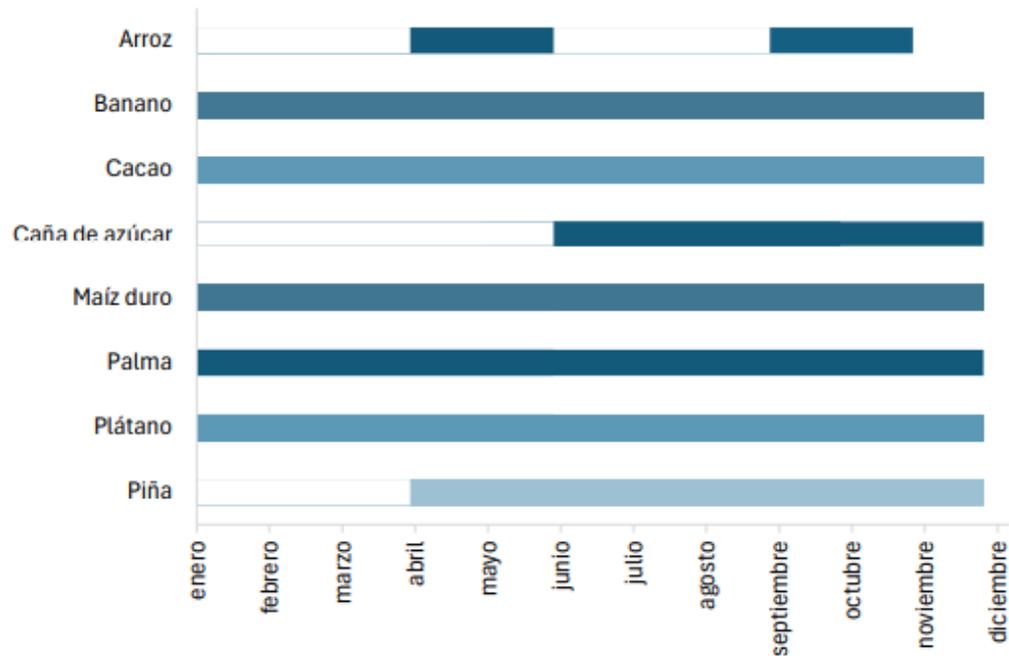


Ilustración 10 Periodo de cosecha de los cultivos seleccionados. Recogido de: (María Eliza & Yulissa del Cisne, s/f)

### 2.19.2 Cálculo de potencial energético

La metodología empleada para determinar el potencial energético se orienta a la cuantificación de la energía disponible a partir de los residuos agrícolas con el propósito de generar electricidad.

### 2.19.3 Determinación del Potencial Energético de la Biomasa y los ajustes por contenido Hídrico

La evaluación de la capacidad energética de los residuos orgánicos se basa principalmente en determinar su Poder Calorífico Inferior (PCI). Esta medida, expresada en megajulios por kilogramo (MJ/kg), cuantifica la energía liberada durante la combustión y es fundamental para valorar la calidad energética de cualquier tipo de desecho. Un factor importante es ajustar el PCI según la humedad presente en cada material, la cantidad de agua afecta directamente la energía utilizable porque, a mayor humedad, menor será el PCI obtenido. Este ajuste es indispensable para conseguir una

valoración precisa del potencial energético y para elegir la tecnología de conversión más adecuada. (María Eliza & Yulissa del Cisne, s/f).

Los residuos de caña de azúcar, palma aceitera, maíz duro seco y arroz son catalogados como particularmente aptos para la combustión directa, dada su inherentemente baja proporción de humedad. Contrariamente, se observó que, a pesar de su significativa generación de volumen, los residuos de cultivos como el banano (con un 86% de humedad) y el cacao (con un 83% de humedad) fueron excluidos del cálculo principal de potencial para esta tecnología. Esta decisión se fundamenta en que su elevada proporción hídrica merma de forma considerable su Poder Calorífico Inferior (PCI) ajustado, lo cual implicaría la necesidad de volúmenes sustancialmente mayores de biomasa para lograr una generación de energía equivalente, comprometiendo así su viabilidad económica para la combustión directa. En este contexto, se plantea que el raquis de banano, específicamente, podría ofrecer un potencial energético más prometedor si se considerara la biodigestión anaeróbica como tecnología de conversión. (Sagastume Gutiérrez et al., 2020)

El estudio (Sagastume Gutiérrez et al., 2020) implementa un factor de corrección que refleja un decaimiento lineal del PCI conforme aumenta la humedad. A modo de ejemplo ilustrativo, se observa que el bagazo de caña de azúcar, con un 50% de humedad, presenta un PCI ajustado de 7.9396 MJ/kg, mientras que el raquis de banano, con un considerable 86% de humedad, exhibe una reducción significativa hasta los 0.6313 MJ/kg.

#### **2.19.4 Obtención del Potencial Energético**

La energía calórica bruta (Q) se obtiene multiplicando los residuos disponibles (en toneladas por año) por el PCI ajustado. (María Eliza & Yulissa del Cisne, s/f)

El PEEE se calcula aplicando un factor de conversión de energía y el Rendimiento Global de la Planta (RGP), que para el estudio se asume en un 25%. Esta eficiencia considera tanto el ciclo termodinámico (aproximadamente 30.62% para el ciclo Rankine con recalentamiento), la eficiencia de la caldera (85%) y la eficiencia del generador (96%), así como las pérdidas internas y el autoconsumo de la planta. (Sagastume Gutiérrez et al., 2020)

En cuanto a las estimaciones de potencial energético, se determinó que la biomasa residual de la caña de azúcar, con 400.238,75 toneladas disponibles y un Poder Calorífico Inferior (PCI) ajustado de 7,9396 MJ/kg, podría generar un Potencial Eléctrico Energético Equivalente (PEEE) de 220.676 GWh anuales. A nivel nacional, la capacidad energética total, considerando los cuatro residuos clave: caña de azúcar, palma aceitera, maíz duro seco y arroz, se cuantificó en 2407,68 GWh anuales. El análisis de distribución geográfica reveló que las provincias con el mayor potencial eléctrico anual son: Guayas, con 891,09 GWh generados a partir de 1.263.517 toneladas anuales de residuos disponibles; Los Ríos, con 702,83 GWh derivados de 1.066.434 toneladas; Esmeraldas, con 438,58 GWh a partir de 720.426 toneladas; Sucumbíos, con 133,98 GWh y 220.417 toneladas; y Manabí, con 124,81 GWh y 174.583 toneladas de residuos aprovechables anualmente. (María Eliza & Yulissa del Cisne, s/f)

Para una planta de generación eléctrica con una capacidad instalada de 25 MW, los parámetros operativos y económicos proyectados son los siguientes: se estima un coeficiente de disponibilidad del recurso de 0,6712, mientras que el factor de capacidad (FP) calculado se sitúa en 0,5636. Esto se traduce en unas horas efectivas de operación anuales de 4937,436 horas. El requerimiento de biomasa para su funcionamiento asciende a 183.002,95 toneladas por año. En cuanto a la inversión inicial, los costos de capital promedio global se fijaron en 2162 USD/kW. Por otro lado, los gastos operativos y de

mantenimiento anuales abarcan un 3% del costo total de capital destinado a mantenimiento, sumado a un costo de transporte de 4,20 USD por tonelada más 0,0286 USD por tonelada-kilómetro, y un costo de almacenamiento de 6,47 USD por tonelada. El costo de la materia prima se estableció en 6,50 USD por tonelada. Bajo estas condiciones, el Costo Nivelado de Energía (LCOE) resultante fue de 0,097 USD/kWh. (Sagastume Gutiérrez et al., 2020)

