



Carrera
Ingeniería Civil Mecánica
Universidad de Concepción

Evaluación de la combustión de briquetas de mezclas de residuos sólidos en calefactores a leña

Felipe Andrés Venegas Reveco

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de
Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor guía:
Dr.- Ing. Oscar Farias F.

Diciembre 2025
Concepción, Chile

©2025 Felipe Andrés Venegas Reveco

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento,
incluyendo la cita bibliográfica del documento

Agradecimientos

A mis padres, por ser el pilar fundamental de mi vida. Gracias por el apoyo incondicional durante todos estos años, por creer en mí incluso cuando yo no lo hacía y por darme las herramientas necesarias para llegar a esta meta. Todo mi esfuerzo es, en gran parte, un reflejo del suyo.

A mis a mis familiares, tías, tíos y primos por estar siempre presentes, por cada palabra de aliento y por el cariño constante que me permitió mantenerme enfocado. Un agradecimiento muy especial por haberme apoyado en una de las decisiones más importantes de mi vida, el cambio de carrera. Gracias por no juzgar mi incertidumbre, contarme sus experiencias cuando experimentaron el mismo camino, y por acompañarme en este nuevo rumbo que hoy concluye con éxito.

A mis amigos, tanto a aquellos que me acompañaron en mi primera etapa universitaria como a los que conocí en esta segunda carrera. Gracias por las jornadas de estudio, las risas, los consejos y por hacer que este largo camino fuera mucho más llevadero. Cada uno de ustedes aportó algo valioso a mi formación como persona y profesional.

A los docentes, por su generosidad al entregar sus conocimientos y por guiar mi aprendizaje durante estos años. Sus enseñanzas han sido la base sobre la cual he construido esta investigación.

Finalmente, agradezco de manera especial a los locales “El Balcón 2” y “La Cooperativa eléctrica Los Ángeles Ltda.”, por su disposición y colaboración al facilitar la materia prima necesaria para este estudio. Su aporte fue fundamental para llevar a cabo la fase experimental de esta investigación.

Resumen

La crisis ambiental derivada del uso de combustibles fósiles y la alta contaminación atmosférica por material particulado asociada a la calefacción residencial a leña en Chile, hacen imperativa la búsqueda de alternativas energéticas sostenibles. En este contexto, la valorización de residuos agroindustriales, específicamente cuescos de palta y borra de café (SCG), surge como una oportunidad para desarrollar biocombustibles sólidos que impulsen la economía circular. El objetivo general de este trabajo es evaluar la combustión de briquetas fabricadas a partir de mezclas de estos residuos sólidos en calefactores a leña, analizando su eficiencia energética y las emisiones generadas para determinar su viabilidad frente a la leña tradicional.

Para llevar a cabo la investigación, se diseñaron y fabricaron briquetas cilíndricas con orificio central y briquetas cilíndricas macizas, utilizando dos formulaciones distintas de mezclas de cuesco de palta, SCG y aserrín, empleando almidón de yuca como aglutinante. La metodología incluyó la caracterización fisicoquímica de las materias primas y la determinación experimental del Poder Calorífico Superior (PCS) mediante una bomba calorimétrica. Posteriormente, se realizaron ensayos de combustión en una cocina a leña a escala de laboratorio, donde se registraron perfiles de temperatura, consumo de combustible y se cuantificaron las emisiones de gases (CO, NOx) y Material Particulado (MP) utilizando un analizador de gases y un tren de muestreo isocinético, respectivamente.

Los resultados principales indicaron que las briquetas poseen un potencial energético competitivo, las mezclas A y B alcanzaron un PCS de 16,31 MJ/kg y 17,04 MJ/kg respectivamente, valores muy cercanos a los 17,31 MJ/kg obtenidos para la leña certificada. Sin embargo, en términos ambientales, las briquetas no superan a la leña, presentan mayores emisiones de CO en la fase de brasas (8.000–14.000 mg/m³ vs 4.000–5.800 mg/m³ en leña), confirmando la relación inversa entre estabilidad térmica y generación de CO. Asimismo, las emisiones de NOx dependen de la composición del combustible, La briqueta A, con mayor contenido de nitrógeno (0,52 vs 0,09), genera valores más altos y persistentes (350–500 mg/m³), mientras que la leña mantiene un perfil más estable y con menores emisiones. En cuanto al MP, la leña es el combustible más limpio (29 mg/m³ y 8,05 g totales), mientras que la Briqueta B es la más contaminante (30,2 g, ≈4 veces más que la leña). La Briqueta A se ubica en un punto intermedio, pero aún emite el doble que la leña (16,18 g).

Se concluye que, si bien es posible producir briquetas con propiedades energéticas comparables a la leña incorporando residuos de palta y café, su implementación actual genera mayores emisiones contaminantes en calefactores convencionales. Estos hallazgos sugieren que, para viabilizar su uso como alternativa sostenible, investigaciones futuras deben enfocarse en mejorar la densidad de compactación, una selección de residuos diferentes y optimizar los equipos de combustión para mitigar las emisiones de MP, CO y NOx.

