

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TESIS PARA OBTENER  
EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL**

**EVALUACIÓN DEL PODER CALORÍFICO DE  
BRIQUETAS DE BIOCHAR OBTENIDO A PARTIR DE  
RESIDUOS ORGÁNICOS**

**Autora: Bach. Yesica Montenegro Santillan**

**Asesor: Mg. Wildor Gosgot Angeles**

**Registro:.....**

**CHACHAPOYAS – PERÚ**

**2022**

## **DATOS DEL ASESOR**

Mg. Wildor Gosgot Angeles

DNI N°: 70156443

Registro ORCID: 0000-0002-7301-2809

<https://orcid.org/0000-0002-7301-2809>

Campo de la Investigación y el Desarrollo OCDE

1.05.00 – Ciencias de la Tierra, Ciencias ambientales

1.05.08 – Ciencias del medio ambiente

## DEDICATORIA

A mis padres Lider Montenegro Loja y Ester Santillan Saldaña, por entregarme sus corazones llenos de amor verdadero, por guiar mi camino con sus consejos, ejemplo e integridad, son mi más grande impulso para lograr mis sueños.

**¡Los amo!**

A mis hermanos Tabita y Lenin, porque han sido un obsequio en mi vida y por darme el placer y el orgullo de estar dentro de sus corazones.

A mi familia y amigos por creer en mí.

*Yesica Montenegro Santillan*

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, que ha sido bueno conmigo, hasta aquí me ha ayudado y en su infinita misericordia lo seguirá haciendo.

Al ingeniero Wildor Gosgot Angeles, por su asesoramiento, paciencia, tiempo y dedicación, a lo largo de la elaboración de este trabajo.

A mis docentes, que a lo largo de estos años han compartido sus conocimientos y han sido guía en mi camino.

A mis familiares, amigos y compañeros que me han brindado su apoyo.

Al equipo técnico del Proyecto de Centro de Investigación en Climatología y Energías Alternativas (PROCICEA) de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza por brindarme la oportunidad de formar parte de su equipo de trabajo.

**AUTORIDADES UNIVERSITARIAS**

**Dr. POLICARPIO CHAUCA VALQUI  
RECTOR**

**Dr. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN  
VICERRECTOR ACADÉMICO**

**Dra. FLOR TERESA GARCÍA HUAMÁN  
VICERRECTORA DE INVESTIGACIÓN**

**Ph. D. RICARDO EDMUNDO CAMPOS RAMOS  
DECANA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

## VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS



**UNTRM**

### REGLAMENTO GENERAL

PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE  
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

### ANEXO 3-K

#### VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

El que suscribe el presente, docente de la UNTRM (X)/Profesional externo ( ), hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada Evaluación del poder calorífico de briquetas de biochar obtenido a partir de residuos orgánicos del egresado Bachiller Yesica Monteregro Sandillan de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de esta Casa Superior de Estudios.

El suscrito da el Visto Bueno a la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de observaciones que formulen en Acta en conjunto, y estar presente en la sustentación.

Chachapoyas, 23 de Junio del 2022

Firma y nombre completo del Asesor

Wilder Bosgot Angeles



## **JURADO EVALUADOR**

### **JURADO EVALUADOR**



---

**M.Sc. ELI PARIENTE MONDRAGÓN**

**Presidente**



---

**M.Sc. GINO ALFREDO VERGARA MEDINA**

---

**Secretario**



---

**M.Sc. JEFFERSON FITZGERALD REYES FARJE**

**Vocal**

# CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS



**UNTRM**

**REGLAMENTO GENERAL**  
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE  
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

## ANEXO 3-Q

### CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

Los suscritos, miembros del Jurado Evaluador de la Tesis titulada:

Evaluación del poder calorífico de briquetas de biochar obtenido  
a partir de residuos orgánicos

presentada por el estudiante ( ) /egresado (X) Yesica Montenegro Santillan

de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

con correo electrónico institucional 7190053551 @untrm.edu.pe

después de revisar con el software Turnitin el contenido de la citada Tesis, acordamos:

- a) La citada Tesis tiene 18 % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es menor (X) / igual ( ) al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM.
- b) La citada Tesis tiene \_\_\_\_\_ % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es mayor al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM, por lo que el aspirante debe revisar su Tesis para corregir la redacción de acuerdo al Informe Turnitin que se adjunta a la presente. Debe presentar al Presidente del Jurado Evaluador su Tesis corregida para nueva revisión con el software Turnitin.



Chachapoyas, 20 de Julio del 2022

  
SECRETARIO

  
PRESIDENTE

  
VOCAL

OBSERVACIONES:

.....  
.....

# ACTA DE SUSTENTACIÓN



## ANEXO 3-5

### ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Chachapoyas, el día 14 de Septiembre del año 2022, siendo las 11 horas, el aspirante: Bach. Yesica Montenegro Santillan, asesorado por Mg. Wilder Gasset Argeles defiende en sesión pública presencial (X) / a distancia ( ) la Tesis titulada: Evaluación del poder calorífico de briqueta de biochar obtenido a partir de residuos orgánicos para obtener el Título Profesional de Ingeniería Ambiental a ser otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas; ante el Jurado Evaluador, constituido por:

Presidente: MSc Eli Poriente Moradragón

Secretario: MSc Gino Alfredo Vergara Medina

Vocal: MSc Jefferson Fitzgerald Reyes Farje



Procedió el aspirante a hacer la exposición de la Introducción, Material y métodos, Resultados, Discusión y Conclusiones, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la Tesis presentada, los miembros del Jurado Evaluador pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones y objeciones consideraron oportunas, las cuales fueron contestadas por el aspirante.

Tras la intervención de los miembros del Jurado Evaluador y las oportunas respuestas del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los presentes en el acto de sustentación, para que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

Seguidamente, a puerta cerrada, el Jurado Evaluador determinó la calificación global concedida a la sustentación de la Tesis para obtener el Título Profesional, en términos de:

Aprobado (X) por Unanimidad ( ) / Mayoría ( ) Desaprobado ( )

Otorgada la calificación, el Secretario del Jurado Evaluador lee la presente Acta en esta misma sesión pública. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las 12:30 horas del mismo día y fecha, el Jurado Evaluador concluye el acto de sustentación de la Tesis para obtener el Título Profesional.

  
SECRETARIO

  
PRESIDENTE

  
VOCAL

OBSERVACIONES:

## ÍNDICE GENERAL

DATOS DEL ASESOR .....	i
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
AUTORIDADES UNIVERSITARIAS .....	iv
VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS .....	v
JURADO EVALUADOR .....	vi
CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS .....	vii
ACTA DE SUSTENTACIÓN .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
I. INTRODUCCIÓN.....	13
II. MATERIAL Y MÉTODOS .....	15
2.1. Ubicación del estudio.....	15
2.2. Residuos orgánicos domiciliarios .....	16
2.6. Elaboración del biochar .....	18
2.5. Producción de briquetas de biochar .....	18
2.5.1. Trituración del biochar .....	18
2.5.2. Aglomerantes para la elaboración de las briquetas .....	19
2.5.3. Elaboración de las briquetas de biochar .....	20
2.5.4. Compactación de las briquetas de biochar .....	21
2.8. Poder calorífico de las briquetas de biochar .....	21
III. RESULTADOS .....	23
3.1. Biochar solar.....	23
3.2. Briquetas de biochar .....	24
3.3. Prueba de encendido .....	25
3.4. Prueba de combustión.....	26
3.4. Poder Calorífico.....	28
IV. DISCUSIÓN .....	30
V. CONCLUSIONES .....	33
VI. RECOMENDACIONES.....	34
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	35
Anexo .....	40
Anexo1: Resultados de laboratorio del poder calórico de las briquetas .....	40

