

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR, MODALIDAD PRESENCIAL

TEMA:

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DEL BIOCHAR COMO COMBUSTIBLE OBTENIDO MEDIANTE PIRÓLISIS DE RESIDUOS AGRÍCOLAS

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

Línea de investigación: Biotecnología, energía y recursos naturales renovables

AUTOR:

Diego Alexander Enríquez Mendoza

DIRECTOR:

Msc. Julio Esteban Guerra Masson

Ibarra, julio 2024



REPÚBLICA DEL ECUADOR

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004126882		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Enríquez Mendoza Diego Alexander		
DIRECCIÓN:	San Antonio de Ibarra calle 27 de noviembre 574		
EMAIL:	daenriquezm@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	062932981	TELÉFONO MÓVIL:	0981559013

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DEL BIOCHAR COMO COMBUSTIBLE OBTENIDO MEDIANTE PIRÓLISIS DE RESIDUOS AGRÍCOLAS
AUTOR (ES):	Enríquez Mendoza Diego Alexander
FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA	22/07/2024
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	MSc. Julio Esteban Guerra Masson



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD



2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 22 días del mes de Julio de 2024

EL AUTOR:

Enriquez Mendoza Diego Alexander
C.I. 1004126882



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



**CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR**

Yo, MSc. Julio Esteban Guerra Masson en calidad de director del señor estudiante Enríquez Mendoza Diego Alexander certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: “EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DEL BIOCHAR COMO COMBUSTIBLE OBTENIDO MEDIANTE PIRÓLISIS DE RESIDUOS AGRÍCOLAS.”

Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, aprobado la defensa, impresión y empastado.

MSc. Julio Esteban Guerra Masson

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

DEDICATORIA

Dedico este trabajo especialmente a mi madre, cuyo amor, apoyo incondicional y sacrificios han sido mi mayor inspiración y motivación a lo largo de este camino académico. A mi padre, por sus valiosos consejos y apoyo, que se reflejaron en la culminación de este trabajo. A mis hermanas, por su constante aliento y comprensión en cada etapa de este viaje. A mis profesores y mentores, por su guía experta y por compartir su sabiduría conmigo. A todos aquellos que creyeron en mí y me impulsaron a seguir adelante, este logro también es suyo. Finalmente, dedico este trabajo de integración curricular a mí mismo, como testimonio de mi perseverancia, determinación y crecimiento personal durante este desafiante pero gratificante proceso.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mis padres por su amor incondicional y apoyo constante a lo largo de mi educación. También quiero agradecer a mi tutor el MSc. Julio Esteban Guerra Masson por su guía experta y dedicación en este proyecto. Sin su apoyo, esta tesis no habría sido posible. Gracias a todos por creer en mí.

Además, quiero expresar mi gratitud a todos aquellos que de alguna manera han creído en mí y me han brindado palabras de aliento y a mí mismo para seguir adelante. Este logro no habría sido posible sin su apoyo, Por último, pero no menos importante, agradezco a mí mismo por mi persistencia, determinación y esfuerzo dedicados a este proyecto. Este trabajo representa un hito importante en mi vida académica y personal.

Tabla de contenido

RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XIV
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
Problema de investigación.....	1
Formulación de la pregunta de investigación	1
Objetivo General.....	2
Objetivos Específicos	2
Alcance y delimitación	2
CAPÍTULO II.....	3
MARCO TEÓRICO	3
Antecedentes.....	3
2.1 Biomasa.....	6
2.1.1. Biomasa oleaginosa.....	8
2.1.2. Biomasa alcoholígena	8
2.1.3. Biomasa Amilácea	8
2.1.4. Biomasa lignocelulósica	8
2.1.5. Biomasa natural.....	9
2.1.6. Biomasa residual	9
2.1.7. Cultivo energético	9
2.1.8. Biomasa sólida	10
2.1.9. Biomasa líquida.....	10
2.1.10. Biomasa gaseosa	10
2.2 Características energéticas de la biomasa	10
2.2.1 Composición química.....	10
<i>Contenido de humedad</i>	10
<i>Porcentaje de cenizas</i>	11
<i>Poder calorífico</i>	11

2.3 Pirólisis.....	11
2.3.1 Productos obtenidos a través de pirólisis líquido sólido y gas	12
2.3.2 Tecnologías utilizadas para los tipos de pirólisis	12
<i>Pirólisis rápida</i>	13
<i>Pirólisis intermedio</i>	14
<i>Torrefacción</i>	14
<i>Pirólisis lenta</i>	14
<i>Pirólisis ultrarápida</i>	14
2.4 Biochar	15
2.4.1 Característica Físico Químicas De Biochar	16
2.4.2 Obtención De Biomasa Para Su Uso Como Combustible	16
2.5 Uso de biochar como combustible para la generación eléctrica.	17
2.5.1 Centrales Térmicas.....	18
CAPÍTULO III	21
3.1 Métodos	21
3.2 Diseño de la investigación.....	21
3.3 Alcance de la investigación	22
3.4 Metodología.....	22
3.5 Materiales	25
3.6 Ecuaciones utilizadas en la caracterización de biochar.	30
CAPÍTULO IV	33
RESULTADOS Y ANÁLISIS	33
4.1 Análisis de producción de biochar.....	33
4.2 Caracterización de resultados de pruebas de análisis elemental.....	33
4.2.1 Contenido de humedad.....	33
4.2.2 Contenido de densidad	34

4.2.3 Contenido de densidad aparente	34
4.2.4 Contenido de pH	35
4.2.5 Contenido de materia seca	35
4.2.6 Conductividad eléctrica.....	36
4.2.7 Contenido de carbono	36
4.2.8 Contenido de nitrógeno.....	37
4.2.9 Relación de carbono y nitrógeno	37
4.2.10 Porcentaje de fósforo.	38
4.3 Caracterización del Poder calorífico de biochar.....	38
4.4 Poder calorífico total de los biochar a base de residuos agrícolas.....	43
4.5 Potencial de generación eléctrica del biochar.....	46
4.6 Potencial de generación eléctrica kW/kg de combustibles.....	47
4.7 Potencial de generación eléctrica de biochar y combustibles.....	48
4.8 Relación de potencial de generación kWh/kg.	49
4.9 Relación de potencial de generación(kWh/kg) del biochar en comparación a otros combustibles.	50
4.10 Relación de potencial de generación kWh/kg de biochar con respecto a combustibles.	53
4.11 Relación de potencial de generación kWh/kg de biochar en comparación al carbón.	57
Bibliografía.....	63
Anexos	66

Índice de Figuras

Figura 1. Fijación de carbono mediante fotosíntesis en los diferentes tipos de residuos.	6
Figura 2. Diagrama de tipos y clasificación de la biomasa	7
Figura 3. Clasificación de las diferentes tecnologías de pirólisis	13
Figura 4. Representación de biochar.	15
Figura 5. Tipos de procesos de conversión de biomasa	17
Figura 6. Secuencia de transformación para obtención de energía eléctrica	18
Figura 7. Central térmica convencional	19
Figura 8. Diagrama de bloques de metodología utilizada.	23
Figura 9. Tipos de muestras agrícolas A (rastrojo de maíz), B (Bagazo de caña), C(Papa).	25
Figura 10. Reactor de pirólisis.....	26
Figura 11. Calorímetro leco 500.....	27
Figura 12. Molino Fritsch.....	28
Figura 13. Báscula sartorius.	29
Figura 14. Prueba número 1 de poder calorífico de biochar a base de rastrojo de maíz.	39
Figura 15. Prueba número 2 de poder calorífico de biochar a base de rastrojo de maíz.	39
Figura 16. Prueba número 3 de poder calorífico de biochar a base de rastrojo de maíz.	40
Figura 17. Prueba número 1 de poder calorífico de biochar a base de bagazo de caña.	40
Figura 18. Prueba número 2 de poder calorífico de biochar a base de bagazo de caña.	41
Figura 19. Prueba número 3 de poder calorífico de biochar a base de bagazo de caña.	41
Figura 20. Prueba número 1 de poder calorífico de biochar a base de papa.	42
Figura 21. Prueba número 2 de poder calorífico de biochar a base de papa.	42
Figura 22. Prueba número 3 de poder calorífico de biochar a base de papa.	43
Figura 23. Poder calorífico total del biochar	44
Figura 24. Poder calorífico de combustibles.	45
Figura 25. Potencial de generación eléctrica de biochar.	46
Figura 26. Potencial de generación eléctrica.....	47
Figura 27. Potencial de generación eléctrica de combustibles y biochar.	48

Figura 28. Potencial de generación kWh/kg.....	49
Figura 29. Comparativa de kWh/kg de carbón y biochar.....	50
Figura 30. Comparativa de kWh/kg de Diesel y biochar.	51
Figura 31. Comparativa de kWh/kg de Diesel y biochar.	51
Figura 32. Comparativa de kWh/kg de Keroseno y biochar.	52
Figura 33. Comparativa de poder calorífico de gas licuado de petróleo y biochar.	52
Figura 34. Comparativa de poder calorífico de gasóleo y biochar.....	53
Figura 35. Porcentaje de generación kWh/kg de Diesel y biochar.....	54
Figura 36. Porcentaje de generación kWh/kg de gasolinas y biochar.....	54
Figura 37. Porcentaje de generación kWh/kg de keroseno y biochar.	55
Figura 38. Porcentaje de generación kWh/kg de LPG y biochar.	56
Figura 39. Porcentaje de generación kWh/kg de gasóleo y biochar.....	56
Figura 40. Porcentaje de generación kWh/kg de carbón y biochar.....	57
Figura 41. Potencial de generación eléctrica kW/kg.....	58
Figura 42. Potencial de generación eléctrica kW/kg de biochar a base de rastrojo de maíz y carbón.....	58
Figura 43. Potencial de generación eléctrica de biochar a base de bagazo de caña de maíz y carbón.....	59
Figura 44. Potencial de generación eléctrica de biochar a base de papa de maíz y carbón.	60
Figura 45. Potencial de generación eléctrica a partir de biochar a base de papa y bagazo de caña.	60

Índice de tablas

Tabla I. Poder calorífico de las materias utilizadas como combustible.	11
Tabla II. Cálculo del rendimiento de producción de biochar.	33
Tabla III. Contenido de humedad en residuos agrícolas y biochars obtenidos.....	34
Tabla IV. Densidad presente en residuos agrícolas y biochars.	34
Tabla V. Densidad aparente presente en los residuos agrícolas y biochar.	35
Tabla VI. Nivel de pH en residuos agrícolas y biochar.....	35
Tabla VII. Porcentaje de materia seca en residuos agrícolas y biochar.	36
Tabla VIII. Niveles de conductividad eléctrica.	36
Tabla IX. Porcentaje de carbono.	37
Tabla X. Nivel de porcentaje de nitrógeno	37
Tabla XI. Relación de carbono nitrógeno.....	37
Tabla XII. Porcentaje de fósforo en biochar.	38

RESUMEN

Este estudio se centró en caracterizar el potencial de generación eléctrica del biochar cuando se emplea como combustible. Para lo cual se utilizó una metodología sistemática para recopilar información estructurada de bases de datos indexadas como Scopus, WEB OF SCIENCE y el repositorio institucional de la Universidad Técnica Del Norte con el objetivo de seleccionar datos relevantes sobre las tecnologías para obtener biochar y su uso en la generación eléctrica. También se realizó un trabajo experimental para lo cual se recolectaron muestras de 60 gramos de tres residuos agrícolas (papa, rastrojo de maíz y bagazo de caña) de la zona de Imbabura. Estas muestras fueron procesadas para obtener biochar mediante un reactor de pirólisis ubicado en los laboratorios de la carrera de electricidad de la Universidad Técnica del Norte. Posteriormente, se analizaron las muestras de biochar en un laboratorio químico para determinar su composición fisicoquímica y su poder calorífico. Utilizando ecuaciones matemáticas, se transformaron los valores obtenidos de poder calorífico en potencial de generación eléctrica para cada tipo de muestra, donde se obtuvieron los siguientes resultados; 20.96 kW/kg para el biochar de rastrojo de maíz, 14.32 kW/kg para el de papa y 16.99 kW/kg para el de bagazo de caña. Además, se empleó un método comparativo para evaluar el biochar en relación con los combustibles tradicionales utilizados en la generación termoeléctrica. Estos hallazgos permitieron identificar tanto el potencial de generación el poder calorífico y la composición fisicoquímica del biochar.

Palabras clave: biochar, poder calorífico, residuos agrícolas, pirólisis.

ABSTRACT

This study aimed to characterize the electric generation potential of biochar when used as a fuel. A systematic methodology was employed to gather structured information from indexed databases such as Scopus, WEB OF SCIENCE, and the institutional repository of Universidad Técnica Del Norte. The objective was to select relevant data on technologies for biochar production and its use in electricity generation. Samples weighing 60 grams each of three agricultural residues (potato, maize stalk, and sugarcane bagasse) were collected from the Imbabura region. These samples underwent biochar production using a pyrolysis reactor located in the electricity department laboratories of Universidad Técnica del Norte. Subsequently, the biochar samples were analyzed in a chemical laboratory to determine their physicochemical composition and calorific value. Mathematical equations were used to convert the calorific values obtained into generation potentials for each type of biochar. The results obtained were as follows: 20.96 kW/kg for maize stalk biochar, 14.32 kW/kg for potato biochar, and 16.99 kW/kg for sugarcane bagasse biochar. Additionally, a comparative method was employed to evaluate biochar in relation to traditional fuels used in thermal electricity generation. These findings allowed for the identification of both the generation potential calorific potential and the physicochemical composition of biochar, facilitating its comparison with conventional fuels.

Keywords: biochar, calorific value, agricultural residues, pyrolysis.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Problema de investigación

La problemática que se aborda en esta investigación se origina en la necesidad de buscar nuevas alternativas de combustible que permitan reducir el impacto negativo en el medio ambiente. En este sentido, el uso de combustibles fósiles en la generación termoeléctrica es uno de los principales emisores de dióxido de carbono lo que ha generado la necesidad de encontrar unas nuevas alternativas de combustible más amigables con el medio ambiente.

En las centrales de generación termoeléctrica, el uso de derivados del petróleo como fuente de calor para generar energía, han sido considerando como las fuentes de energía primordiales para poder satisfacer el consumo energético a nivel mundial no obstante debido al desarrollo industrial y los diferentes crecimientos tecnológicos se ha observado que las reservas de estos combustibles son limitadas.

En la actualidad en la zona norte de Imbabura se destaca como una de las zonas más productivas en el ámbito agrícola, produciendo una gran variedad de productos, sin embargo, se presenta una problemática relacionada con el manejo inadecuado de los residuos agrícolas que se producen durante las cosechas. Esta problemática se ve reflejada en diferentes localidades dedicadas a la producción agrícola las cuales comprenden grandes, medianas y pequeñas zonas dedicadas a la actividad agrícola. Los agricultores optan por incinerar o desechar los desperdicios agrícolas como un desecho común provocando que se genere una pérdida de un recurso natural.

Formulación de la pregunta de investigación

¿Cuál es la capacidad de generación eléctrica de biochar obtenido mediante pirólisis de residuos agrícolas

Objetivo General

Evaluar la capacidad de generación eléctrica mediante el análisis de los parámetros de las muestras obtenidas mediante pirólisis de residuos agrícolas para su uso como combustible.

Objetivos Específicos

1. Describir las tecnologías para obtención de biochar y su uso como combustible en plantas de generación eléctrica.
2. Caracterizar el potencial energético de biochar.
3. Analizar el potencial de generación eléctrica del biochar.

Alcance y delimitación

El propósito de este proyecto es realizar una descripción detallada de las diversas tecnologías de pirólisis utilizadas para la obtención de biochar, y analizar las características de las distintas biomásas que pueden ser utilizadas como fuentes energéticas renovables. Para ello, se llevará a cabo una revisión detallada en fuentes bibliográficas y artículos científicos relevantes.

Con el objetivo de determinar el potencial energético de los residuos agrícolas en la zona norte del país, se llevará a cabo una selección de tres tipos de residuos agrícolas los cuales serán originarios de los cultivos más comunes en la zona de Imbabura. Posteriormente, se someterán a un proceso de preparación y se introducirán en el reactor de pirolisis de la Carrera de Electricidad.

Donde al biochar resultante se realizará una caracterización del poder calorífico y mediante métodos estadísticos se evaluará la cantidad de materia prima de biochar necesaria para la generación termoeléctrica.

Con la finalidad de analizar el potencial de generación eléctrica del biochar obtenido, a partir de las pruebas de poder calorífico de cada uno de estos, se realizará un análisis comparativo con respecto al combustible fósil, esto con el fin de identificar cuál de los biochar tiene una mejor eficiencia como combustible en la generación termoeléctrica.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Antecedentes

El biochar es un tipo de carbón vegetal producido a través de pirólisis de materiales orgánicos o residuos agrícolas y estos pueden al llegar a convertirse en biochar, ha ganado un interés para su uso como combustible en la generación eléctrica.

La utilización del biochar como combustible en la producción de energía eléctrica ha emergido como un campo de investigación relevante y significativo, motivado por sus potenciales beneficios ambientales y su capacidad para contribuir a la obtención de energía a partir de fuentes sostenibles.

Investigaciones previas han revelado que, al emplear residuos agrícolas en los procesos de gasificación y pirólisis, se logra la obtención de biogás y biocarbón. Estos subproductos pueden ser directamente utilizados como fuentes de combustible en la producción de energía, especialmente en sistemas de combustión directa que tienen como objetivo la generación de electricidad.

La investigación realizada por Montenegro [1], se centró en evaluar el poder calorífico de briquetas de biochar obtenidas a partir de residuos orgánicos domiciliarios mediante un proceso de pirólisis solar. Este estudio es de gran relevancia para la gestión de residuos y la transición energética sostenible, ya que proporciona una solución práctica y ecológica para la valorización de residuos orgánicos. La utilización de biochar como combustible sólido no solo reduce la cantidad de residuos que terminan en vertederos, sino que también ofrece una alternativa renovable y menos contaminante frente a los combustibles fósiles tradicionales. El enfoque del estudio en el uso de aglomerantes naturales como la fécula de yuca y la arcilla contribuye a la creación de productos con menor impacto ambiental y promueve la economía circular. El estudio se llevó a cabo en Chachapoyas, región Amazonas, y utilizó residuos orgánicos como cáscaras de frijol, papa, alverja, yuca, plátano y calabaza. Los residuos fueron secados al aire libre hasta alcanzar una humedad del 10 % y luego sometidos a un proceso de pirólisis solar utilizando una cocina solar con un concentrador cilíndrico parabólico. Este método de pirólisis permitió la conversión de los residuos en biochar, que posteriormente fue pulverizado y mezclado con aglomerantes naturales. La mezcla de biochar y aglomerantes se compactó en una prensa mecánica para formar briquetas cilíndricas. La eficiencia del proceso se evaluó mediante pruebas de encendido, combustión y poder calorífico, utilizando metodologías estándar en un laboratorio especializado. El estudio concluyó que las briquetas de biochar,

especialmente las que utilizaban fécula de yuca como aglomerante, mostraron un poder calorífico superior y un tiempo de encendido más rápido en comparación con las briquetas que usaban arcilla y el carbón vegetal. Los valores de poder calorífico obtenidos, 4750.75 kJ/kg para las briquetas de fécula de yuca y 4287.16 kJ/kg para las de arcilla, fueron comparables al carbón vegetal, lo que las posiciona como una alternativa viable para su uso como combustibles sólidos. Además, la investigación destacó la eficiencia del pirólisis solar en la producción de biochar y su potencial para contribuir a la gestión sostenible de residuos y la transición hacia fuentes de energía renovables.

El principal aporte del estudio radica en la demostración de que los residuos orgánicos pueden ser transformados en combustibles sólidos de alta eficiencia energética a través de procesos de pirólisis solar. Este enfoque no solo apoya la gestión integral de residuos, sino que también ofrece una alternativa viable y ecológica a los combustibles convencionales, contribuyendo significativamente a la reducción de la huella de carbono y la promoción de una economía circular. Además, el uso de aglomerantes naturales como la fécula de yuca ofrece una opción sostenible y accesible para la producción de briquetas, lo que puede ser replicado en otras regiones con condiciones similares, promoviendo así la adopción de tecnologías limpias y la transición energética hacia fuentes renovables.

El estudio titulado "*Valorización energética de residuos orgánicos mediante pirolisis*" por Ángeles et al.[2], se centra en la exploración de la pirolisis como una tecnología viable para la conversión de residuos orgánicos en productos de alto valor energético. Este enfoque responde a la necesidad creciente de alternativas sostenibles para la generación de energía y la gestión de residuos, en el contexto de una matriz energética que busca reducir su dependencia de los combustibles fósiles y minimizar el impacto ambiental. La pirolisis, como se describe en el estudio, es un proceso termoquímico que transforma la biomasa en biochar, bioaceites y gases condensables, productos que pueden ser utilizados en diversas aplicaciones energéticas como la calefacción y la generación de electricidad. La principal ventaja de la pirolisis es que se realiza en ausencia de oxígeno, lo que reduce significativamente la emisión de gases de efecto invernadero. Además, el biochar obtenido se destaca por sus aplicaciones en la mejora de suelos y la mitigación de contaminantes, lo que contribuye a la sostenibilidad ambiental y económica de la gestión de residuos orgánicos. El estudio realiza una revisión exhaustiva de la literatura sobre tecnologías de pirolisis y sus aplicaciones. Los autores analizan diversos tipos de biomasa y las condiciones óptimas de operación para la pirolisis, incluyendo la temperatura y la composición de los residuos. Se revisan estudios previos que describen la producción de

biochar y otros productos energéticos, y se comparan los rendimientos de diferentes tipos de biomasa bajo condiciones específicas de pirolisis.

Los autores concluyen que la pirolisis es una de las tecnologías más prometedoras para la valorización de residuos orgánicos debido a su capacidad para generar productos con alto valor energético y su bajo impacto ambiental. Se enfatiza que, a diferencia de otros procesos termoquímicos como la incineración o la gasificación, la pirolisis no genera emisiones significativas de gases de efecto invernadero. Además, los productos derivados, como el biochar, tienen múltiples aplicaciones, desde la mejora de la fertilidad del suelo hasta la remediación de contaminantes, lo que lo convierte en una opción atractiva para la gestión de residuos y la generación de energía sostenible.

El estudio de Ángeles et al. [2] aporta un marco comprensivo para entender la pirolisis como una tecnología clave en la transición hacia sistemas de energía más sostenibles y eficientes. Al proporcionar un análisis detallado de las condiciones óptimas para la pirolisis de diferentes tipos de biomasa, el estudio facilita la implementación práctica de esta tecnología en diversos contextos, desde pequeñas granjas hasta industrias a gran escala. Además, resalta la importancia del biochar no solo como fuente de energía, sino también como una herramienta para la gestión ambiental, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones en la economía circular.

Dichos estudios han permitido identificar tanto el poder calorífico del biochar producido a través del proceso de pirolisis, como las propiedades físico-químicas que caracterizan tanto al biocarbón como al gas generado durante este proceso. Esta caracterización detallada de los componentes obtenidos posibilita una comprensión más profunda de su composición, lo cual a su vez abre la puerta a la exploración de estrategias para mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de gases contaminantes, en comparación con los combustibles convencionales disponibles en la actualidad.

El biocarbón ha sido identificado como una herramienta fundamental en la lucha contra el cambio climático, ofreciendo a los agricultores la oportunidad de obtener beneficios al transformar los residuos agrícolas en una valiosa fuente de energía renovable. Más allá de su papel en la generación de energía, el biocarbón también se destaca por su importancia en el ámbito doméstico, sobre todo en aplicaciones como la cocina. Además, se observa un crecimiento significativo en la implementación de proyectos para la producción de electricidad a partir de biocarbón, expandiéndose a una escala cada vez mayor y contribuyendo así a la diversificación de las fuentes de energía y a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

2.1 Biomasa

La biomasa es una materia orgánica renovable que proviene de seres vivos o de sus residuos y se utiliza para la producción de energía a través de diversos procesos biológicos, químicos y termoquímicos como se observa en la figura 1. Este recurso ha ganado una importancia creciente en las últimas décadas debido a su potencial para contribuir a la generación de energía sostenible y a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. La biomasa incluye una amplia gama de materiales como residuos agrícolas, forestales, desechos industriales y urbanos, así como cultivos específicos destinados a la producción de biocombustibles. Su versatilidad y disponibilidad hacen de la biomasa una fuente de energía prometedora en la transición hacia una matriz energética más verde y menos dependiente de los combustibles fósiles [3].

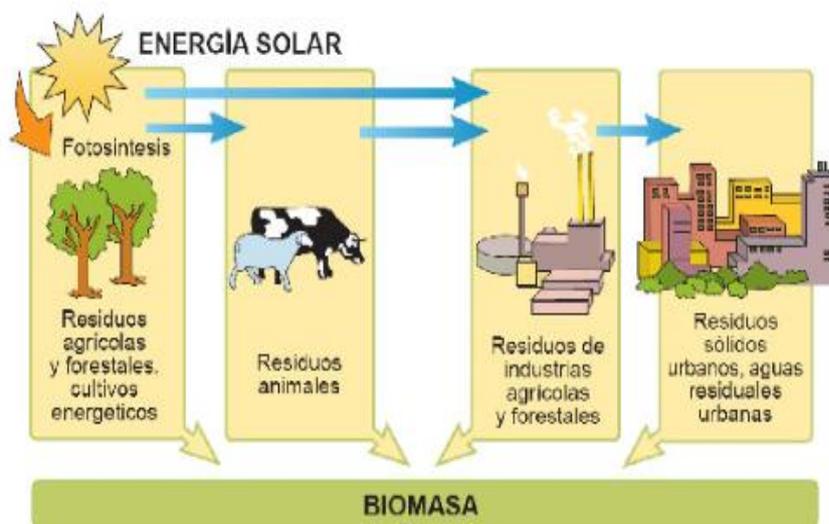


Figura 1. Fijación de carbono mediante fotosíntesis en los diferentes tipos de residuos [4].

