

# Performance of ecological briquettes to reduce pollutant emissions applied to an artisanal brickyard in the Peruvian Andes

Kevin Abner Ortega Quispe, Bachelor<sup>1</sup>, Kelly Steffy Monago Torres, Bachelor<sup>1</sup>, Claudia Milagros Caballero Blanco<sup>1</sup>,  
Dennis Ccopi Trucios<sup>1</sup> and Oscar Paul Huari Vila, PhD<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Continental, Perú, 46754383@continental.edu.pe, 70859260@continental.edu.pe, 76275329@continental.edu.pe,  
46241941@continental.edu.pe, ohuari@continental.edu.pe.

*Abstract– There are few studies about the amounts of emissions generated by fuels and polluting materials used in artisanal brick industry in the country that affect health and cause damage to the environment. The objective was to make suitable use of natural resources in a sustainable way and to be able to determine the reduction of atmospheric pollutants after the substitution of traditional fuels for ecological briquettes and which can also improve energy efficiency. To achieve this, it began by estimating and measuring the emission factors of atmospheric pollutants generated by an artisanal brick kiln in a rural area of the Peruvian Andes, as well as ecological briquettes were designed and made from local waste from two seasons. The energy efficiency of the waste was determined from the direct method (calorimetric bomb) and indirect for the traditional fuel, the dispersion of the pollutant CO was simulated with the METI-LIS software as visual support of the direction of the pollutant plume dispersion CO emitted on the earth's surface, giving in general as results a reduction of CO emission and energy efficiency in the first season 15.22% and 12.96% and the second season 17.03% and 7.30% respectively, in addition a reduction in the plume dispersion is observed for the pollutant CO. The ecological briquette represents a cleaner and cheaper alternative to substitute any traditional fuel and its development is important because it revalues agricultural waste, generating economic savings and deducting emissions, improving the energy efficiency of the productive process.*

*Keywords-- Ecological briquette, emission factor, pollution, calorific power, dispersion, brickwork.*

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).  
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).  
**DO NOT REMOVE**

# Desempeño de briquetas ecológicas para reducir emisiones contaminantes aplicados a una ladrillera artesanal en los Andes Peruanos

Kevin Abner Ortega Quispe, Bachiller<sup>1</sup>, Kelly Steffy Monago Torres, Bachiller<sup>1</sup>, Claudia Milagros Caballero Blanco<sup>1</sup>, Dennis Ccopi Trucios<sup>1</sup> and Oscar Paul Huari Vila, PhD<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Continental, Perú, 46754383@continental.edu.pe, 70859260@continental.edu.pe, 76275329@continental.edu.pe, 46241941@continental.edu.pe, ohuari@continental.edu.pe.

*Resumen– Existen pocos estudios sobre las cantidades de emisiones generadas por los combustibles y materiales contaminantes usados en las ladrilleras artesanales en el Perú que afectan a la salud y producen perjuicios en el ambiente. Donde se aprovechó de manera sostenible los recursos naturales para poder determinar la reducción de contaminantes atmosféricos tras la sustitución de combustibles tradicionales por briquetas ecológicas que puedan mejorar la eficiencia energética. Para lograrlo, se inició estimando y midiendo por cada contaminante atmosférico los factores de emisión respectivos generados por el horno de una ladrillera artesanal en una zona rural de los andes peruanos, así mismo se diseñaron y elaboraron briquetas ecológicas a partir de residuos locales de dos temporadas. La eficiencia energética de los residuos se determinó a partir del método directo (bomba calorimétrica) e indirecto para el combustible tradicional, se simuló la dispersión del contaminante CO con el software METI-LIS como apoyo visual de la dirección de la pluma de dispersión del contaminante CO emitido sobre la superficie terrestre. Obteniendo como resultados una reducción de emisión del CO y eficiencia energética en la primera temporada de 15.22% y 12.96% y la segunda temporada 17.03% y 7.30% respectivamente, además de observarse una reducción en la pluma de dispersión para el contaminante CO. La briqueta ecológica representa una alternativa más limpia y económica para sustituir cualquier combustible tradicional y es importante su desarrollo pues revaloriza los residuos agrícolas generando ahorro económico y reduciendo emisiones, mejorando la eficiencia energética del proceso productivo.*

*Palabras clave-- Briqueta ecológica, contaminación, dispersión, factor de emisión, poder calorífico.*

## I. INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental producida por distintas actividades económicas, ha generado una gran preocupación en los últimos años debido al significativo impacto en el cambio climático generando perjuicio sobre la salud humana y el ambiente [1], entre los distintos tipos de contaminación, está la atmosférica, caracterizada por la introducción a la atmósfera de sustancias y efectos que son potencialmente dañinos o que van a interferir con los procesos normales en el ambiente, generados por el aumento excesivo de emisiones contaminantes

de innumerables operaciones los que, con el fin de reducir sus costos y sin respeto a la capacidad de dilución de la atmósfera, generan estas emisiones sin fiscalización alguna. Las diferentes fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos, generan diferentes gases como CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, partículas de 2.5, 10 micras y otras ricas en plomo y azufre [2], las que terminan produciendo efectos perjudiciales en la salud humana, generando por ejemplo aproximadamente 2.8 millones de muertes prematuras a nivel mundial solo en el año 2015 [3].

La alteración en la calidad del aire y su efecto en la salud pública han despertado una atención cada vez mayor por parte de la comunidad de investigación en salud ambiental, las agencias reguladoras ambientales, la industria y el público en general, tomando conciencia de los problemas que contrae la contaminación del aire externo e interno en el medio ambiente regional y global [4].

Los países en vías de desarrollo mantienen procesos productivos informales, a pequeña escala, generalmente no regulados que generan graves impactos ambientales, sobre todo en la fabricación de ladrillos artesanales, lo que produce un impacto negativo al medio ambiente [5] y con la creciente demanda de materiales de construcción y la falta de medidas que mitiguen la contaminación, la industria del ladrillo puede tener un impacto adverso al medio ambiente, a raíz de sus emisiones [6].