El LCOE de 0,097 USD/kWh posiciona a la bioenergía como una fuente competitiva frente a otras opciones renovables en el país, como la fotovoltaica (0,115 USD/kWh) y la termoeléctrica (0,100 USD/kWh), y es comparable con el LCOE de biomasa en regiones como Europa (0,095 USD/kWh) y países vecinos como Colombia (0,110 USD/kWh). (María Eliza & Yulissa del Cisne, s/f)

## **2.20 Distribución geográfica del residuo**

La identificación de las zonas más adecuadas para la ubicación de plantas generadoras de biomasa en Ecuador se realizó mediante un análisis multicriterio que integra factores de exclusión y preferencia, utilizando un programa de sistemas de información geográfica (ArcGIS). (María Eliza & Yulissa del Cisne, s/f)

Las provincias ubicadas en la región Costa, destacándose particularmente Guayas, Los Ríos, Esmeraldas, Sucumbíos y Manabí, concentran las áreas con mayor aptitud para el aprovechamiento energético de la biomasa. Dentro de estas, las provincias de Guayas y Los Ríos obtuvieron las valoraciones más elevadas. No obstante, al aplicar sucesivos filtros de selección, el número de cantones viables experimentó una disminución notable. Inicialmente, 26 cantones satisfacían los requerimientos mínimos en términos de potencial energético. Tras esta primera criba, una segunda condición relacionada con la

proximidad a las subestaciones de transmisión eléctrica redujo el conjunto a 18 de estos 26 cantones. (María Eliza & Yulissa del Cisne, s/f)

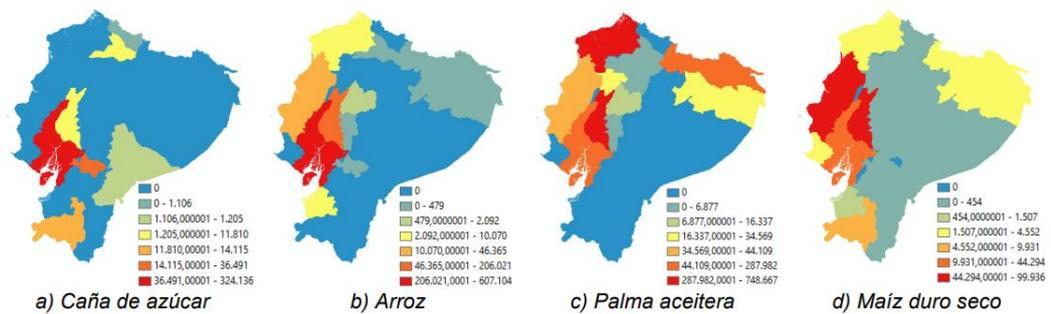


Ilustración 11 Distribución espacial y la producción anual en toneladas de los cultivos clave ecuatorianos. a) caña de azúcar, b) arroz, c) palma aceitera y d) maíz duro seco. Recogido de: (María Eliza & Yulissa del Cisne, s/f)

Un examen más profundo, que incorporó el ajuste del Poder Calorífico Inferior (PCI) de los residuos en función de su contenido de humedad, puso de manifiesto que ciertos subproductos, como el raquis de banano, poseen una proporción hídrica tan elevada que los hace inviables para la operación eficiente de una planta de combustión directa de 5 MWe. Esta característica implica la necesidad de volúmenes de biomasa sustancialmente superiores a los disponibles localmente para asegurar una generación energética óptima. Consecuentemente, este discernimiento limitó el número de cantones aptos para la implementación de una o más centrales de 5 MWe a once, concentrando el potencial en residuos de cascarilla de arroz, bagazo de caña de azúcar y cuesco y fibra de palma africana. Dentro de esta selección, el cantón Quinindé en Esmeraldas sobresale por su notable potencial técnico, atribuido a la predominancia del cultivo de palma africana, lo que podría permitir la instalación de hasta 27 plantas de generación eléctrica de 5 MWe. (Sagastume Gutiérrez et al., 2020)

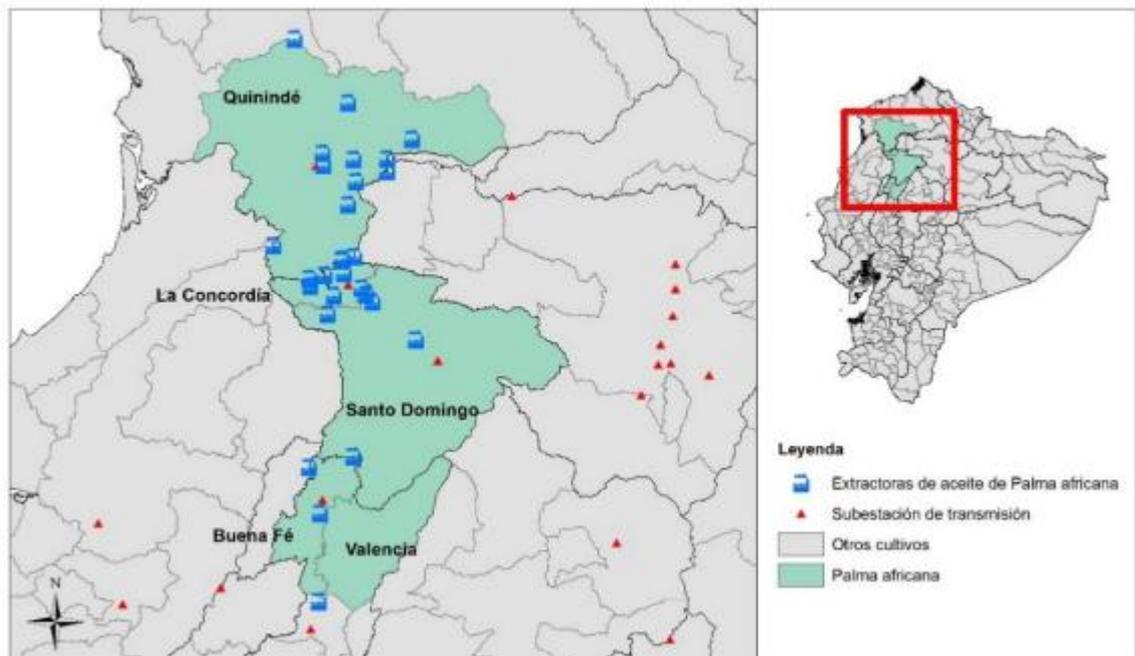


Ilustración 12 Localización de plantas de generación eléctrica a partir de residuo de palma africana. Recogido de: (Sagastume Gutiérrez et al., 2020)

## 2.21 Costo de inversion

El costo de capital, o CAPEX, comprende el conjunto de inversiones requeridas para la concepción, el diseño de ingeniería, la edificación de infraestructura y la adquisición de equipos esenciales, como aquellos destinados al manejo de combustible y a los sistemas de conversión, elementos indispensables para la fase de puesta en operación de un proyecto. La magnitud de estos desembolsos resulta crítica para el progreso y la materialización de iniciativas enfocadas en la valorización energética de la biomasa residual.

El análisis de la inversión inicial revela que, a nivel global, el costo instalado promedio para proyectos de generación con biomasa de escala pequeña a mediana (inferiores a 50 MW) se situó en 2022 en un rango que osciló entre USD 2000 y USD 4500 por kilovatio, estableciéndose un promedio global de 2162 USD/kW. Si bien en Sudamérica estos costos suelen ser más bajos, generalmente por debajo de los 2000 USD/kW, lo que denota una mayor competitividad regional, (María Eliza & Yulissa del

Cisne, s/f) optó por adoptar el costo promedio global de 2162 USD/kW como valor de referencia, en aras de garantizar la robustez y certeza del análisis. Bajo esta premisa, la inversión de capital para una planta con una capacidad de 25 MW se estima en 54,050 millones de USD, lo cual valida la correspondencia con el costo unitario de 2162 USD/kW.