La conversión de biomasa en energía puede llevarse a cabo mediante diversas tecnologías. Entre las más comunes se encuentran la combustión directa, la gasificación, la digestión anaeróbica y la pirolisis. Cada uno de estos procesos transforma la biomasa en productos energéticos como calor, electricidad, biogás o biocombustibles líquidos, los cuales pueden ser utilizados en diferentes aplicaciones industriales y domésticas. La combustión directa es la forma más tradicional de aprovechamiento de la biomasa, utilizada desde tiempos antiguos para la producción de calor. Sin embargo, tecnologías más avanzadas como la gasificación y la pirolisis han permitido una mayor eficiencia y una diversificación de los productos obtenidos, incluyendo el biochar, que además de su valor energético, ofrece beneficios adicionales en la mejora de la calidad del suelo y la mitigación de contaminantes [4].

La biomasa representa una alternativa energética viable, y contribuye a la gestión sostenible de residuos. Al convertir residuos orgánicos en recursos energéticos valiosos, se reduce la cantidad de desechos que van a los vertederos y se disminuye la emisión de metano, un potente gas de efecto invernadero. Además, la utilización de cultivos energéticos específicos puede fomentar la diversificación agrícola y proporcionar nuevas oportunidades económicas en áreas rurales [5].

La biomasa se refiere a cualquier sustancia orgánica, ya sea de origen animal o vegetal, en la que se produce una fijación de carbono a través de la fotosíntesis” A partir de este fenómeno natural se originan diversos tipos de biomas, puede ser aprovechada en distintas áreas de la industria gracias a sus características [6].

De acuerdo con Iglesias, [7] la biomasa es una fuente de energía renovable que contribuye significativamente al desarrollo de las zonas rurales. Se trata de materia orgánica se origina a través de un proceso biológico y que puede ser utilizada como fuente de energía. o para la producción de diferentes productos mientras que Yepes, [3] asegura que la biomasa se refiere al conjunto de materia orgánica de origen vegetal o animal, resultantes de residuos agrícolas, ganaderos y forestales y cultivos específicos para la producción de energía.

La biomasa tiene una clasificación según su origen estado como se muestra en la figura 2 los tipos de biomasa y su clasificación.

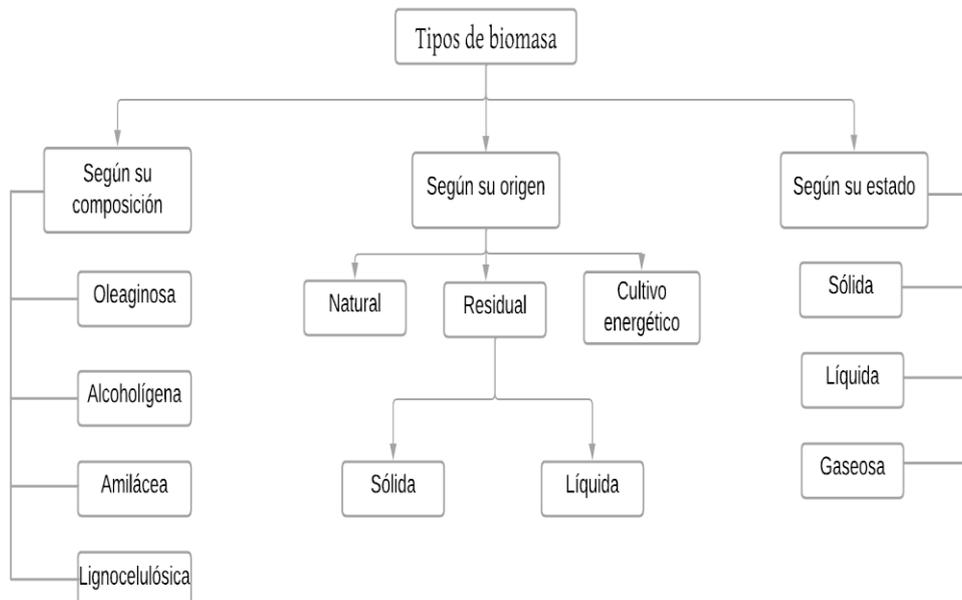


Figura 2. Diagrama de tipos y clasificación de la biomasa [8].

Clasificación de la biomasa según su composición

La clasificación de la biomasa se ve dividida en tres grupos fundamentales que son por su composición, según por su origen, según su estado como se observa en la figura 2 donde se observa los tipos y clasificación de biomasa.

Según su composición la biomasa se clasifica en.

2.1.1. Biomasa oleaginosa

La biomasa oleaginosa comprende las especies vegetales en la cual su semilla posee un nivel alto de aceite el cual se puede utilizar directamente en producción de energía [4].

2.1.2. Biomasa alcoholígena

Es aquella que se obtiene de la fermentación de glucosa, donde su principal objetivo el cual tiene de esta producción es principalmente para la producción de bioetanol para la producción de combustible [4].

2.1.3. Biomasa Amilácea

La biomasa amilácea es aquellas que se producen en productos que contengan almidón tales como papas, maíces presentes en la materia el cual posee características de hidratos de carbono [8].

2.1.4. Biomasa lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica se produce a través del proceso de fotosíntesis, el cual aprovecha la captación de la energía solar. De esta manera, se obtiene la producción de azúcares y compuestos orgánicos con un alto grado de carbono, lo que constituye una de las principales características potenciales para reemplazar los combustibles fósiles en la generación de energía [9].

Se obtiene de diferentes productos, los cuales son los siguientes:

Residuos forestales son los materiales que quedan después de las actividades de explotación, procesamiento y aprovechamiento de los recursos madereros en los bosques y plantaciones forestales.

Residuos agrícolas son los materiales que quedan después de la cosecha o el procesamiento de los cultivos y la cría de animales en las actividades agropecuarias. Estos incluyen tallos, hojas, cáscaras, semillas, estiércol y otros desechos generados en las granjas, huertas, plantaciones y procesadoras de alimentos.

Papel reciclado es el proceso de recolección, clasificación, procesamiento y transformación de papel y cartón usado, con el fin de obtener nuevos productos de papel. Este proceso permite recuperar y reutilizar los materiales fibrosos contenidos en el papel,

Residuos sólidos urbanos son los desechos generados en las actividades domésticas, comerciales e institucionales de las ciudades y áreas urbanas. Estos incluyen restos de alimentos, papel, plásticos, vidrio, metales, textiles y otros materiales desechados por los habitantes y establecimientos de las zonas urbanas.

Según su origen la biomasa se clasifica en:

2.1.5. Biomasa natural

La biomasa natural se adquiere dentro de un ecosistema natural, donde su composición se basa en materia orgánica renovable proveniente de árboles, plantas y microorganismos presentes en dicho entorno. Su principal rasgo distintivo es que se forma sin la intervención directa del ser humano [10].

2.1.6. Biomasa residual

La biomasa residual se forma por la intervención humana mediante diferentes actividades humanas que utilizan procesos industriales, agrícolas o forestales. Esta biomasa se clasifica en sólido y líquido y puede ser utilizada como fuente de energía para producir electricidad, calor y combustibles [11].

2.1.7. Cultivo energético

Un cultivo energético es un tipo de cultivo agrícola cultivado específicamente para la producción de energía renovable y no para el consumo o la alimentación animal. Estos cultivos incluyen plantas como la caña de azúcar, el maíz, el sorgo, el eucalipto, que pueden ser procesadas para generar biocombustibles como el bioetanol, el biodiésel, o utilizadas en la producción de biogás y biomasa para generación de electricidad y calor. Los cultivos energéticos juegan un papel crucial en la diversificación de la matriz energética, contribuyendo a la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles y a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero [12].

Según en el estado en que se encuentra la biomasa se clasifica en:

2.1.8. Biomasa sólida

La biomasa sólida es un estado de la biomasa donde se encuentran ramas, raíces y aserrín que por generalmente este tipo de biomasa es encontrado en de una manera natural en lo que son los bosques o vegetaciones [13].

2.1.9. Biomasa líquida

La biomasa líquida se conforma a base de residuos ganaderos, procesos industriales, biocombustibles y bioaceites. Se utiliza para la producción de calor, donde su aplicación es en la generación eléctrica [14].

2.1.10. Biomasa gaseosa

La biomasa gaseosa es una forma de energía obtenida a partir de la descomposición de materia orgánica mediante procesos biológicos o termoquímicos, resultando en la generación de gases combustibles. Los principales gases producidos en este proceso son el metano, dióxido de carbono, hidrógeno, y monóxido de carbono. Un ejemplo común de biomasa gaseosa es el biogás, que se produce mediante la digestión anaeróbica de residuos orgánicos como estiércol, desechos agrícolas, y residuos alimentarios [14].

2.2 Características energéticas de la biomasa

La composición química considera diferentes caracteres de la biomasa los cuales son la composición química, contenido de humedad, porcentaje de cenizas, poder calorífico los cuales se explican.

2.2.1 Composición química

La composición de la biomasa está conformada por tres partes fundamentales en [10] se detalla que “contiene una parte orgánica, una parte inorgánica y agua. Durante la combustión, estas partes se incineran de tal manera que la parte orgánica aporta en el proceso de combustión, generando residuos sólidos. Los principales compuestos que se pueden determinar mediante pruebas de laboratorio son carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre.”

Contenido de humedad

El contenido de humedad que se encuentra en la biomasa es aquel que detalla la presencia de agua en relación a su peso. Este factor es importante ya que la humedad puede afectar directamente la calidad y el rendimiento de la biomasa en distintos procesos [13].

Porcentaje de cenizas

El porcentaje de cenizas es una medida que indica la cantidad de residuos sólidos que resultan de la incineración de biomasa [15].

Poder calorífico

El poder calorífico [4] “se define como la cantidad de energía térmica producida mediante un proceso de combustión, expresada como cantidad de energía por unidad física (Joule por kilogramo).”

En la tabla I se muestran los valores de diferentes poderes caloríficos, expresados en (kJ/kg), de los materiales utilizados como combustible [16].

Tabla I. Poder calorífico de las materias utilizadas como combustible.

Combustibles	Poder calorífico (kJ/kg)
Carbón	14600 – 26700
Plásticos, papel, basura	17600 – 20000
Madera	16000 – 20000
Gasoil	45500
Gas natural	38000
Gas de carbón sintético	10800
Gas de alto carbono	4400-53000

2.3 Pirólisis

La pirólisis es un proceso de la descomposición térmica de la materia orgánica como la presente en los residuos en ausencia de oxígeno. los productos obtenidos por el proceso de pirólisis se aprovechan de muy diferentes maneras. El proceso de pirólisis es un tratamiento de la biomasa para posteriormente su conversión de tipo de combustible como se menciona en el estudio realizado en [17] “el biogás y el carbón vegetal se los realiza por medio de pirólisis a través de procesos térmicos en un reactor de pirólisis el cual permite la descomposición de la materia sin ausencia de oxígeno.”

2.3.1 Productos obtenidos a través de pirólisis líquido sólido y gas

La pirólisis es un proceso termoquímico que permite la conversión de la biomasa en diferentes combustibles de gran utilidad mediante calentamiento a altas temperaturas sin ausencia de oxígeno, en el cual se obtiene tres principales productos los cuales son líquido (bioaceites), gas (biogás) y biocarbón [18].

Líquido el bio aceite es obtenido de la biomasa vegetal, como las plantas y los residuos de animales, y se trata de un combustible orgánico altamente oxigenado de color oscuro o negro. La fracción líquida de la biomasa se obtiene en el proceso de pirólisis, y el porcentaje de bio aceite que se obtiene depende de la biomasa utilizada. En un proceso de pirólisis rápida, por lo general se puede obtener un 75% de bio aceite, 12% de biocarbón y 13% de gas [19].

Gas el biogás está compuesto por metano y dióxido de carbono, los cuales se producen a través de la degradación de la biomasa en ausencia de oxígeno. Las proporciones de metano y dióxido de carbono pueden variar dependiendo del tipo de biomasa que se utilice para generar el biogás [20].

Las principales fuentes de biomasa utilizadas para la generación de biogás son los residuos ganaderos, agroindustriales y el tratamiento de aguas residuales.

Sólido el biochar o carbono vegetal es el sólido resultante obtenido a través del pirólisis, también conocido como carbono pirolítico. Su concentración de carbono es del 85%. Este carbono se compone principalmente de los compuestos inorgánicos presentes en los componentes de la biomasa y de los subproductos formados durante el proceso de pirólisis, los cuales se encuentran en estado sólido en la composición del carbón pirolítico. [19].

2.3.2 Tecnologías utilizadas para los tipos de pirólisis

Las tecnologías para obtención de biomasa comprenden diferentes tipos de pirólisis en la figura 3 muestra los diferentes tipos de pirólisis y las características a las que se somete la biomasa. La cual indica los diferentes tipos de pirólisis y las características y a las condiciones que son sometidas y el producto obtenido final en porcentajes de su estado.

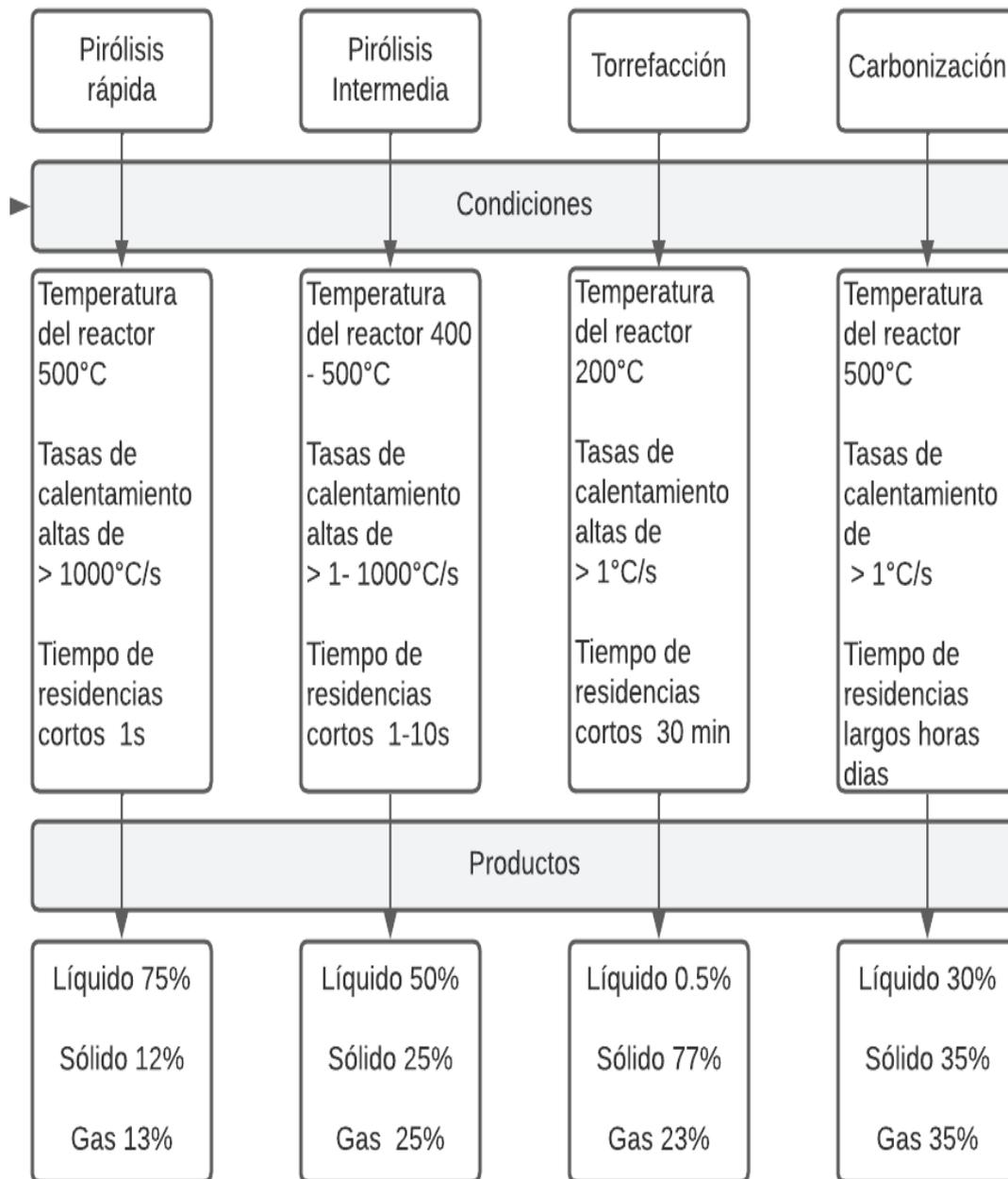


Figura 3. Clasificación de las diferentes tecnologías de pirólisis [11].

Pirólisis rápida

El proceso de pirólisis rápida sucede cuando la biomasa se somete a altas temperaturas sin la presencia de oxígeno, lo que provoca su descomposición y genera gases, vapores, aerosoles y carbonizado. Para que esto ocurra, la biomasa debe tener una humedad menor al 10% y calentarse rápidamente a una temperatura de 500 grados Celsius. Los resultados

del proceso varían según el tipo de biomasa utilizada, pero en general se obtiene un 75% de líquido, un 12% de sólido y un 13% de gases [21].

Pirólisis intermedio

La pirólisis intermedia como se menciona [22] se somete la biomasa a temperaturas de entre 400 y 500 grados Celsius durante 5 a 10 minutos, lo que produce tres fracciones: líquido (50%), biocarbón (25%) y gas (25%).

Este tipo de pirólisis es utilizado para convertir desechos como aserrín, alimentos y hasta desechos cloacales en combustibles.

Torrefacción

La torrefacción es un método de tratamiento térmico que transforma la biomasa en un sólido de mayor densidad energética. Además, este proceso también produce un sólido más fácil de triturar, con una menor relación Oxígeno/Carbono y una naturaleza menos higroscópica que la biomasa original. Durante la torrefacción, la biomasa se seca y se desvolatiliza parcialmente, lo que disminuye su masa, pero mantiene su contenido energético. Este proceso se lleva a cabo a bajas temperaturas (200-300 grados Celsius) y tasas de calentamiento, lo que resulta en una mayor cantidad de biocarbón (77%), alrededor del 23% de gas y menos del 1% de líquido [21].

Pirólisis lenta

El proceso de pirólisis lenta, también conocida como carbonización, es una técnica empleada en la producción de carbón vegetal. Se somete la biomasa natural a una temperatura de 500 grados Celsius, lo que permite obtener productos sólidos, líquidos y gaseosos. Con esta técnica se puede obtener un porcentaje de sólidos del 30%, líquidos del 35% y gaseosos del 35% [21].

Al ser una técnica utilizada en la antigüedad para producir carbón a partir de madera. Es un proceso lento que puede durar hasta 48 horas y se calienta hasta alrededor de 500

Pirólisis ultrarrápida

La Pirólisis ultrarrápida, también conocida como pirólisis "flash" debido a su velocidad de calentamiento, produce bio-aceites en un 75% como producto. Este proceso se realiza mediante una rápida desvolatilización en una atmósfera inerte, utilizando una velocidad de calentamiento más alta y temperaturas que oscilan entre los 450 y los 1000 grados Celsius [23].

2.4 Biochar

De acuerdo a [1] el biochar es una alternativa de acción climática, accesible, de bajo costo y sostenible. Su aplicación como enmienda permite incrementar la fertilidad del suelo, además de poseer propiedades físicas químicas de potencial energéticos.

El proceso de pirólisis consiste en una degradación térmica en ausencia de oxígeno que se utiliza para obtener el biochar, un producto rico en carbono que se produce a partir de residuos de biomasa [1].

A continuación, se muestra un ejemplo de la representación del biochar en la figura 4.



Figura 4. Representación de biochar [25].

Una representación del biochar, el cual presenta una textura fina y se compone de pequeños trozos con una apariencia similar a la del carbón.

El biochar es un producto obtenido a través de pirólisis de biomasa y residuos biodegradables, caracterizado por su alto contenido de carbono. La cantidad de carbono presente en el producto final depende de la temperatura utilizada durante el proceso de pirólisis. Un aumento en la temperatura conduce a una mayor carbonización de la materia prima, lo que resulta en un mayor contenido de carbono y una disminución en los contenidos de hidrógeno. Para obtener un biochar con las propiedades deseadas, es importante optimizar la temperatura del reactor, la tasa de aumento de temperatura y la duración del proceso a la temperatura final [24].

2.4.1 Característica Físico Químicas De Biochar

El biochar producido mediante pirólisis presenta características que varían en función de la temperatura y el tiempo de exposición durante el proceso de paralización. Si se utiliza un proceso de pirólisis a alta temperatura de 600 grados Celsius, se obtendrá un biochar con un alto contenido de carbono, lo que determina sus características. Por otro lado, si se emplea una temperatura más baja 400 grados Celsius, el biochar resultante conservará compuestos volátiles [15],[2].

La composición del biochar tiene una variación según su composición según la materia prima utilizada, pero se compone principalmente de carbono orgánico recalcitrante, macro y micronutrientes retenidos de la materia prima original, así como de otros elementos como carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y azufre, contenido de carbono fijo y cenizas [6].

2.4.2 Obtención De Biomasa Para Su Uso Como Combustible

La biomasa se puede convertir en formas de energía mediante tipos de tecnología las cuales son conversión termoquímica, físico-química y biológica como se muestra en la figura 5.

El biochar se produce a partir del proceso de pirólisis de biomasa, y su principal componente es el carbón. Su contenido es de hidrógeno, oxígeno, cenizas y pequeñas cantidades de nitrógeno y azufre. Durante la pirólisis, la biomasa se descompone termoquímicamente en ausencia de oxígeno, lo que evita la emisión de dióxido de carbono [25].

El biocombustible producido puede emplearse en motores del sector transporte, turbinas, hornos o calderas con el propósito de suministrar energía térmica, energía mecánica, la cual puede transformarse posteriormente en energía eléctrica. Como se muestra en la figura 5 por los procesos de conversión de la biomasa para llegar a un resultado el cual puede ser utilizado como un recurso energético [26].

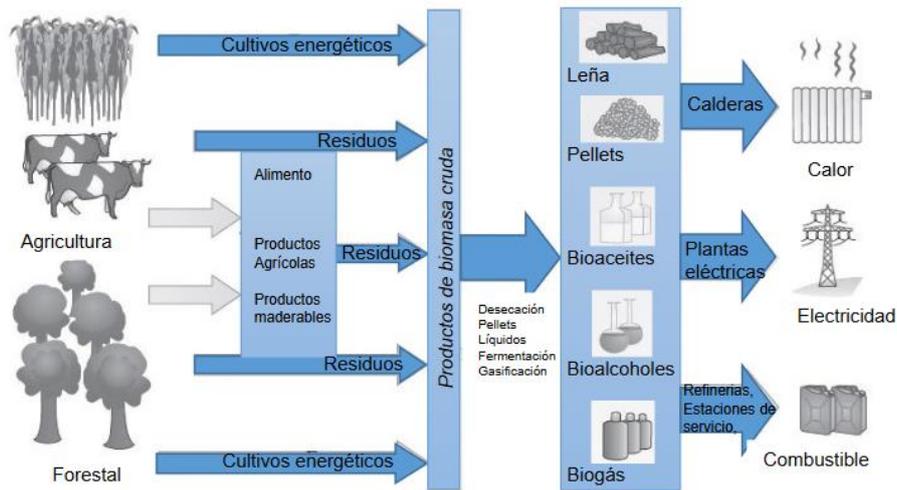


Figura 5. Tipos de procesos de conversión de biomasa [26].

En [10] se explica que la composición química del biochar depende según el tipo de biomasa que se utilice. Principalmente, está compuesto por nitrógeno, fósforo, carbono y oxígeno. Además, se destaca por contener elementos asociados a la fracción mineral, como potasio, calcio, magnesio, azufre.

2.5 Uso de biochar como combustible para la generación eléctrica.

En términos de Bioenergía o energía de biomasa se refiere a un tipo de energía renovable procedente del uso de materia orgánica. En general, la biomasa puede ser sometida a diferentes procesos para ser utilizada como fuente de energía. Estos procesos transforman la energía acumulada en forma de carbono e hidrógeno, generando combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, los cuales pueden ser utilizados para diferentes fines según el resultado obtenido [26].

Se pueden obtener beneficios socioeconómicos y ambientales al emplear biochar como combustible, en comparación con los combustibles fósiles tradicionales. Además, el biochar tiene una alta capacidad de adsorción y energética. El proceso para obtener biochar mediante pirólisis ofrecen una alternativa más atractiva que los reactores de combustión o gasificación. Esta técnica permite obtener una variedad más amplia de productos donde este producto final es sometido a un ciclo para obtener energía eléctrica [10] como se menciona el ciclo de transformación de energía en la figura 6.

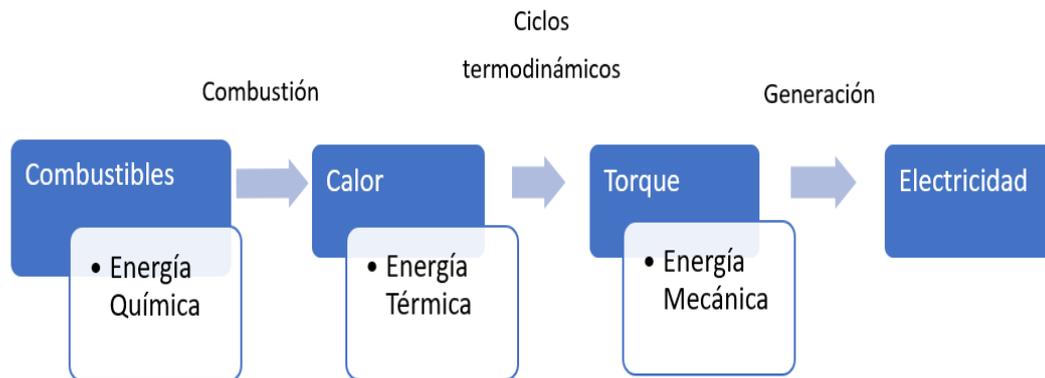


Figura 6. Secuencia de transformación para obtención de energía eléctrica [26].

Una de las aplicaciones de biochar como se explica en [10] “La co-combustión es una alternativa rentable para la generación eléctrica ya que no requiere adaptaciones en las instalaciones, a diferencia de la biomasa sin procesar. Además, al no producir alquitranes, no daña los quemadores de la planta de generación eléctrica.”