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Producción de biochar respecto a la irradiancia .....	23
<b>Tabla 2.</b> Propiedades físicas de las briquetas de biochar más aglomerantes .....	24
<b>Tabla 3.</b> Tiempo de encendido de los combustibles sólidos evaluados.....	25
<b>Tabla 4.</b> Prueba de combustión de los combustibles sólidos evaluados .....	26
<b>Tabla 5.</b> Poder calorífico de las briquetas de biochar más aglomerantes .....	28

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación de la realización del estudio.....	15
<b>Figura 2.</b> Cascaras de frijol, alverja, calabaza, plátano y yuca en verde .....	16
<b>Figura 3.</b> Cascaras picadas de frijol, alverja, calabaza, plátano y yuca.....	17
<b>Figura 4.</b> Cascaras secadas de plátano y frijol.....	17
<b>Figura 5.</b> Cocina solar utilizada para pirolizar los residuos orgánicos .....	18
<b>Figura 6.</b> Trituración del biochar .....	18
<b>Figura 7.</b> Obtención de la fécula de yuca .....	19
<b>Figura 8.</b> Arcilla.....	20
<b>Figura 9.</b> Elaboración de la briqueta de biochar .....	20
<b>Figura 10.</b> Prensa mecánica utilizada para compactación de las briquetas .....	21
<b>Figura 11.</b> Prueba de encendido de los combustibles sólidos.....	21
<b>Figura 12.</b> Prueba de combustión de los combustibles sólidos .....	22
<b>Figura 13.</b> Biochar solar producido .....	23
<b>Figura 14.</b> Briquetas de biochar con aglomerante de fécula de yuca (superior) y arcilla (inferior).....	24
<b>Figura 15.</b> Los combustibles sólidos encendidos en su totalidad .....	25
<b>Figura 16.</b> Los combustibles sólidos recién encendidos.....	25
<b>Figura 17.</b> Pruebas de ebullición de un litro de agua con los combustibles sólidos.....	26
<b>Figura 18.</b> Incidencia de emisión de humo de los combustibles sólidos.....	27
<b>Figura 19.</b> Cenizas generadas por los combustibles sólidos.....	27
<b>Figura 20.</b> Potencial poder calorífico de los combustibles sólidos.....	28

## RESUMEN

Una alternativa sostenible de valorización energética de los residuos orgánicos es a través de la pirolisis solar. Por ello, la investigación se centró en evaluar el poder calorífico de briquetas de biochar a partir de residuos orgánicos domiciliarios (cascaras). Las cascaras fueron sometidos un secado al aire libre hasta alcanzar una humedad relativa del 12 %, para luego, ser pirolizados en una cocina solar con geometría de un concentrador cilindro parabólico y obtener el biochar. Después, se pulverizó el biochar para luego mezclar con aglomerantes naturales (fécula de yuca y arcilla). La relación de mezcla de 4:1 de materia prima y aglomerante fue agregada agua y dicha mezcla fue compactada en una prensa mecánica manual. Se obtuvo briquetas de forma cilíndricas que fueron secas hasta una humedad 12 %. De ahí, se realizó prueba de encendido, combustión y poder calorífico principalmente. Los resultados determinan que la briqueta de biochar mas fécula de yuca se enciende en menor tiempo que la briqueta de biochar más arcilla y el carbón vegetal. Así también, al poder calorífico superior, la briqueta de biochar más fécula de yuca presenta un valor de 4750.75 kcal/kg respecto al 4287.16 kcal/kg de la briqueta de biochar con arcilla, en consecuencia, poder calorífico útil es mayor. Dichos valores, son similares al poder caloríficos del carbón vegetal, por lo que, las briquetas elaboradas en el estudio son una alternativa como combustibles sólidos amigables con el ambiente y contribuyen a una gestión de residuos orgánicos que impulsa la transición energética sostenible.

**Palabras claves:** pirolisis, solar, arcilla, fécula de yuca

## **ABSTRACT**

A sustainable alternative for energy recovery from organic waste is through solar pyrolysis. Therefore, the research focused on evaluating the calorific value of biochar briquettes from household organic waste (husks). The husks were dried in the open air until they reached a relative humidity of 12%, and then pyrolyzed in a solar stove with the geometry of a parabolic cylinder concentrator to obtain biochar. The biochar was then pulverized and mixed with natural binders (cassava starch and clay). Water was added to the 4:1 ratio of raw material and binder, and the mixture was compacted in a manual mechanical press. Cylindrical briquettes were obtained and dried to a humidity of 12%. From there, ignition, combustion and calorific value tests were carried out. The results show that the briquette of biochar plus cassava starch ignites in less time than the briquette of biochar plus clay and charcoal. Also, at the higher calorific value, the biochar plus cassava starch briquette presents a value of 4750.75 kcal/kg compared to 4287.16 kcal/kg of the biochar briquette with clay, consequently, the useful calorific value is higher. These values are similar to the calorific value of charcoal; therefore, the briquettes produced in the study are an alternative as environmentally friendly solid fuels and contribute to organic waste management, promoting a sustainable energy transition.

**Keywords:** pyrolysis, solar, clay, cassava starch

## I. INTRODUCCIÓN

El sistema de gestión de residuos se orientan a la valorización de materiales, energía y la correcta eliminación de los residuos, para reducir los efectos del cambio climático (Cerdá, 2012). La tecnología de valoración se elige no solo en función a los costos que esta demande, a la recuperación de energía, o a la capacidad de degradación del residuo, sino también que orientada a la búsqueda de la sostenibilidad ambiental durante el proceso de tratamiento (Kumar & Samadder, 2017).

Por ello, han surgido diferentes tecnologías de valorización como las biológicas y térmicas. Entre las tecnologías biológicas compostaje y la digestión anaeróbica son las más utilizadas, pero, ambos procesos el tiempo de degradación lleva días y/o mes (Li, Zhou, & Wang, 2017). En cambio, en la valorización térmica, los residuos pasan por procesos termoquímicos, endotérmicos y exotérmicos como es el secado, desvolatilización, reducción y oxidación de volátiles, en las cuales los residuos son transformados en minutos y/o horas. Las técnicas termoquímicas para la conversión de residuos sólidos se pueden clasificar en tres categorías generales: pirólisis, combustión y gasificación (Sindhu et al., 2019).

La pirólisis es la descomposición térmica de residuos en ausencia de oxígeno que produce productos gaseosos, líquidos y sólidos (Chhabra, Shastri, & Bhattacharya, 2016; Bridgwater, 2018). Esta tecnología permite la recuperación, facilita el transporte, almacenamiento y aprovechamiento de los residuos, además, es de fácil y bajo costo de operación y mantenimiento (Czajczyńska et al., 2017; Zaman et al., 2017). Por ello, la pirólisis se considerada como una de las soluciones sostenibles en la gestión y valorización de los residuos (Grycová et al., 2016). La pirólisis convierte la biomasa en tres sub productos: líquidos (bio-aceite), sólido (biocarbón) productos gaseosos que comprenden CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> (Chen et al., 2018; Hu & Gholizadeh, 2019).