## **CAPITULO III: METODOLOGIA**

### **3.1 Tipo y diseño de investigación**

La investigación llevada a cabo consistió en una revisión bibliográfica, cuyo principal objetivo fue analizar y sintetizar la información científica y técnica disponible sobre las opciones de biocombustibles de segunda generación técnica, económica y ambientalmente aplicables en Ecuador para la diversificación y fortalecimiento de su matriz de generación eléctrica. Esta investigación se concentró de manera específica en recolectar la información de artículos científicos, informes técnicos y documentos oficiales divulgados en años recientes con información relevante acerca del aprovechamiento energético de los residuos agrícolas en el territorio nacional.

En cuanto al método de investigación, se utilizó un enfoque transversal. Esto significa que se revisó la información y la literatura existente en un momento determinado, lo cual permitió obtener una visión clara y actual de las principales tendencias, los descubrimientos más importantes y el conocimiento actual relacionado con el uso energético de los residuos agrícolas. Por lo tanto, la revisión se enfocó en estudios recientes y datos actualizados para asegurar que la información recopilada sobre las características, el potencial y la viabilidad de aprovechar la biomasa agrícola en Ecuador fuera relevante y precisa.

### **3.2 Población y la muestra**

#### **3.2.1 Características de la población**

La población considerada para el presente análisis bibliográfico estuvo conformada por un total de 59 artículos científicos, los cuales fueron seleccionados directamente de fuentes bibliográficas confiables tales como Scopus, Scielo, PubMed, ScienceDirect. Estos documentos, publicados en los últimos cinco años, abordaron el

tema central del potencial energético de los residuos agrícolas en Ecuador, específicamente para su aplicación en la generación eléctrica distribuida basada en bioenergía. La revisión se centró en el examen de su viabilidad, características y las metodologías de aprovechamiento empleadas para la producción de energía.

### **3.2.2 Delimitación de la población**

Para delimitar el conjunto de documentos científicos y técnicos relevantes para este estudio, se fijaron criterios estrictos de inclusión y exclusión los cuales se definieron aplicando operadores booleanos como “AND, OR, NOT” de forma estratégica en las bases de datos Scopus, Scielo, PubMed y ScienceDirect. Este método permitió establecer con exactitud el universo de información, garantizando que solo los artículos e informes que coincidieran rigurosamente con los parámetros de la investigación fueran incluidos en el análisis.

### **3.3 Criterios de inclusión**

Los artículos debían cumplir con requisitos principales, tratar sobre biocombustibles de segunda generación, biomasa lignocelulósica, residuos agrícolas o biomasa de algas. Segundo, era importante que los estudios tuvieran una conexión directa con la producción o generación de energía eléctrica. También el contexto geográfico debía regirse a Ecuador, Latinoamérica o Sudamérica. Como cuarto criterio, los documentos debían analizar aspectos específicos como el impacto social, el impacto ambiental, la viabilidad económica, la innovación tecnológica, los desafíos futuros o las políticas relacionadas con la bioenergía. Finalmente, para asegurar la actualidad de la información, solo se incluyeron publicaciones cuyo año de edición fuera posterior a 2019.

### 3.3.1 Operación usada:

( ( "biocombustibles de segunda generación" OR "advanced biofuels" OR "2G biofuels" OR "lignocellulosic biomass" OR "agricultural residues" OR "algal biomass" ) AND ( "producción de energía eléctrica" OR "generación de electricidad" OR "power generation" OR "electric energy production" ) AND ( "Ecuador" OR "Latin America" OR "South America" ) AND ( "social impact" OR "environmental impact" OR "economic viability" OR "technological innovation" OR "future challenges" OR "policies" ) ) AND ( PUBYEAR > 2019 )

### 3.4 Criterios de exclusión

Para refinar la selección de la literatura, se aplicaron criterios de exclusión específicos que descartaron los documentos que no se alineaban con el enfoque de la investigación. De esta manera, se eliminaron sistemáticamente los estudios que se centraban en contextos geográficos fuera de Latinoamérica y Sudamérica, incluyendo publicaciones relacionadas con Europa, Norteamérica, Asia, África u Oceanía. Asimismo, fueron excluidos los artículos que abordaban principalmente los biocombustibles destinados al sector transporte o aquellos que trataban sobre combustibles para vehículos, garantizando así que la información recopilada se concentrara en la generación eléctrica y las regiones geográficas de interés para el estudio.

#### 3.4.1 Operación usada:

NOT ( ("Europa" OR "Europe") OR ("Norteamérica" OR "North America") OR ("Asia") OR ("África" OR "Africa") OR ("Oceanía" OR "Oceania") OR ("biocombustibles para transporte" OR "transport biofuels" OR "combustibles para vehículos" OR "vehicle fuels") )

### **3.5 Tipo de muestra**

En este análisis bibliográfico, la muestra de documentos fue de carácter no probabilístico, específicamente de tipo por conveniencia. Esto implica que los artículos se seleccionaron de manera deliberada de la base de datos Scopus, Scielo, PubMed, ScienceDirect, priorizando aquellos que satisfacían plenamente los criterios de inclusión previamente definidos y que se encontraban accesibles para su revisión. Esta aproximación se consideró idónea para abordar de manera comprensiva y representativa el tema central de la investigación, el cual se enfoca en el potencial energético de los residuos agrícolas en Ecuador para la generación eléctrica distribuida basada en bioenergía.

### **3.6 Tamaño de la muestra**

La muestra utilizada para el presente análisis bibliográfico constó de 59 artículos científicos seleccionados, se determinó que esta cantidad de documentos era adecuada y suficiente para cumplir con los propósitos de la revisión. Esta selección proveyó una base de información sólida, actualizada y muy relevante, fundamental para realizar un análisis completo del potencial energético de los residuos agrícolas en Ecuador, particularmente en lo que respecta a la generación eléctrica distribuida utilizando bioenergía.

### **3.7 Proceso de selección de la muestra**

El proceso de selección de la muestra documental se realizó siguiendo el primer paso donde se procedió con una búsqueda exhaustiva en la base de datos Scopus, Scielo, PubMed, ScienceDirect, empleando las operaciones booleanas. Luego, se aplicaron manualmente rigurosamente los criterios de inclusión y exclusión preestablecidos manualmente al realizar el método PRISMA, el cual emplea un flujograma para organizar los estudios que pasan los filtros aplicados, lo que permitió refinar la selección y asegurar

la pertinencia de los artículos para los objetivos de la investigación. Además, dentro de la flujograma se evidencia la adición de nuevos artículos integrados los cuales también eran relevantes para la investigación.

### **3.8 Métodos y técnicas**

Para la búsqueda de información se realizó en las bases de datos Scopus, Scielo, PubMed y ScienceDirect, usando las operaciones booleanas para poder seleccionar solo aquellos artículos que cumplieran estrictamente con los criterios de inclusión y exclusión definidos previamente.

Una vez obtenidos los documentos seleccionados, se procedió a una lectura crítica y detallada de cada uno de ellos. Durante esta etapa, se empleó la herramienta SciSpace para el procesamiento de la información, lo que facilitó la extracción y sintetización de los datos más relevantes concernientes al tema. Aquí además se aplicó el método PRISMA para determinar los artículos que pasen los filtros manualmente durante la lectura de estos. Para la organización y sistematización del volumen de información recopilada, se utilizó la plataforma de inteligencia artificial Research Rabbit. Esta herramienta resultó invaluable al permitir determinar las relaciones intrínsecas entre los artículos, autores, citas, temáticas centrales y años de publicación y también encontrar nuevos artículos con potencial para agregar en la revisión.