El biochar puede ser utilizado en las centrales térmicas convencionales, las cuales son conocidas también como termoeléctricas convencionales. Estas centrales generan energía eléctrica a través de un ciclo termodinámico de agua-vapor, utilizando como combustibles fósiles el gas natural, el carbón o el fueloil [27].

El biochar o carbón vegetal es un subproducto que puede ser utilizado para generar energía renovable. Se puede emplear como biocombustible para producir energía y, según el mismo autor, el proceso de pirólisis utiliza los productos de combustión incompleta, como el hidrógeno y metano [10].

2.5.1 Centrales Térmicas

Las centrales térmicas convencionales son aquellas que emplean la energía generada por la combustión de combustibles como el carbón, gas natural y derivados del petróleo. Estos combustibles se queman en una caldera para producir calor, el cual se utiliza para generar vapor. Este vapor circula a través de conductos y, al llegar a la turbina, hace que esta se ponga en marcha. En [28] la turbina está conectada a un generador, donde la energía calorífica se convierte en energía mecánica y posteriormente, en energía eléctrica. Se muestra un ejemplo de una central térmica convencional en la figura 7.

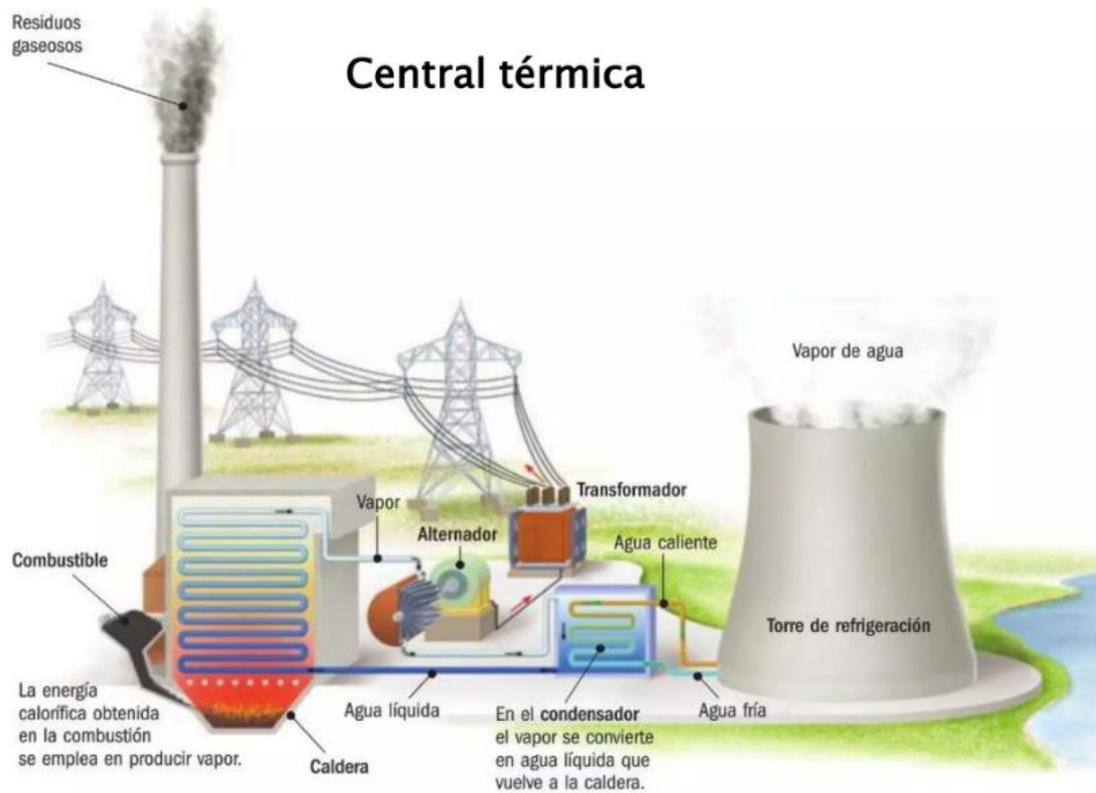


Figura 7. Central térmica convencional [28].

Las centrales térmicas convencionales están compuestas de varios elementos que posibilitan la transformación de los combustibles fósiles en energía eléctrica. Sus componentes principales son:

- **Caldera:** espacio donde el agua se transforma en vapor gracias a la quema de combustible. En este proceso la energía química se transforma en térmica.
- **Serpentines:** cañerías por donde circula el agua que se transforma en vapor. En ellos se produce el intercambio de calor entre los gases de la combustión y el agua.
- **Turbina de vapor:** máquina que recoge el vapor de agua y que, gracias a un complejo sistema de presiones y temperaturas, consigue que se mueva el eje que la atraviesa. Esta turbina normalmente tiene varios cuerpos, de alta, media y baja presión, para aprovechar al máximo el vapor de agua.
- **Generador:** máquina que recoge la energía mecánica generada en el eje que atraviesa la turbina y la transforma en eléctrica mediante inducción electromagnética.

Las centrales eléctricas convencionales, también conocidas como centrales térmicas de carbón, son instalaciones que queman carbón para producir vapor con el fin de generar electricidad.

En [28] el carbón se pulveriza en un polvo fino mediante un molino para garantizar la combustión casi completa y minimizar los contaminantes donde a continuación El carbón pulverizado se introduce en una caldera, donde se produce la combustión y el carbón proporciona calor a la central eléctrica. Este calor se transfiere por medio de las tuberías que contienen agua a alta presión. A continuación, el vapor pasa por una turbina que gira a gran velocidad y esta se encuentra acoplada por medio de un eje a un generador, produciendo electricidad. Esta electricidad puede entonces introducirse en la red eléctrica para ser utilizada.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se presenta la metodología y materiales empleados para el análisis de caso de este capítulo. Como fundamentos teóricos y objetivos previamente establecidos en el trabajo de titulación donde posteriormente se realizó la selección y caracterización del biochar y su poder calorífico.

3.1 Métodos

Se empleó el método documental para llevar a cabo la investigación, recurriendo a diversas fuentes bibliográficas con el propósito de recopilar información detallada acerca de las tecnologías y aplicaciones del biochar. En este proceso, se buscó no solo adquirir conocimiento sobre el uso actual de esta sustancia, sino también indagar acerca de proyectos previos que hayan abordado temáticas relacionadas en el mismo ámbito de estudio.

Posteriormente se utilizó el método sistemático, el cual posibilitó una organización meticulosa y estructurada de la información recopilada. A través de este enfoque, se pudo explorar de manera detallada las características y propiedades fisicoquímicas del biochar, permitiendo así una comprensión más profunda de su potencial como combustible en la generación termoeléctrica. Mediante un análisis de su composición y propiedades. De esta manera se detalló los aspectos que permiten la viabilidad y eficacia de su uso como una fuente energética.

Seguidamente, se recurrió a un método comparativo para llevar a cabo una detallada comparación entre las composiciones fisicoquímicas de los tres tipos de biochar obtenidos mediante pirolisis en relación al combustible fósil normalmente utilizado en la generación termoeléctrica en este enfoque permite contrastar las características estructurales para su uso como combustible en la generación termoeléctrica.

3.2 Diseño de la investigación

Para el presente trabajo de titulación, se optó por utilizar una investigación experimental, la cual ha sido seleccionada en base a las características particulares del proyecto. Dentro de este estudio, se han realizado manipulaciones en diversas variables, incluyendo el poder calorífico del biochar y su composición fisicoquímica. Estas variables han sido obtenidas a través de pruebas de laboratorio, las cuales han sido utilizadas para validar la hipótesis del tema central del proyecto. Este enfoque ha permitido llevar a cabo un análisis

comparativo detallado sobre el uso del biochar como fuente de combustible, generando resultados significativos para la investigación en desarrollo.

3.3 Alcance de la investigación

El alcance del trabajo de titulación se centra en una investigación descriptiva del biochar obtenido. Donde se realizó una descripción detallada de su composición físico químico y su poder calorífico, con el objetivo de establecer las características y los posibles usos del biochar en la generación termoeléctrica.

El alcance del trabajo de titulación se enfoca en llevar a cabo una investigación descriptiva del biochar obtenido. Con respecto a su composición fisicoquímica y de su poder calorífico, con la finalidad de establecer las características y los potenciales usos del biochar en el ámbito de la generación termoeléctrica. Este análisis ayudara a la comprensión de las propiedades del biochar, e identificar de manera más precisa las aplicaciones y beneficios que puede ofrecer en el contexto de la generación de energía termoeléctrica.

3.4 Metodología

La metodología empleada en este trabajo de titulación fue una metodología secuencial diseñada para lograr los objetivos planteados anteriormente. Se centró en identificar las técnicas y procesos requeridos para llevar a cabo el trabajo donde este se dividió en varias etapas, ilustradas en la figura 8.

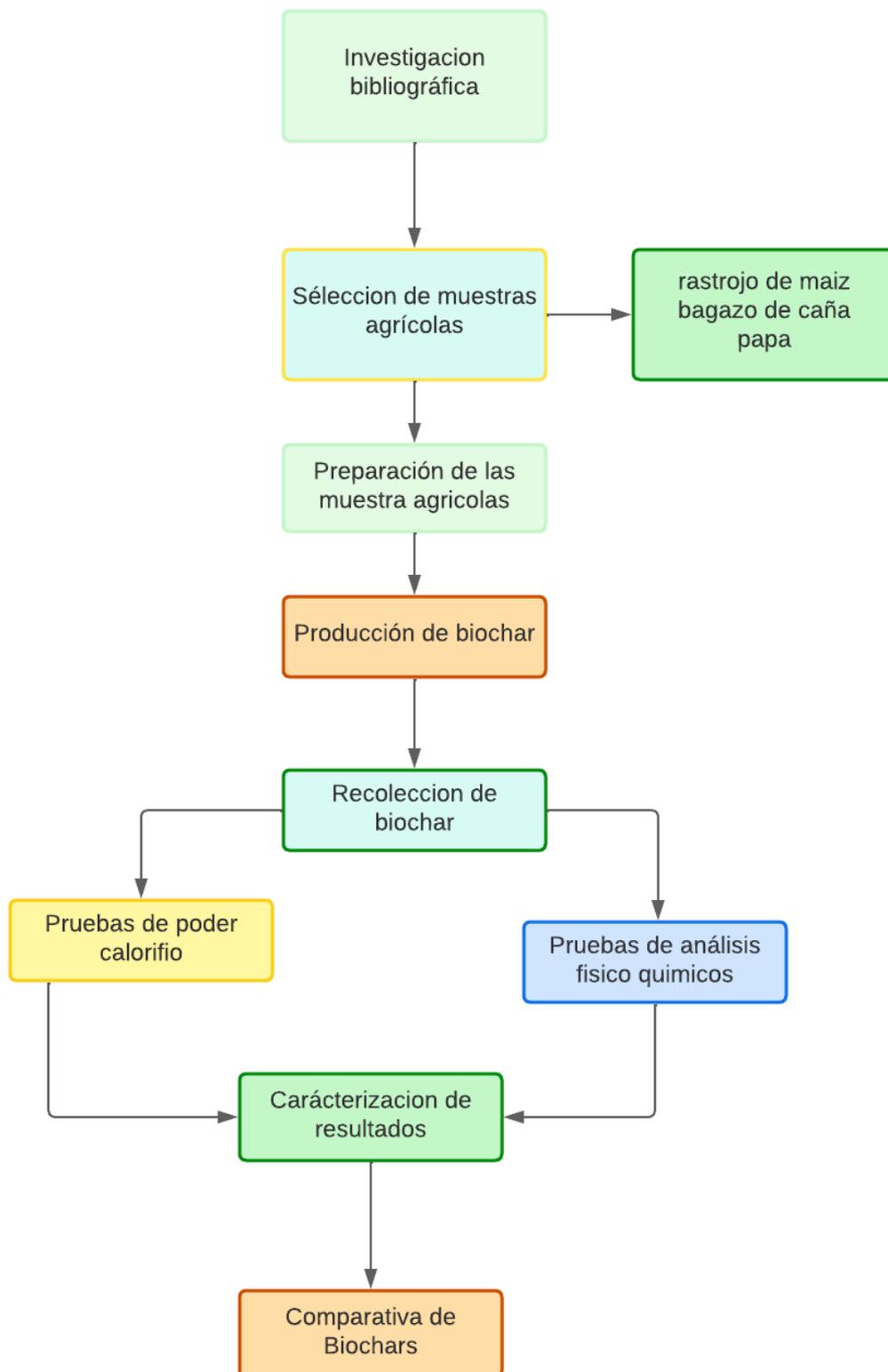


Figura 8. Diagrama de bloques de metodología utilizada.

En primera instancia el presente trabajo de titulación incluye la recopilación de información en bases de datos indexadas tales como Scopus, WEB OF SCIENCE y repositorio institucional de la Universidad Técnica Del Norte en artículos, revistas científicas, proyectos de grado y sitios web que albergan información de carácter científico en el área especializada para el desarrollo del marco teórico del trabajo de titulación.

Se seleccionó tres diferentes tipos de muestras agrícolas las cuales fueron rastrojo de maíz que se lo obtuvo en la parroquia San Antonio de Ibarra, bagazo de caña el cual se lo recolectó en la parroquia de Salinas y de igual manera en la provincia de Carchi, donde la cantidad recolectado de cada muestra fue 1 kilogramo posteriormente se procedió al almacenamiento de estas.

Posteriormente se realizó una preparación de las muestras agrícolas en el cual consistía en un secado de los residuos agrícolas de manera natural el cual consistía en dejar las muestras al aire libre en una superficie por el tiempo de una semana.

Con la finalidad de producir biochar, se introdujeron 60 gramos de las muestras agrícolas recolectadas en un reactor de pirolisis ubicado en la carrera de electricidad de la Universidad Técnica del Norte. Para este proceso. El reactor de pirolisis fue encendido y configurado para aumentar la temperatura hasta alcanzar los 500 grados Celsius, conforme a la teoría que establece que esta temperatura durante un periodo de noventa minutos resultaría en un proceso de pirolisis lenta. Donde cabe destacar que el reactor de pirolisis está configurado para incrementar su temperatura desde el ambiente hasta la temperatura seleccionada durante un tiempo de noventa minutos.

Una vez concluida la producción de biochar, se procedió a la recolección de este. Para ello, se destapó el reactor y se almacenó el biochar resultante en fundas ziploc permitiendo de esta manera su conservación.

Para la preparación del biochar resultante, se procedió a moler cada una de las muestras de biochar obtenidas utilizando un molino Fritsch. Las características de este molino se detallan en la Tabla IV, donde se indica que su finura oscila entre 0.25 y 0.20 milímetros.

Después de obtener el biochar molido, se llevó a cabo el análisis de su composición fisicoquímica y poder calorífico. Las pruebas de poder calorífico se realizaron en el laboratorio de energías renovables LABINAM, ubicado en Ibarra. En este laboratorio, se

introdujo 5 gramos de biochar molido en un calorímetro especializado que permitió determinar el poder calorífico del biochar.

Además, una parte de las muestras de biochar el que comprendía un peso de 50 gramos fue enviada al laboratorio AGRARPROJEKT S.A. en Quito-Ecuador. En este laboratorio, se realizaron análisis fisicoquímicos para obtener información detallada sobre la composición química del biochar.

La caracterización de la composición fisicoquímica del biochar se realizó utilizando los resultados obtenidos de los laboratorios. Estos informes proporcionarán valores y detalles sobre la composición físico y química del biochar, Con esta información, se podrán evaluar las propiedades y posibles aplicaciones del biochar en la generación termoeléctrica.

La comparativa se realizó mediante los resultados obtenidos y las composiciones fisicoquímicas de los biochar con respecto al combustible fósil utilizado en la generación termoeléctrica.

3.5 Materiales

Se selecciono tres diferentes residuos agrícolas para el análisis de caso, dentro de estos están rastrojo de maíz, papa y bagazo de caña como se muestra en la figura 9 A (rastrojo de maíz), B (Bagazo de caña), C (Papa).

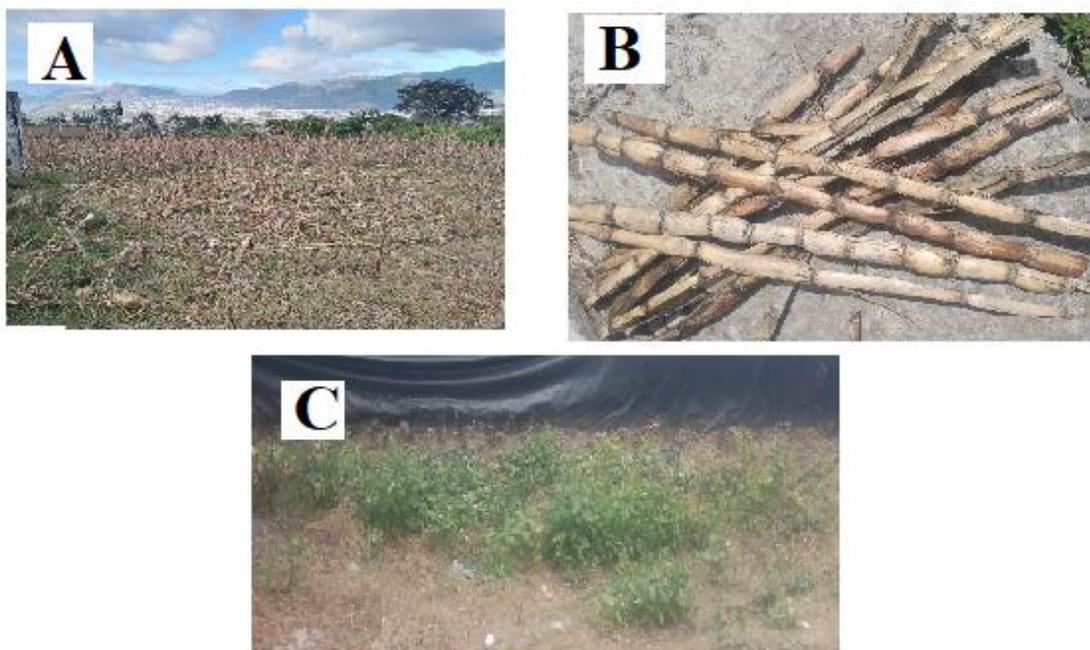


Figura 9. Tipos de muestras agrícolas A (rastrojo de maíz), B (Bagazo de caña), C(Papa).

Laboratorio AGRARPROJEKT S.

En el laboratorio químico AGRARPROJEKT ubicado en Quito-Ecuador. Se llevaron a cabo pruebas de análisis elemental para determinar la composición fisicoquímica de una muestra determinada. Estas pruebas se realizaron utilizando equipos especializados y técnicas avanzadas de análisis químico.

Software

Microsoft Excel, que forma parte del paquete de Office, se considera una herramienta importante debido a que permite realizar cálculos aritméticos [29]. Este software es utilizado dentro de la investigación para la representación gráfica de datos, lo que facilitara la visualización de una manera más sencilla.

Reactor de Pirólisis

En [10] se explica los datos técnicos las especificaciones técnicas del reactor de pirólisis se tiene se muestra de igual manera en la figura 10 el reactor de pirólisis utilizado.

- Tipo de material del reactor: Acero ASTM A36
- Cámara aislada con fibra de cerámica
- Controlador de temperatura
- Lectura de la temperatura en pantalla digital
- Rango de temperatura: 10°C – 500 °C
- Resistencia eléctrica tubular alrededor del cuerpo del reactor
- Voltaje: 120 V – 60Hz



Figura 10. Reactor de pirólisis.

Calorímetro

En la figura 11 se muestra la máquina leco 500 utilizada para realizar las pruebas de poder calorífico. De acuerdo con [30] se explica que el calorímetro leco 500 tiene las características como son

Especificaciones

- Joules/Carga :14000 a 35000"
- Calorías /carga:3300 a 8300
- BTU/Carga: 13 a 33 (6000 a 15000 BTU/lb para una muestra de 1 gramo)
- Precisión: $\leq 0,05\%$ RSD
- Modo de precisión 8 minutos
- Requisitos eléctricos :115/30 V-(10%, a carga máxima). 50/60 Hz, monofásico, 3,2/1,6 A 1.300 BTU
- Requisitos de agua: Sólo agua destilada, aproximadamente 16 litros de capacidad total



Figura 11. Calorímetro leco 500.

Molino Fritsch

En la figura 12 se muestra el molino Fritsch utilizado este es un molino de corte utilizado para la molienda de materiales secos de consistencia blanda a semidura utilizado generalmente en laboratorios como se como se muestra. De acuerdo con los datos del fabricante [31] las características son.

DATOS TÉCNICOS

- Óptimo para el tipo de material: Muestra fibrosas blandas y semiduras
- Herramientas de corte Rotor con filos de corte rectos y cuchillas fijas
- Material de las herramientas de corte: Acero para herramientas, acero inoxidable
- Finura: 0,25 -0,20 mm
- Velocidad del rotor: 2800/3400rpm
- Monofásico
- Potencia de consumo 2,1 kW
- Peso: 32kg



Figura 12. Molino Fritsch.

Báscula digital sartorius

En la figura 13 se muestra la báscula digital sartorius es una báscula utilizada en laboratorio por su exactitud y precisión de medida. De acuerdo con los datos del fabricante en [32] se detallan las características siguiente.

- Ultramicrobalanza 0,0001mg
- Intervalo de escala (d): 0,001 mg
- Capacidad máxima (Max): 2,1 g
- Desviación estándar de los valores de carga, tolerancia: 0,0002 mg
- Desviación estándar de los valores de carga, valor de referencia: 0,00015 mg
- Clase de precisión según OIML R111-: E2

Dimensiones

- Module de pesaje MCEI MCA (largo x ancho x alto)": 340X139X129 mm
- Tamaño del plato de pesaje: Ø20
- Modulo electrónico MCE (largo x ancho x alto):315X240X61mm
- Modulo electrónico MCA (largo x ancho x alto):355X240X61mm



Figura 13. Báscula sartorius.

3.6 Ecuaciones utilizadas en la caracterización de biochar.

A continuación, se detallan las ecuaciones utilizadas con el propósito de describir los valores numéricos de densidad aparente, humedad, pH y conductividad eléctrica en la caracterización de la composición física del biochar.

Densidad

La densidad es una medida que representa la relación entre el peso (masa) de una sustancia y el volumen que ocupa esa misma sustancia. La densidad del biochar se establece mediante la relación entre la masa y el volumen, utilizando la Ecuación 1.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

Donde

ρ : Densidad

m: masa (gramos)

v: volumen (centímetros cúbicos)

Densidad aparente

Para calcular la densidad aparente Se utilizó la Ecuación 2 con el propósito de establecer una relación de la masa total con respecto a su volumen total.

$$D = \frac{M}{V} \quad (2)$$

Donde

D: Densidad aparente(gramos/litro)

M: masa (gramos)

V: volumen (litro)

Humedad

Con el propósito de calcular el porcentaje de contenido de humedad en los análisis fisicoquímicos se utilizó la ecuación 3 la cual establece el porcentaje de contenido de humedad.

$$h = \frac{Ph-Ps}{m} * 100 \quad (3)$$

Donde

h: humedad

Ph: peso húmedo de la muestra (gramos)

Ps: peso seco de la muestra (gramos)

m: peso de la muestra húmedo (gramos)

pH

Con el propósito de establecer el nivel de pH mediante la relación de contenido de iones de hidrógeno se utiliza la Ecuación 4.

$$pH = -\log_{10}[H^+] \quad (4)$$

Donde

pH: medida de la acidez o alcalinidad

H: concentración de iones hidrógeno

\log_{10} : concentración en una escala logarítmica

Conductividad eléctrica

Con el propósito de determinar los valores de conductividad eléctrica del biochar se utilizó la ecuación 5 donde se establecerá los valores de conductividad eléctrica de en las muestras analizadas.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} * 100 \quad (5)$$

Donde

σ : conductividad eléctrica en siemens por metro (S/m)

ρ : es la resistividad eléctrica en ohmios por metro (Ω .m)

Rendimiento

Con el propósito de realizar el cálculo de los valores de rendimiento de biochar obtenido se utilizó la Ecuación 6.

$$R = \frac{M1}{M2} * 100 \quad (6)$$

Donde

R: rendimiento total del producto obtenido (%)

M1: masa inicial (gramos)

M2: masa obtenida (gramos)

Poder calorífico

Con el propósito de calcular el valor de poder calorífico de las muestras de biochar se utilizó la Ecuación 7 la cual establece.

$$Q = m * C * \Delta T \quad (7)$$

Donde

Q: Poder calorífico liberado en Mega Joules sobre kilogramos (MJ/kg)

m: masa de la muestra de reacción

C: capacidad calorífica del calorímetro julios por grado Celsius.

ΔT : Cambio de temperatura

Potencia eléctrica.

Con el propósito de calcular la potencia eléctrica a partir del poder calorífico y el flujo masa del combustible se utilizó la Ecuación 8 la cual establece.

$$P = PCB * m \quad (8)$$

Donde

P: potencia en vatios (kW)

PCB: Poder calorífico liberado en Mega Joules sobre kilogramos (J/kg)

m: cantidad de masa de combustible (kg/s)

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Análisis de producción de biochar

En la producción de biochar, se añadieron 60 gramos de cada residuo agrícola, al reactor de pirólisis en el cual se obtuvieron distintas cantidades finales. Según la Ecuación 6, se obtiene un porcentaje de rendimiento que se presenta en detalle en la tabla II.

Tabla II. Cálculo del rendimiento de producción de biochar.

Tipo de muestra agrícola	Cantidad inicial (gr)	Cantidad obtenida (gr)	Rendimiento
Bagazo de caña	60	50	83%
Rastrojo de maíz	60	45	75%
Papa	60	55	91%

4.2 Caracterización de resultados de pruebas de análisis elemental

A continuación, se presenta los resultados obtenidos de las pruebas de análisis fisicoquímicos donde se obtuvo una caracterización de sus componentes estructurales. Lo cual permitió la comprensión de su composición y estructura interna.

4.2.1 Contenido de humedad

El contenido de inicial de humedad presente en los residuos agrícolas y posteriormente en la muestra de biochar se muestra en la tabla III. En la cual proporciona los resultados detallados de la cantidad de humedad según los análisis de laboratorio realizados mediante el método AOAC 930, presentando los valores correspondientes. De las características del material de partida y del biochar producido, lo cual es crucial para optimizar los procesos de producción y asegurar la calidad del producto final.