Existen pocos estudios y proyectos enfocados a conocer las cantidades de emisiones generadas por los combustibles y materiales usados en las ladrilleras artesanales en el Perú, por lo que se recurrió a estudios y artículos foráneos, como [7] en Vietnam y de [6] en la India, esto representa una amenaza indirecta y potencial para la salud de las plantas y los residentes cercanos a estas fuentes [8], por otro lado la subestimación de las estadísticas energéticas de la biomasa e insumos para la producción de ladrillos conducen a una falta de comprensión del estado de las emisiones, lo que dificulta aún más la investigación y las medidas sobre el control de la contaminación del aire [9] [10], este vacío de información local aumenta las dificultades de una mayor y mejor evaluación conducente a mejoras de procesos y beneficios ambientales a través de proyectos que implementen tecnologías y energías limpias, el cual presenta una oportunidad única y urgente para

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).  
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).  
DO NOT REMOVE

generar cambios en materiales y/o tecnologías que puedan producir un beneficio en el ambiente [11].

El trabajo actual mantiene entre sus objetivos investigar sobre tecnologías limpias con aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y poder determinar la reducción de contaminantes atmosféricos, originado por la sustitución de combustibles tradicionales por briquetas ecológicas y que a la par generen mayor eficiencia energética, buscando reducir la contaminación del aire, promover el uso de materiales ecológicos y que sean eficientes en los procesos propios de las ladrilleras artesanales [12].

A partir de la problemática descrita es importante lograr y contribuir en las metas e indicadores del país respecto a los compromisos con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), teniendo como meta reducir emisiones a la atmósfera, esta se representan en el ODS 13, nombrado como “Acción por el Clima” asumiendo como prioridad la toma de medidas urgentes para abordar la emergencia climática con miras de obtener mejoras en su calidad de vida y la protección de ecosistemas mundiales [13].

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Área de Estudio

La ladrillera San Román, tiene una producción de 500 ladrillos semanales, se localiza en el centro poblado de Cochas Grande en la sierra central de Perú, al lado norte del distrito de Huancayo, por la margen izquierda del río Mantaro. Se encuentra a 3480 msnm, con latitud y longitud 12°0'8.55"S y 75°11'58.58"O, posee un clima templado, donde el verano es más lluvioso que los meses de invierno y las épocas de precipitaciones se dan entre los meses de septiembre hasta abril, así mismo la temperatura es de alrededor de los 10.8°C [14]. El área descrita se muestra en la Fig. 1.

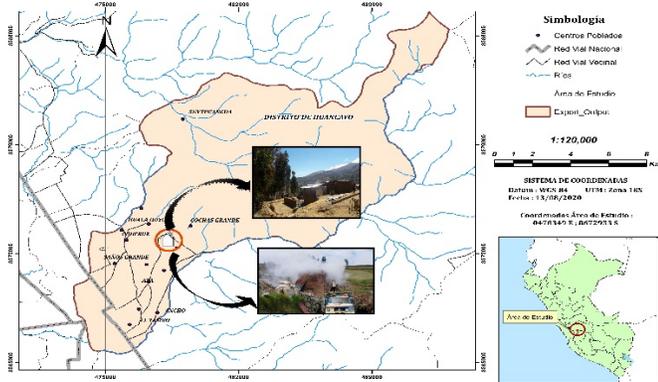


Fig. 1 Ubicación del área de estudio en Cochas Grande, mostrando coordenadas de la ladrillera artesanal de acuerdo al sistema de coordenadas WGS-84 Zona 18S

### B. Método EPA

Los datos utilizados en el estudio se han evaluado según la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU (EPA), como se muestra en la Ecuación (1) donde se evaluó los contaminantes atmosféricos emitidos por fuentes puntuales (ladrilleras

artesanales)(EPA, 1993), los datos utilizados en el estudio corresponden al periodo del año 2019 donde se ha hecho uso del documento "Recopilación de factores de emisión de contaminación atmosférica" (AP-42), publicado por EPA desde 1972, además se han publicado suplementos de AP-42 con regularidad para agregar nuevas categorías de fuentes y actualizar las emisiones existentes. El informe proporciona información para respaldar los factores de emisión al aire libre, un capítulo corresponde a la parte de combustión de residuos sólidos del AP-42 (Sección 2.4), específicamente, este proporciona la base para estimar los factores de emisión para la quema al aire libre de llantas en desuso y desechos agrícolas inorgánicos. El mismo se divide en las secciones: quema a cielo abierto de llantas de desecho (sección 2.0), quema al aire libre de residuos agrícolas orgánicos (sección 5.0).

$$E = A \times f \times \left[ 1 - \frac{\epsilon}{100} \right] \quad (1)$$

De la Ecuación (1) se extrae que, E es la emisión que está dado en g/s, A el consumo de combustible en kg/s, f el factor de emisión no controlada expresada en g/kg, y  $\epsilon$  es la eficiencia de reducción de emisiones en porcentaje, cuando se utiliza tecnología de reducción. Como no existe tecnología de reducción de emisiones en el caso a evaluar, entonces  $\epsilon=0$ .

A partir de este método se obtiene la cantidad de emisión de cada contaminante atmosférico producto de la combustión de residuos agrícolas para la fabricación de ladrillos artesanales.

### C. Diseño Experimental

#### 1) Diseño de máquinas

Para la fabricación de briquetas se requieren dos máquinas, una con función de triturar y otra de compactar, dichas máquinas fueron de diseño propio para este fin. Podrían ser rentables debido a que su manejo es manual y no necesitan de energía eléctrica para su funcionamiento.

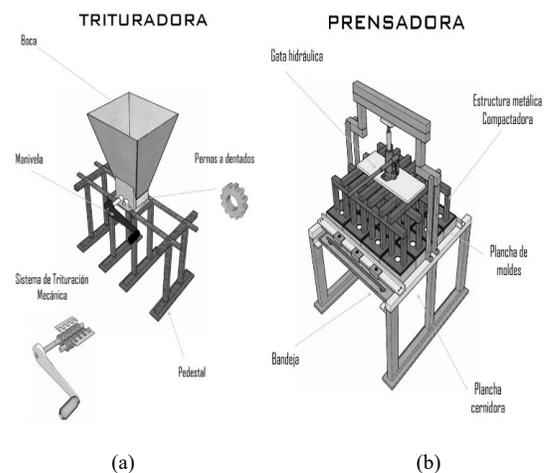


Fig. 1 Diseño de las máquinas para la fabricación de briquetas ecológicas (a) trituradora de residuos y (b) compactadora para eliminar el líquido restante que contiene la briqueta.