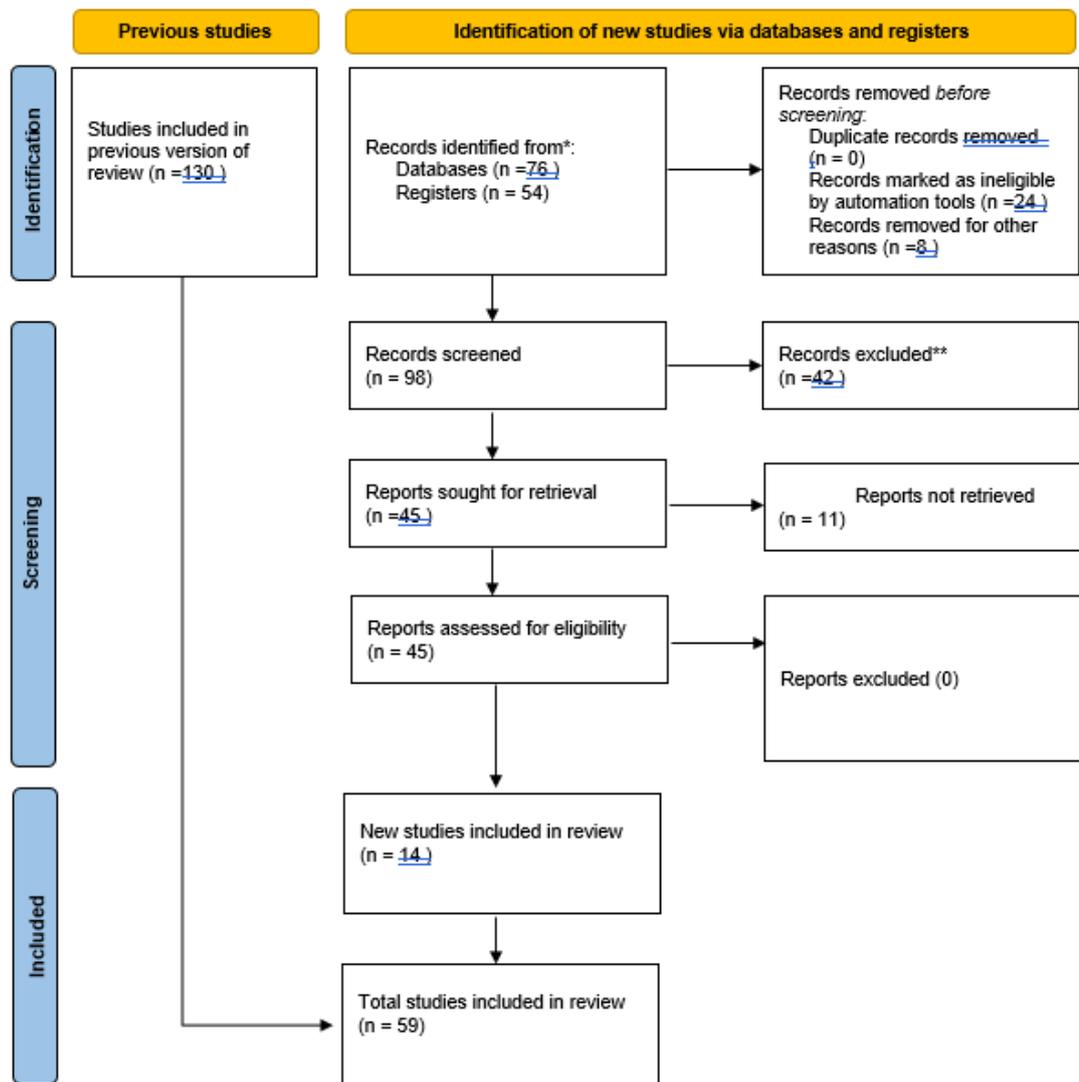


Ilustración 13 Flujograma PRISMA.

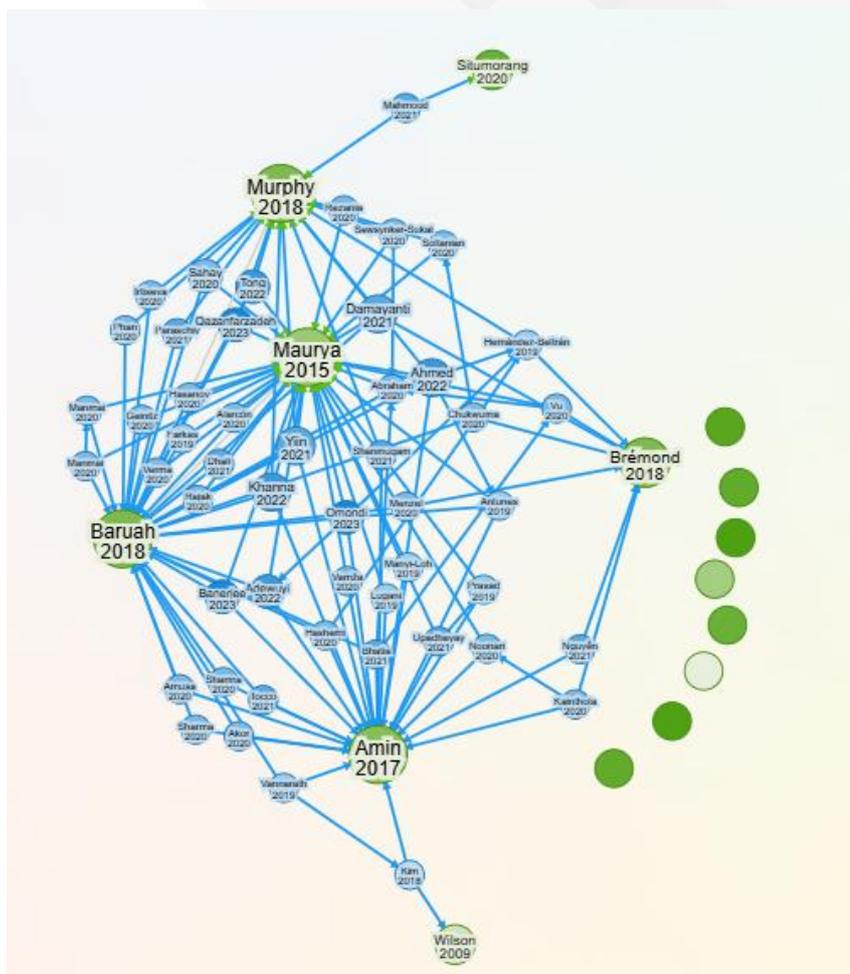


Ilustración 14 Mapeo de los artículos revisados en la plataforma Research Rabbit. \*VERDE: Artículos en revisión \*CELESTE: Artículos con conexiones según Autor, Temática Metodología, similares.

### 3.9 Procesamiento estadístico de la información

Dado el enfoque cualitativo de este análisis bibliográfico, que se centró en la revisión de la literatura científica para recopilar información sobre el potencial energético de los residuos agrícolas, no se aplicó un procesamiento estadístico de la información en el sentido tradicional de análisis cuantitativo de datos. En su lugar, se adoptó una metodología cualitativa para interpretar y sintetizar la información obtenida de los artículos científicos revisados.