Tabla III. Contenido de humedad en residuos agrícolas y biochar obtenidos.

Tipo de muestra	Contenido de humedad de residuos agrícolas. (60g de muestra)	Contenido de humedad biochar (60g de muestra)
Bagazo de caña	4,5%	3,6%
Rastrojo de maíz	8,3%	5,9%
Papa	8,5%	4,1%

4.2.2 Contenido de densidad

El contenido de densidad inicial presente en los residuos agrícolas y la densidad en la muestra de biochar se muestra en la tabla IV, donde se detalla el resultado de la cantidad de densidad de acuerdo al método gravimétrico.

Tabla IV. Densidad presente en residuos agrícolas y biochar.

Muestra de biochar	Densidad inicial de residuos agrícolas (g/l)	Densidad final de biochar (g/l)
Bagazo de caña	0,650	285
Rastrojo de maíz	0,575	170
Papa	0,750	357

4.2.3 Contenido de densidad aparente

El contenido densidad aparente presente en los residuos agrícolas y en la muestra de biochar se muestra en la tabla V siguiente, donde se detalla el resultado de la cantidad de densidad aparente de acuerdo con el método gravimétrico.

Tabla V. Densidad aparente presente en los residuos agrícolas y biochar.

Muestra de biochar	Densidad aparente de residuos agrícolas (g/l)	Densidad Aparente de biochar (g/l)
Bagazo de caña	0,531	275
Rastrojo de maíz	0,562	160
Papa	0,745	342

4.2.4 Contenido de pH

En la tabla VI se indican los valores del contenido de pH presente en los residuos agrícolas y el mismo obtenido en el biochar de las diferentes muestras agrícolas el cual es su contenido inicial en la muestra y el contenido final presente en el biochar.

Tabla VI. Nivel de pH en residuos agrícolas y biochar.

Muestra de Biochar	Contenido de pH de residuos agrícolas (60g de muestra)	Contenido de pH de Biochar (60g de muestra)
Bagazo de caña	7,3	7,8
Rastrojo de maíz	8,3	9,4
Papa	9,3	10,5

4.2.5 Contenido de materia seca

EL contenido de materia seca debido a las circunstancias presentes en los residuos agrícolas y en el biochar obtenido mediante pirólisis se detallan los resultados en la tabla VII donde se expresa los porcentajes de acuerdo a la cantidad de gramos de cada una de las muestras.

Tabla VII. Porcentaje de materia seca en residuos agrícolas y biochar.

Muestra de Biochar	Materia seca de residuos agrícolas. (60g de muestra)	Materia seca de biochar. (60g de muestra)
Bagazo de caña	50,4%	96,4 %
Rastrojo de maíz	38,5%	94,1 %
Papa	23,9%	95,9 %

4.2.6 Conductividad eléctrica

Los valores de conductividad eléctrica para las muestras de residuos agrícolas y para el biochar obtenido se detallan los valores de conductividad eléctrica expresados en mili Siemens por centímetro se detallan en la tabla VIII.

Tabla VIII. Niveles de conductividad eléctrica.

Muestra de biochar	Conductividad eléctrica de residuos agrícolas. (60g de muestra mS/cm)	Conductividad eléctrica de biochar (60g de muestra ms/cm)
Bagazo de caña	1,2	1,79
Rastrojo de maíz	15,2	21,2
Papa	18,5	38,4

4.2.7 Contenido de carbono

El contenido de carbono presente en las muestras de residuos agrícolas y en el biochar obtenido se obtienen los resultados que se observan en la tabla IX detallando el contenido de carbono en las muestras de residuos agrícolas y biochar.

Tabla IX. Porcentaje de carbono.

Muestra de Biochar	Porcentaje de carbono de residuos agrícolas	Porcentaje de Carbono de Biochar
Bagazo de caña	38,9%	54,9 %
Rastrojo de maíz	35%	49,3 %
Papa	24,3%	43,8 %

4.2.8 Contenido de nitrógeno

El contenido de nitrógeno de las muestras de residuos agrícolas y el biochar obtenido se presentan los valores detallados de cada una de las muestras donde se observan los valores en la tabla X.

Tabla X. Nivel de porcentaje de nitrógeno

Muestra de Biochar	Nitrógeno presente en 60 gramos de residuos agrícolas	Nitrógeno presente en 60 gramos de biochar.
Bagazo de caña	0,35%	0,46 %
Rastrojo de maíz	1,15%	0,36 %
Papa	1,5%	2,04 %

4.2.9 Relación de carbono y nitrógeno

En la tabla XI se muestran la relación de carbono y nitrógeno presentes en las muestras de residuos agrícolas y el biochar obtenido el cual se observa los valores que tienen cada uno de las diferentes circunstancias presentes en cada muestra.

Tabla XI. Relación de carbono nitrógeno.

Muestra de biochar	Relación de carbono nitrógeno de los residuos agrícolas	Relación de carbono nitrógeno del biochar obtenido.
Bagazo de caña	111:1	118:1
Rastrojo de maíz	30:1	137:1
Papa	16:1	21:1

4.2.10 Porcentaje de fósforo.

El contenido de fósforo presente en las muestras de residuos agrícolas y en el biochar se pueden observar los resultados obtenidos en la tabla XIV donde se indica el valor porcentaje de fósforo presente en cada una de las muestras.

Tabla XII. Porcentaje de fósforo en biochar.

Muestra de Biochar	Porcentaje de fósforo inicial	Porcentaje de fósforo en el biochar obtenido
Bagazo de caña	0,15%	0,07%
Rastrojo de maíz	0,13%	0,06%
Papa	1,2%	0,54%

4.3 Caracterización del Poder calorífico de biochar.

A continuación, se presenta el resultado obtenido de las pruebas de poder calorífico que fueron realizadas a los tres diferentes tipos de biochar que se obtuvieron mediante el proceso de pirólisis. Estos biochar fueron previamente preparados para poder realizar estas pruebas, donde se detallan los valores de poder calorífico que presenta cada uno de los tres diferentes tipos de biochar.

4.3.1 Poder calorífico de rastrojo de maíz.

De las pruebas de laboratorio realizadas, se obtuvo como resultado el valor de poder calorífico. Para ello, se realizó una primera prueba al biochar a base de rastrojo de maíz, con la cantidad de 0,534 gramos de muestra de biochar, donde se obtuvo un poder calorífico de 32,7388(MJ/kg), tal como se muestra en la figura 14.

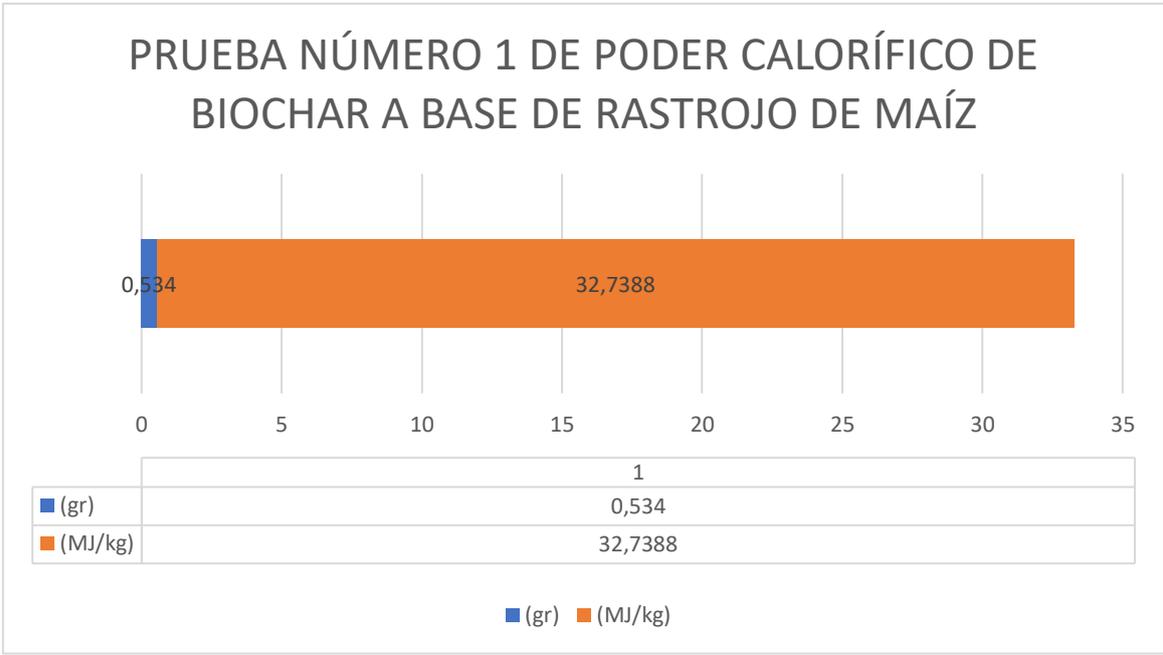


Figura 14. Prueba número 1 de poder calorífico de biochar a base de rastrojo de maíz.

Se realizó una segunda prueba de laboratorio con el propósito de obtener el valor de poder calorífico al biochar a base de rastrojo de maíz, con la cantidad de 0,550 gramos de muestra de biochar, donde se obtuvo un poder calorífico de 38,0831(MJ/kg), como se muestra en la figura 15.

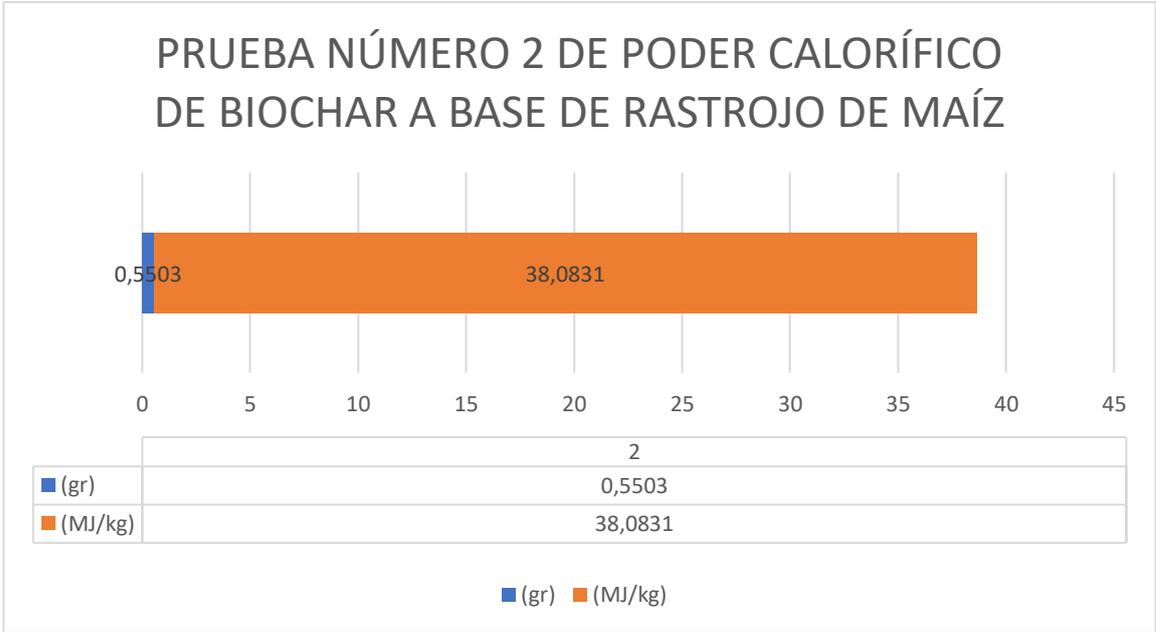


Figura 15. Prueba número 2 de poder calorífico de biochar a base de rastrojo de maíz..

Se realizó una tercera prueba de laboratorio con el propósito de obtener el valor de poder calorífico al biochar a base de rastrojo de maíz, con la cantidad de 0,550 gramos de muestra de biochar, donde se obtuvo un poder calorífico de 35,8901(MJ/kg), tal como se muestra en la figura 16.

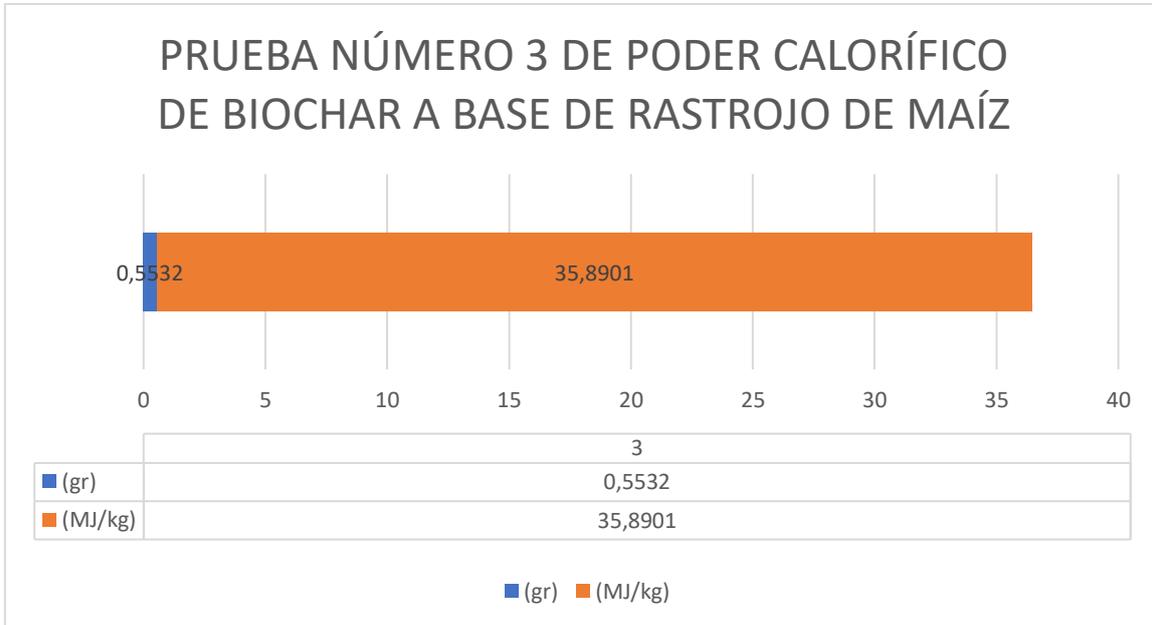


Figura 16. Prueba número 3 de poder calorífico de biochar a base de rastrojo de maíz..

4.3.2 Poder calorífico de bagazo de caña

Se realizó una primera prueba de laboratorio con el propósito de obtener el valor de poder calorífico al biochar a base de bagazo de caña con la cantidad 0,551 gramos de muestra de biochar donde se obtuvo un poder calorífico de 27,2058(MJ/kg) como se muestra en la figura 17.

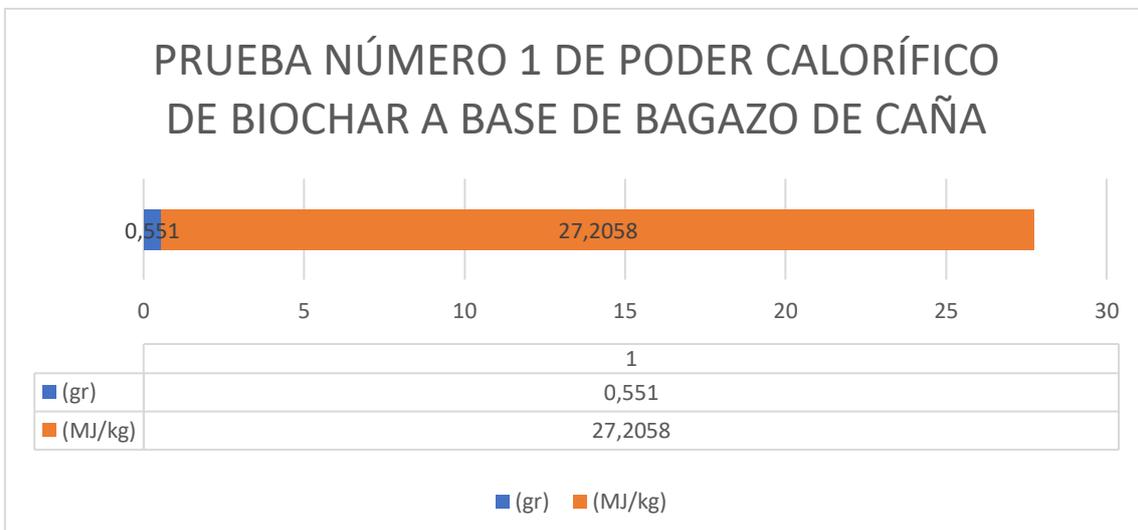


Figura 17. Prueba número 1 de poder calorífico de biochar a base de bagazo de caña. .

Prueba número dos Se realizó una segunda prueba de prueba de poder calorífico al biochar a base de bagazo de caña con la cantidad 0,580 gramos de muestra de biochar donde se obtuvo un poder calorífico de 27,4159(MJ/kg) como se muestra en la figura 18.

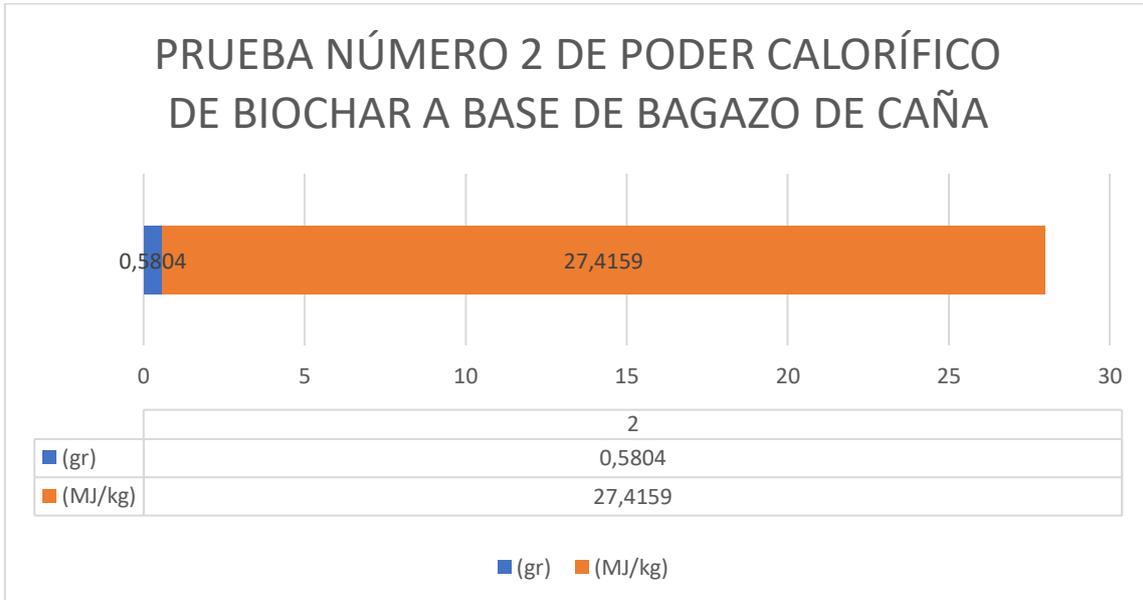


Figura 18. Prueba número 2 de poder calorífico de biochar a base de bagazo de caña.

Se realizó una tercera prueba de poder prueba de poder calorífico al biochar a base de bagazo de caña con la cantidad 0,592 gramos de muestra de biochar donde se obtuvo un poder calorífico total de 28,6979(MJ/kg) como se muestra en la figura 19.

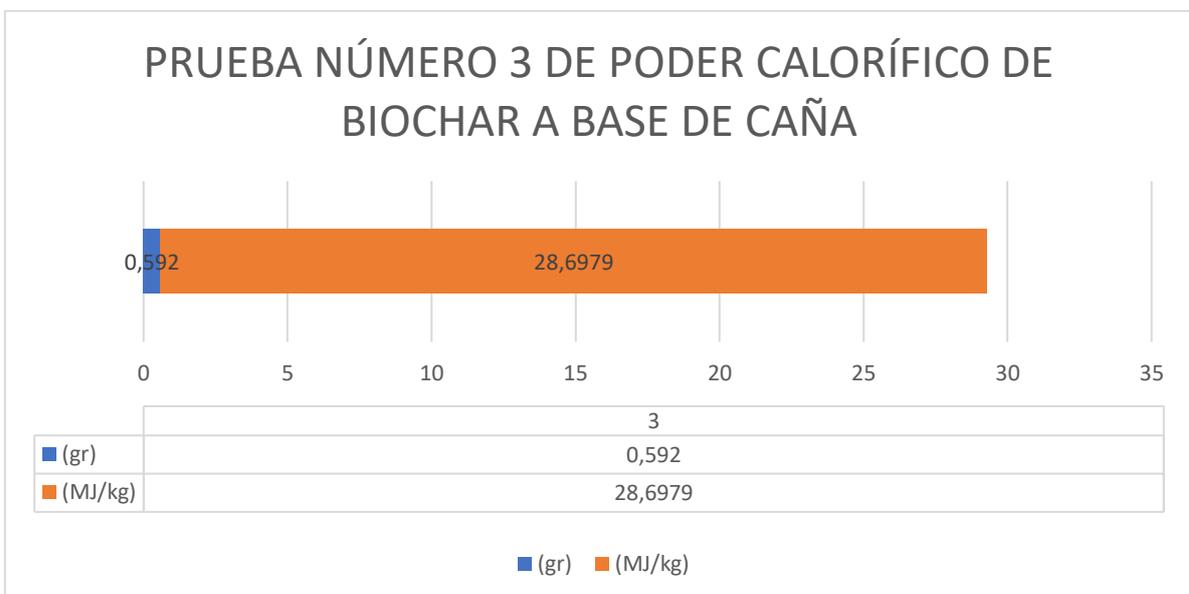


Figura 19. Prueba número 3 de poder calorífico de biochar a base de bagazo de caña.

4.3.3 Poder calorífico de papa

Se realizó una primera prueba de laboratorio de poder calorífico al biochar a base papa con la cantidad 0,587 gramos de muestra de biochar donde se obtuvo un poder calorífico de 22,4828(MJ/kg) como se muestra en la figura 20.

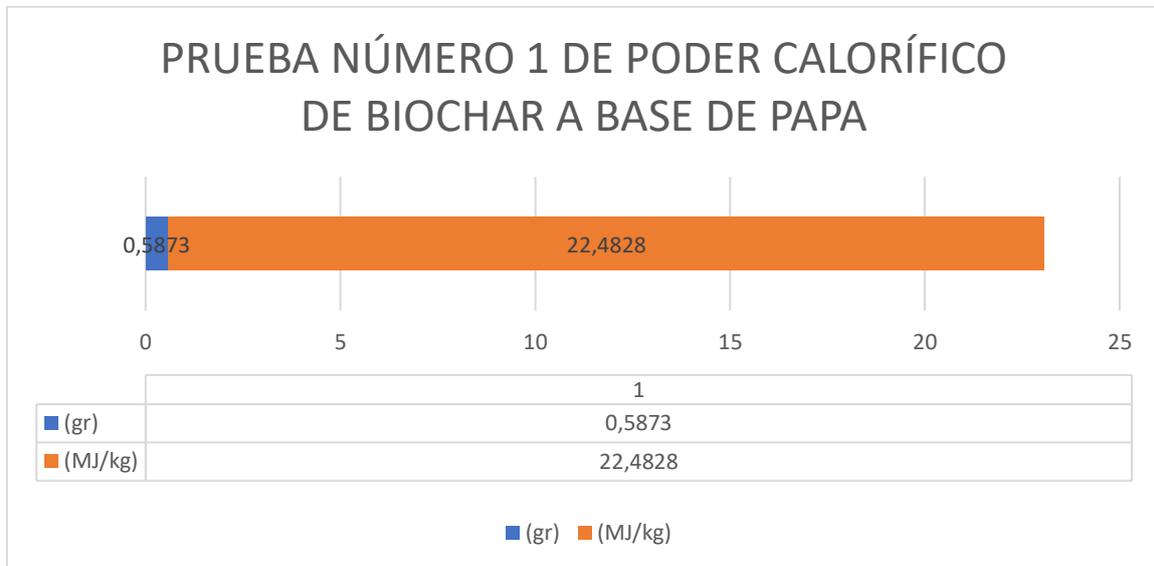


Figura 20. Prueba número 1 de poder calorífico de biochar a base de papa.

Se realizó una segunda prueba de laboratorio de poder calorífico al biochar a base papa con la cantidad 0,546 gramos de muestra de biochar donde se obtuvo un poder calorífico de 26,1904(MJ/kg) como se muestra en la figura 21.

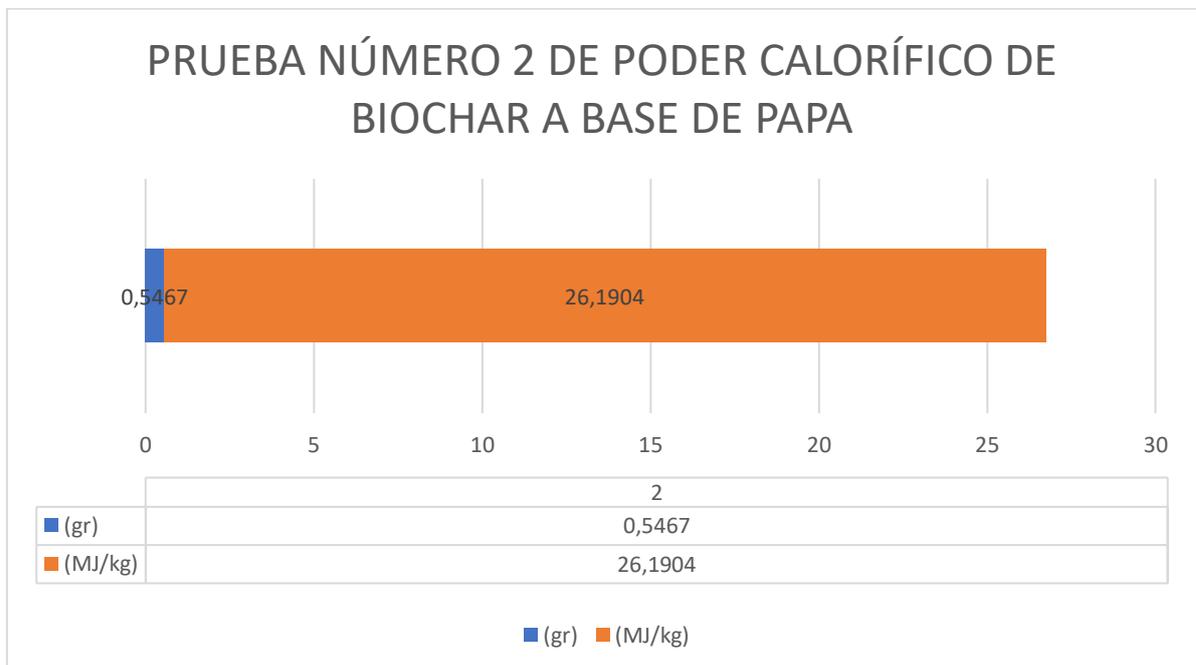


Figura 21. Prueba número 2 de poder calorífico de biochar a base de papa.