## 2) Diseño de briquetas

En la Fig. 3 se aprecia el proceso de fabricación de briquetas con residuos agrícolas (panca de maíz, cebada, trigo), papel reciclado, aserrín y el aglomerante a base de papa.

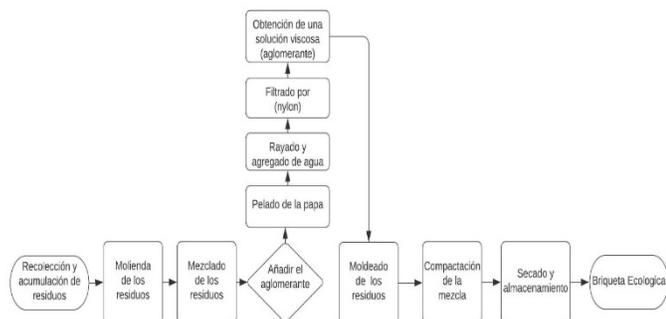


Fig. 3 Proceso de fabricación de la briketa ecológica.

En la TABLA I se muestra las cantidades de residuos, biomasa y la cantidad del aglomerante necesario que se necesitó para la elaboración de una briketa, además la briketa fue elaborada en dos temporadas por motivo de que los residuos usados no se encuentran disponibles todo el año, como el caso de los residuos de maíz, esta se encuentra entre los meses de marzo a octubre a la que se denominará Temporada 1, por ello se encontró otro tipo de residuos y biomasa disponible en los meses restantes siendo los residuos de trigo y cebada, disponible para los meses de noviembre a febrero denominada Temporada 2, ello de acuerdo a la actividad agrícola anual cercana al anexo de Cochabamba.

TABLA I  
CANTIDAD DE MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DE UNA BRIQUETA ECOLÓGICA

Briketa Temporada 1*		Briketa Temporada 2**	
Biomasa	Cantidad (mes)	Biomasa	Cantidad (mes)
Residuos de maíz (bagazo, panca)	300 g	Residuos de Trigo	150 g
Papel	400 g	Residuos de cebada	150 g
Aserrín	300 g	Papel	400 g
		Aserrín	300 g
<b>Total: 1 kg</b>		<b>Total: 1 Kg</b>	
Aglomerantes	Cantidad	Aglomerante	Cantidad
Almidón de papa	113 g	Almidón de papa	113 g
Agua	20 ml	Agua	20 ml

\*Temporada 1 establecido entre los meses de marzo a octubre

\*\*Temporada 2 correspondiente entre los meses de noviembre a febrero, de acuerdo a la producción agrícola anual del área de estudio

## D. Eficiencia Energética de las Briketas

La biomasa es una fuente de energía prometedora y sostenible, con la cual es posible aminorar la cantidad de emisiones contaminantes, pudiendo resolver futuros problemas que arrastran los combustibles fósiles. El mayor desafío es

utilizar la biomasa de manera eficiente y aumentar el poder calorífico por kilogramo de biomasa [15].

El método de análisis del poder calorífico de los combustibles tradicionales (llantas usadas, leña de eucalipto y residuos de madera) de las ladrilleras artesanales se realizarán de manera indirecta, basándose en el hecho de que cada componente de combustible contribuye al poder calorífico total. Para el cálculo del PC se requiere determinar la energía hipotética que se transfiere cuando se quema el combustible, y sumando el aporte de cada sustancia de la mezcla al poder calorífico puro, luego se multiplica por la respectiva concentración en el combustible y finalmente se obtiene el resultado a través de una sumatoria, como se muestra en la Ecuación

$$PC_{id} = \sum_{i=1}^n x_i \times PC_i \quad (2)$$

El valor de poder calorífico del *Eucalyptus globulus* depende de su humedad, a partir de la ecuación mostrada y con una humedad del 25% este poder se estima en 12896 kJ/kg [17], asimismo las llantas usadas rondan los 30000 kJ/kg, mientras que los residuos de leña se encuentran cerca de los 19000 kJ/kg [18].

Respecto a la determinación del poder calorífico de la biomasa a usarse en las temporadas 1 y 2, estas se realizaron de manera directa, haciendo uso y referencia de la norma ASTM-2015-66, en el laboratorio del Instituto de Investigación Nutricional de Lima, la cual se sirve del uso de una bomba calorimétrica como equipo principal, expresándose los resultados en kcal/100g, donde posteriormente se convirtieron a kJ/kg para uniformizar los resultados.

## E. Descripción Modelamiento de Dispersión

El comportamiento del viento se estableció utilizando WRPLOT, este software puede generar estadísticas de vientos y gráficos para una determinada estación meteorológica en un periodo de tiempo especificado [19], mientras que METI-LIS es un modelo gaussiano de dispersión, la que se desarrolla sobre la base del modelo ISC de la U.S. EPA, [20]. Este modelo expresa el efecto de corriente descendente que a menudo afecta la dispersión atmosférica de fuentes de emisión más bajas, mientras proporciona soluciones simples en la pluma de dispersión gaussiana sobre fuentes más elevadas [21], el propósito de este modelo es estimar la concentración de un contaminante en un determinado punto receptor a partir de cálculos y expresiones matemáticas [22].

Se usó el mencionado software para simular la dispersión del CO, prediciendo la distribución horizontal de concentraciones de hasta en promedio 1 hora [23], el método de modelamiento designado en este estudio fue para fuentes puntuales, y se realizó dos corridas entre las 14:00 a 16:00 horas en intervalos de 10 minutos siendo los parámetros necesarios para el modelamiento, la dirección del viento, velocidad del viento, temperatura, la clase de estabilidad atmosférica y

radiación solar [23], los mismos que fueron extraídos del laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación (LAMAR) Observatorio de Huancayo que se encuentra a 3350 msnm con una latitud de 12°02'18''S y una longitud 75°18'22''O. La estabilidad atmosférica se obtiene a partir de la información meteorológica de temperatura, dirección, velocidad de viento y radiación solar por el método Pasquill [24].

El modelamiento de dispersión corresponde a dos fechas distintas dentro del año 2019, las que coinciden con los cambios de estación y épocas dentro del periodo de inversión térmica 21 de junio y convección térmica 21 de noviembre lo que influye en los cambios meteorológicos necesarios para realizar un correcto modelamiento.