El procesamiento de la información se centró en la interpretación y el análisis crítico de los datos cualitativos recopilados. Esto implicó identificar patrones, tendencias,

similitudes y diferencias en el potencial, las características, la viabilidad técnica y económica, así como los aspectos ambientales y sociales del aprovechamiento de la biomasa residual reportados en los diferentes estudios. Además, se realizaron comparaciones y contrastes entre los hallazgos de los diversos artículos para obtener una visión global y contextualizada del tema de estudio.

## CAPITULO IV: RESULTADOS

### 4.1 Fuentes de Biomasa y Potencial Energético en Ecuador

El análisis inicial en Ecuador permitió identificar ocho cultivos clave, seleccionados con base en su producción anual y la cantidad de biomasa residual que generan. En este contexto, la biomasa residual se consolida como un recurso renovable de considerable valor, que, a diferencia de otros recursos, no genera competencia con los cultivos alimentarios ni por el uso del suelo ni por los recursos hídricos. Para la generación de electricidad mediante combustión directa, se priorizaron los residuos de palma aceitera, caña de azúcar, maíz duro seco y arroz, debido a su intrínseco bajo contenido de humedad.

Se estima que la producción anual de residuos aprovechables de estos cuatro cultivos combinados asciende a un total de 3635 millones de toneladas, de las cuales un 40% se considera disponible para fines energéticos. En el año 2023, la distribución de la producción de residuos aprovechables fue de 1001 millones de toneladas para la caña de azúcar, 5252 millones para la palma aceitera, 0,636 millones para el maíz duro seco y 2199 millones para el arroz. El Potencial Eléctrico Energético Equivalente (PEEE) total a nivel nacional, derivado de estos cuatro tipos de residuos, se cuantificó en 2407,68 GWh anuales.

Geográficamente, las provincias que destacan por su mayor potencial eléctrico anual son Guayas, con 891,09 GWh; Los Ríos, que contribuye con 702,83 GWh; Esmeraldas, con 438,58 GWh; Sucumbíos, alcanzando los 133,98 GWh; y Manabí, con un potencial de 124,81 GWh.

Es importante señalar que residuos con un alto contenido de humedad, como los de banano (86%) y cacao (83%), fueron excluidos del cálculo para la combustión directa. Esta decisión se fundamentó en su bajo Poder Calorífico Inferior (PCI) ajustado, lo que

compromete su viabilidad técnica y económica para esta tecnología específica. No obstante, se sugiere que el raquis de banano podría mostrar un potencial prometedor para la biodigestión anaeróbica. Finalmente, la disponibilidad de biomasa es inherentemente estacional, lo cual subraya la necesidad de una planificación estratégica de almacenamiento para asegurar un suministro constante que permita una generación eléctrica ininterrumpida a lo largo de todo el año.

#### **4.2 Viabilidad Económica y Costos**

En el análisis de la viabilidad económica de una planta de generación eléctrica de 25 MW, el Costo Nivelado de Energía (LCOE) se proyectó en 0,097 USD/kWh. Este valor confiere a la bioenergía una posición competitiva dentro del panorama energético ecuatoriano, superando en eficiencia de costos a la energía fotovoltaica, que asciende a 0,115 USD/kWh, y mostrándose muy cercana a la termoeléctrica, cuyo LCOE es de 0,100 USD/kWh. Adicionalmente, esta cifra es comparable con los LCOE observados para la biomasa en regiones como Europa (0,095 USD/kWh) y Colombia (0,110 USD/kWh), lo que subraya su competitividad a escala internacional.

En lo referente al costo de capital (CAPEX), la inversión promedio global para proyectos de biomasa de pequeña a mediana escala fue establecida en 2162 USD por kilovatio. Aplicando este parámetro, la inversión inicial estimada para una planta de 25 MW alcanza los 54,050 millones de USD.

Finalmente, los gastos anuales de operación y mantenimiento comprenden un 3% del costo total de capital destinado al mantenimiento de la infraestructura. A esto se añaden los costos específicos de transporte, que se calculan en 4,20 USD por tonelada, más un componente de 0,0286 USD por tonelada-kilómetro. Los costos de

almacenamiento se fijaron en 6,47 USD por tonelada, y el costo de la materia prima se estableció en 6,50 USD por tonelada.

### **4.3 Ubicación Estratégica de Plantas**

El análisis multicriterio llevado a cabo reveló que las provincias de la región Costa, con especial énfasis en Guayas, Los Ríos, Esmeraldas, Sucumbíos y Manabí, se presentan como las zonas más prometedoras para el aprovechamiento energético de la biomasa.

Inicialmente, se identificó que 26 cantones cumplían con los requisitos mínimos de potencial energético. Sin embargo, este número se vio significativamente reducido a 11 cantones aptos después de aplicar filtros subsiguientes. Estos filtros consideraron la proximidad indispensable a las subestaciones eléctricas de transmisión y la viabilidad del Poder Calorífico Inferior (PCI) ajustado de los residuos para su uso eficiente en plantas de combustión directa con una capacidad de 5 MWe.

Dentro de este grupo reducido, el cantón Quinindé, ubicado en la provincia de Esmeraldas, sobresale notablemente por su elevado potencial técnico. Este desempeño se atribuye principalmente a la predominancia del cultivo de palma africana en la zona, lo cual podría viabilizar la instalación de hasta 27 plantas de generación eléctrica de 5 MWe.

### **4.4 Beneficios e Impactos de la Bioenergía**

La integración de la bioenergía en la matriz energética de Ecuador aportaría significativamente a la disminución de la dependencia hidroeléctrica del país y a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero. Esta diversificación de fuentes energéticas, al reducir la necesidad de combustibles importados, fortalecería la seguridad energética nacional.

Adicionalmente, esta iniciativa impulsaría la generación de puestos de trabajo en las áreas rurales y fomentaría el desarrollo socioeconómico de las comunidades agrarias, al brindar un valor añadido a sus actividades productivas.

Con la aplicación del uso de la bioenergía al ser de fácil aplicación y planificación, permite una mayor eficiencia energética y ayuda a disminuir la carga en las redes de transmisión principales.

#### **4.5 Desafíos y Marco Regulatorio**

A pesar del prometedor potencial de la bioenergía, su implementación a gran escala en Ecuador afronta desafíos significativos dentro de los cuales se incluye una intensa competencia por parte de los combustibles fósiles, la ausencia de un mapeo de la biomasa, y la limitada disponibilidad de capital.

La viabilidad financiera actual de los proyectos de bioenergía se ve restringida por los elevados costos de inversión inicial. Por lo que es importante que el apoyo Gubernamental sea activo no solo en lo financiero sino también en la promoción de políticas que favorezcan a la ejecución de los proyectos, además de atraer la inversión privada hacia este campo.

La Ley de Competitividad Energética, promueve y pone en prioridad la generación de energía eléctrica a partir de biomasa derivada de desechos sólidos orgánicos y fomenta activamente la instalación de sistemas de generación distribuida basados en energías renovables no convencionales (ERNC). Como parte de estos incentivos, se ha establecido un "Precio Preferente" de 0.056 USD/kWh para la electricidad excedente.

A pesar de que en los últimos años a causa de crisis en la matriz de generación de energía eléctrica del país se promulgo leyes como la antes mencionada, la poca

participación de la inversión extranjera se ve reflejada por la inestabilidad de estas leyes y del sistema político ecuatoriano. Por lo que es crucial la creación de políticas fiscales consistentes que consigan equilibrar la atracción de nuevas inversiones con el sostenimiento de una recaudación tributaria suficiente.