Se realizó una tercera prueba de poder prueba de poder calorífico al biochar a base de papa con la cantidad 0,575 gramos de muestra de biochar donde se obtuvo un poder calorífico de 23,8598(MJ/kg) como se muestra en la figura 22.

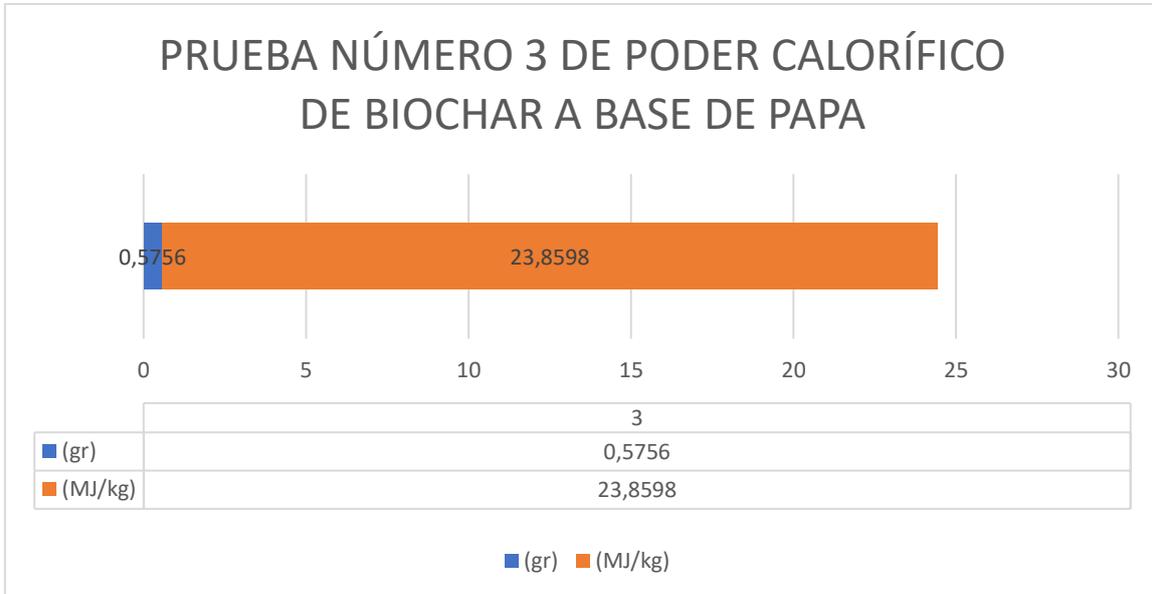


Figura 22. Prueba número 3 de poder calorífico de biochar a base de papa.

4.4 Poder calorífico total de los biochar a base de residuos agrícolas

En la figura 23 se observan los valores de potencial calorífico total que se obtuvieron a partir de las diferentes muestras analizadas como son la muestra de biochar a base de rastrojo de maíz con un potencial calorífico de 38,0831(MJ/kg) el biochar a base de bagazo de caña se obtuvo un poder calorífico de 27,4159(MJ/kg) y el biochar a base de papa obteniendo un poder calorífico de 26,1904(MJ/kg).

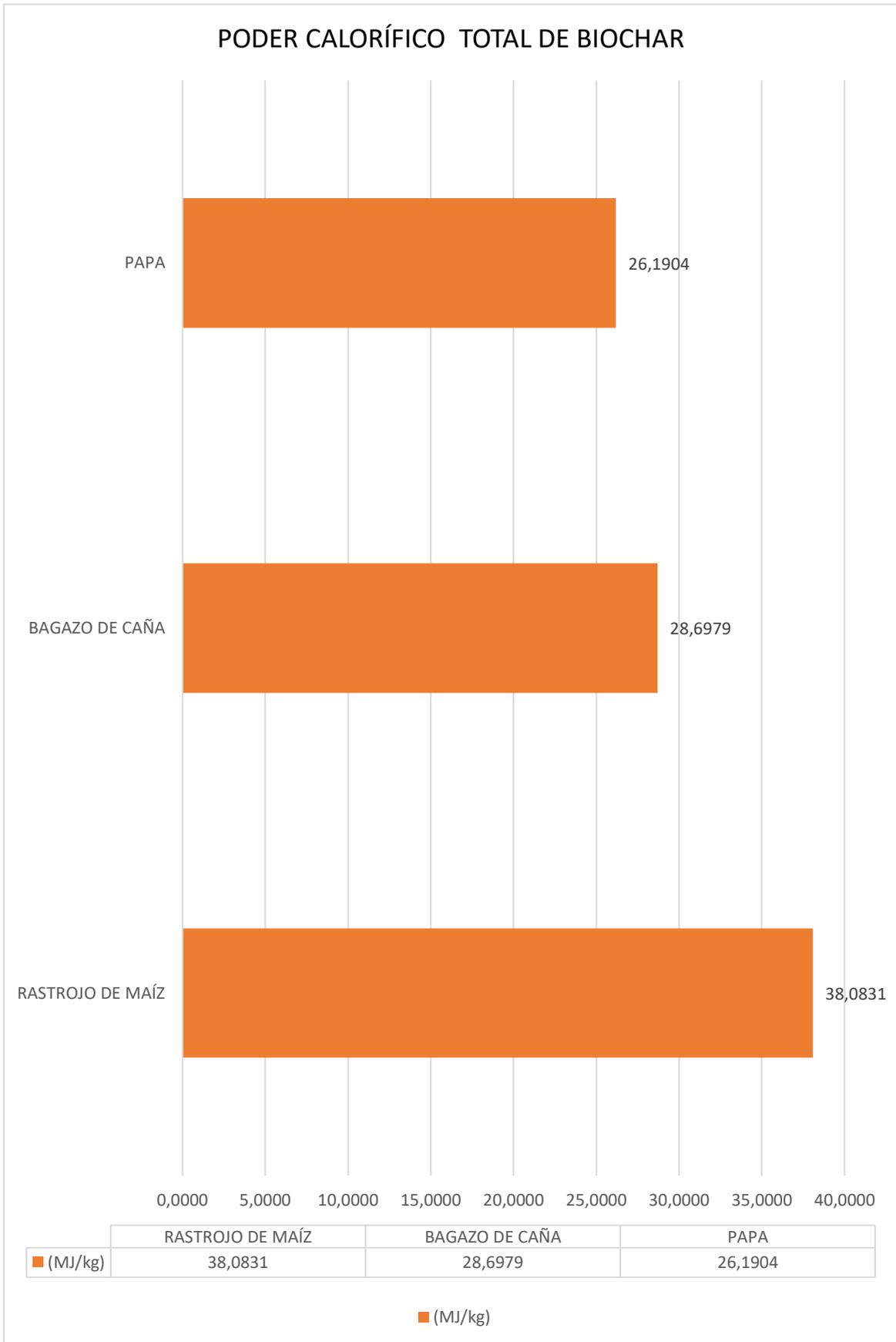


Figura 23. Poder calorífico total del biochar

De acuerdo con los datos obtenidos en [33]. El combustible utilizado presenta diferentes valores de poder calorífico, tal como se muestra en la figura 24 donde se puede observar el valor que tiene cada uno de estos combustibles y el valor de poder calorífico de los biochars obtenidos. En donde se observa que el valor de poder calorífico del combustible comúnmente utilizado es similar al poder calorífico del biochar a base de residuos agrícolas.

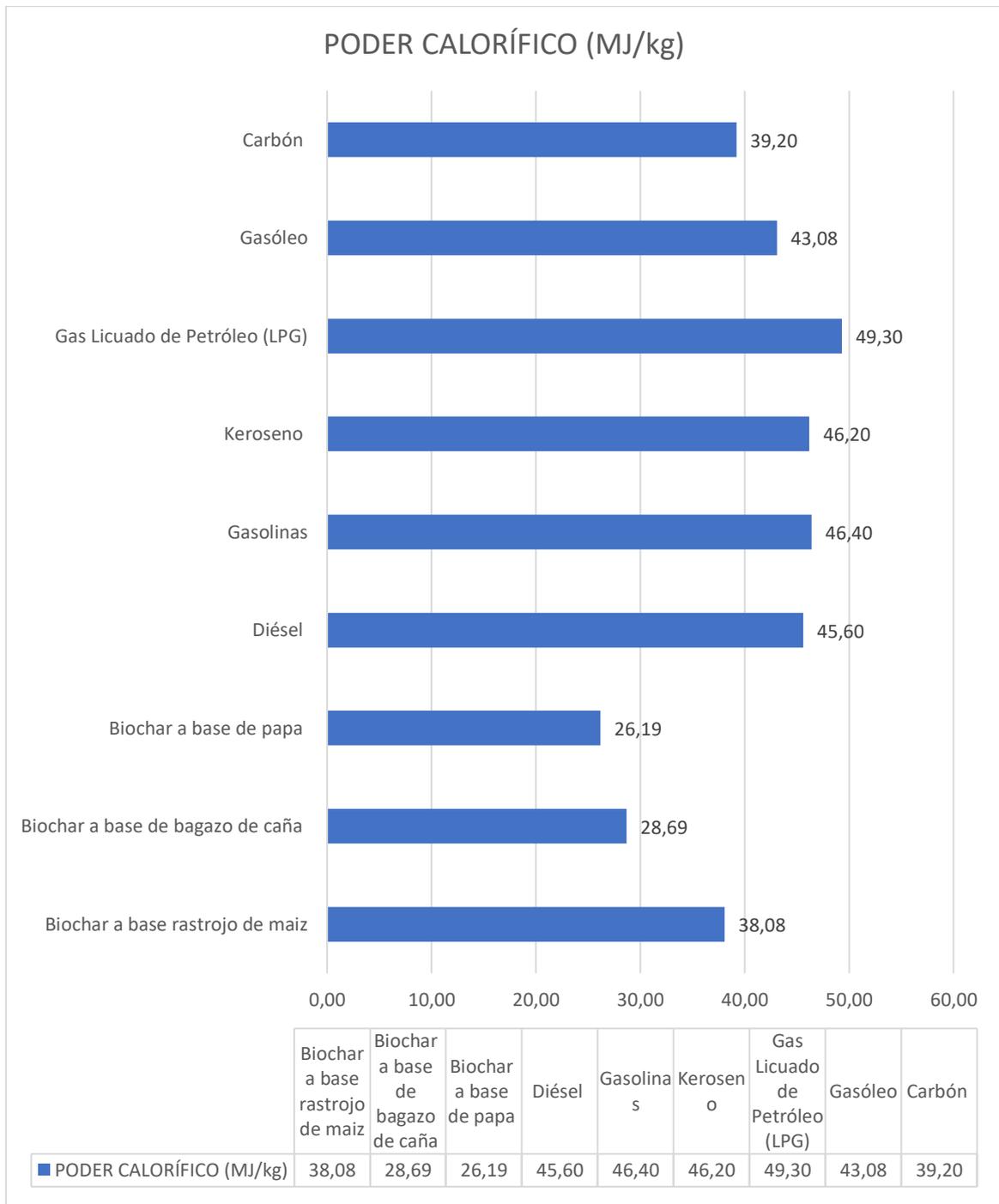


Figura 24. Poder calorífico de combustibles.

4.5 Potencial de generación eléctrica del biochar

A partir de la ecuación 8 se obtuvo el valor del potencial de generación eléctrica que podía alcanzar durante el proceso de combustión del biochar, tal como se muestra en la figura 25 se indica que las muestras de biochar a base de bagazo de caña y el biochar a base de papa presentaban potencias eléctricas ligeramente inferiores a las del maíz, pero aún significativas. Como se observó, el Biochar a base de bagazo de caña tenía una potencia eléctrica de 16,98 kW, mientras que el Biochar a base de papa alcanzaba una potencia de 14,32 kW, siendo estas dos ligeramente menores, mientras que el biochar a base de rastrojo alcanzaba una potencia mayor de 19,04 kW. Los valores obtenidos representaban el potencial de generación eléctrica que se podía llegar a obtener cuando el biochar tuviera una reacción de combustión con un determinado poder calorífico.

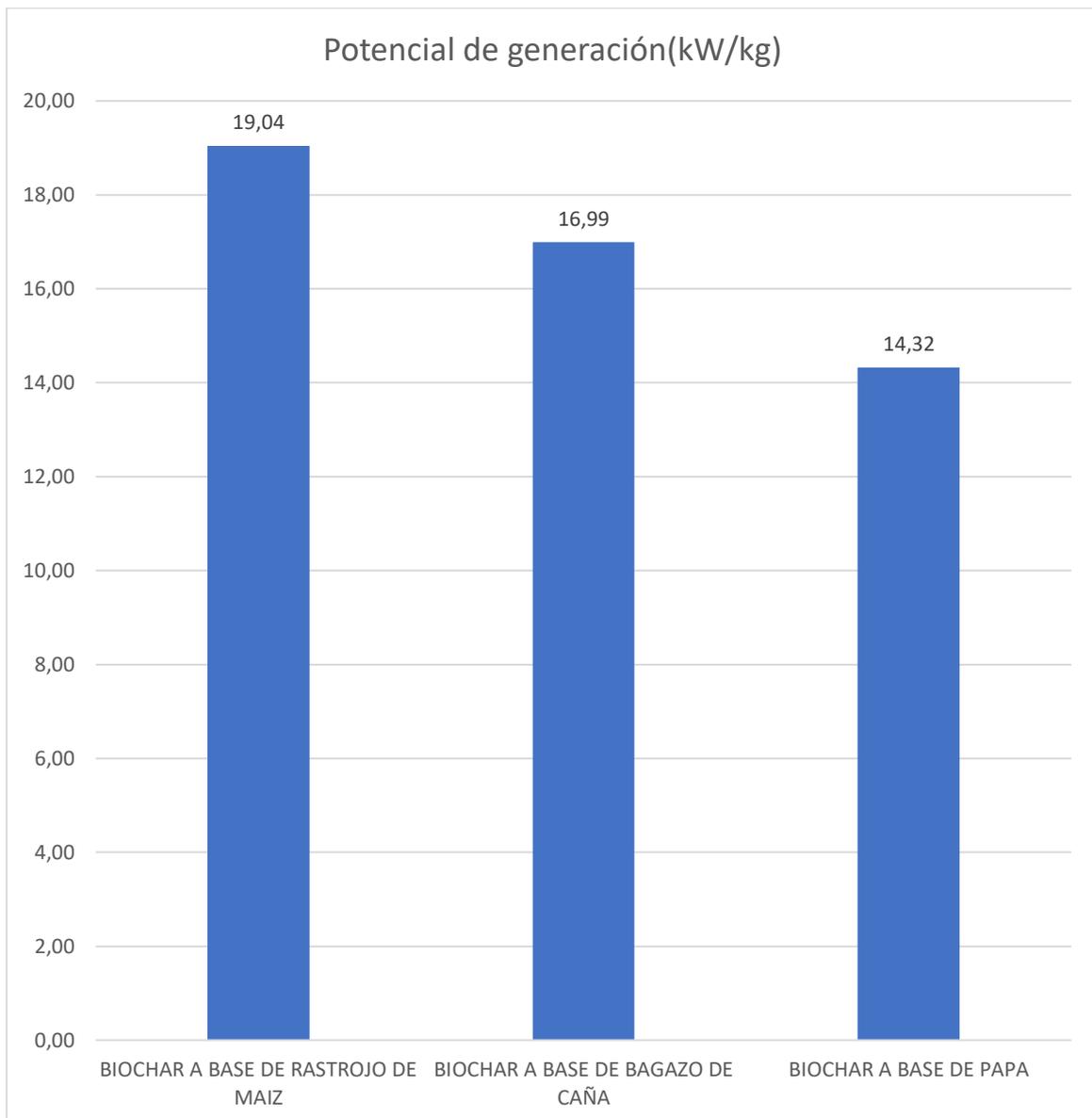


Figura 25. Potencial de generación eléctrica de biochar.

4.6 Potencial de generación eléctrica kW/kg de combustibles.

A partir de la ecuación 8 se realizó el cálculo de la relación entre la potencia eléctrica generada y la masa del combustible consumido, expresada en kW/kg donde se obtuvo los valores de potencial de generación eléctrica que puede llegar a tener un combustible con una potencia por unidad de masa kW/kg en el proceso de combustión. En la figura 26 se muestran los valores de potencia eléctrica de los diferentes combustibles a partir de su poder calorífico.

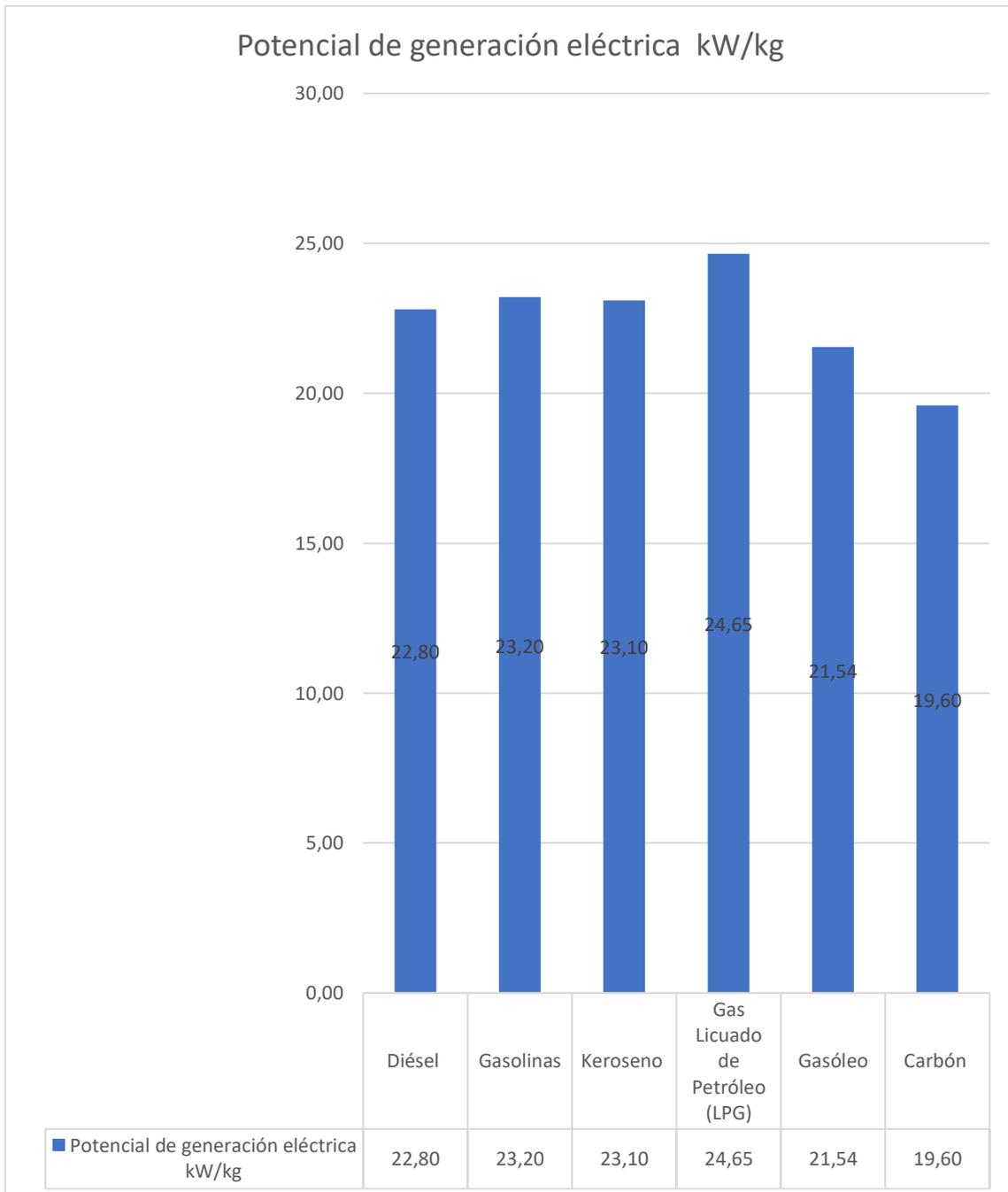


Figura 26. Potencial de generación eléctrica.

4.7 Potencial de generación eléctrica de biochar y combustibles.

En la figura 27 representa la potencia por unidad de masa (kW/kg) de cada uno de los combustibles y el biochar obtenido. En esta se muestran los valores obtenidos para los diferentes combustibles, donde se aprecia una diferencia en el valor del potencial de generación del biochar en comparación con los demás combustibles.

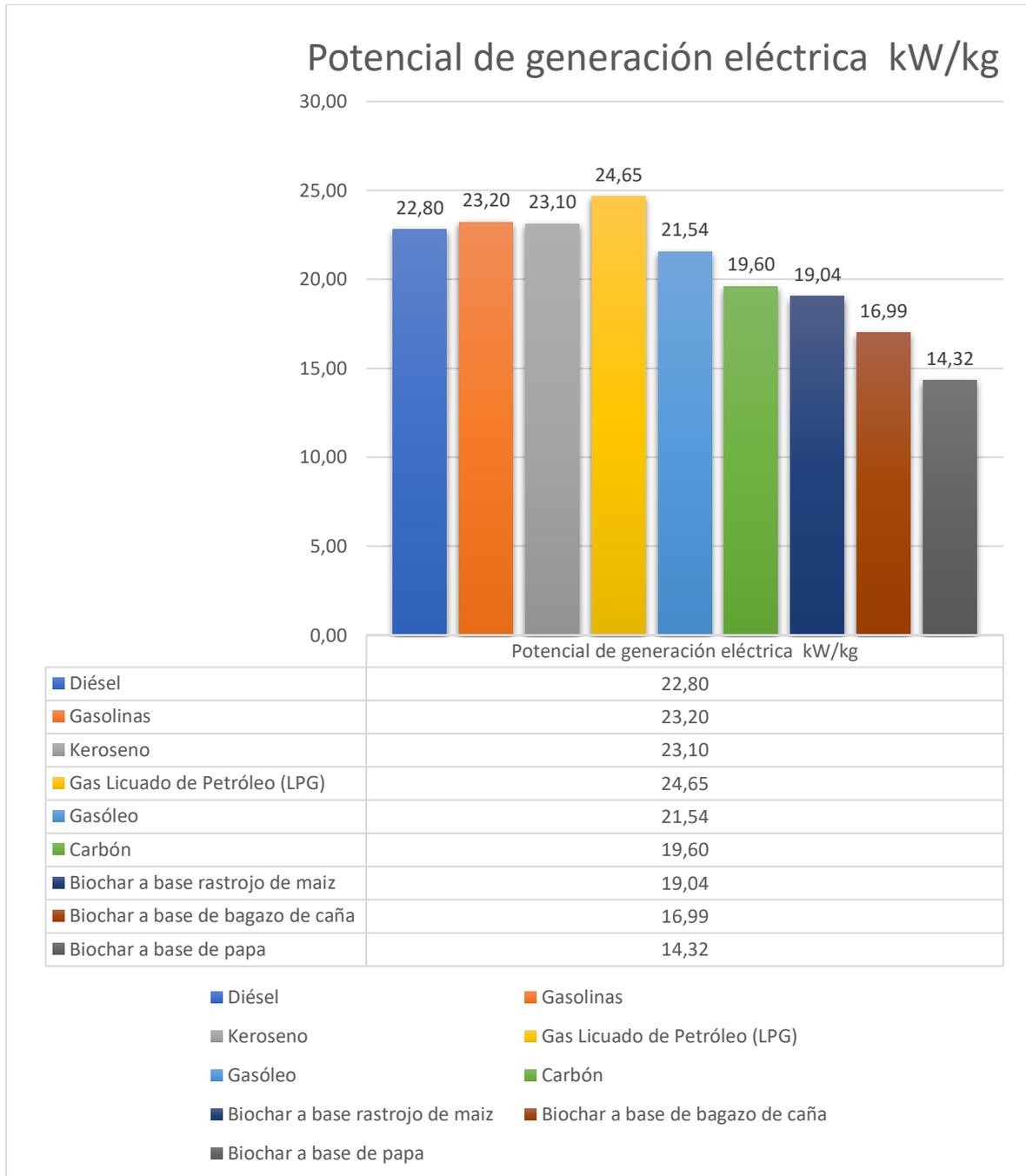


Figura 27. Potencial de generación eléctrica de combustibles y biochar.

4.8 Relación de potencial de generación kWh/kg.

A partir de la relación de energía que permite convertir de kilojulios a kilovatios-hora, mostrando la relación numérica entre estas dos unidades de energía para indicar el contenido energético de diferentes combustibles por unidad de masa. Se obtuvo el valor de la energía eléctrica generada por unidad de masa del combustible, es decir los (kWh/kg) de energía que se pueden obtener por cada kilogramo (kg) del combustible. Como se observa en la figura 28 se muestran los valores que se pueden llegar a obtener del biochar y los diferentes combustibles en la unidad de tiempo por cada kilogramo de combustible que entra en el proceso de combustión.