Es así que, existen múltiples trabajos de valorización de residuos sólidos a través de pirólisis. Por ejemplo, Waqas et al.(2018), utilizaron pirolisis lenta, para desintegrar térmicamente la biomasa vegetal en intervalos de temperatura entre los 200 y 300 °C, logrando mejorar las propiedades del producto sólido como combustible para aprovechamiento térmico. De igual manera Emiro & Vargas, (2016), elaboró carbón, utilizando pirolisis lenta, con residuos vegetales del cultivo de *Elaeis guineensis* (palma aceitera) con temperaturas entre los 300°C y 500°C.

También, se investigaron el aprovechamiento residuos agroindustriales del bagazo de caña, polvillo de fique, afrecho de yuca y sus mezclas, logrando determinar que la muestra compuesta por 60% de afrecho de yuca, 30% de polvillo de fique y 10% de bagazo de caña es la más óptima para su aprovechamiento en hornos y calderas. Además, se utilizaron los residuos de la cosecha del cacao para elaborar pellets compuestos por cáscara de cacao-aserrín logrando disminuir las emisiones de compuestos de nitrógeno y azufre (Andrés & Núñez, 2012; Muñoz, Cuatin, & Pantoja, 2013).

Por otro lado Obando (2015), diseñó un equipo de pirolisis lenta para transformar la cascarilla de arroz en un combustible sólido térmicamente aprovechable, adicionalmente este equipo, permite la condensación de los gases provenientes de la pirolisis. De la misma manera Medina-Orozco,(2018) construyeron un equipo de capacidad de transformación entre 300 y 400 kg de desechos de aguacate a biocarbón , con una temperatura de operación entre los 360 a 700 °C.

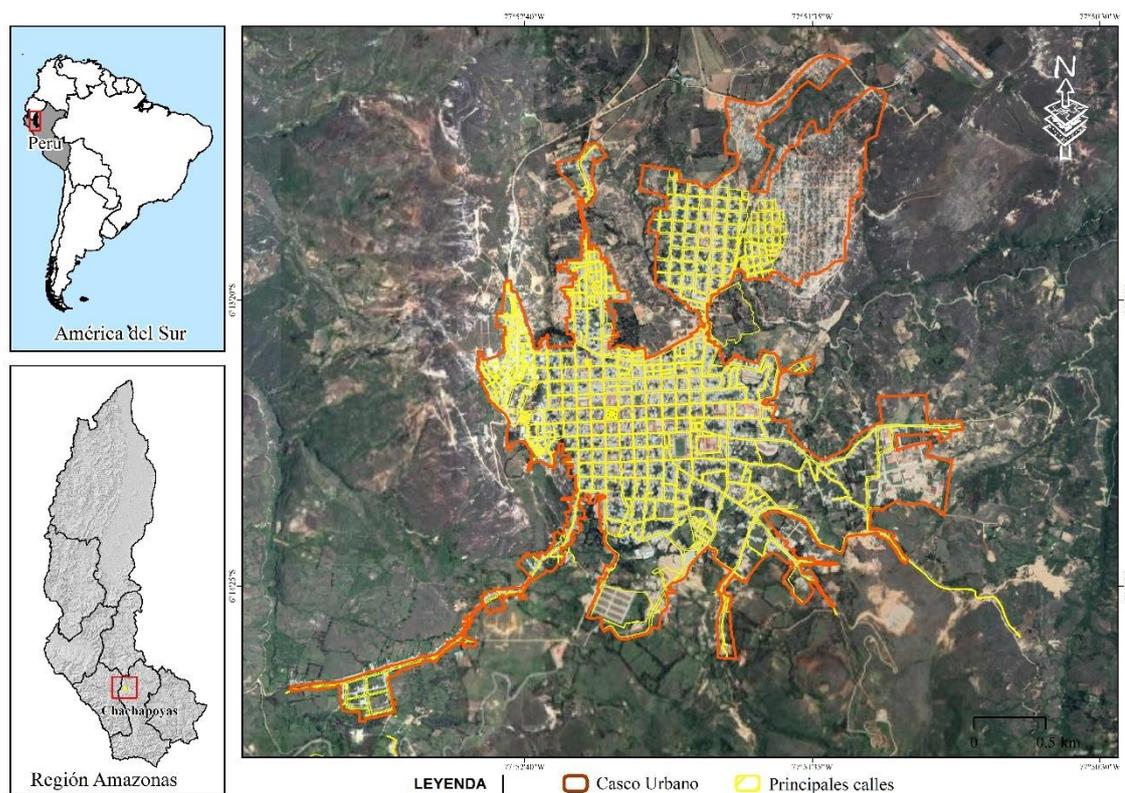
Después del proceso de pirólisis, Berastegui et al., (2017), evaluó briquetas de tuza de maíz en donde el poder calorífico de la biomasa adicionando carbón mineral sin que se aumente significativamente el porcentaje de azufre. Se obtuvieron briquetas con resistencia a la compresión de 223,7 kgf, durabilidad de 97,3%, poder calorífico de 17,5 MJ/kg y un porcentaje de azufre de 0,4%. Así mismo, Tumutegyereize, Mugenyi, Ketlogetswe, & Gandure, (2016) realizaron un estudio comparativo entre briquetas obtenidas a partir de restos de banano y residuos domésticos con el carbón vegetal comercial, los rangos de poder calorífico que se alcanzaron las briquetas con residuos fueron de 4663 - 6517 kcal/kg.

Entonces, a partir de ello, la investigación se enfocó en determinar el poder calorífico de briquetas de biochar a partir de residuos orgánicos domésticos (cascara de frijol, alverja, yuca, plátano y calabaza) utilizando como aglomerante fécula de yuca y arcilla. Para lo cual, se realizó una pirolisis solar para obtener el biochar y a través de una prensa mecánica se elaboró las briquetas, para luego, se realizó pruebas de encendido, combustión y contenido energético a cada una de las muestras obtenidas.

## II. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Ubicación del estudio

El estudio se desarrolló en la ciudad de Chachapoyas en la región Amazonas (Figura 1), esta ciudad se caracteriza por tener una temperatura promedio de 19 °C, las épocas lluviosas son en los meses de noviembre a abril y la época seca en los meses de mayo a octubre (Rascón et al., 2020).



**Figura 1.** Ubicación de la realización del estudio

## 2.2. Residuos orgánicos domiciliarios

Los residuos orgánicos fueron recolectados del domicilio de la tesista. Los cuales fueron segregados según su tipo de consistencia, de los cuales, se utilizaron cascara de frijol 30.5 kg, papa 1 kg, alverja 1kg, yuca 1kg, plátano 4 kg, calabaza 0.5 kg (Figura 2). Después, se procedió a cortar cada una de las cascaras en trozos de 1 cm (Figura 3), con la finalidad de disminuir la densidad. Por último, las cascaras fueron secados al aire libre hasta alcanzar una humedad del 10 % respecto al peso inicial (Figura 4).