## CAPITULO V: DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 DISCUSIÓN

La bioenergía se ha afianzado como una alternativa renovable de relevancia mundial, con un aumento promedio del 16% en su generación de energía limpia durante la última década, al 2024 ya representa el 1.57% de la capacidad eléctrica global instalada. América Latina, y Ecuador específicamente, disponen de un gran potencial aún poco utilizado especialmente al aprovechar desechos agrícolas, los cuales podrían producir hasta 3 exajulios (EJ) al año en la región. Sin embargo, a pesar de la clara oportunidad para diversificar su matriz energética, que es altamente dependiente de la hidroelectricidad (aproximadamente 80%) y vulnerable a variaciones climáticas que han causado apagones, Ecuador enfrenta obstáculos significativos como la competencia de los combustibles fósiles, la escasez de inventarios detallados de biomasa y una inversión de capital limitada, aunque la implementación de la generación distribuida, utilizando recursos locales, emerge como una solución eficaz y adaptable para complementar su infraestructura existente.

La biomasa se convierte en energía a través de dos vías principales: termoquímica y bioquímica/biológica, siendo la elección determinada por el contenido de humedad de la biomasa. Los métodos termoquímicos, que incluyen la combustión directa, gasificación y pirólisis, son generalmente más eficientes y se encuentran en una fase de madurez tecnológica, siendo los más adecuados para biomásas con baja humedad, como los residuos de caña de azúcar, palma aceitera, maíz y arroz. En contraste, los procesos bioquímicos o biológicos, como la digestión anaeróbica, son óptimos para biomásas con alta humedad, como el raquis de banano, y resultan en la producción de biogás y biofertilizantes. Un factor clave para mejorar la eficiencia de la conversión es el pretratamiento de la biomasa, que busca desestructurar su composición compleja y

facilitar el acceso a sus componentes mediante diversas técnicas (físicas, químicas, físico-químicas, biológicas o con solventes limpios), aunque esto puede generar costos adicionales.

El sector eléctrico del Ecuador es estratégico, permitiendo la participación privada y fomentando las energías renovables no convencionales (ERNC) y la generación distribuida con un "Precio Preferente" de 0.056 USD/kWh por la electricidad excedente, gracias a la Ley de Competitividad Energética de 2024 que prioriza la generación con biomasa de desechos sólidos orgánicos y la autogeneración; sin embargo, la incertidumbre regulatoria y fiscal limita la inversión extranjera directa. Económicamente, el Costo Nivelado de Energía (LCOE) de la bioenergía se estima en 0.097 USD/kWh, haciéndola competitiva frente a la energía fotovoltaica (0.115 USD/kWh) y termoeléctrica (0.100 USD/kWh), con un costo de capital (CAPEX) para una planta de 25 MW de aproximadamente 54.050 millones de USD, siendo las provincias costeras como Guayas, Los Ríos y Esmeraldas (particularmente Quinindé) las zonas más idóneas para estas plantas por la disponibilidad de biomasa agrícola.

## 5.2 CONCLUSIONES

La bioenergía se presenta como una alternativa estratégica y factible para Ecuador, ofreciendo una oportunidad crucial para diversificar su matriz energética y disminuir su alta dependencia de la hidroelectricidad, la cual es susceptible a los cambios climáticos y ha provocado inestabilidad en el suministro. El país cuenta con un potencial considerable y aún sin aprovechar en residuos agrícolas, como los de caña de azúcar, palma aceitera, maíz y arroz, que en 2023 sumaron 3635 millones de toneladas de residuos utilizables. Esto representa un Potencial Eléctrico Energético Equivalente (PEEE) nacional de 2407.68 GWh al año. La gran ventaja de este abundante recurso de biomasa residual es

que no entra en competencia con la producción de alimentos, consolidándose como una fuente de energía sostenible y de gran valor.

La viabilidad técnica de la bioenergía en Ecuador se apoya en la existencia de tecnologías de conversión ya consolidadas y eficientes, capaces de adaptarse a las diversas características de la biomasa disponible. Desde una perspectiva económica, el Costo Nivelado de Energía (LCOE) de 0.097 USD/kWh posiciona a la bioenergía como una alternativa altamente competitiva frente a otras fuentes de energía, dentro del mercado ecuatoriano, y con un valor comparable a nivel internacional. Además, estudios geográficos han permitido identificar las zonas más idóneas para la ubicación de plantas de generación, concentrándose el mayor potencial en provincias costeras como Guayas, Los Ríos y Esmeraldas (particularmente en Quinindé), lo que optimiza tanto la planificación como la eficiencia logística.

La expansión de la bioenergía en Ecuador podría traer muchos beneficios, no solo en cuanto a tener energía más segura, sino también al bajar las emisiones que calientan el planeta, crear trabajo en el campo y usar mejor los desechos agrícolas, cerrando ciclos. Pero para que esto ocurra, hay varios problemas que superar, nos topamos con la dura competencia de los combustibles fósiles, que son baratos, falta de apoyo para las tecnologías que transforman la biomasa, poca inversión de dinero y, lo más importante, un ambiente legal y de impuestos que no da confianza, lo que ahuyenta el dinero de empresas nacionales y de fuera. Si queremos que este potencial se convierta en una fuente de energía real y duradera, tenemos que arreglar estas dificultades.

### 5.3 RECOMENDACIONES

Para que la bioenergía despegue en Ecuador, es esencial que las reglas y los impuestos sean claros y estables. Conviene mantener y asegurar incentivos como el precio especial de 0.056 USD por kilovatio-hora para la electricidad que los proyectos de energía renovable y generación distribuida devuelven a la red, tal como lo indica la Ley de Competitividad Energética. También es importante tener políticas de impuestos fijas que, por un lado, atraigan inversión de otros países y, por otro, permitan seguir recaudando para el Estado, creando la confianza necesaria para que el dinero llegue a este sector tan clave y se reduzcan los gastos iniciales.

En cuanto a la parte técnica y cómo manejar los recursos, es indispensable hacer listas detalladas y con ubicación exacta de cuánta biomasa hay en todo el país. Así se podrá decidir mejor dónde poner las futuras plantas y cómo transportar el material, tomando en cuenta cuándo se cosechan los cultivos y dónde guardar lo que sobra. Se sugiere, además, invertir en investigación para mejorar cómo se prepara la biomasa y las tecnologías que la transforman (las que usan calor o las biológicas), sobre todo para materiales húmedos como el raquis de banano. La idea es encontrar formas de bajar los costos iniciales y hacer que las plantas funcionen mejor en general.

Por último, es recomendable darle prioridad a impulsar proyectos de generación distribuida en las provincias con más potencial agrícola, como Guayas, Los Ríos y Quinindé en Esmeraldas. Esta estrategia no solo aprovecharía al máximo la biomasa de cada lugar, sino que también ayudaría al crecimiento de la gente y la economía en las zonas rurales, creando trabajos y dándole valor a lo que antes se consideraba basura de la agricultura. La bioenergía debe ir de la mano con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, asegurando que ayude a combatir el cambio climático y a manejar mejor los desechos, sin poner en riesgo la comida ni el uso responsable de la tierra.