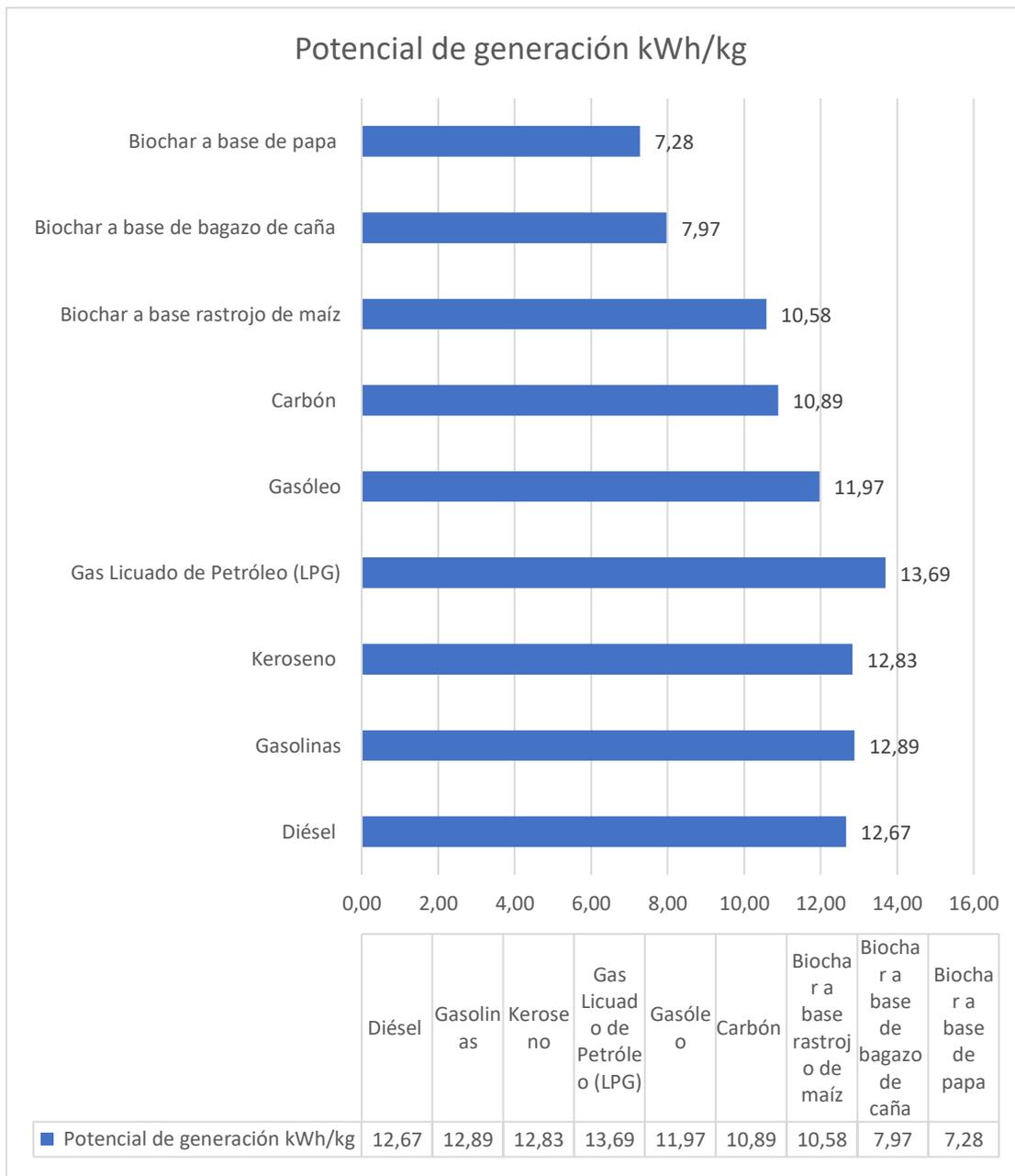


Figura 28. Potencial de generación kWh/kg.

4.9 Relación de potencial de generación(kW/kg) del biochar en comparación a otros combustibles.

En la figura 29 se observa que el valor de potencial eléctrico generado por unidad de masa (kW/kg) del carbón se encuentra en rangos similares del biochar a base de rastrojo de rastrojo de maíz, mientras que los otros biochar presentan valores ligeramente inferiores con respecto al carbón.

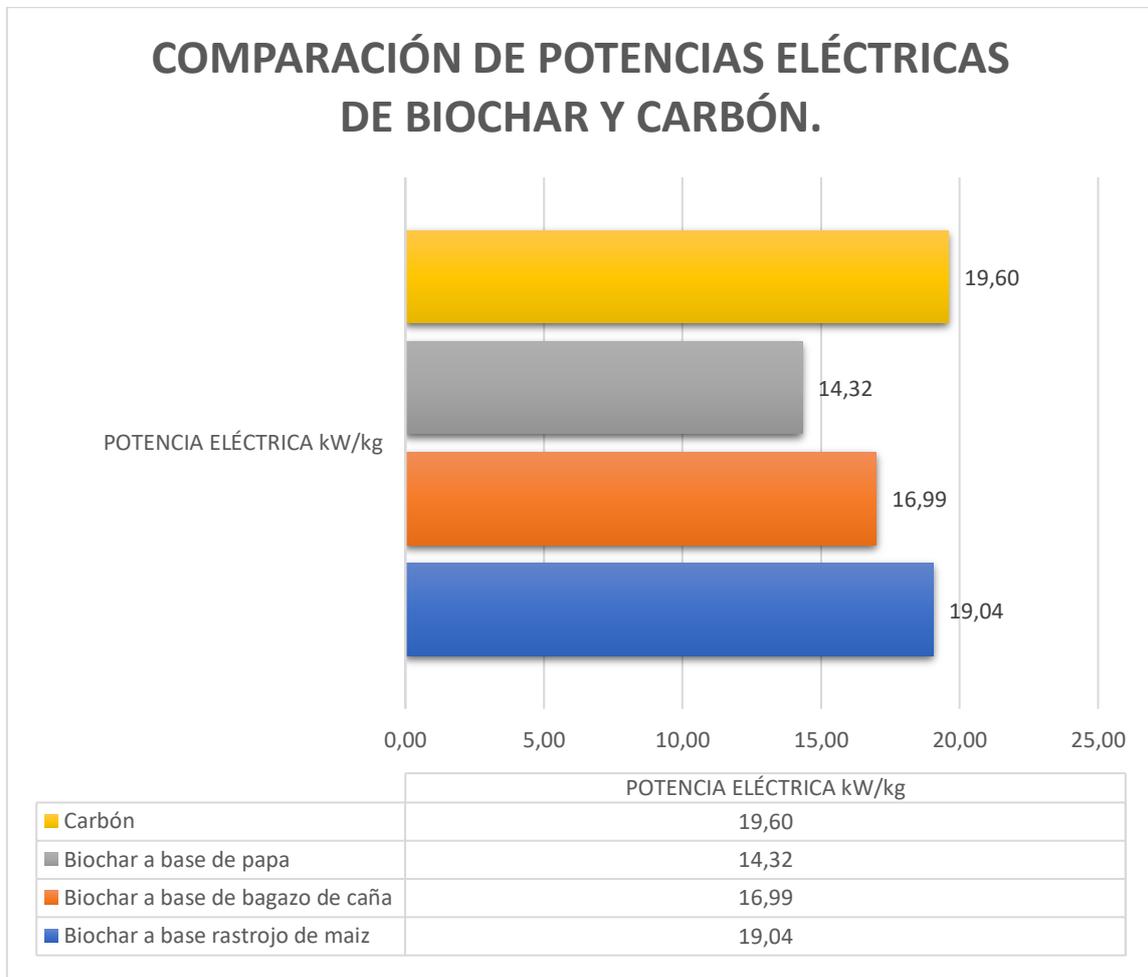


Figura 29. Comparativa de kWh/kg de carbón y biochar.

En la figura 30 se observa que el valor de potencial eléctrico generado por unidad de masa (kW/kg) de Diesel es ligeramente superior en comparación con el biochar a base de rastrojo de maíz. Además, el potencial de generación eléctrica del Diesel supera de forma considerable al del biochar a base de bagazo de caña y papa presentando una diferencia notable entre ambos combustibles.

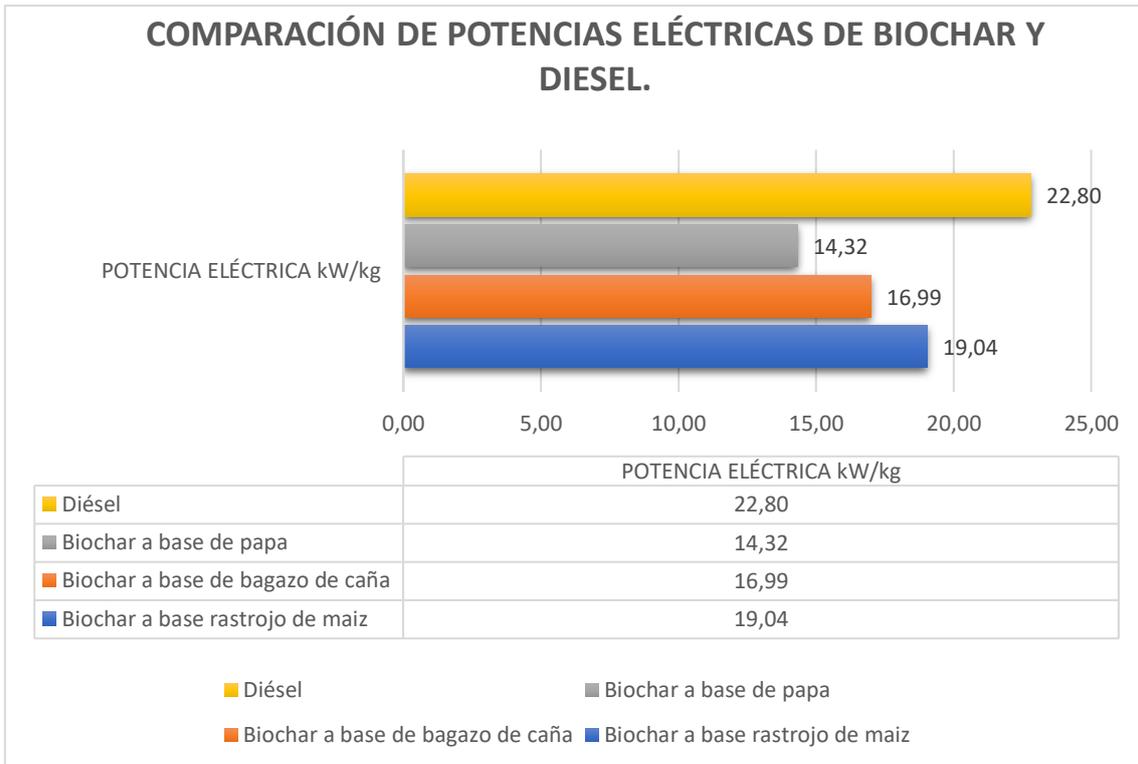


Figura 30. Comparativa de kWh/kg de Diesel y biochar.

En la figura 31 se observa que el valor de potencial eléctrico generado por unidad de masa (kW/kg) de las gasolinas es notablemente superior en comparación al biochar. Se aprecia que las gasolinas presentan un potencial de generación eléctrica elevado, con una diferencia considerable con respecto a los tres diferentes tipos de biochar evaluados.

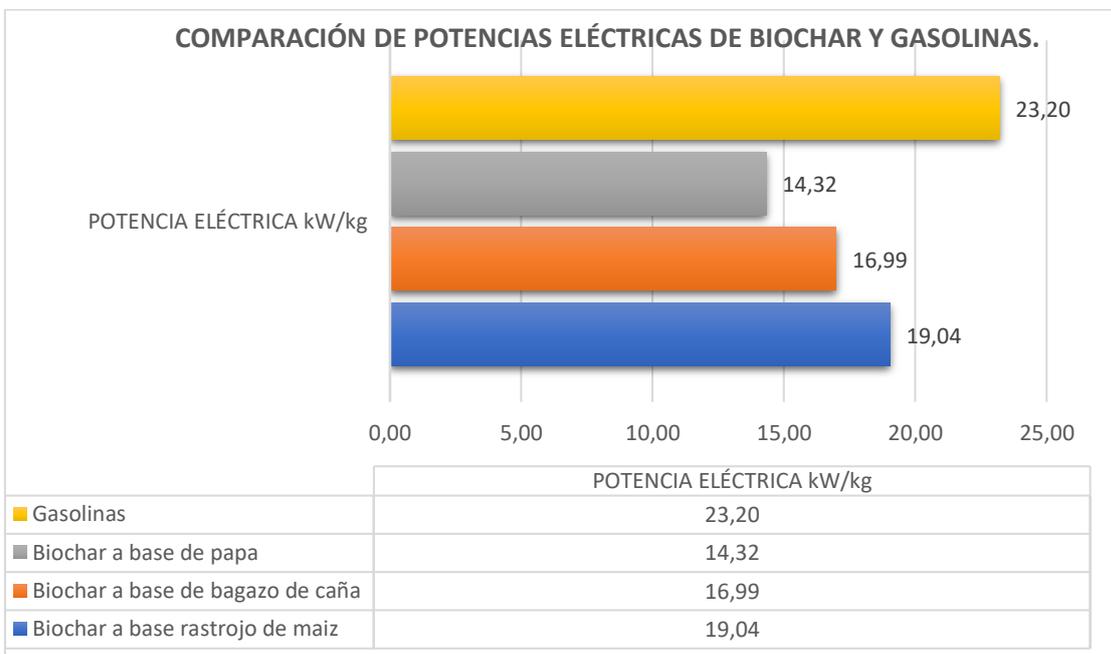


Figura 31. Comparativa de kWh/kg de Diesel y biochar.

En la figura 32 se observa que el valor de potencial eléctrico generado por unidad de masa, (kWh/kg), del keroseno es notablemente superior en comparación al biochar donde se observa que se tiene un potencial de generación con una notable diferencia con respecto al keroseno.

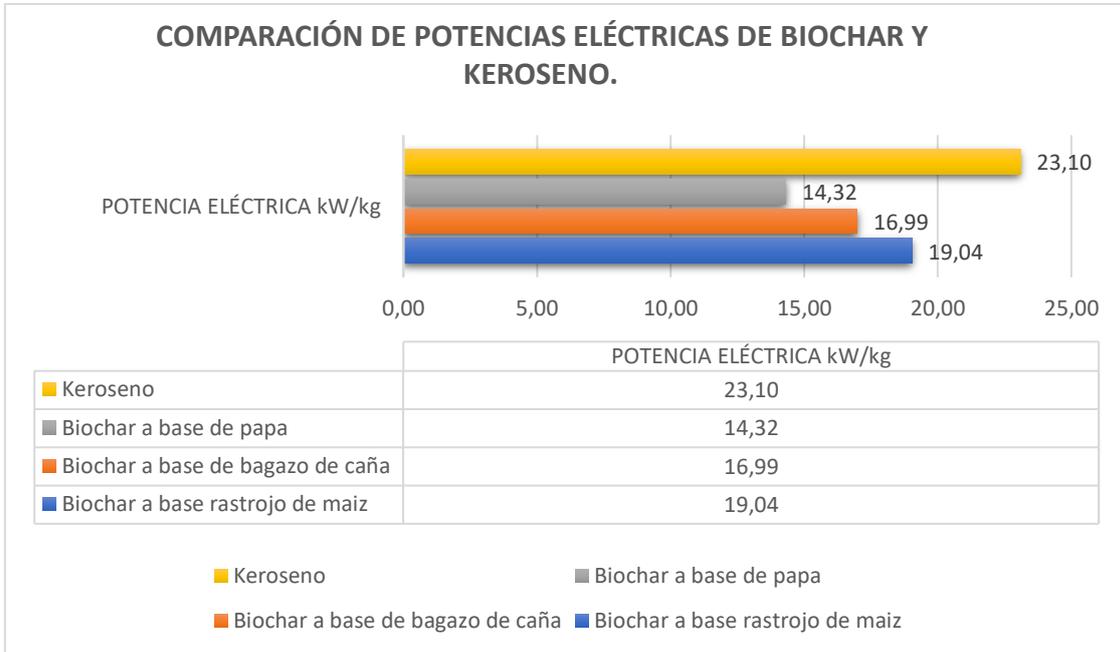


Figura 32. Comparativa de kWh/kg de Keroseno y biochar.

Se observa en la figura 33 que el valor del potencial eléctrico generado por unidad de masa (kW/kg) del GLP es considerablemente superior con respecto al grupo de biochar mencionados.

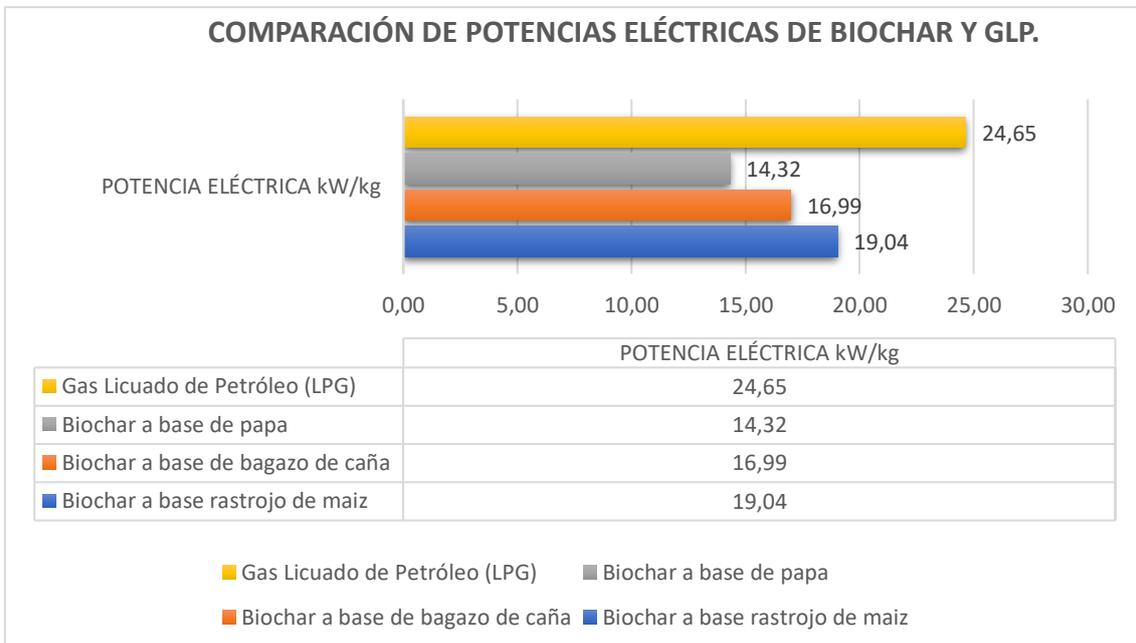


Figura 33. Comparativa de poder calorífico de gas licuado de petróleo y biochar.

Se observa en la figura 34 que el valor del potencial eléctrico generado por unidad de masa (kW/kg) del gasóleo presenta valores de poder calorífico inferiores con respecto al biochar a base de papa y bagazo de caña. Por otro lado, el biochar a base de maíz presenta un valor ligeramente similar al poder calorífico del gasóleo.

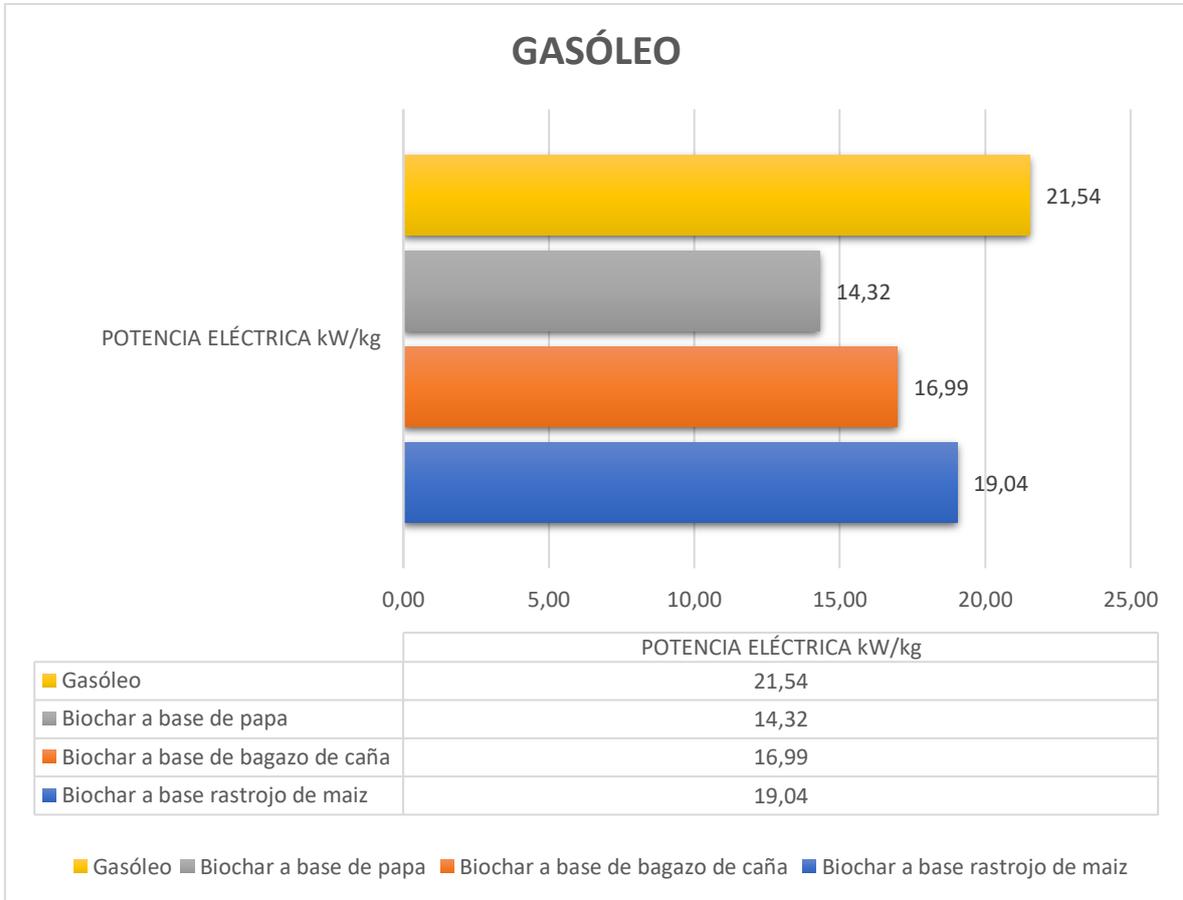


Figura 34. Comparativa de poder calorífico de gasóleo y biochar.

4.10 Relación de potencial de generación kWh/kg de biochar con respecto a combustibles.

En la figura 35 se presenta una comparación de potencial de generación por unidad de masa del combustible (kWh/kg). Se toma como referencia que el Diésel posee el mayor potencial de generación de este grupo de estudio asignándole un 100%. El biochar a base de rastrojo de maíz tiene un porcentaje más cercano al del Diésel en comparación el biochar a base de rastrojo de maíz tiene un porcentaje más cercano al del Diésel, en comparación a los otros biochar analizados.

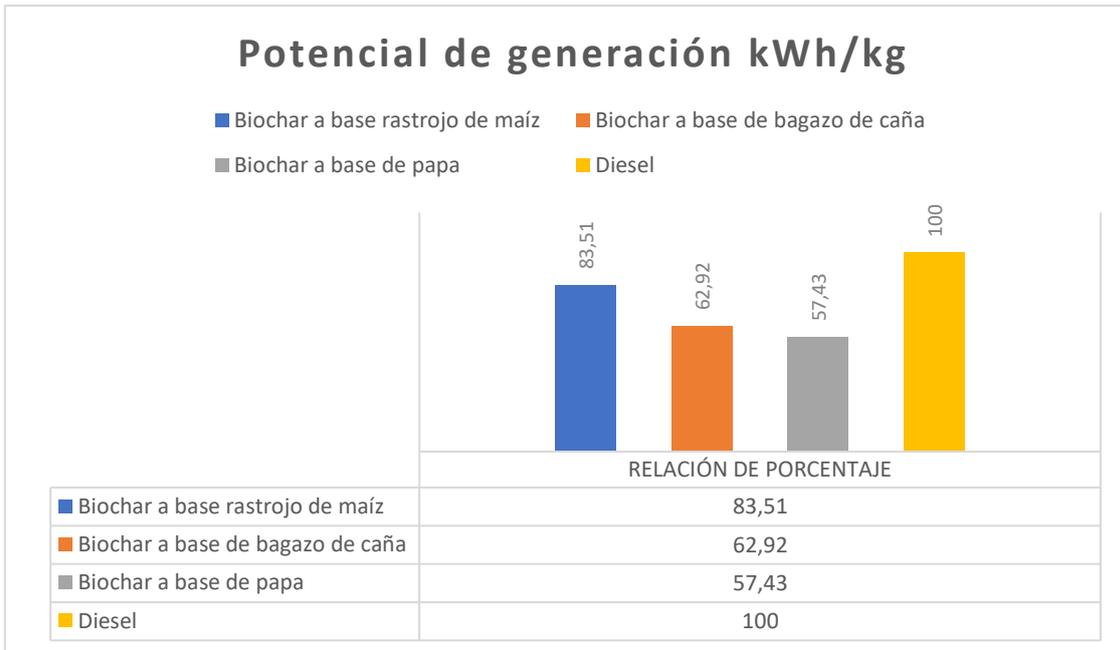


Figura 35. Porcentaje de generación kWh/kg de Diesel y biochar.

En la figura 36 se muestra de potencial de generación por unidad de masa del combustible (kWh/kg) del biochar obtenido con respecto a la gasolina. Tomando a la gasolina como referencia del 100% de potencial de generación con respecto al biochar se puede ver que el biochar a base de rastrojo de maíz se encuentra por niveles de porcentaje cercano a la gasolina y el biochar a base de bagazo de caña y papa tiene un porcentaje menor.