**Figura 2.** Cascaras de frijol, alverja, calabaza, plátano y yuca en verde



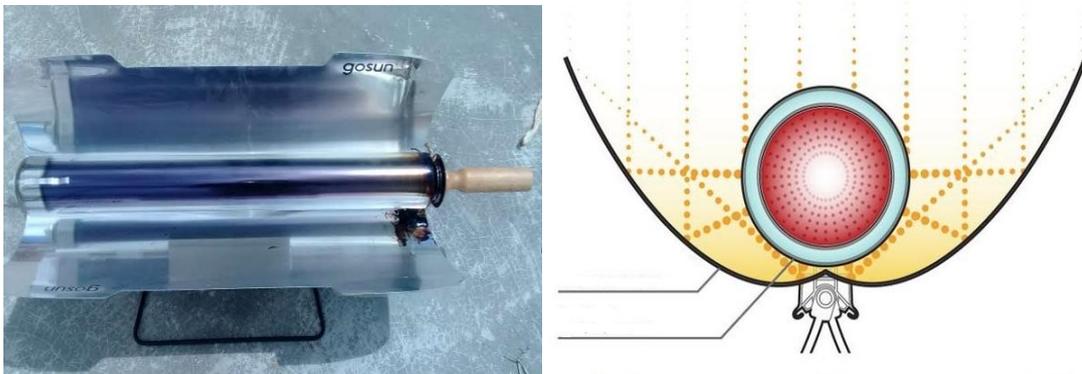
**Figura 3.** Cascaras picadas de frijol, alverja, calabaza, plátano y yuca



**Figura 4.** Cascaras secadas de plátano y frijol

## 2.6. Elaboración del biochar

La elaboración del biochar se realizó a través de la pirolisis solar como lo propuesto por Zeng et al., (2017). Para ello, se utilizó una cocina solar GOSUN SPORT, la cual consta con reflectores de aluminio anodizados de grado industrial y patas de acero inoxidable que funcionan como asas de transporte y una bandeja de cocina de acero inoxidable en donde se deposita los residuos orgánicos. El funcionamiento del pirolizador solar consiste en que la luz del sol se enfoca mediante los reflectores parabólicos compuestos en el tubo, calentando la cámara pirolizadora. El tubo de vacío actúa como un aislante casi perfecto, convirtiendo más del 80% de los rayos del Sol en calor utilizable (Figura 5).



**Figura 5.** Cocina solar utilizada para pirolizar los residuos orgánicos

## 2.5. Producción de briquetas de biochar

### 2.5.1. Trituración del biochar

La producción de briquetas se inició con la pulverización del biochar con un molino mecánico de granos, para luego, tamizarlo a través de una malla de 2 mm para homogenizar el diámetro de las partículas del biochar.



**Figura 6.** Trituración del biochar

### 2.5.2. Aglomerantes para la elaboración de las briquetas

Para lograr la aglomeración de las partículas de biochar, se utilizó dos aglomerantes naturales que se describen a continuación:

- A) **Fécula de yuca:** para obtener la fécula de yuca se procedió a quitar la cascara, luego rayar y luchar la yuca para luego dejarlo reposar un 1 kg de yuca con 2 L de agua por 24 horas. Después se exprimió el agua de la mezcla para luego dejarlo secar a temperatura ambiente, por último, el sólido se pasó por un tamiz de 2 mm para obtener la fécula.



**Figura 7.** Obtención de la fécula de yuca

- B) **Arcilla:** La arcilla fue obtenida del distrito de Huancas, del lugar donde utilizan los alfareros, para elaborar sus artesanías como vasijas y ollas. Para utilizar esta arcilla como aglomerante se procedió como lo indica Lubwama & Yiga, (2018). Se trabajó con un 1 kg de arcilla, la cual se pulverizó y se puso a remojar por 48 horas y después se amasó hasta que se quedara una mezcla compactada y no se pegara a ninguna superficie.



**Figura 8.** Arcilla

### **2.5.3. Elaboración de las briquetas de biochar**

Para la elaboración de biochar, se mezcló el biochar molino con el aglomerante en relación 4:1, es decir por cada 1kg de biochar se agrega 0.25 kg de fécula de yuca o arcilla. Se mezcla de forma uniforme, después, se agrega 250 ml de agua caliente (40 °C en promedio), se remueve la mezcla hasta uniformizarlo. Luego, se toma 150 g de la mezcla y se realiza porciones en forma redonda para someterlo a la compactación de la briqueta.



**Figura 9.** Elaboración de la briqueta de biochar

#### 2.5.4. Compactación de las briquetas de biochar

Para la compactación de la mezcla de biochar más los aglomerantes, se utilizó un prensa mecánica de metal, la cual se diseñó y construyó para la investigación, siguiendo lo establecido por Granado et al., (2021). La prensa tiene molde cilíndrico de acero con un diámetro interno de 50 mm y una altura de 120 mm. Para el proceso de densificación, se introdujeron 200 g de material en el molde (Figura 10). Se aplicó presión con la prensa tras un determinado intervalo de tiempo de 3 minutos.



**Figura 10.** Prensa mecánica utilizada para compactación de las briquetas

#### 2.8. Poder calorífico de las briquetas de biochar

Para las pruebas de poder calorífico de las briquetas de biochar con los dos aglomerantes utilizados, además, del carbón comercial se utilizó las pruebas realizadas por Osei et al., (2020):

**Prueba de encendido:** El tiempo que tardan los combustibles en empezar a arder (tiempo de ignición) se registró con un cronómetro. Las briquetas se encendieron con unas servilletas con aceite.



**Figura 11.** Prueba de encendido de los combustibles sólidos

**Prueba de combustión:** La prueba de combustión se realizó con agua hirviendo (prueba de ebullición del agua), utilizando materiales y estufas trípode tradicionales en una casa rural típica para simular las condiciones normales de cocción. El experimento se repitió tres veces y se tomaron los valores medios. El agua de 1000 ml de volumen a una temperatura inicial de 17 °C se midió en una olla de cocción. Cinco briquetas que pesaban inicialmente 500 g se colocaron en la estufa de cocción (Figura 12).



**Figura 12.** Prueba de combustión de los combustibles sólidos

**Poder Calorífico:** El contenido energético de las briquetas de biochar con aglomerante de arcilla y fécula de yuca han sido evaluado en una bomba calorimétrica ALEMMAR Modelo KL-5, cuya metodología fue basada en el manual de instrucciones del calorímetro y adaptada la norma ABNT-NBR 8633. Las muestras fueron enviadas al Laboratorio de Residuos Sólidos e Compuestos del Departamento de Recursos Naturales de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad Estatal Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) en Campus de Botucatu Sao Paulo.

### III. RESULTADOS

#### 3.1. Biochar solar

El biochar obtenido fue a través de pirolisis lenta, ya que, en sistema utilizado se logró alcanzar hasta 320 °C. La cantidad de residuos seco sometido a la pirolisis fue de 200 g y después del proceso pirolítico se obtuvo 20 g de biochar. El tiempo de sometimiento de los residuos a pirolisis dependió de la irradiancia solar, por ello, los experimentos se realizaron desde las 10 am hasta 3:00 pm con la finalidad de aprovechar una irradiancia superior a los 600 W/m<sup>2</sup>, sin embargo, hubo días que presentaron nubosidad por lo cual el tiempo de pirolisis supero los 60 minutos, mientras que, cuando se tenía un buen brillo solar el intervalo de tiempo de pirolisis fue en promedio de 30 minutos. Después de la pirolisis se retiró el biochar y se dejó enfriar al aire libre aproximadamente por 20 minutos.