## BIBLIOGRAFÍA

Agencia de Regulación y Control de Electricidad. (s/f). *Panorama Eléctrico 2025*. arconel.gob.ec. Recuperado 2025, de <https://arconel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2025/01/PanoramaElectricoXXV-Enero-Baja.pdf>

Alzate-León, M. A., Bermúdez-Santaella, J. R., & Herrera-Susa, D. A. (2024). Revisión del estado del arte en tecnologías de transesterificación para la producción de biodiésel en sistemas de flujo continuo y por lotes. *Revista Ion Investigación Optimización y Nuevos procesos en Ingeniería*, 37(2). <https://doi.org/10.18273/revion.v37n2-2024005>

Amin, F. R., Khalid, H., Zhang, H., Rahman, S. U., Zhang, R., Liu, G., & Chen, C. (2017). Pretreatment methods of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion. *AMB Express*, 7(1), 72. <https://doi.org/10.1186/s13568-017-0375-4>

Ana María Espinosa-Negrín, Lisbet Mailin López-González, Neybis Lourdes Casdelo-Gutiérrez. (s/f). *Pretratamientos aplicados a biomásas lignocelulósicas: una revisión de los principales métodos analíticos utilizados para su evaluación*. researchgate.net. Recuperado 2025, de <https://www.redalyc.org/journal/4435/443570155006/html/>

ARCONEL. (s/f). *Mapa Normativo del Sector Eléctrico – ARCONEL*. Gob.ec. Recuperado 2025, de <https://arconel.gob.ec/mapa-normativo-del-sector-electrico/>

Barahona Marin, A. R., & Santacruz Hurtado, M. A. (2025). Generación de energía eléctrica por medio de biomasa orgánica en Santo Domingo, Ecuador: Generation of electrical energy through organic biomass in Santo Domingo, Ecuador. *Revista Científica Multidisciplinar G-nerando*, 6(1). <https://doi.org/10.60100/rcmg.v6i1.483>

Barros López, J. G., & Troncoso Salgado, A. Y. (s/f). *Atlas climatológico del Ecuador*. bibdigital.epn.edu.ec. Recuperado 2025, de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1720>

Baruah, J., Nath, B. K., Sharma, R., Kumar, S., Deka, R. C., Baruah, D. C., & Kalita, E. (2018). Recent trends in the pretreatment of lignocellulosic biomass for value-added products. *Frontiers in energy research*, 6. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00141>

Bautista-Peñuelas. (2023). *Diseño y simulación de una planta de procesamiento hidrotermal utilizando energía solar: un análisis tecno-económico*. Centro de Investigaciones en Óptica.

Blanco-Orozco, N. V. (2021). Generación de energía eléctrica en sistemas de generación distribuida de pequeña escala usando bioenergía en Nicaragua. *Revista fuentes el reventón energético*, 19(1). <https://doi.org/10.18273/revfue.v19n1-2021003>

Brémond, U., de Buyer, R., Steyer, J.-P., Bernet, N., & Carrere, H. (2018). Biological pretreatments of biomass for improving biogas production: an overview from lab scale to full-scale. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 583–604. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.103>

Carreño-Vesga, J. P. (s/f). *Pretratamiento de Biomasa Lignocelulósica de los Desechos Agrícolas del Cacao Para la Producción de Biogás en una Finca Cacaotera*. repositorio.udes.edu.co. Recuperado 2025, de <https://repositorio.udes.edu.co/handle/001/8251>

Castro Yupangui, J. F. (s/f). *Análisis para viabilizar un sistema energético 100% renovable para la amazonía ecuatoriana al año 2050*. dspace.ucacue.edu.ec. Recuperado 2025, de <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/13121>

CENACE. (s/f). *Energía Neta Producida por las Centrales de Generación [GWh]*  
– *Operador Nacional de Electricidad CENACE*. Gob.ec. Recuperado 2025, de  
<https://www.cenace.gob.ec/energia-neta-producida-por-las-centrales-de-generacion-gwh/>

Chamorro, J., & Mera, E. (2025). Estudio de la crisis energética en el Ecuador por la dependencia en la generación de energía hidráulica. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*, 8, 168–186.

Chevez-Barba, R., & Quinatoa-Caiza, C. (2025). Ley de competitividad energética en el Ecuador. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*, 8, 502–516.

Davila, W. L., Solís, M. F., & Rosales, E. P. C. (2024). Potencial de Exportación de Biomasa Cañera: Una Alternativa Sostenible desde el Cantón Milagro, Ecuador. *Estudios. Perspectivas Revista Científica y Académica*, 4(4), 2018–2043.

Del Cisne Marín-Apolo, Y., Iñiguez, M. E. V., & Correa, D. O. (2025). Aprovechamiento de residuos agrícolas para producción de electricidad en Latinoamérica: Revisión literaria de casos exitosos en México, Colombia y Brasil. *Revista InGenio*, 8(1), 46–68.

Delgado Noboa, J. W. (2023). *Producción de etanol anhidro a partir de la fermentación de residuos de cacao para uso como biocombustible - Universidad de Zaragoza Repository*. Universidad de Zaragoza, Prensas de La Universidad. <https://zaguan.unizar.es/record/133204>

Fernández, J., Gutiérrez, F., Del Río, P., San Miguel, G., Bahillo, A., & Sánchez, J. M. (2015). *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética*.

García-Saldarriaga, J. L., & Rodríguez-Gámez, M. (2022). La generación distribuida con fuentes renovables de energía en la parroquia Portoviejo - Ecuador. *Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies*, 3(7), 289–299. <https://doi.org/10.51798/sijis.v3i7.547>

German, B. (2021, febrero 4). Ecuador y los Biocombustibles. *Petroenergía*. <https://www.petroenergia.info/post/ecuador-y-los-biocombustibles>

Gosgot Angeles, W., Rivera López, R. Y., Rascón, J., Barrena Gurbillón, M. Á., Ordinola Ramirez, C. M., Oliva, M., & Montenegro Santillan, Y. (2021). Valorización energética de residuos orgánicos mediante pirolisis. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 5(2), 26. <https://doi.org/10.25127/aps.20212.766>

Instituto Nacional de Preinversión. (s/f). *Atlas Bioenergético de la República del Ecuador*. Olade.org. Recuperado 2025, de <http://biblioteca.olade.org/opactmpl/Documentos/cg00194.pdf>

IRENA. (s/f-a). *Agricultural residue-based bioenergy: Regional potential and scale-up strategies*. Irena.org. Recuperado 2025, de <https://www.irena.org/Publications/2023/Nov/Agricultural-residue-based-bioenergyRegional-potential-and-scale-up-strategies>

IRENA. (s/f-b). *Regional Trends*. Irena.org. Recuperado 2025, de <https://www.irena.org/Data/Viewdata-by-topic/Capacity-and-Generation/Regional-Trends>

IRENA. (s/f-c). *Statistics Data*. Irena.org. Recuperado 2025, de <https://www.irena.org/Data/View-databy-topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>

Jaramillo, F. E., Alvarado, P. N., & Mazo, R. A. (2022). Torrefacción de biomasa en un reactor de tornillo a escala de banco: efecto de la temperatura y del tipo de biomasa. *TecnoLógicas*, 25(54), e2269. <https://doi.org/10.22430/22565337.2269>

Luzardo Gorozabel, B. P., Ruíz Reyes, E., & Pérez Parra, J. C. (2023). TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA EN BIOCOMBUSTIBLE DE SEGUNDA GENERACIÓN: ESTADO DEL ARTE DEL PRETRATAMIENTO. *Revista Bases de la Ciencia*, 7(ESPECIAL), 3–22. <https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v7i3.4243>

María Eliza, V. I., & Yulissa del Cisne, M. A. (s/f). *Análisis del potencial energético de residuos agrícolas en Ecuador para aplicaciones de generación eléctrica distribuida basada en bioenergía*. rest-dspace.ucuenca.edu.ec. Recuperado 2025, de <https://rest-dspace.ucuenca.edu.ec/server/api/core/bitstreams/d5c31a06-9966-4201-8ef2-5063722d493b/content>

Maurya, D. P., Singla, A., & Negi, S. (2015). An overview of key pretreatment processes for biological conversion of lignocellulosic biomass to bioethanol. *3 Biotech*, 5(5), 597–609. <https://doi.org/10.1007/s13205-015-0279-4>

Mohammed, Y. S., Mustafa, M. W., Bashir, N., Ogundola, M. A., & Umar, U. (2014). Sustainable potential of bioenergy resources for distributed power generation development in Nigeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 361–370. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.018>

Naranjo-Silva, S. (2024). Una perspectiva del desarrollo hidroeléctrico en Ecuador: pasado, presente y futuro. *La granja*, 39(1), 63–77. <https://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.04>

Peláez-Samaniego y J. L. Espinoza Abad, M. R. (s/f). *Energías renovables en el Ecuador: situación actual, tendencias y perspectivas*. Recuperado 2025, de <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00214.pdf>

Quezada, C., & Gómez Live, C. D. (2020). *Evaluación del potencial técnico y económico de plantas de generación eléctrica basadas en desechos agrícolas y agroindustriales, reproducibles en distintas localizaciones en Ecuador*. 76 hojas. EPN.