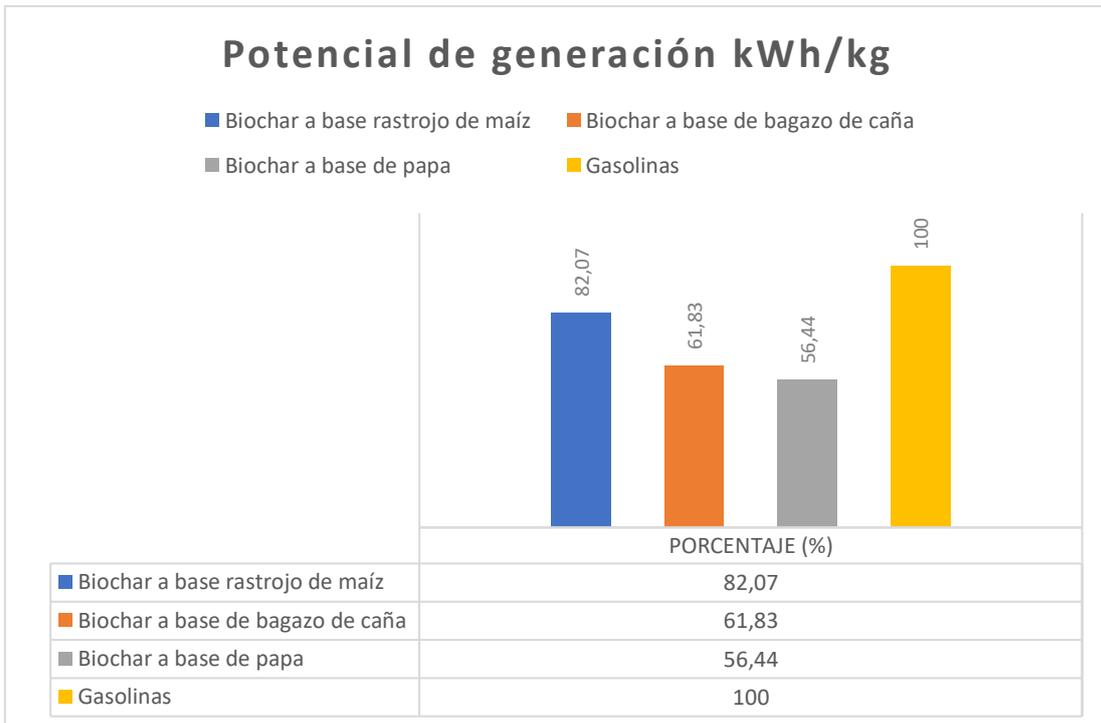


Figura 36. Porcentaje de generación kWh/kg de gasolinas y biochar.

En la figura 37 se presenta una comparación de potencial de generación por unidad de masa del combustible (kWh/kg). En esta comparativa, se toma como referencia el potencial de generación del keroseno al cual se le asigna un valor del 100%. Al analizar los resultados, se observa que el porcentaje correspondiente al potencial de generación de los biochar a base de papa y bagazo de caña es inferior en comparación al del keroseno mientras que el biochar a base de rastrojo de maíz se encuentra en valor cercano a del keroseno indicando que el biochar a base de rastrojo de maíz posee un potencial de generación considerable en este grupo de estudio.

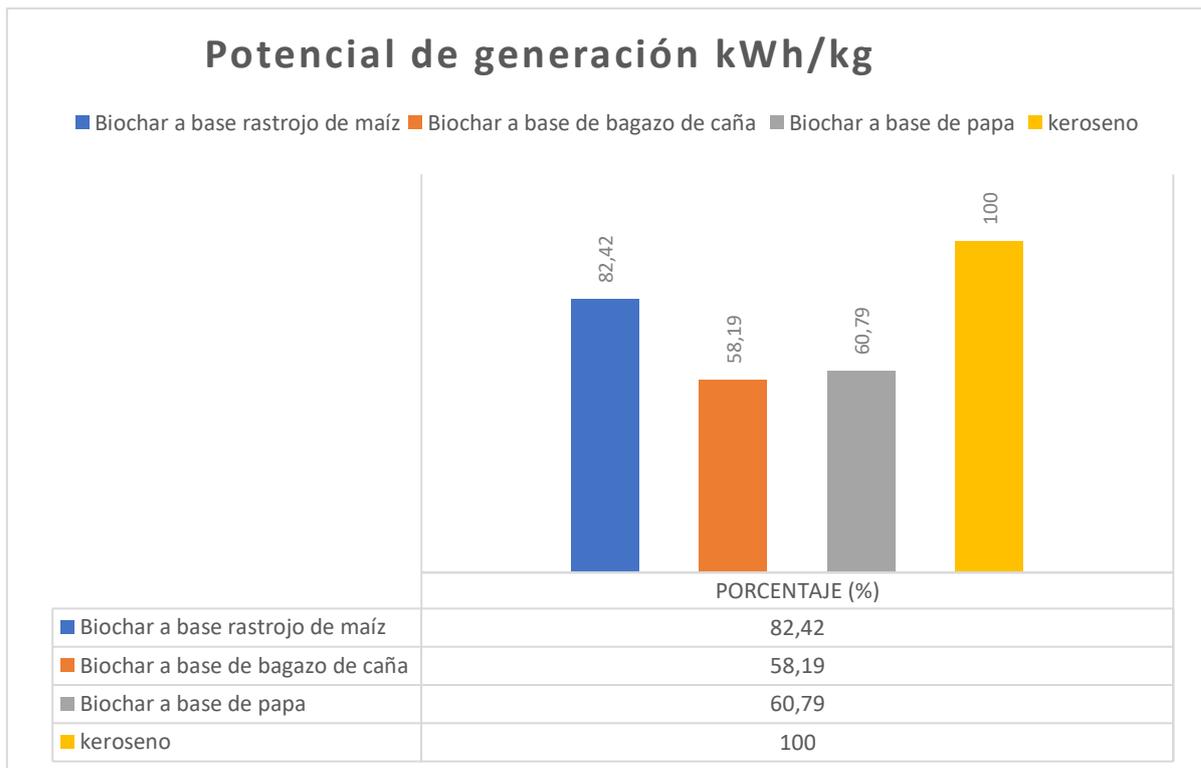


Figura 37. Porcentaje de generación kWh/kg de keroseno y biochar.

En la figura 38 se presenta una comparación de potencial de generación por unidad de masa del combustible (kWh/kg). En esta comparativa se toma como referencia el potencial de generación del keroseno al cual se le asigna un valor del 100%. Al analizar los resultados, se observa que el porcentaje correspondiente al potencial de generación de los biochar poseen valores inferiores en comparación al del keroseno. Esto indica que, si bien los biochar poseen un potencial de generación considerable, este se encuentra por debajo del valor de referencia establecido para el keroseno.

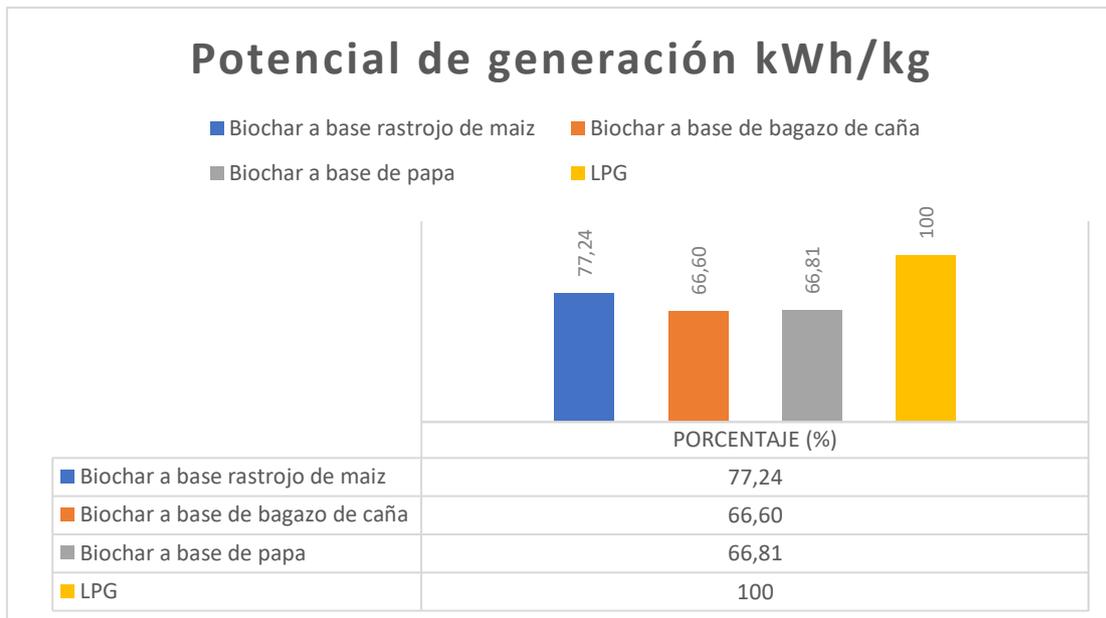


Figura 38. Porcentaje de generación kWh/kg de LPG y biochar.

En la figura 39 se presenta una comparación de potencial de generación por unidad de masa del combustible (kWh/kg). En esta comparativa se toma como referencia el poder calorífico del gasóleo, al cual se le asigna un valor del 100% se observa que el porcentaje correspondiente al potencial de generación de los biochar es inferior en comparación al del gasóleo. Esto indica que, si bien los biochar poseen un potencial de generación considerable este se encuentra por debajo del valor de referencia establecido para el gasóleo.

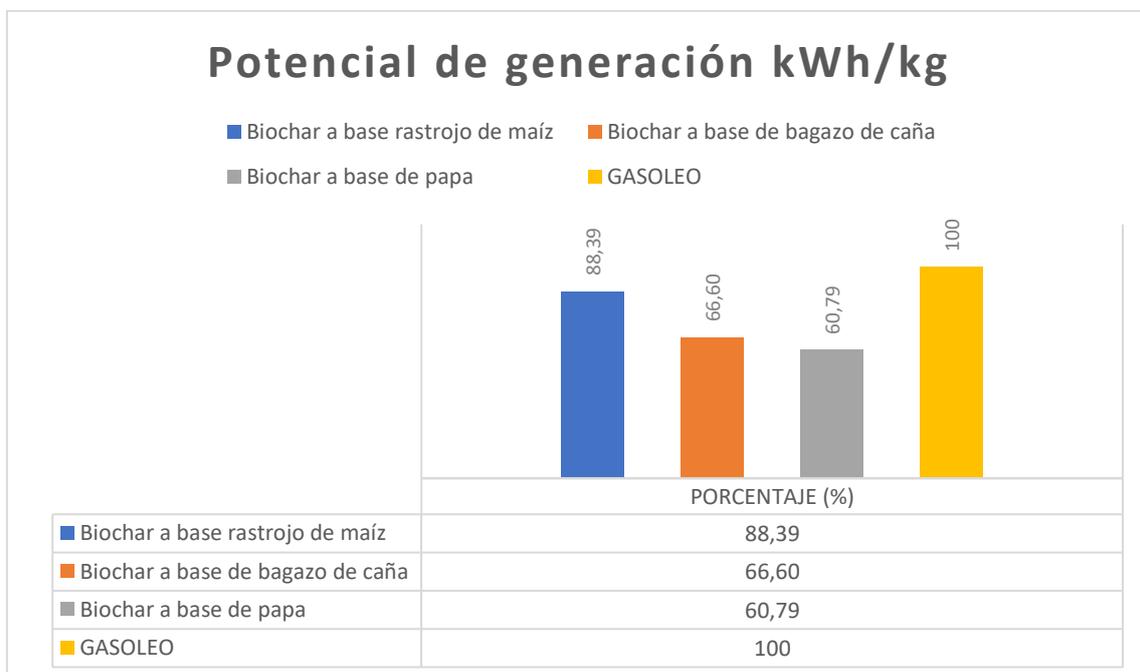


Figura 39. Porcentaje de generación kWh/kg de gasóleo y biochar.

En la figura 40 se presenta una comparación de potencial de generación por unidad de masa del combustible (kWh/kg). En esta comparativa, se toma como referencia el poder calorífico del carbón, al cual se le asigna un valor del 100%. Se observa que el porcentaje correspondiente al potencial de generación de los biochar a base de bagazo de caña y de papa es un valor inferior pero considerable en comparación al del carbón, mientras que el biochar de rastrojo de maíz tiene un poder calorífico casi similar al del carbón, con una diferencia porcentual mínima de solo un 3.6%, tal como se muestra indicando que posee un poder calorífico considerable en comparación al carbón.

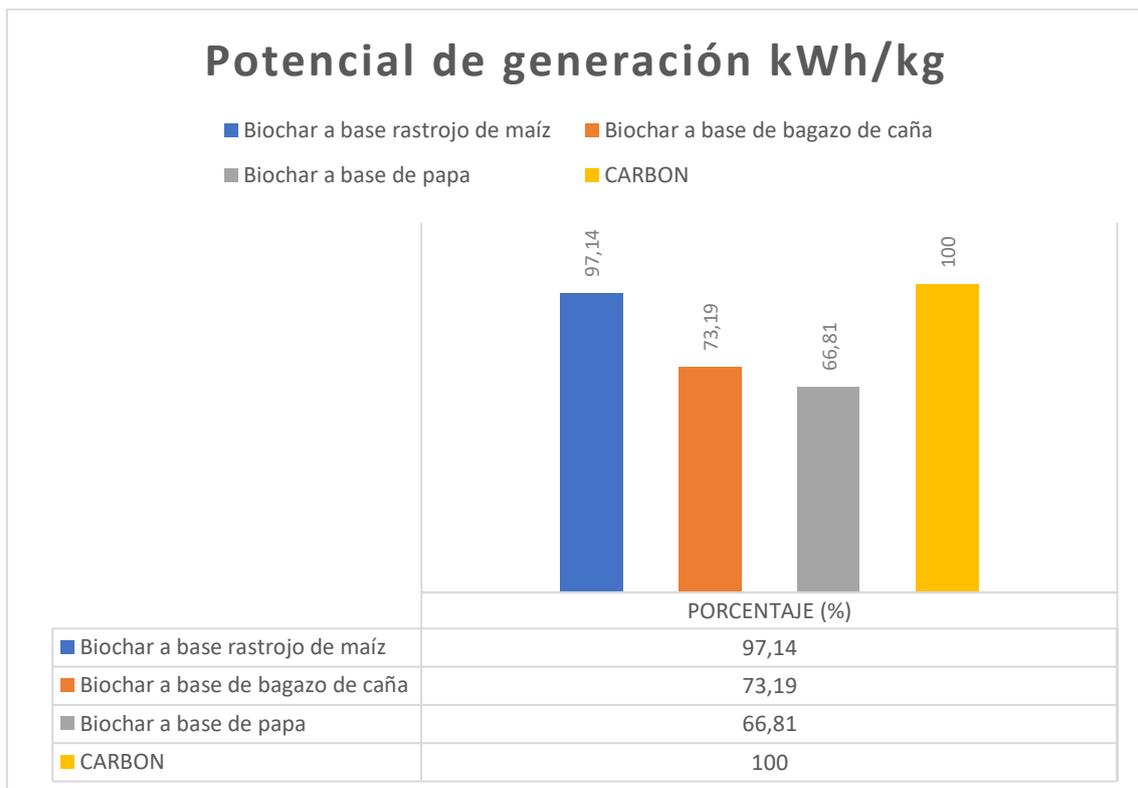


Figura 40. Porcentaje de generación kWh/kg de carbón y biochar.

4.11 Relación de potencial de generación kWh/kg de biochar en comparación al carbón.

El potencial de generación eléctrica por unidad de masa del combustible (kW/kg). del carbón utilizado en la generación termoeléctrica se compara con el biochar obtenido mediante pirólisis. En la figura 41 se muestra que existe una similitud potencial de generación del biochar y el del carbón. Cabe recalcar que dos de los biochar el biochar a base de papa y el biochar a base de bagazo de caña, se encuentran con un valor por debajo del potencial de generación del carbón. Sin embargo, el biochar a base de rastrojo de maíz tiene un valor similar al poder calorífico del carbón. Por lo tanto, el poder calorífico del biochar a base de rastrojo de maíz presenta una similitud considerable en comparación con el potencial de generación del carbón.

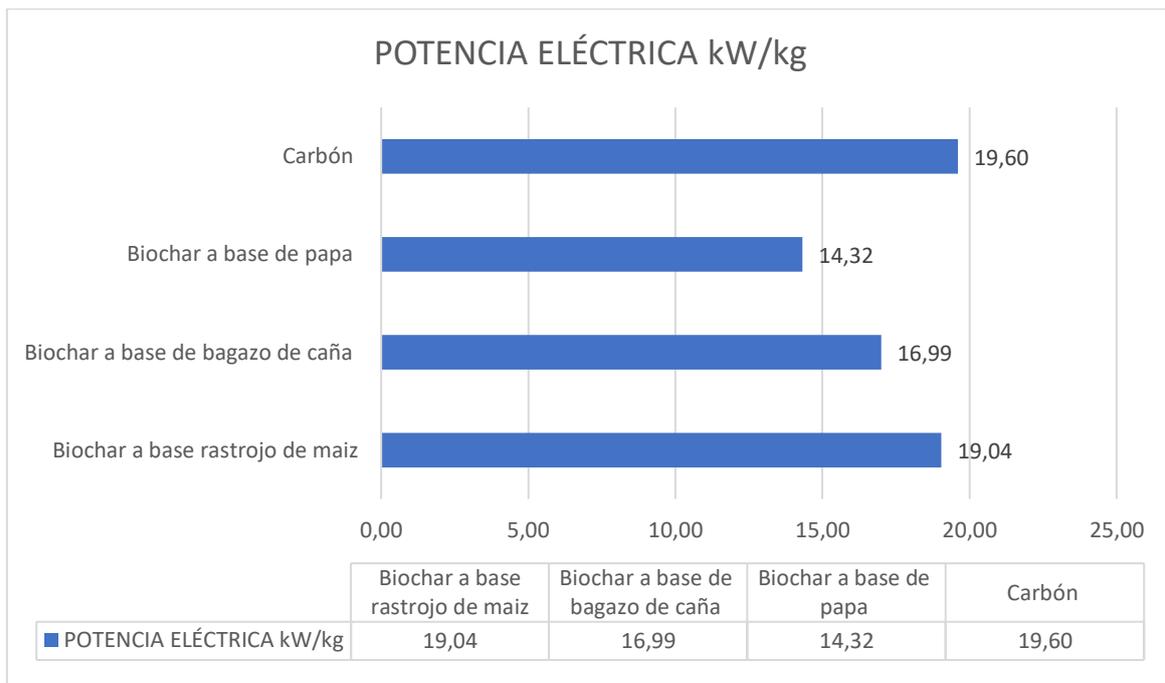


Figura 41. Potencial de generación eléctrica kW/kg.

El potencial de generación eléctrica por unidad de masa del combustible (kW/kg) del biochar a base de rastrojo de maíz es comparable con el potencial de generación del carbón. Como se aprecia en la figura 42 existe una similitud semejante entre el potencial de generación eléctrica del biochar a base de rastrojo de maíz y el potencial de generación eléctrica del carbón. Esto indica que el biochar a base de rastrojo de maíz puede llegar a ser utilizado como combustible, dada la similitud en su potencial calorífico en comparación con el carbón

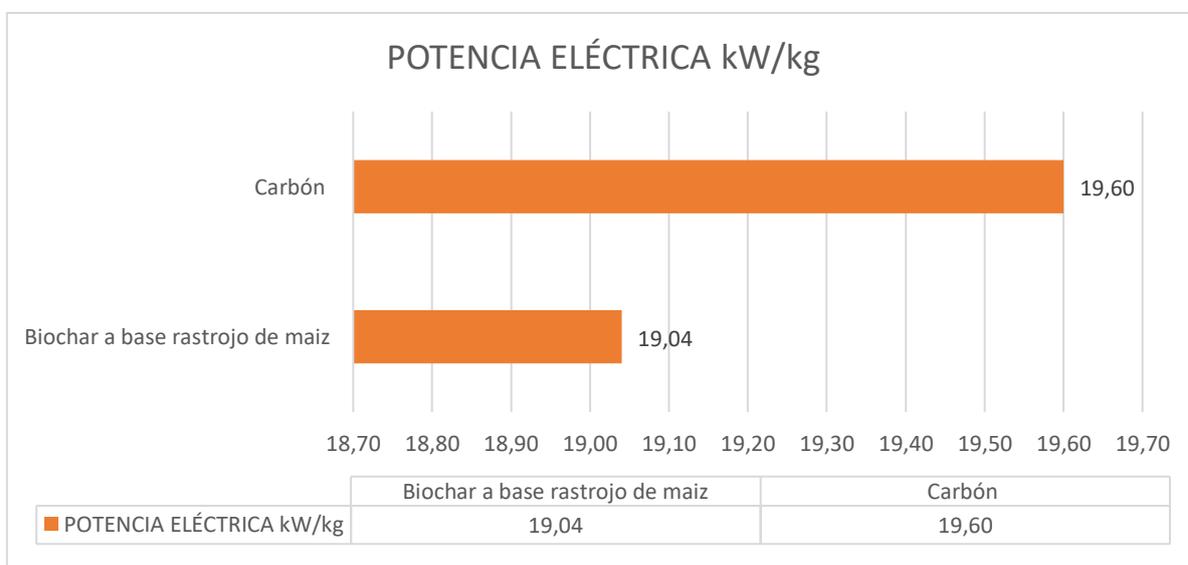


Figura 42. Potencial de generación eléctrica kW/kg de biochar a base de rastrojo de maíz y carbón.

Al comparar potencial de generación eléctrica por unidad de masa del combustible (kW/kg) del biochar a base de maíz, como se observa en la figura 43 se evidencia que el biochar a base de bagazo de caña tiene un potencial de generación eléctrica menor. Sin embargo, el biochar, aunque inferior al del biochar de maíz, no es despreciable y puede ser una alternativa viable en aquellas zonas donde se tenga abundancia de bagazo de caña y se requiera generación de energía a menor escala.

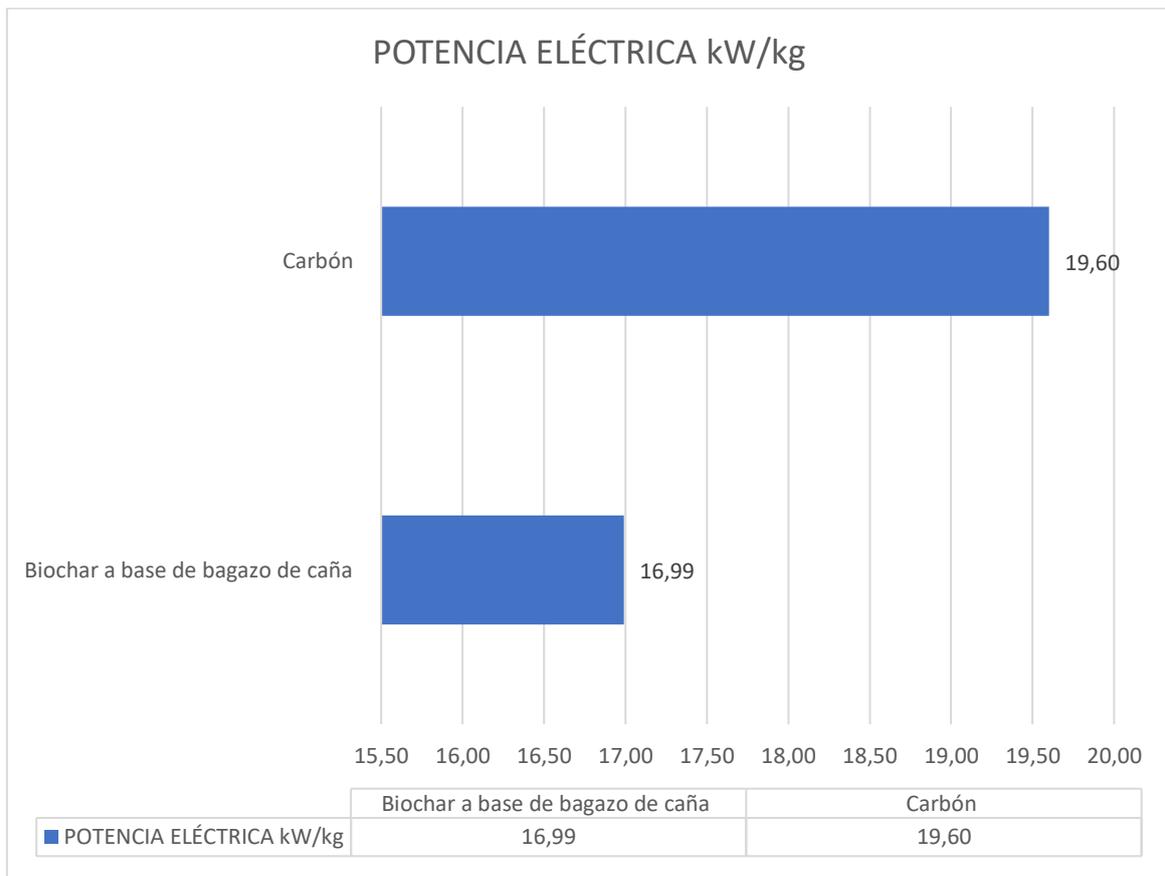


Figura 43. Potencial de generación eléctrica de biochar a base de bagazo de caña de maíz y carbón.

Al comparar el potencial de generación eléctrica por unidad de masa del combustible (kW/kg) del biochar a base de papa con el del carbón, como se muestra en la figura 44 se observa que el potencial de generación del biochar de papa es menor en comparación al poder calorífico del carbón. Sin embargo, este potencial de generación de biochar a base de papa, aunque inferior, no es despreciable y puede ser una alternativa viable en aquellas zonas donde se tenga abundancia de este residuo agrícola y se requiera generación de energía a menor escala.