#### F. Análisis Estadístico

Las pruebas estadísticas se realizaron con el uso del Software SPSS, generándose dos pruebas de validación, la primera se realizó a partir del análisis de regresión lineal múltiple, donde se identificó la influencia que existe entre la cantidad de combustible y el factor de emisión respecto a la cantidad de emisión generada por cada combustible con un nivel de significancia del 95%, obteniéndose  $R^2=0.956$  identificando que las variables independientes aportan de manera considerable sobre la variable de respuesta y el estadístico de Durbin-Watson es igual a 1.67 significando una correlación positiva entre las variables. La segunda prueba se realizó mediante el análisis de correlación de Pearson para identificar la afinidad entre la cantidad de combustible y el poder calorífico total, resultando  $r=0.959$  determinando la existencia de correlación positiva muy alta entre las dos variables.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### A. Cantidades de Emisión

Las cantidades de emisión del combustible tradicional y de las briquetas ecológicas se describen a continuación.

TABLE II  
EMISIONES CONTAMINANTES DEL COMBUSTIBLE TRADICIONAL  
Combustible tradicional

Combustible	Cont.	F.E (g/kg del Comb.)	A (kg del Comb./sem)	Cantidad de Emisión (kg del Cont./sem)	Cantidad total del CO (kg/sem)
Llantas Usadas	PM <sub>10</sub>	0.59	16.00	0.04	196.79
	CO	0.77	16.00	0.05	
	NO <sub>x</sub>	2.61	16.00	0.17	
	SO <sub>x</sub>	1.30	16.00	0.08	
	COV	1.81	16.00	0.12	
Leña de eucalipto	PM <sub>10</sub>	8.50	750.00	25.50	196.79
	CO	31.90	750.00	95.70	
	NO <sub>x</sub>	1.76	750.00	5.28	
Residuos de madera	PM <sub>10</sub>	17.30	200.00	13.84	166.85
	COV	114.50	200.00	91.60	
	CO	126.30	200.00	101.04	

Donde Comb. = combustible usado, cont.= contaminante, sem= semana, FE = factor de emisión, A = peso del combustible

Como se puede observar la TABLA II, representa las cantidades de emisiones que varían entre las diferentes combinaciones de materiales y cantidades necesarias para la producción de los ladrillos, siendo la emisión de contaminantes mayor en los residuos de madera contando con hasta 101.04 kg/sem de CO, seguido de los COV con 91.60 kg/sem, todo ello para 200 kg de residuos de madera, al contrariamente de lo que se podría pensar, las ladrilleras requieren de 16 kg de llantas usadas por semana, las que emiten hasta 0.05 kg/sem de CO y 0.12 kg/sem en COV, así mismo [25] muestra valores similares en la emisión de contaminantes por el uso de la leña, siendo además que posee un factor de emisión entre los más altos, claramente la diferencia de cantidades incide sobre las emisiones generadas por la combustión de la biomasa, esto podría explicarse por las cantidades de residuos requeridos de manera semanal por las ladrilleras, de acuerdo a [26], el uso de estos materiales es histórico debido a la alta eficiencia calorífica que estos generan, aunque sean más contaminantes y peligrosos para la salud humana.

En la TABLA III se aprecian los resultados de la emisión de contaminantes de la briqueta ecológica en la primera temporada teniendo como insumos a los residuos de maíz, aserrín y el papel, las cantidades de emisión contaminante producida por la briqueta son menores al del combustible tradicional y se exhiben a partir de una reducción expresada en porcentajes, uno de ellos es el CO el cual reduce su emisión en 15.22% (ver TABLA II) siendo esta en 196.79 kg/sem de CO respecto al CO de las briquetas de la primera temporada (ver TABLA III), resultando estas en 166.85 kg/sem de CO, además los factores de emisión fueron comparables a [11] sobre todo los reportados respecto al CO con residuos de maíz.

TABLE III  
EMISIONES DE LA BRIQUETA EN LA PRIMERA TEMPORADA  
Briqueta temporada I (marzo-octubre)

Combustible	Cont.	F.E (g/kg del Comb.)	A (kg del Comb./sem)	Cantidad de Emisión (kg del Cont./sem)	Cantidad total de CO (kg/sem)
Residuos de maíz	CO	34.61	255.00	35.30	166.85
	CO <sub>2</sub>	1747.80	255.00	1782.76	
	PM <sub>10</sub>	3.33	255.00	3.40	
Aserrín	PM <sub>2.5</sub>	2.70	255.00	2.75	166.85
	PM <sub>10</sub>	17.30	255.00	17.65	
Papel	CO	126.30	255.00	128.83	166.85
	CO	2.00	340.00	2.72	
	CO <sub>2</sub>	1.80	340.00	2.45	

La briqueta ecológica de la segunda temporada tiene como insumos a los residuos de trigo, cebada, aserrín y papel, logrando que el combustible emita los contaminantes atmosféricos en menor cantidad respecto al combustible tradicional, como se muestra en la TABLA IV, observándose la misma situación que con el CO, reduciendo su emisión en 17.03%, teniendo un total de emisión por combustible tradicional de 196.79 kg/sem de CO, y con las briquetas de la

segunda temporada 163.27 kg/sem de CO. Los factores de emisión para el CO con residuos de trigo y de cebada son menores al de residuos de maíz, aparentemente debido a la composición química del maíz, la que produce mayores cantidades de emisión en todos los parámetros descritos, comparable al estudio previo [25] quien además demuestra la relación en la reducción de emisiones contaminantes atmosféricos producto del uso y reemplazo de briquetas en comparación y sustitución con otros tipos de combustible.