**Tabla 1.** Producción de biochar respecto a la irradiancia

<b>Irradiancia solar</b>	<b>Temperatura de pirolisis</b>	<b>Tiempo de pirolisis</b>	<b>Cantidad de residuos orgánicos secos</b>	<b>Cantidad de biochar</b>
600 – 800 W/m <sup>2</sup>	300 °C	60 minutos	200 g	20 g
800 a más W/m <sup>2</sup>	320 °C	30 minutos	200 g	20 g



**Figura 13.** Biochar solar producido

### 3.2. Briquetas de biochar

Las briquetas obtenidas fueron de forma cilíndrica cuyo diámetro fue de 5.5 cm y una altura de 3 cm. Todas briquetas tienen la misma forma, tanto, para las briquetas con fécula de yuca y la de arcilla. Por otra parte, el peso en seco (al 12 % de humedad) de la briqueta con arcilla es mayor que con la fécula de yuca y, por ende, esto influye en la densidad como se muestra en la Tabla 2 y figura 14.

**Tabla 2.** Propiedades físicas de las briquetas de biochar más aglomerantes

Propiedades físicas	Briqueta de biochar más fécula de yuca	Briqueta de biochar más arcilla
Peso en seco	100 g	110 g
Volumen	71.3 cm <sup>3</sup>	71.3 cm <sup>3</sup>
Densidad	1.4 g/cm <sup>3</sup>	1.5 g/cm <sup>3</sup>



**Figura 14.** Briquetas de biochar con aglomerante de fécula de yuca (superior) y arcilla (inferior).

### 3.3. Prueba de encendido

La prueba de encendido de los combustibles sólidos se realizó teniendo en cuenta las mismas condiciones en donde la briqueta de fécula de yuca tuvo el menor tiempo, respecto a la briqueta de arcilla y el carbón (Tabla 3 y Figura 15). En figura 16, se muestra la forma de encendida de cada uno de los combustibles solidó en la cual se evidencia que la briqueta de biochar más arcilla mantiene su forma, mientras que la briqueta de fécula de yuca y el carbón comercial tiene el mismo comportamiento.

**Tabla 3.** Tiempo de encendido de los combustibles sólidos evaluados

Combustible sólido	Tiempo de encendido
Briqueta de biochar más fécula de yuca	7 minutos
Briqueta de biochar más arcilla	8 minutos
Carbón vegetal	10 minutos



**Figura 15.** Los combustibles sólidos recién encendidos



**Figura 16.** Los combustibles sólidos encendidos en totalidad

### 3.4. Prueba de combustión

El tiempo de ebullición de un litro de agua con los combustibles sólidos evaluados en la investigación se muestra en la Tabla 4. En la cual la briqueta de biochar más fécula de yuca tiene en promedio similar tiempo que el carbón vegetal, mientras, que la briqueta de biochar con arcilla difiere 6 minutos más que el carbón vegetal (Figura 17).

**Tabla 4.** Prueba de combustión de los combustibles sólidos evaluados

Combustible sólido	Tiempo de ebullición de 1 litro de agua
Briqueta de biochar más fécula de yuca	55 minutos
Briqueta de biochar más arcilla	60 minutos
Carbón vegetal	54 minutos

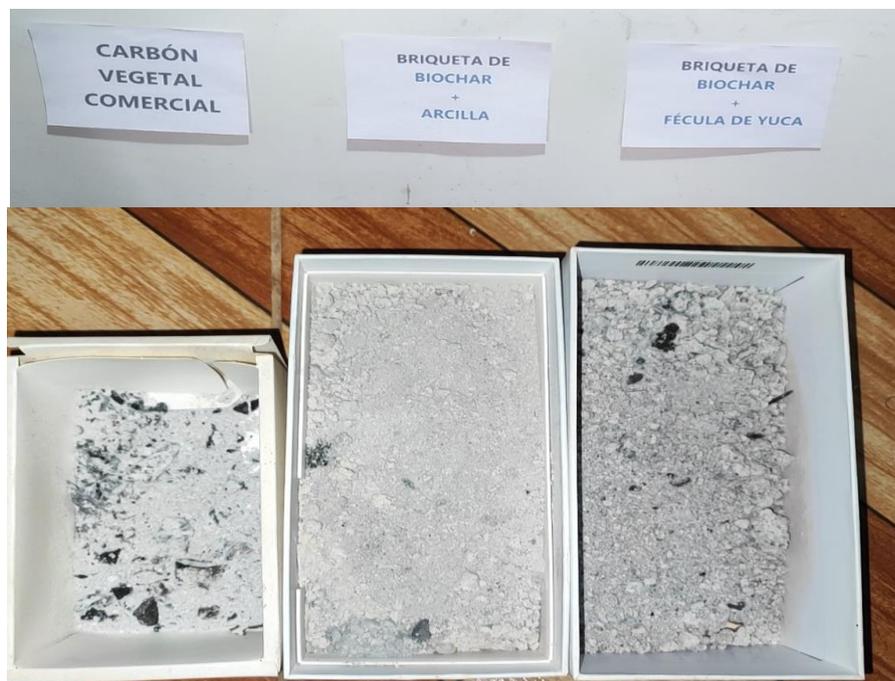


**Figura 17.** Pruebas de ebullición de un litro de agua con los combustibles sólidos

Por otro lado, la figura 18, se muestra la emisión de humo en donde la briqueta de biochar más fécula de yuca tiene mayor incidencia que los otros dos combustibles sólidos, lo cual, se evidencia la superficie del recipiente utilizado en las pruebas de realizada. Por otro lado, la cantidad de ceniza después de la combustión se reporta que la briqueta de biochar más arcilla tiene 300 g/kg, seguido, por la briqueta de biochar mas fécula de yuca con 200 g/kg y por último el carbón vegetal presenta 100 g/kg de combustible (Figura 19).



**Figura 18.** Incidencia de emisión de humo de los combustibles sólidos



**Figura 19.** Cenizas generadas por los combustibles sólidos

### 3.4. Poder Calorífico

El poder calorífico presentado por la briqueta de biochar más fécula de yuca es mayor que la briqueta de biochar más arcilla, lo cual se muestra en la Tabla 5. Esto también se demostró durante la prueba de combustión y es respaldado por las pruebas realizadas, sin embargo; la diferencia de poder útil es muy cercano entre los combustibles elaborados en la investigación. Por último, estos combustibles tienen un potencial muy prometedor para ser utilizado como alternativa del carbón vegetal comercial (Figura 20).

**Tabla 5.** Poder calorífico de las briquetas de biochar más aglomerantes

<b>Propiedades caloríficas</b>	<b>Briqueta de biochar más fécula de yuca</b>	<b>Briqueta de biochar más arcilla</b>
Poder calorífico inferior	4415.95 kcal/kg	3952.36 kcal/kg
Poder calorífico superior	4750.75 kcal/kg	4287.16 kcal/kg
Poder calorífico útil	3679.60 kcal/kg	3312.80 kcal/kg



**Figura 20.** Potencial poder calorífico de los combustibles sólidos

En la tabla 6, se muestra el poder calorífico de briquetas a partir de residuos orgánicos elaborados en diferentes países, cuyos valores caloríficos tienen un rango similar a lo desarrollado en la investigación.