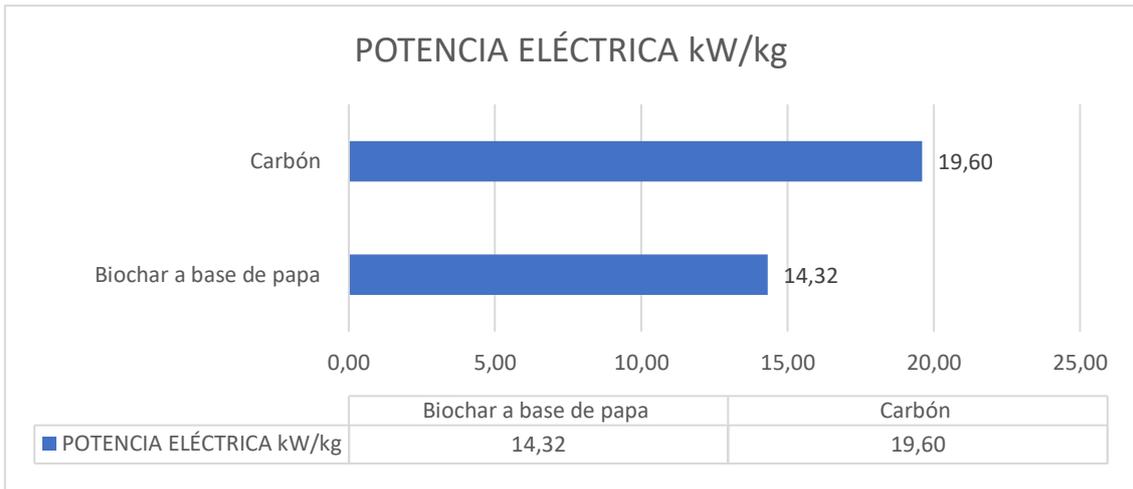


Figura 44. Potencial de generación eléctrica de biochar a base de papa de maíz y carbón.

En la comparación entre el biochar a base de papa y el biochar a base de bagazo de caña, se observa que ambos tienen un potencial de generación eléctrica por unidad de masa del combustible (kW/kg) ligeramente similar, como se evidencia en la figura 45 donde se encuentran valores de similitud. Esto sugiere que ambos tipos de biochar podrían ser utilizados como fuentes primarias de energía. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, en zonas donde hay abundancia de papa y bagazo de caña, estos materiales tienen un potencial de generación de energía bajo, aunque no despreciable. Al pasar por un ciclo termodinámico, estos materiales pueden llegar a generar energía de manera eficiente.

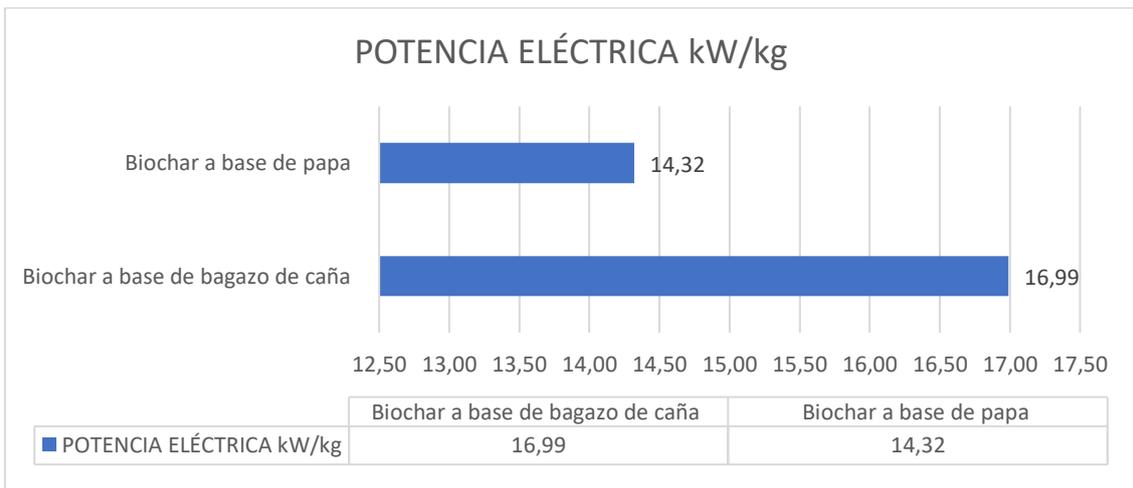


Figura 45. Potencial de generación eléctrica a partir de biochar a base de papa y bagazo de caña.

Los biochar obtenidos mostraron tener un poder calorífico casi equivalente al del carbón, como se observó en los gráficos donde el biochar hecho de rastrojo de maíz presentó un poder calorífico casi idéntico al del carbón. Los otros dos tipos de biochar mostraron valores más bajos pero significativos para su uso como combustible en la generación eléctrica.

Conclusiones

1. El aprovechamiento de los residuos agrícolas representa hoy una manera amigable con el medio ambiente de reciclar estos productos y explorar aplicaciones específicas basadas en sus características fisicoquímicas. Al detallar estas composiciones, se logró comprender su estructura y componentes, y cómo estas características influyen en su poder calorífico y la energía liberada durante la combustión puede ser aprovechada y transformada en energía útil.
2. La caracterización de las muestras de biochar obtenidas mediante el proceso de pirólisis reveló que el biochar derivado del rastrojo de maíz tiene un poder calorífico total de 38.0831 MJ/kg, con un potencial de generación de 20.96 Kw/kg. Por otro lado, el biochar derivado de la papa presentaba un poder calorífico total de 26.1904 MJ/kg, con un potencial de generación de 14.32 kW/kg, mientras que el biochar derivado del bagazo de caña tenía un poder calorífico de 28.6979 MJ/kg, con un potencial de generación de 16.99 kW/kg. Estos hallazgos destacan el potencial de los residuos agrícolas como una fuente viable al someterse a un ciclo termodinámico para la obtención de energía eléctrica.
3. Después de realizar una comparación de potencial de generación eléctrica por unidad de masa del combustible (kW/kg) de los combustibles comúnmente utilizados en la generación termoeléctrica, se observó que el biochar obtenido a partir de pirólisis de residuos agrícolas tiene un potencial de generación eléctrica más bajo en comparación con estos combustibles. En particular se destacó que el biochar derivado del rastrojo de maíz tiene un potencial de generación eléctrica casi similar al del carbón. Por otro lado, el biochar proveniente de la papa y el bagazo de caña sigue siendo bajo, aunque no se puede descartar su utilidad.

Recomendaciones

El análisis realizado en este trabajo de integración curricular resalta la importancia de las características fisicoquímicas que se puede llegar a obtener del biochar a base de residuos agrícolas el usar este tipo de combustibles para la generación eléctrica ayudaría a la generación a pequeña o grande escala por su fácil obtención de materia prima permitiendo de esta manera una obtención de energías alternativas. EL utilizar un reactor de pirólisis permite obtener el biochar para su uso como combustible, pero el estudio del potencial ha sido obtenido de una manera experimental y para obtener valores más acordes de su uso en la generación termoeléctrica debería realizarse métodos prácticos.

Bibliografía

- [1] Y. Montenegro Santillan, «Evaluación del poder calorífico de briquetas de biochar obtenido a partir de residuos orgánicos», 2022, Accedido: 6 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/2963>
- [2] W. G. Angeles *et al.*, «Valorización energética de residuos orgánicos mediante pirolisis», *Rev. de investig. agroproducción sustentable*, vol. 5, n.º 2, Art. n.º 2, ago. 2021, doi: 10.25127/aps.20212.766.
- [3] A. Fernández Yepes, «Análisis preliminar de modelos de pirólisis de biomasa para generación de combustibles a partir de residuos», 2020, Accedido: 6 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://idus.us.es/handle/11441/104986>
- [4] S. E. Villacis Chilingua, «Aprovechamiento de residuos orgánicos obtenidos en invernaderos de la provincia de Tungurahua», bachelorThesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología. Carrera de Ingeniería Bioquímica, 2022. Accedido: 6 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/36058>
- [5] Emmanuelle Gómez Trejo López, «Elaboración de membranas catalíticas para producción de biodiésel a partir de aceite de cocina usado», Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., Yucatán, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/1763>
- [6] T. F. Ganzhi Maurizaca, «Caracterización química de biochar producido a diferentes temperaturas a partir de los residuos de Ciprés y Quinual en el cantón Cañar», 2020, Accedido: 6 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/10780>
- [7] S. F. Iglesias Abad, «Aplicación de Biochar a partir de biomasa residual de Eucalipto para evaluar la productividad con maíz en el austro ecuatoriano», Universidad Nacional Agraria La Molina, 2018. Accedido: 4 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3394>
- [8] E. B. Campos, *Presente y futuro de las tecnologías verdes: contribuciones desde la Universitat de València*. Universidad de Valencia = Universitat de València, 2020. Accedido: 6 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=864138>
- [9] C. Sánchez y H. Fuquen Gonzalez, «EFICIENCIA ENERGÉTICA», vol. 1, pp. 9-13, jun. 2014.
- [10] H. W. Vaca Guevara, «Implementación de un reactor de obtención de biochar mediante pirolisis para su uso como combustible en plantas de generación eléctrica», bachelorThesis, 2023. Accedido: 20 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13813>
- [11] T. F. Ganzhi Maurizaca, «Caracterización química de biochar producido a diferentes temperaturas a partir de los residuos de Ciprés y Quinual en el cantón Cañar», Universidad Católica de Cuenca., 2020. Accedido: 3 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/10780>
- [12] «ECORFAN®». Accedido: 6 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.ecorfan.org/republicofperu/rj_energias_renovables_17_1.php
- [13] A. Rojas, «Obtención de biocombustible mediante pirólisis con base en el aprovechamiento de residuos agrícolas partiendo de la cascarilla de arroz en los cultivos de la región de Tolima Grande (Tolima y Huila).», bachelorThesis, Fundación Universidad de América, 2022. Accedido: 3 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8889>

- [14] D. J. Vega Martínez y F. L. Silva Ariza, «Estudio para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos de búfalo mediante la biodigestión en el municipio de Rionegro, Santander», Universidad Autónoma de Bucaramanga UNAB, 2020. Accedido: 3 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/12005>
- [15] Jordy Pariona-Palomino, Wendy Matos-Ormeño, y duardo Huillca-Huanaco, «Biochar como tecnología de emisión negativa frente al cambio climático», 2020, doi: 10.21142/SS.
- [16] B. Saletnik, «Biochar as a Multifunctional Component of the Environment-A Review», *Applied Sciences*, vol. 9, p. 1139, mar. 2019, doi: 10.3390/app9061139.
- [17] J. E. Rhenals Hoyos, «Evaluación de la producción de Biochar por medio de pirólisis lenta de residuos de la agroindustria del maíz en un reactor alotérmico», feb. 2024, Accedido: 6 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/8263>
- [18] S. J. D. Alvarado, G. J. Z. Maldonado, G. A. B. Briones, y C. A. Moreira-Mendoza, «Evaluación de los residuos agroindustriales con potencial para biocombustibles», *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, vol. 10, n.º 2, pp. 53-73, 2023.
- [19] D. A. Aguilar Romero, «Determinación del potencial energético de la biomasa residual de cultivos de banano en el cantón Machala, El Oro, Ecuador», bachelorThesis, 2019. Accedido: 6 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18090>
- [20] K. Aróstegui Cornelio, «Evaluación del efecto de biochar de residuos de sachá inchi y cacao sobre suelos degradados de Campoverde, Ucayali, usando Zea mays con indicador», *Universidad Científica del Sur*, 2019, Accedido: 6 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.cientifica.edu.pe/handle/20.500.12805/762>
- [21] C. Sánchez y H. Fuquen Gonzalez, «EFICIENCIA ENERGÉTICA», vol. 1, pp. 9-13, jun. 2014.
- [22] A. Tursi, «A review on biomass: importance, chemistry, classification, and conversion», *Biofuel Research Journal*, vol. 6, n.º 2, pp. 962-979, jun. 2019, doi: 10.18331/BRJ2019.6.2.3.
- [23] W. G. Angeles *et al.*, «Valorización energética de residuos orgánicos mediante pirolisis», *Rev. de investig. agroproducción sustentable*, vol. 5, n.º 2, Art. n.º 2, ago. 2021, doi: 10.25127/aps.20212.766.
- [24] W. Gosgot Angeles *et al.*, «Valorización energética de residuos orgánicos mediante pirolisis», *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, vol. 5, p. 26, ago. 2021, doi: 10.25127/aps.20212.766.
- [25] E. del Amo Mateos, «Producción de biochar a partir de material bioestabilizado», 2018, Accedido: 4 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/31220>
- [26] M. A. T. Gómez, «Evaluación de dos especies leñosas de la Península de Yucatán como posibles Cultivos Dendroenergéticos.», Tesis de maestría, CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C. POSGRADO EN CIENCIAS EN ENERGÍA RENOVABLE, Mérida, Yucatán, México, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/1762>
- [27] Victor Quintanilla Sanguenza, «El rol de América Latina en la extracción y uso de carbón», Interamerican Association for Environmental Defense (AIDA).

- Accedido: 4 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://aida-americas.org/es/blog/el-rol-de-america-latina-en-la-extraccion-y-uso-de-carbon>
- [28] Alberto Marcos Trespacios, «Análisis de distintos escenarios de generación de energía eléctrica», VALLODALID, 2021. Accedido: 9 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/47194>
- [29] «Escuela Microsoft | G-Talent.Net | 100% online». Accedido: 7 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.g-talent.net/collections/escuela-microsoft?utm_source=GoogleAds&utm_medium=Busqueda&utm_campaign=CampMarcaG-Talent&utm_content=extension&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw-ai0BhDPArisAB6hmP5xaII0eucd97s6cBxAE2XT7b15A80rneAMoyc6ubcZrZO pBMvhngEaAjjKEALw_wcB
- [30] «AC500 CALORÍMETRO MANUAL | LECO». Accedido: 16 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://leco Peru.com/producto/ac500/>
- [31] «MOLINO DE CORTE - Pulverisette 15 | Instrumentalia». Accedido: 16 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://instrumentalia.com.ar/producto/molino-de-corte-pulverisette-15/>
- [32] «Balanzas-Sartorius.pdf». Accedido: 17 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://cdn.lrdiagnostico.com/files/20221231123111/Balanzas-Sartorius.pdf>
- [33] S. Majumder, «Design and Analysis of First Stage Rocket Engine using Butane and Liquid Oxygen», 2019, doi: <https://doi.org/10.26634/jme.9.3.15806>.

Anexos

Anexo 1. Resultados de análisis de laboratorio.



Trabajamos bajo la Norma ISO 17025

Agrarprojekt S.A.
Urb. El Condado, Calle V #941 y Av. A, Quito
Tel: 02-2490575/02-2492148/0984-034148
info@agrارprojekt.com
www.agrarprojekt.com

RESULTADOS

Código Agrarprojekt: DGE-181023

Pág 2/2

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA			
Información Adicional:	Biochar		
Tipo de Muestra:	Abono Orgánico Sólido		
Número de Muestra:	# 1	# 2	# 3
Información Proporcionada por el Cliente:	Caña	Maíz	Papa

Contenido Total de macro- y microelementos en Materia Seca (macroelementos en %, microelementos en ppm equivalente a mg/kg)

Análisis	Unidad	*Valores de Orientación: Niveles Adecuados para un Compost de Buena Calidad	Resultado	Resultado	Resultado
Materia Seca	%	50 - 70	96,4	94,1	95,9
Humedad	%	30 - 50	3,6	5,9	4,1
Densidad (materia fresca, presión 0.1 kg/cm ²)	g/litro	-	285	170	357
Densidad Aparente (0% Humedad)	g/litro	> 200	275	160	342
pH (Volumen 1:1 1/2)	-	7,0 - 8,5	7,8	9,4	10,5
Conductividad - CE (Volumen 1:1 1/2)	mS/cm	> 4	1,79	21,2	38,4
Materia Orgánica	%	> 65	94,4	84,8	75,3
Carbono (C)	%	> 38	54,9	49,3	43,8
Relación Carbono- Nitrógeno (C:N)	%	10:1 hasta 20:1	118 : 1	137 : 1	21 : 1
Nitrógeno Total (N)	%	> 2,0	0,46	0,36	2,04
Fósforo (P)	%	> 0,2	0,07	0,06	0,54
Potasio (K)	%	> 1,5	0,32	2,76	6,40
Magnesio (Mg)	%	> 0,2	0,05	0,12	0,34
Calcio (Ca)	%	> 1,5	0,10	0,23	0,18
Sodio (Na)	%	< 0,2	0,02	0,10	0,14
Hierro (Fe)	ppm	-	4700	4960	4100
Manganeso (Mn)	ppm	-	123	94,2	59,8
Cobre (Cu)	ppm	-	78,0	159	129
Zinc (Zn)	ppm	-	876	1332	794
Boro (B)	ppm	-	25,2	42,6	51,4

* Fuente: R. Gottschall. Kompostierung ("Compostaje"). Verlag C.F. Mueller, Karlsruhe, Alemania. 295 pp.

- = No Aplica

Nota: - Los datos y resultados están basados en la información y muestras entregadas por el cliente para quien se ha realizado este informe de manera exclusiva y confidencial.
- La fecha de ensayo y los métodos utilizados están a disposición del cliente cuando lo requiera.
- El Laboratorio no realizó el muestreo por lo tanto no certifica el origen de las muestras.
- Prohibida la reproducción total o parcial de Los resultados. No procede copia.

Agrarprojekt S.A.
Dr. Karl Sponagel
Director del Laboratorio

Anexo 2. Resultados de pruebas de laboratorio.



Trabajamos bajo la Norma ISO 17025

AgrarprojeKT S.A.
 Urb. El Condado, Calle V #941 y Av. A, Quito
 Tel: 02-2490575/02-2492148/0984-034148
 info@agrarprojeKT.com
 www.agrarprojeKT.com

INFORME: ANÁLISIS DE ABONO ORGÁNICO SÓLIDO

PT0901.REV01

Pág 1/2

Código AgrarprojeKT:	DGE-181023	Informe de Ensayo N°	1766
Fecha de recepción:	18-10-23	Fecha de Informe:	30-10-23

DATOS DEL CLIENTE			
Cliente:			
Solicitado por:			
Ubicación:	Ibarra	Teléfono:	

PROCESO DE ANÁLISIS
<p>Método utilizado para la preparación de la muestra: Conductividad Eléctrica (C.E) y pH: Preparación del Extracto Según Método Volumen 1:1½ (Reglamento de Holanda para Sustratos) Contenido Total de Nutrientes: Secado de la muestra a ensayar hasta 0 % de humedad - Determinación del % Materia Seca - Trituración de la muestra a ensayar ("40 mesh") - Incineración - Dilución en "Agua Regia".</p>

MÉTODOS DE REFERENCIA UTILIZADOS	
PARÁMETROS	MÉTODO
Materia Seca	AOAC 930.04
Humedad	AOAC 930.04
Densidad (materia fresca)	Gravimetrico
Densidad Aparente	Gravimetrico
pH	EPA 9045 D
Conductividad (C.E.)	SM 2510 B
Materia Orgánica (L.O.I., "Loss on Ignition")	AOAC 967.05 / DIN 19684-3
Carbono (C)	AOAC 967.05
Nitrógeno Total Kjeldahl (N-Total)	AOAC 978.04
Fósforo (P)	SM 4500-P C
Potasio (K)	SM 3500-K B / AOAC 975.03
Magnesio (Mg)	AOAC 975.03
Calcio (Ca)	AOAC 975.03
Sodio (Na)	SM 3500-Na B
Hierro (Fe)	AOAC 975.03
Manganeso (Mn)	AOAC 975.03
Cobre (Cu)	AOAC 975.03
Zinc (Zn)	AOAC 975.03
Boro (B)	AOAC 982.01



INFORME DE RESULTADOS DE PRUEBAS DE PODER CALORÍFICO

El presente informe tiene como objetivo presentar los resultados obtenidos en las pruebas de poder calorífico realizadas en LABORATORIO DE INVESTIGACIONES AMBIENTALES-LABINAM, en donde se realizaron el análisis de poder calorífico al carbón natural obtenido de biomasa de papa, maíz y caña.

Procedimiento

Las pruebas se realizaron utilizando una muestra de 5 gramos, la cual fue sometida a un proceso de combustión controlada en un calorímetro de combustión en la maquina LECO-500 los resultados obtenidos se muestran en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1.

Ensayos de muestras para obtención de poder calorífico

Nombre	Masa(gr)	Método	CV(MJ/KG)	Longitud de fusible
BiocharMaiz1	0,53400	Podas	32,7388	10,0
BiocharMaiz2	0,55030	Podas	38,0831	10,0
BiocharMaiz3	0,55320	Podas	35,8901	10,0
BiocharCaña1	0,55100	Podas	27,2058	10,0
BiocharCaña2	0,58040	Podas	27,4159	10,0
BiocharCaña3	0,59200	Podas	28,6979	10,0
BiocharPapa1	0,58730	Podas	22,4828	10,0
BiocharPapa2	0,54670	Podas	26,1904	10,0
BiocharPapa3	0,57560	Podas	23,8598	10,0

Cómo se puede observar en la tabla, se obtuvieron resultados consistentes y reproducibles para cada muestra analizada en base a la desviación estandar.

Las pruebas realizadas en el laboratorio LABINAM han permitido obtener resultados precisos y confiables sobre el poder calorífico de la muestra analizada. Donde el docente investigador Juan Carlos García PhD certifica los resultados presentados en este informe.



JUAN CARLOS GARCIA
HERNANDEZ

Elaborado por: Juan Carlos García PhD

Anexo 4. Tabla de valores de poder calorífico de combustibles obtenido de [33].

	Density			Higher Heating Value (HHV)						Lower Heating Value (LHV)			
	[kg/l]	[kg/gal]	[kWh/kg]	[MJ/kg]	[Btu/lb]	[MJ/l]	[Btu/gal]	[kWh/kg]	[MJ/kg]	[Btu/lb]	[MJ/l]	[Btu/gal]	
Ammonia				22,5	9690								
Hydrogen	0,09	2,55	39,4	141,7	60920	12,7	341	33,3	120,0	51591	10,8	290	
Methane	0,716	20,3	15,4	55,5	23874	39,8	1069	13,9	50,0	21496	35,8	964	
Natural gas (US market)*	0,777	22	14,5	52,2	22446	40,6	1090	13,1	47,1	20262	36,6	983	
Liquid fuels	[kg/l]	[kg/gal]	[kWh/kg]	[MJ/kg]	[Btu/lb]	[MJ/l]	[Btu/gal]	[kWh/kg]	[MJ/kg]	[Btu/lb]	[MJ/l]	[Btu/gal]	
Acetone	0,787	2,979	8,83	31,8	13671	25	89792	8,22	29,6	12726	23,3	83580	
Butane	0,601	3,065	13,64	49,1	21109	29,5	105875	12,58	45,3	19475	27,2	97681	
	0,81		10,36	37,3	16036	30,2	108359	9,56	34,4	14789	27,9	99934	
Diesel fuel*	0,846	3,202	12,67	45,6	19604	38,6	138412	11,83	42,6	18315	36	129306	
Dimethyl ether (DME)	0,665	2,518	8,81	31,7	13629	21,1	75655	8,03	28,9	12425	19,2	68973	
Ethane	0,572	2,165	14,42	51,9	22313	29,7	106513	13,28	47,8	20550	27,3	98098	
Ethanol (100%)	0,789	2,987	8,25	29,7	12769	23,4	84076	7,42	26,7	11479	21,1	75583	
Diethyl ether (ether)	0,716	2,71	11,94	43	18487	30,8	110464						
Gasoline (petrol)*	0,737	2,79	12,89	46,4	19948	34,2	122694	12,06	43,4	18659	32	114761	
Gas oil (heating oil)*	0,84	3,18	11,95	43	18495	36,1	129654	11,89	42,8	18401	36	128991	
Glycerin	1,263	4,781	5,28	19	8169	24	86098						
Heavy fuel oil*	0,98	3,71	11,61	41,8	17971	41	146974	10,83	39	16767	38,2	137129	
Kerosene	0,821	3,108	12,83	46,2	19862	37,9	126663	11,94	43	18487	35,3	126663	
Light fuel oil*	0,96	3,634	12,22	44	18917	42,2	151552	11,28	40,6	17455	39	139841	
LNG*	0,428	1,621	15,33	55,2	23732	23,6	84810	13,5	48,6	20894	20,8	74670	
LPG*	0,537	2,033	13,69	49,3	21195	26,5	94986	12,64	45,5	19561	24,4	87664	
Marine gas oil*	0,855	3,237	12,75	45,9	19733	39,2	140804	11,89	42,8	18401	36,6	131295	
Methanol	0,791	2,994	6,39	23	9888	18,2	65274	5,54	19,9	8568	15,8	56562	
Methyl ester (biodiesel)	0,888	3,361	11,17	40,2	17283	35,7	128062	10,42	37,5	16122	33,3	119460	
MTBE	0,743	2,811	10,56	38	16337	28,2	101244	9,75	35,1	15090	26,1	93517	
Oils vegetable (biodiesel)*	0,92	3,483	11,25	40,5	17412	37,3	133684	10,5	37,8	16251	34,8	124772	
Paraffin (wax)*	0,9	3,407	12,78	46	19776	41,4	148538	11,53	41,5	17842	37,4	134007	
Pentane	0,63	2,385	13,5	48,6	20894	30,6	109854	12,6	45,4	19497	28,6	102507	
Petroleum naphtha*	0,725	2,745	13,36	48,1	20679	34,9	125145	12,47	44,9	19303	32,6	116819	
Propane	0,498	1,885	13,99	50,4	21647	25,1	89963	12,88	46,4	19927	23,1	82816	
Residual oil* Tar*	0,991	3,752	10,00	36,0	15477	41,8	150072	10,97	39,5	16982	39,2	140470	
Turpentine	0,865	3,274	12,22	44	18917	38,1	136555						
Solid fuels*			[kWh/kg]	[MJ/kg]	[Btu/lb]			[kWh/kg]	[MJ/kg]	[Btu/lb]			
Bituminous coal			8,39	30,2	12984			8,06	29	12468			
Carbon			10,89	39,2	14101								
Charcoal			8,22	29,6	12726			7,89	28,4	12210			
Coke			7,22	26	11178								

Anexo 6.Recolección de muestras de residuos agrícolas.



Anexo 7. Residuos agrícolas.



Anexo 8. Introducción de muestras en reactor de Pirólisis.



Anexo 9. Montaje de reactor de pirólisis.



Anexo 10. Encendido de reactor de pirólisis.



Anexo 11. Muestras de Biochar obtenidas.



Anexo 12. Trituración de muestras de Biochar.



Anexo 13. Etiquetado de muestras.



Anexo 14. Gramaje de muestras etiquetadas.



Anexo 15. Colocación de muestras en cámara de combustión.



Anexo 16. Colocación de muestras en calorímetro.



Anexo 17. Realización de pruebas de poder calorífico.