TABLA IV  
RESULTADOS DE LA EMISIÓN DE LA BRIQUETA DE LA SEGUNDA TEMPORADA

Briqueta temporada 2 (noviembre-febrero)					
Combustible	Cont.	F.E (g/kg del Comb.)	A (kg del Comb./sem)	Cantidad de Emisión (kg del Cont./sem)	Cantidad total del CO (kg/sem)
Residuos de trigo	CO	28.90	127.50	14.74	163.27
	CO <sub>2</sub>	1802.50	127.50	919.28	
	PM <sub>10</sub>	4.07	127.50	2.08	
	PM <sub>2.5</sub>	2.54	127.50	1.30	
Residuos de cebada	CO	33.31	127.50	16.99	
	CO <sub>2</sub>	2.71	127.50	1.38	
	PM <sub>10</sub>	1.77	127.50	0.90	
	PM <sub>2.5</sub>	1.19	127.50	0.62	
Aserrín	PM <sub>10</sub>	17.30	255.00	17.65	
	CO	126.30	255.00	128.83	
Papel	CO	2.00	340.00	2.72	
	CO <sub>2</sub>	1.80	340.00	2.45	

### B. Diseño de la Briqueta

Seguidamente del proceso de elaboración de las briquetas ecológicas con los residuos de ambas temporadas se pudo obtener el modelo presentado en la Fig. 4, la cual muestra medidas de 13.50 cm de ancho, 16.50 cm de largo, 5.00 cm de espesor y un agujero central de 3 cm de diámetro para una mejor oxigenación de la briqueta, estas proporciones son similares a las obtenidas por [27], claramente los insumos correspondientes a los residuos tanto para el aglomerante y la compactación de la briqueta son distintos, estos suelen corresponder a la biomasa fácil de conseguir en el área circundante para mejorar la eficiencia y la reducción de costos de la fabricación, esta investigación se caracteriza por presentar insumos característicos del valle del Mantaro, una zona altamente agrícola donde los residuos de maíz, trigo, cebada y aserrín suelen ser destinados a la quema, pero que son abundantes en todo el año según cada temporada de cosecha, una contribución adicional es el acopio de estos residuos destinados para la fabricación de estas briquetas ecológicas. Según [28] la biomasa y las dimensiones son relativas, lo importante es mantener una masa uniforme y encontrar la combinación óptima de residuos a mezclar para que con la ayuda del aglomerante este pueda tener un cuerpo sólido que cumpla sus funciones, el diseño de la briqueta ecológica propuesta presenta las cantidades observadas en la Tabla I tanto para la primera temporada y segunda temporada, para ambas combinaciones se requirió el uso del aglomerante de almidón de papa, en cantidad de aproximadamente 113 g existen diversos materiales para el

aglomerante uno de los más conocidos es el producido a partir de yuca como lo demuestra [27], pero la funcionalidad de unir y dar cohesión es similar al de la papa, el diseño propuesto presenta una combinación más factible, además de que puede ser replicada por los usuarios finales al tener una composición y tamaño compacto, de acuerdo a [29] cuando el tamaño de las briquetas ecológicas es menor, la densidad y el tamaño de partícula de la briqueta mejora, por lo que la concentración de energía se incrementa.

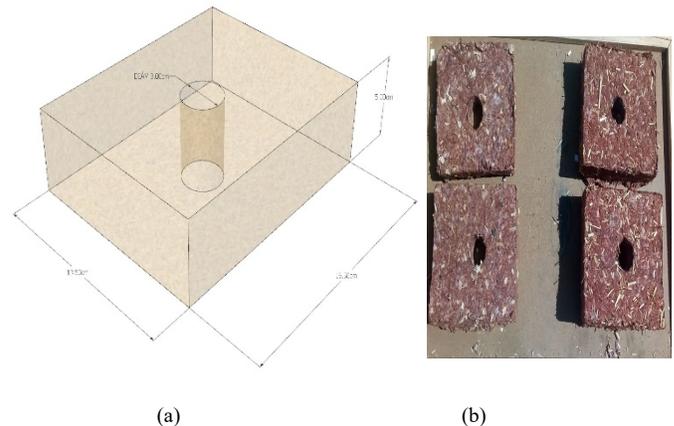


Fig. 4 Diseño de la briqueta ecológica (a) dimensiones en cm (b) izquierda briqueta con residuos temporada 1, derecha briqueta con residuos temporada 2

### C. Eficiencia Energética

Se comparó el poder calorífico (PC) del combustible tradicional con las briquetas ecológicas teniendo en cuenta las diferencias de insumos para ambas temporadas, la TABLA V muestra los valores de PC obtenidos por métodos indirectos, con un total de 13952 MJ/sem, siendo las llantas usadas el material con mayor PCI (poder calorífico inferior), tal como muestra [30] en su proyecto, siendo un residuo muy valioso para este tipo de procesos artesanales, por otra parte varios estudios han demostrado valores mayores de PC, como en la leña de eucalipto donde [31] reporta valores de hasta 18700 kJ/kg a diferencia de los 12896 kJ/kg obtenidos en esta investigación, la diferencia se debe posiblemente a la obtención del PC por otros métodos como conversión térmica a baja temperatura y posterior pirólisis, entonces el método por el cual se determina el PC en la biomasa es un factor determinante para estudios posteriores en la aplicación de nuevas tecnologías de eficiencia energética sobre materiales limpios.

TABLA V  
PC DEL COMBUSTIBLE TRADICIONAL

Material	PCI (kJ/kg)	Cantidad (kg/sem)	PC (kJ/sem)	PC Total (kJ/sem)	PC Total (kJ/sem)
Leña de eucalipto	12896	750.00	9672000	13952000	13952
Llantas Usadas	30000	16.00	480000		
Residuos de leña	19000	200.00	3800000		

Donde PCI= PC inferior y PC= Poder calorífico

En la TABLA VI se observa una mejora en la eficiencia energética mostrada por un mayor PC de la biomasa usados para la briqueta de la primera temporada, obteniéndose un PCT (poder calorífico total) de 15760.07 MJ/sem respecto a 13952 MJ/sem del combustible tradicional, mejorando la eficiencia energética en 12.96%, de acuerdo a estos resultados se muestra una superioridad del aserrín en su PCI llegando a los 20410 kJ/kg, siendo el material que más aporta a la eficiencia energética en las briquetas de la primera temporada en cambio el papel revela el menor valor de PCI con solo 17210 kJ/kg, así mismo [32] expone un valor de PC sobre el papel como residuo sólido urbano de 3175 Kcal/kg la que es equivalente a 13284 kJ/kg, valores menores a los propuestos en esta investigación, aunque el proceso de obtención fue también por bomba calorimétrica, existen condiciones como la composición química de la biomasa, condiciones ambientales, transporte o conservación que podrían alterar los resultados de obtención del poder calorífico inferior.