**Tabla 6.** Poder calorífico de briquetas de residuos orgánicos

<b>Briquetas</b>	<b>Poder calorífico (Kcal/kg)</b>	<b>País</b>	<b>Referencias</b>
Cáscara de arroz, almidón de yuca, bentonita y caucho	3499.09 – 4038.88	Perú	(Arévalo et al., 2017)
Cáscara de frutos de palma aceiteras	4261.01 – 4449.7	Colombia	(Cabral et al., 2020)
Cáscara de cítricos (naranja pera, mandarina Ponkan, limón Tahití), cascarilla de arroz y papa amarilla.	3487.15 – 4108.15	Brasil	(Magnago et al., 2020)
Bagazo de caña de azúcar, salvado de arroz	3905.13 – 4478.36	Taiwan	(Navalta et al., 2020)
Residuos del mercado de verduras y aserrín	3343.84 – 3749.88	India	(Afsal et al., 2020)
Aserrín, cáscaras de coco y arroz	5897.11	Ghana	(Akolgo et al., 2021)
Cáscara de arroz y coco	4060.38 – 5015.76	Nigeria	(Umaru Ahmadu et al., 2020)

#### IV. DISCUSIÓN

La creciente demanda de fuentes de energía renovables ha creado interés en fuentes de energía como la energía solar y la biomasa entre otras (Rahman et al., 2022). En esta investigación se aprovechó ambas energías (solar y biomasa) para obtener un valor energético de residuos orgánicos de cascara de cascara de frijol, papa, alverja, yuca, plátano y calabaza, a través, de pirólisis solar. Esta técnica es una forma sostenible de aprovechar la biomasa y, almacenar energía solar intermitente como combustibles solares (gas, biocarbón y bioaceite) (Zeng et al., 2017). Para ello, se utilizó una cocina solar cuyo dispositivo está diseñado en un concentrador parabólico compuesto, con la finalidad de concentrar los rayos solares en el tubo de vidrio de borosilicato y elevar la temperatura en un rango de 300 °C y 320 °C, ya que, para lograr la pirolisis lenta cuya rango se encuentra entre 300 °C y 500 °C (Gosgot et al., 2021).

Los procesos térmicos con caracteres y mecanismos complejos, como la pirólisis, proporcionan un campo para una investigación experimental más sofisticada (Sobek & Werle, 2019). Empero, en esta investigación se basó en experimentos a condiciones reales, es decir, la pirolisis de las cascara dependió de la intensidad de la radiación solar durante los días de experimento y utilizando un sistema comercial, lo que diferencia de otras investigaciones que se basan en diseños exclusivos de los reactores, lo cuales, no es suficiente para llevar la pirólisis solar hacia la comercialización (Ndukwu et al., 2021). Sin embargo, el reactor utilizado (cocina solar) su capacidad es limitado por lo que, es necesario diseñar y construir un sistema con mayor capacidad y además un sistema con almacenamiento de energía calorífica, para cuando varía la irradiancia el proceso no varíe.

Por otro lado, el proceso de fabricación de briquetas, es una técnica de densificación, que mejora la densidad, el tiempo de combustión y el poder calorífico de los combustibles a base de biomasa (Amarasekara et al., 2017). Lo que se realizó en este estudio, en donde se buscó dar una alternativa de valorización energética de residuos que comúnmente no es aplicado convencionalmente. Las briquetas obtenidas fueron de 12 % de humedad mucho mayor a la briqueta realizada por Kongprasert et al. (2019) con biocarbon de residuos agrícolas mezclado con madera de Madan (100%), cuya humedad es menor a 7.8%. La diferencia de la humedad se debe a que las briquetas evaluadas fueron secado al aire libre, mientras, a las briquetas con Madan se fue secado en estufa.

En cuanto, a las densidades de las briquetas de biochar más arcilla es mayor que la briqueta de fécula de yuca debido a que la arcilla tiene mayor peso que la fécula de yuca. Sin embargo, las briquetas estudiados fueron más densas que las reportadas por Akande & Olorunnisola, (2018), dentro del rango de  $0,79 \text{ g/cm}^3$  a  $0,96 \text{ g/cm}^3$  para briquetas de hojas de zanahoria y repollo con papel (como aglomerante), este debido a los tipo los aglomerantes utilizados y la materia prima. De igual importancia, el tiempo de encendido es mucho menor para las briquetas evaluadas que lo obtenida por Osei Bonsu et al.,(2020), cuyo tiempo de encendido es de 9 minutos, pero, todas briquetas se encienden en menor tiempo que el carbón vegetal.

La prueba de combustión de las briquetas se evidencia que el mayor poder calorífico tiene la briqueta de yuca respecto a la briqueta con arcilla como se muestra en la Tabla 5. Estos poderes caloríficos son mayores a lo determinado por Arévalo et al., (2017) para briquetas de arroz de 4040 kcal/kg de poder calorífico y 80.39% de eficiencia de combustión y también, a la briquetas de rizoma de yuca elaborado por Granado et al., (2021) cuyo el poder calorífico superior de 17.12 MJ/kg (4089.04 kcal/kg). Asimismo, las briquetas estudiadas, superan en poder calorífico a la briqueta de cáscara de palmiste carbonizada en Ghana, cuyo valor es de 18.72 MJ/kg (4471.19 kcal/kg), así como también, estos combustibles sólidos tienen similar poder calorífico que el carbón vegetal de 17.5 MJ/kg (4179.8 kcal/kg) como lo reporta Osei Bonsu et al., (2020).

Sin embargo, Ifa et al., (2020), fabricaron briquetas a partir de residuos de cáscara de anacardo obtenidos del sudeste de Sulawesi, Indonesia, cuyo producto tiene un poder calorífico de 29.49 MJ/kg (7043.56 kcal/kg), un contenido de humedad del 5,3%, un contenido de cenizas del 4,96%, un contenido de sustancias volátiles del 17,16% y un contenido de carbono del 72,62%, que cumple con la norma de biobriquetas universalmente aceptada (SNI 016235-2000), japonés, inglés e ISO 17225). De ahí que, las briquetas elaboradas en la investigación se encuentran en proceso de desarrollo para luego poder comercializada, pero, son una alternativa para ser utilizadas como combustibles sólidos en los hogares.

Además que, las briquetas tienen un potencial de mitigación de gases de efecto invernadero, y a la vez proporcionan energía (Ji et al., 2018), es por ello, que se puede usarse como combustibles sólidos para aplicaciones domésticas e industriales (Ajimotokan et al., 2019), ya que, es un biocombustible sólido, que puede transformar grandes cantidades de biomasa lignocelulósica en energía (Bonassa et al., 2018). Por eso se debe, seguir investigando los costes de producción y el análisis económico para preparar la fabricación de un producto comercial (Kongprasert et al., 2019).

Por lo tanto, el uso de briquetas a base de desechos puede apoyar la reducción de los impactos ambientales, la degradación forestal y la deforestación, ofreciendo una nueva fuente de energía e introduciendo otra opción de valorización de residuos en contextos en desarrollo con problemas de gestión de residuos (Ferronato & Torretta, 2019). Por otra parte, debe prestar más atención a los beneficios sociales en relación con la introducción del sistema de fabricación de briquetas como una opción para crear nuevos puestos de trabajo y acciones hacia un pensamiento circular. Además, se debe dar énfasis a la gestión de residuos ya que las briquetas pueden ser una opción alternativa al tratamiento convencional de residuos sólidos (Ferronato et al., 2022).