Rajendran, K., Drielak, E., Sudarshan Varma, V., Muthusamy, S., & Kumar, G. (2018). Updates on the pretreatment of lignocellulosic feedstocks for bioenergy production—a review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 8(2), 471–483. <https://doi.org/10.1007/s13399-017-0269-3>

Ramos Rivadeneira, C., Toro, D., & Sanchez, M. (2023). Potencial de los biocombustibles de segunda generación en Ecuador: una revisión crítica. *\*Journal of Sustainable Energy\**, 12(3), 45–60. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i4.7729](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7729)

Rojas-Asuero, H., Duque-Yaguache, E., & García-Ramírez, Y. (s/f). *CONTEXTO ACTUAL DEL SECTOR HIDROELÉCTRICO ECUATORIANO: ANÁLISIS DE PROYECTOS EMBLEMÁTICOS*. studocu.com. Recuperado 2025, de <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-central-del-ecuador/hidraulica/5sector-hidrico-ecuador/65537038>

Romo Iglesias, J. D. (2025). *ENOS y su influencia en sequías en la cuenca del río Paute*.

Saavedra, D., Suárez Alvarado, G. S., & Domínguez Andrade, C. S. (2025). *Relación entre políticas fiscales y atractivo de inversión extranjera directa en el sector energético Ecuatoriano (Doctoral dissertation)*.

Sagastume Gutiérrez, A., Cabello Eras, J. J., Hens, L., & Vandecasteele, C. (2020). 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*, 269(122317), 122317. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122317>

Salamanca de Federico, G. (2024). *Estudio de una planta de producción de metanol verde a partir de la hidrogenación del CO2*. ETSI\_Energia.

Salinas Callejas, E., & Quezada, V. (2009). Los biocombustibles. *El Cotidiano*, 157, 75–82.

Salvatierra Hansen Vik, T. N., Orellana Barzola, J. P., & Villa Cox, G. G. (s/f). *Cuáles son los factores que influyen en el progreso de los países para alcanzar el objetivo de desarrollo sostenible número 7 sobre energía asequible y no contaminante*. dspace.espol.edu.ec. Recuperado 2025, de <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/65951>

Sanchez-Hervas, J. M., Ortiz, I., Márquez, A., Fernández-Fernández, A. M., Canivell, M., & Ruiz, E. (2023). Pirólisis de biomasa y residuos como estrategia de producción sostenible y simbiosis industrial en la comunidad de Madrid (España). *Revista Tecnología en Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i10.7010>

Sanmartín González, M. E. (2022). *Autogeneración : desafíos y oportunidades para el desarrollo y competitividad del sector eléctrico ecuatoriano*. Universidad Externado de Colombia. <https://doi.org/10.57998/bdigital/handle.001.2581>

Secretaría de Energía. (s/f). *Energías Renovables*. energia.gob.ar. Recuperado 2025, de

[https://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro\\_energia\\_biomasa.pdf](https://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_biomasa.pdf)

SECRETARIO GENERAL JURÍDICO DE LA PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA DEL ECUADOR, & PRESIDENTE CONSTITUCIONAL DE LA REPÚBLICA. (s/f). *REGLAMENTO GENERAL DE LA LEY ORGÁNICA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA*. Gob.ec. Recuperado 2025, de [https://arconel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/07/REGLAMENTO\\_GENERAL\\_DE\\_LA\\_LEY\\_ORGANICA\\_DE\\_EFICIENCIA\\_ENERGETICA.pdf](https://arconel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/07/REGLAMENTO_GENERAL_DE_LA_LEY_ORGANICA_DE_EFICIENCIA_ENERGETICA.pdf)

Serrano, J., Mejía, W., Ortiz, J., Sánchez, A., & Zalamea, S. (s/f). *Determinación del Potencial de Generación Eléctrica a Partir de Biomasa en el Ecuador Determination of the Potential Electric Generation from Biomass in Ecuador*.

SIPA. (s/f). *Cifras Agroproductivas*. Gob.ec. Recuperado 2025, de <https://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/cifras-agroproductivas>

Situmorang, Y. A., Zhao, Z., Yoshida, A., Abudula, A., & Guan, G. (2020). Small-scale biomass gasification systems for power generation (<200 kW class): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117(109486), 109486. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109486>

Sofan German, S. J., Mendoza Fandiño, J. M., Rhenals Julio, J. D., Jimenez Lopez, J., & De la Vega González, T. D. J. (2024). Análisis Exergético de la Generación de Vapor Integrada a Gasificación de Biomasa. *Inge CUC*, 20(1), 24–37. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.20.1.2024.03>

Tech Solutions. (s/f). *Guía Taller Biomasa*. etechsolutions.com.co. Recuperado 2025, de

<https://repositorio.etechsolutions.com.co/bitstream/handle/123456789/82/Gui%CC%81a%20Taller%20Biomasa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Torres, B., & Alexander, R. (2024). *Comparación de tres tratamientos (aerobia, anaerobia y combinado) para la descomposición de materia orgánica en la obtención de biogás y biofertilizante en el Ecuador*. Babahoyo, Ecuador.

Torres Moyano, J. A., Andrade Izurieta, F. E., & Aguirre, D. (2025). *Dimensionamiento de una central hidroeléctrica en Ecuador considerando condiciones climatológicas adecuadas y aspectos de diseño (Doctoral dissertation)*.

Vega, L. P., Bautista, K. T., Campos, H., Daza, S., & Vargas, G. (2024). Biofuel production in Latin America: A review for Argentina. *Energy Rep*, *11*, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.060>.)

Vélez Pizarro, A. M., Marquinez Viscaíno, J. F., Vega Jaramillo, F. Y., & Vega Granda, A. del C. (2024). Desarrollo sostenible de Ecuador a través del desarrollo de las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable. *Análisis del comportamiento de las líneas de crédito a través de la corporación financiera nacional y su aporte al desarrollo de las PYMES en Guayaquil 2011-2015*, *8*(2), 103–113. [https://doi.org/10.26820/recimundo/8.\(2\).abril.2024.103-113](https://doi.org/10.26820/recimundo/8.(2).abril.2024.103-113)

WBA - World Bioenergy Association. (s/f). *GLOBAL BIOENERGY STATISTICS 2019*. Worldbioenergy.org. Recuperado 2025, de [https://www.worldbioenergy.org/uploads/191129%20WBA%20GBS%202019\\_HQ.pdf](https://www.worldbioenergy.org/uploads/191129%20WBA%20GBS%202019_HQ.pdf)

Wilson, C. A., & Novak, J. T. (2009). Hydrolysis of macromolecular components of primary and secondary wastewater sludge by thermal hydrolytic pretreatment. *Water Research*, *43*(18), 4489–4498. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.07.022>

# UNEMI

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

*¡Evolución académica!*

@UNEMIEcuador