TABLA VI

PC DE LA BRIQUETA ECOLÓGICA EN PRIMERA TEMPORADA

Material	PCU (kJ/Kg)	Cantidad (kg/sem)	PC (kJ/sem)	PC Total (kJ/sem)	PC Total (kJ/sem)
Residuos de maíz	18450	255.00	4704750	15760700	15760.70
Aserrín	20410	255.00	5204550		
Papel	17210	340.00	5851400		

De acuerdo a la TABLA VII, existe un aumento en la eficiencia energética de la briqueta segunda temporada sobre el del combustible tradicional, evidenciándose un PC Total de 14970.20 MJ/sem respecto a 13952 MJ/sem respectivamente, mejorando la eficiencia energética en 7.30%. Para la fabricación de la briqueta de la segunda temporada, los residuos de cebada son los que aportan el menor PCI, con solo 13400 kJ/kg, pudiendo ser un residuo elegible a ser reemplazado por otros que aporten un mayor PCI, mejorando con ello el PC Total.

TABLA VII

PC DE LA BRIQUETA ECOLÓGICA EN SEGUNDA TEMPORADA

Material	PCI (kJ/kg)	Cantidad (kg/sem)	PC (kJ/sem)	PC Total (kJ/sem)	PC Total (kJ/sem)
Residuo de trigo	17300	127.50	2205750	14970200	14970.20
Residuo de cebada	13400	127.50	1708500		
Aserrín	20410	255.00	5204550		
Papel	17210	340.00	5851400		

Se evidencia la comparación entre el combustible tradicional y la briqueta elaborada para la primera temporada siendo evidente el mejor resultado del PC de la briqueta de la primera temporada en la cual utilizan los residuos de maíz. De la misma manera la briqueta de la temporada 2 presenta un PC mayor respecto al del combustible tradicional, esto se debe a que dentro de su composición está el aserrín, el que aporta gran cantidad de PC [34].

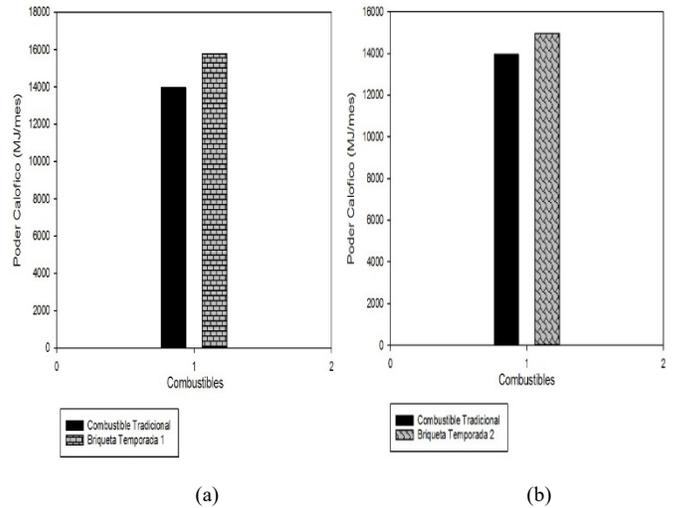


Fig.5 Comparación de PC entre el combustible tradicional y la briqueta ecológica siendo (a) la comparación con la briqueta de la primera temporada y (b) la comparación con la briqueta de la segunda temporada.

D. Modelamiento de dispersión

Las rosas de vientos (Fig. 6) revelan la distribución de frecuencia de la fuerza y dirección del viento para junio del año 2019 en la distribución horaria de las 14 horas hasta las 16 horas (Fig. 6a), observándose que las direcciones prevalecientes de donde viene el viento son el N y el W, contando con mayor velocidad del viento en NW, la (Fig. 6b), la dirección S y SW predomina durante el tiempo referencial.

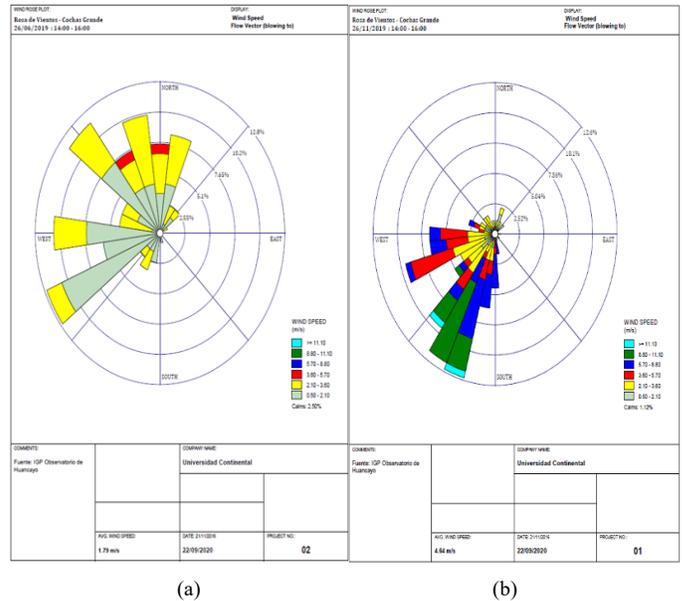


Fig. 6 Frecuencia de los vientos para (a) junio del 2019 entre las 14:00 a 16:00 (b) noviembre 2019 entre las 14:00 a 16:00