## V. CONCLUSIONES

- Se ha logrado obtener biochar de cáscara de frijol, papa, alverja, yuca, plátano y calabaza a través de pirolisis solar, para ello, se ha utilizado una cocina solar cuya geometría fue de un concentrador parabólico compuesto. El tiempo del proceso pirolítico dependió directamente de la irradiancia, por la cual, se determinó que la irradiancia debe ser superior a los  $600 \text{ W/m}^2$  para poder pirolizar la materia orgánica.
- Se elaboró briquetas de forma cilíndrica de biochar con aglomerantes de fécula de yuca y arcilla, cuya densidad fue de  $1.4 \text{ g/cm}^3$  y  $1.5 \text{ g/cm}^3$  respectivamente. En cuanto al tiempo de encendido, la briqueta con fécula de yuca tuvo un mejor tiempo que la briqueta de arcilla y el carbón vegetal. Asimismo, en la prueba de combustión la briqueta de yuca tuvo similar comportamiento que el carbón vegetal, sin embargo, presentó mayor tizne en la superficie del recipiente respecto a la briqueta de biochar con arcilla.
- A lo que respecta al poder calorífico superior, la briqueta de biochar más fécula de yuca y briqueta de biochar más arcilla presentan un valor de  $4750.75 \text{ kcal/kg}$  y  $4287.16 \text{ kcal/kg}$  respectivamente, pero, el poder calorífico útil es de  $3679.60 \text{ kcal/kg}$  para la briqueta de biochar más fécula de yuca y  $3312.80 \text{ kcal/kg}$  para la briqueta de biochar más arcilla. Dichos valores, son similares al poder calorífico del carbón vegetal, por lo que, las briquetas elaboradas en el estudio son una alternativa como combustibles sólidos.
- Por último, los resultados obtenidos de las briquetas elaboradas en la investigación, es el primer reporte de combustibles sólidos de partir de residuos sólidos orgánicos procesados con energía solar, contribuyendo, a la gestión integral de residuos a través de la valorización energética, cuidando el ambiente, y al impulso a una transición energética renovable.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Diseñar y construir un horno pirolizador con mayor capacidad y almacenamiento de energía solar térmica.
- Estudiar diferentes materias primas en la elaboración de biochar
- Utilizar otras materias primas como aglomerantes para elaborar las briquetas de biochar.
- Escalar la metodología utilizada para la producción de briquetas de biochar.
- Impulsar la valorización energética de los residuos orgánicos como alternativa de los combustibles convencionales.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afsal, A., David, R., Baiju, V., Muhammed Suhail, N., Parvathy, U., & Rakhi, R. B. (2020). Experimental investigations on combustion characteristics of fuel briquettes made from vegetable market waste and saw dust. *Materials Today: Proceedings*, 33, 3826–3831. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.222>
- Ajimotokan, H. A., Ibitoye, S. E., Odusote, J. K., Adesoye, O. A., & Omoniyi, P. O. (2019). Physico-mechanical Properties of Composite Briquettes from Corncob and Rice Husk. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 4(3), 159–165. <https://doi.org/10.12162/jbb.v4i3.004>
- Akande, O. M., & Olorunnisola, A. O. (2018). Potential of briquetting as a waste-management option for handling market-generated vegetable waste in Port Harcourt, Nigeria. *Recycling*, 3(2). <https://doi.org/10.3390/recycling3020011>
- Akolgo, G. A., Awafo, E. A., Essandoh, E. O., Owusu, P. A., Uba, F., & Adu-Poku, K. A. (2021). Assessment of the potential of charred briquettes of sawdust, rice and coconut husks: Using water boiling and user acceptability tests. *Scientific African*, 12, e00789. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00789>
- Amarasekara, A., Tanzim, F. S., & Asmatulu, E. (2017). Briquetting and carbonization of naturally grown algae biomass for low-cost fuel and activated carbon production. *Fuel*, 208, 612–617. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.034>
- Andrés, C., & Núñez, F. (2012). *Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación*. 9(c), 21–30.
- Arévalo, J., Quispe, G., & Raymundo, C. (2017). Sustainable Energy Model for the production of biomass briquettes based on rice husk in low-income agricultural areas in Peru. *Energy Procedia*, 141, 138–145. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.026>
- Berastegui, B. C., Ortega Rodríguez, J. P., Mendoza Fandiño, J. M., González Doria, Y. E., & Gómez Vasquez, R. D. (2017). Elaboración de biocombustibles sólidos densificados a partir de tusa de maíz, bioaglomerante de yuca y carbón mineral del departamento de Córdoba. *Ingeniare*, 25(4), 643–653. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052017000400643>

- Bonassa, G., Schneider, L. T., Canever, V. B., Cremonez, P. A., Frigo, E. P., Dieter, J., & Teleken, J. G. (2018). Scenarios and prospects of solid biofuel use in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(June 2016), 2365–2378. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.075>
- Bridgwater, T. (2018). Challenges and opportunities in fast pyrolysis of biomass: Part I. *Johnson Matthey Technology Review*, 62(1), 118–130. <https://doi.org/10.1595/205651318X696693>
- Cabrales, H., Arzola, N., & Araque, O. (2020). The effects of moisture content, fiber length and compaction time on African oil palm empty fruit bunches briquette quality parameters. *Heliyon*, 6(12), e05607. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05607>
- Cerdá, E. (2012). Energía obtenida a partir de biomasa. *Cuadernos Económicos de ICE*, 83. <https://doi.org/10.32796/cice.2012.83.6036>
- Chen, Z., Wang, M., Jiang, E., Wang, D., Zhang, K., Ren, Y., & Jiang, Y. (2018). Pyrolysis of Torrefied Biomass. *Trends in Biotechnology*, 36(12), 1287–1298. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2018.07.005>
- Chhabra, V., Shastri, Y., & Bhattacharya, S. (2016). Kinetics of Pyrolysis of Mixed Municipal Solid Waste-A Review. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 513–527. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.036>
- Czajczyńska, D., Nannou, T., Anguilano, L., Krzyżyńska, R., Ghazal, H., Spencer, N., & Jouhara, H. (2017). Potentials of pyrolysis processes in the waste management sector. *Energy Procedia*, 123, 387–394. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.275>
- Emiro, F., & Vargas, S. (2016). *Tecnura*. 20(48), 89–99. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a06>
- Ferronato, N., Calle Mendoza, I. J., Gorrity Portillo, M. A., Conti, F., & Torretta, V. (2022). Are waste-based briquettes alternative fuels in developing countries? A critical review. *Energy for Sustainable Development*, 68, 220–241. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.03.013>
- Ferronato, N., & Torretta, V. (2019). Waste mismanagement in developing countries: A

- review of global issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6). <https://doi.org/10.3390/ijerph16061060>
- Gosgot, A. W., Rivera, L. R. Y., Rascón, J., Barrera Gurbillón, M. Á., Ordinola Ramirez, C. M., Oliva, M., & Montenegro Santillan, Y. (2021). Valorización energética de residuos orgánicos mediante pirolisis. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 5(2), 26. <https://doi.org/10.25127/aps.20212.766>
- Granado, M. P. P., Suhogusoff, Y. V. M., Santos, L. R. O., Yamaji, F. M., & De Conti, A. C. (2021). Effects of pressure densification on strength and properties of cassava waste briquettes. *Renewable Energy*, 167, 306–312. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.087>
- Grycová, B., Koutník, I., & Prysycz, A. (2016). Pyrolysis process for the treatment of food waste. *Bioresource Technology*, 218, 1203–1207. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.064>
- Hu, X., & Gholizadeh, M. (2019). Biomass pyrolysis: A review of the process development and challenges from initial researches up to the commercialisation stage. *Journal of Energy Chemistry*, 109–143. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2019.01.024>
- Ifa, L., Yani, S., Nurjannah, N., Darnengsih, D., Rusnaenah, A., Mel, M., Mahfud, M., & Kusuma, H. S. (2020). Techno-economic analysis of bio-briquette from cashew nut shell waste. *Heliyon*, 6(9), e05009. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05009>
- Ji, C., Cheng, K., Nayak, D., & Pan, G. (2018). Environmental and economic assessment of crop residue competitive utilization for biochar, briquette fuel and combined heat and power generation. *Journal of Cleaner Production*, 192(November 2014), 916–923. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.026>
- Kongprasert, N., Wangphanich, P., & Jutilarptavorn, A. (2019). Charcoal briquettes from Madan wood waste as an alternative energy in Thailand. *Procedia Manufacturing*, 30, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.019>
- Kumar, A., & Samadder, S. R. (2017). A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Management*, 69, 407–422. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>