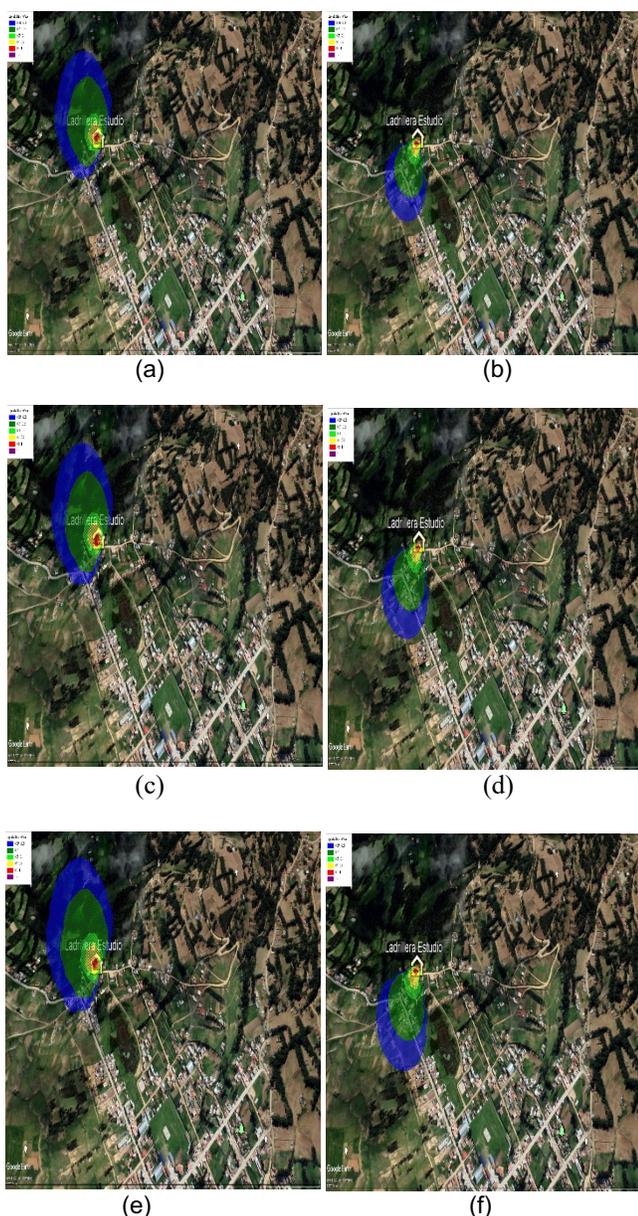


Fig. 7 El modelamiento para (a)(c)(e) se realizó para el 26/06/19 entre las 14:00 a 16:00 y para (b)(d)(f) para el 26/11/19 con los mismos parámetros meteorológicos y de estabilidad atmosférica, siendo (a) y (b) una simulación de combustibles tradicionales, (c)(d) residuos de primera temporada y (e)(f) residuos de segunda temporada.

La pluma de dispersión para el CO, refleja para el mes de junio una reducción de la pluma de dispersión tanto para residuos de primera temporada (Figura 7c) como para los residuos de segunda temporada (Figura 7e) respecto a los combustibles tradicionales (Figura 7a), se observa que la reducción no es extrema, pero es notoria e importante, además se registró una deposición de estos hacia el NW, así mismo en las (Figura 7d,7f) hay una similar reducción de la pluma de dispersión respecto al combustible tradicional para el mes de

noviembre, demostrando la utilidad del software METI-LIS para el desarrollo de estos trabajos tal como lo demuestra [22].

#### IV. CONCLUSIONES

En el estudio se evaluaron las emisiones producidas por las briquetas ecológicas con el fin de sustituir los combustibles tradicionales en la producción de ladrillos artesanales. Demostrando la eficiencia de las briquetas ecológicas en las dos temporadas reduciendo en la primera temporada un 15.22% de CO y de 17.03% de CO en la segunda temporada, siendo solo evaluado el CO por ser el contaminante que afecta directamente a las personas y al ambiente.

El diseño y las dimensiones de las briquetas facilitaron la generación de combustión completa ya que al presentar un agujero en el centro de las briquetas se realiza correctamente la oxigenación del mismo. Los principales parámetros que fueron evaluados son la reducción de emisiones y la eficiencia energética de contaminantes atmosféricos, teniendo en cuenta la accesibilidad de los insumos que requiere para su elaboración.

Se evidenció una mejora en la eficiencia energética tras el reemplazo del combustible tradicional por las briquetas ecológicas en un 12.96% para la primera temporada y de 7.30% para la segunda temporada, lo que permite obtener la misma producción con un menor costo y de requerimiento de materiales.

Con el software METI-LIS se realizó el modelamiento de la reducción de la pluma de dispersión del contaminante CO, visualizándose la comparación entre el combustible tradicional y las briquetas ecológicas en la primer y segunda temporada, evidenciándose una discreta reducción de la pluma de dispersión, validando la eficiencia del cambio de combustible y la reducción de emisiones contaminantes.

El presente artículo es un aporte a futuras investigaciones sobre la evaluación de emisión de contaminantes atmosféricos producido por la quema de combustibles sólidos a pequeña escala, así mismo se evaluó los contaminantes generados en la producción de ladrillos artesanales mediante los factores de emisión de cada combustible.

El uso de briquetas ecológicas en las ladrilleras artesanales para productores de bajos recursos económicos es una alternativa importante a desarrollar, puesto que se revaloriza los residuos agrícolas generando ingresos económicos y que a su vez reduce la emisión de contaminantes.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Continental, Facultad de Ingeniería Ambiental y al apoyo técnico del Dr. Oscar Paul Huari Vila y de la Magister Yipsy Iralmy Platero Morejón, así como a todas las personas que participaron activamente en el proyecto y que facilitaron los medios necesarios para su realización.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Nel, «Air Pollution – Related Illness: Effects of Particles», *Science* (80-), vol. 308, n.o 5273, pp. 804-806, 2005, doi: <https://doi.org/10.1126/science.1108752>.
- [2] C. Grossi y P. Brimblecombe, «The effect of atmospheric pollution on building materials», *J. Phys. IV*, vol. 12, pp. 1-14, 2002, doi: <https://doi.org/10.1051/jp4:20020460>.
- [3] A. J. Cohen et al., «Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015», *Lancet*, vol. 389, n.o 10082, pp. 1907-1918, 2017, doi: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6).
- [4] X. Han y L. P. Naeher, «A review of traffic-related air pollution exposure assessment studies in the developing world», *Environ. Int.*, vol. 32, n.o 1, pp. 106-120, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.05.020>.
- [5] H. X. Co, N. T. Dung, H. A. Le, D. D. An, K. van Chinh, y N. T. K. Oanh, «Integrated management strategies for brick kiln emission reduction in Vietnam: A case study», *Int. J. Environ. Stud.*, vol. 66, n.o 1, pp. 113-124, 2009, doi: <https://doi.org/10.1080/00207230902760507>.
- [6] U. Rajarathnam et al., «Assessment of air pollutant emissions from brick kilns», *Atmos. Environ.*, vol. 98, pp. 549-553, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.075>.
- [7] H. A. Le y N. T. K. Oanh, «Integrated assessment of brick kiln emission impacts on air quality», *Environ. Monit. Assess.*, vol. 171, n.o 1-4, pp. 381-394, 2010, doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1285-y>.
- [8] M. Adrees et al., «Effects of ambient gaseous pollutants on photosynthesis, growth, yield and grain quality of selected crops grown at different sites varying in pollution levels», *Arch. Agron. Soil Sci.*, vol. 62, n.o 9, pp. 1195-1207, 2016, doi: <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1134782>.
- [9] J. Qi et al., «A high-resolution air pollutants emission inventory in 2013 for the Beijing-Tianjin-Hebei region, China», *Atmos. Environ.*, vol. 170, pp. 156-168, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.09.039>.
- [10] L. Li et al., «Bottom-up emission inventories of multiple air pollutants from open straw burning: A case study of Jiangsu province, Eastern China», *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 10, n.o 2, pp. 501-507, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.09.011>.
- [11] M. Deng, P. Li, R. Ma, M. Shan, y X. Yang, «Air pollutant emission factors of solid fuel stoves and estimated emission amounts in rural Beijing», *Environ. Int.*, vol. 138, p. 105608, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105608>.
- [12] T. W. Aung et al., «Health and Climate-Relevant Pollutant Concentrations from a Carbon-Finance Approved Cookstove Intervention in Rural India», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 50, n.o 13, pp. 7228-7238, Jul. 2016, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b06208>.
- [13] J. Guabloche, «Perú: Cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo sostenible», Lima, 2018.
- [14] P. J. Mallma, «Impermeabilidad del BTC en climas lluviosos en el anexo de Cochabamba», Universidad Continental, 2017.
- [15] A. Özyüğüran y S. Yaman, «Prediction of Calorific Value of Biomass from Proximate Analysis», *Energy Procedia*, vol. 107, n.o September 2016, pp. 130-136, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.149>.
- [16] A. Blanco et al., «Revisión del cálculo de poder calorífico y punto de rocío del gas natural y de la estimación de sus incertidumbres», *Rev. ION*, vol. 29, n.o 2, pp. 87-99, 2016, doi: <https://doi.org/10.18273/revion.v29n2-2016007>.
- [17] D. J. Vega, M. F. Lorenzo, L. O. Torres, y J. J. Corral, «Caracterización bioenergética de los residuos de cosecha de las principales especies forestales del Noroeste de España», *Inf. Tecnol.*, vol. 26, n.o 4, pp. 3-12, 2015, doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000400002>.
- [18] M. R. Islam, M. N. Islam, N. N. Mustafi, M. A. Rahim, y H. Haniu, «Thermal recycling of solid tire wastes for alternative liquid fuel: The first commercial step in Bangladesh», *Procedia Eng.*, vol. 56, pp. 573-582, 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.162>.
- [19] L. Environmental, «WRPLOT View Wind and Rain Rose Plots for Meteorological Data». Lakes Environmental Software, Ontario, pp. 1-110, 2016.
- [20] M. of Economy, «Low Rise Industrial Source Dispersion Model METI-LIS Model Ver. 2.03 Operation Manual». National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, pp. 1-87, 2005.
- [21] C. H. Bosanquet y J. L. Pearson, «The spread of smoke and gases from chimneys. Transactions of the Faraday Society», *R. Soc. Chem.*, vol. 32, n.o 0, pp. 1249-1263, 1936, doi: <https://doi.org/10.1039/ft9363201249>.
- [22] A. Florea, C. Lorint, y C. Danciu, «Particulate matters generated by caprisoara tailing pond and their impact on air quality», *Environ. Eng. Manag. J.*, vol. 18, n.o 4, pp. 803-810, 2019, doi: <https://doi.org/10.30638/eemj.2019.075>.
- [23] A. Kouchi et al., «Development of a low-rise industrial source dispersion model (METI-LIS model)», *Int. J. Environ. Pollut.*, vol. 21, n.o 4, pp. 325-338, 2004, doi: <https://doi.org/10.1504/IJEP.2004.005093>.
- [24] F. Pasquill, *Atmospheric Diffusion: The Dispersion of Windborne Material from Industrial and other Sources*, 2 ed., vol. 1. Londres: D. Van Nostrand Company, 1974.
- [25] Y. Chen et al., «Field measurement and estimate of gaseous and particle pollutant emissions from cooking and space heating processes in rural households, northern China», *Atmos. Environ.*, vol. 125, pp. 265-271, 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.032>.
- [26] A. Fullana, «Pirólisis y Combustión de Neumáticos Usados y Lodos de Depuradora», Universidad de Alicante, 2001.
- [27] A. Vera, «Diseño de Briquetas Ecológicas para la Generación de Energía Calórica y Mejoramiento de Ecosistemas en el Corregimiento de Nabusimake, Municipio de Pueblo Bello Cesar», Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, 2014.
- [28] F. Aguirre y N. Costilla, «Propuesta de una Briqueta Ecológica Utilizando Cascarilla y Polvillo de arroz», Universidad Católica de Trujillo Benedicto XVI, 2017.
- [29] L. V. García, P. R. Benítez, S. W. Valero, y I. Gutiérrez, «Elaboración de Briquetas a Partir de Residuos de Aserrín Aglutinados con Almidón de Maíz y su Posible Aplicación como Aislante Térmico», *Rev. Ing.*, vol. 29, n.o 1, pp. 22-40, 2018, doi: <https://doi.org/10.15517/ri.v29i1.33090>.
- [30] D. M. Laura y M. H. Karen, «Fabricación de adoquines con caucho de llantas recicladas para adecuar espacios de juegos infantiles», *Ing. Procesos*, pp. 1-13, 2018.
- [31] J. Diniz, A. D. L. Cardoso, J. A. Stahl, M. A. Villetti, y A. F. Martins, «Poder calorífico da casca de arroz, caroço de pêssego, serragem de eucalipto e de seus produtos de pirólise», *Cienc. e Nat.*, vol. 26, n.o 2, pp. 25-32, 2004.
- [32] L. A. Mafla, «Cuantificación del Poder Calorífico Superior e Inferior de los Residuos Sólidos Urbanos: Papel, Cartón, Madera, Materia Orgánica del Distrito Metropolitano de Quito Año 2014-2015», Universidad Internacional SEK, 2015.
- [33] E. Afra, A. Abyaz, y A. Saraeyan, «The production of bagasse biofuel briquettes and the evaluation of natural binders (LNFC, NFC, and lignin) effects on their technical parameters», *J. Clean. Prod.*, vol. 278, p. 123543, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123543>.
- [34] A. Afsal, R. David, V. Baiju, N. M. Suhail, U. Parvathy, y R. B. Rakhi, «Experimental investigations on combustion characteristics of fuel briquettes made from vegetable market waste and saw dust», *Mater. Today Proc.*, pp. 1-6, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.222>.