- Lubwama, M., & Yiga, V. A. (2018). Characteristics of briquettes developed from rice and coffee husks for domestic cooking applications in Uganda. *Renewable Energy*, *118*, 43–55. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.003>
- Magnago, R. F., Costa, S. C., Assunção Ezirio, M. J. de, Godoy Saciloto, V. de, Cremona Parma, G. O., Gasparotto, E. S., Gonçalves, A. C., Tutida, A. Y., & Barcelos, R. L. (2020). Briquettes of citrus peel and rice husk. *Journal of Cleaner Production*, *276*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123820>
- Muñoz Muñoz, D., Cuatin, M., & Pantoja, A. (2013). Potencial energético de residuos agroindustriales del departamento del Cauca, a partir del poder calorífico inferior. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial: BSAA*, *11*(2), 156–163.
- Navalta, C. J. L. G., Banaag, K. G. C., Raboy, V. A. O., Go, A. W., Cabatingan, L. K., & Ju, Y. H. (2020). Solid fuel from Co-briquetting of sugarcane bagasse and rice bran. *Renewable Energy*, *147*, 1941–1958. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.129>
- Ndukwu, M. C., Horsfall, I. T., Ubouh, E. A., Orji, F. N., Ekop, I. E., & Ezejiolor, N. R. (2021). Review of solar-biomass pyrolysis systems: Focus on the configuration of thermal-solar systems and reactor orientation. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, *33*(6), 413–423. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.05.004>
- Obando, G. A. (2015). *Condiciones de diseño de un Reactor de Pirolisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos Sólidos (ROS)*. 83.
- Orozco, M., & Orozco, M. (2018). *Prototipo autotérmico móvil para producción de biocarbón con biomasa de esquilmos de aguacate*. 121–129.
- Osei Bonsu, B., Takase, M., & Mantey, J. (2020). Preparation of charcoal briquette from palm kernel shells: case study in Ghana. *Heliyon*, *6*(10), e05266. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05266>
- Rahman, A., Farrok, O., & Haque, M. M. (2022). Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *161*(February), 112279. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112279>
- Rascón, J., Angeles, W. G., Oliva, M., Quiñones, L., & Barrena Gurbillón, M. Á. (2020).

- Determinación de las épocas lluviosas y secas en la ciudad de Chachapoyas para el periodo de 2014-2018. *Revista de Climatología*, 20(July), 15–28.
- Sindhu, R., Gnansounou, E., Rebello, S., Binod, P., Varjani, S., Shekhar, I., Nair, R. B., & Pandey, A. (2019). Conversion of food and kitchen waste to value-added products. *Journal of Environmental Management*, August 2018, 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.053>
- Sobek, S., & Werle, S. (2019). Solar pyrolysis of waste biomass: Part 1 reactor design. *Renewable Energy*, 143, 1939–1948. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.011>
- Tumutegyereize, P., Mugenyi, R., Ketlogetswe, C., & Gandure, J. (2016). A comparative performance analysis of carbonized briquettes and charcoal fuels in Kampala-urban, Uganda. *Energy for Sustainable Development*, 31, 91–96. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.01.001>
- Umaru Ahmadu, Jamilu Tanko, Umar Sadiq, & Alhassan Muazu. (2020). Characterization of Rice Husk and Coconut Shell Briquette as an Alternative Solid Fuel. *Advanced Energy Conversion Materials*, 2(1), 1–12. <https://doi.org/10.37256/aecm.212021608>
- Waqas, M., Aburiazaiza, A. S., Miandad, R., Rehan, M., Barakat, M. A., & Nizami, A. S. (2018). Development of biochar as fuel and catalyst in energy recovery technologies. *Journal of Cleaner Production*, 188, 477–488. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.017>
- Zaman, C. Z., Pal, K., Yehye, W. A., Sagadevan, S., Shah, S. T., Adebisi, G. A., Marliana, E., Rafique, R. F., & Johan, R. Bin. (2017). Pyrolysis: A Sustainable Way to Generate Energy from Waste. In *Pyrolysis*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69036>
- Zeng, K., Gauthier, D., Minh, D. P., Weiss-Hortala, E., Nzihou, A., & Flamant, G. (2017). Characterization of solar fuels obtained from beech wood solar pyrolysis. *Fuel*, 188, 285–293. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.036>

Anexo

Anexo 1: Resultados de laboratorio del poder calórico de las briquetas



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
CÂMPUS DE BOTUCATU  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÔNOMICAS



RESIDUALL LABORATORY

Responsible Person: e-mail: [alcides.leao@unesp.br](mailto:alcides.leao@unesp.br)

CUSTOMER:

CHACHAPOYAS UNIVERISTY, Peru

<b>Cliente:</b>	Chachapoyas University
<b>Produto:</b>	Análise de poder calorífico
<b>Data:</b>	04/05/2022
<b>Observações:</b>	Amostras fornecidas pelo cliente

Amostra	Calorimetria	Agua	TI	TF	Vol Amostra, g	Peso Bal	UM	POB	POI	POU	M PCB	M PCI	M PCU
BIOCHAR - FLOCULA DE YUCA	394,064	2766	22.8	22.0	1.0220	0.1642	3.0227	14.08	4735.64	3936.74	3349.83		
BIOCHAR - FLOCULA DE YUCA	394,064	2766	21	22.27	1.0246	0.2183	6.2453	14.08	7013.47	4475.37	3993.23		
BIOCHAR - FLOCULA DE YUCA	394,064	2766	20.46	21.73	1.0190	0.2161	6.7051	14.08	7045.87	4479.37	3854.57	4793.73	4413.05
BIOCHAR-ARCELIA	394,064	2766	20.1	21.1	1.020	0.0980	6.0349	14.05	5310.83	3976.13	3473.68		
BIOCHAR-ARCELIA	394,064	2766	19.79	21.1	1.0190	0.1173	8.0744	14.05	4836.54	4491.74	3774.37		
BIOCHAR-ARCELIA	394,064	2766	19.93	21.27	1.0201	0.1117	8.9164	14.05	4724.82	4399.21	3683.24	4397.16	3913.26

Por ser expressão da verdade, firmamos o presente laudo em,

Botucatu, 04 de Maio de 2022.

Alcides Lopes Leão (PhD.)  
Ful Professor  
Depto. Bioprocessos e Biotecnologia  
FCA/UNESP

Fazenda Experimental Lageado - C.P. 237- PBX (14) 3880-7257/ 3880-7163 - Fax (14) 3880-7202 - CEP 18603-970 - Botucatu-SP