Abstract

The environmental crisis resulting from the use of fossil fuels and the high atmospheric pollution caused by particulate matter associated with residential wood heating in Chile makes the search for sustainable energy alternatives imperative. In this context, the valorization of agro-industrial residues, specifically avocado pits and spent coffee grounds (SCG), emerges as an opportunity to develop solid biofuels that promote the circular economy. The general objective of this work was to evaluate the combustion of briquettes manufactured from mixtures of these solid residues in wood stoves, analyzing their energy efficiency and the emissions generated to determine their viability compared to traditional firewood.

To carry out the research, cylindrical briquettes with a central hole were designed and manufactured using two different formulations of mixtures of avocado pits, SCG, and sawdust, employing cassava starch as a binder. The methodology included the physicochemical characterization of the raw materials and the experimental determination of the Higher Heating Value (PCS) using a bomb calorimeter. Subsequently, combustion tests were conducted in a laboratory-scale wood stove, where temperature profiles, fuel consumption, and emissions of gases (CO, NO_x) and Particulate Matter (PM) were recorded using a gas analyzer and an isokinetic sampling train, respectively.

The main results indicated that the briquettes have competitive energy potential: mixtures A and B reached PCSs of 16,31 MJ/kg and 17,04 MJ/kg, respectively, values very close to the 17,31 MJ/kg obtained for certified firewood. However, in environmental terms, the briquettes did not outperform firewood, exhibiting higher CO emissions during the char phase (8,000–14,000 mg/m³ vs. 4,000–5,800 mg/m³ in firewood), confirming the inverse relationship between thermal stability and CO generation. Furthermore, NO_x emissions depended on fuel composition; Briquette A, with a higher nitrogen content (0.52% vs. 0.09%), generated higher and more persistent values (350–500 mg/m³), while firewood maintained a more stable profile with lower emissions. Regarding PM, firewood was the cleanest fuel (29 mg/m³ and 8.05 g total), while Briquette B was the most polluting (30.2 g, approx 4 times more than firewood). Briquette A stood at an intermediate point but still emitted double that of firewood (16.18 g).

It is concluded that, although it is possible to produce briquettes with energy properties comparable to firewood by incorporating avocado and coffee residues, their current implementation generates higher pollutant emissions in conventional wood stoves. These findings suggest that, to make their use viable as a sustainable alternative, future research should focus on improving compaction density, selecting different residues, and optimizing combustion equipment to mitigate MP and NO_x.

Contenidos

Lista de Figuras	1
Lista de Tablas.....	3
Nomenclatura	4
1 Introducción	6
1.1 Contexto: Problemática Energética y Ambiental Actual.....	6
1.1.1 Problemática y políticas de valorización energética en Chile	6
1.1.2 Relevancia y Disponibilidad de Biomosas Residuales en el Contexto Nacional	6
1.2 Estado del Arte: Valorización Energética de Residuos Orgánicos e Influencia de la Configuración Geométrica	8
1.2.1 Valorización Energética de Residuos de Palta	8
1.2.2 Valorización Energética de Residuos de Café	8
1.2.3 Influencia del Diseño Geométrico	10
1.3 Hipótesis	13
1.4 Objetivos	13
1.4.1 Objetivo General	13
1.4.2 Objetivos específicos	13
2 Metodología	14
2.1 Preparación y Acondicionamiento de la Materia Prima.....	15
2.1.1 Borra del café	15
2.1.2 Cuescos de Palta	15
2.2 Fabricación de las Briquetas	15
2.2.1 Formulación de las Muestras	15
2.2.2 Diseño geométrico	17
2.2.3 Proceso de Compactación y secado	19
2.2.4 Determinación Experimental del Poder Calorífico	20
2.3 Ensayos de Combustión	21
2.3.1 Descripción de Equipos e Instrumentación	21
2.3.2 Procedimiento Experimental.....	29
3 Resultados y discusión	33
3.1 Preparación y Acondicionamiento SCG y CPM.....	33
3.2 Resultado Briquetas	34
3.2.1 Secado de Briquetas	34
3.2.2 Manufactura de Briquetas	35
3.2.3 Poder Calorífico	36
3.3 Resultados Ensayos de Combustión en Cocina a Leña.....	37

3.3.1	Evolución Térmica del Proceso de Combustión.....	38
3.3.2	Influencia de la Geometría en Briquetas	40
3.3.3	Rendimiento Leña y Briquetas	43
3.3.4	Emisiones	46
4	Conclusiones.....	53
	Referencias.....	56

Lista de Figuras

Figura 1. Resultados secados de SCG: para alturas de 6 mm y 11 mm [13]. -----	9
Figura 2. Esquema general del procedimiento experimental de la investigación. -----	14
Figura 3. Dimensiones para briquetas según la norma ISO 17225-7[23]. -----	18
Figura 4. Conjunto de briqueteado: prensa de confección simple, molde de confinamiento en PVC con abrazaderas, mandril axial de madera y émbolo de madera torneada. -----	19
Figura 5. Equipos del sistema CAL2K para la determinación del poder calorífico: (a) unidad calorimétrica CAL2K-ECO; (b) estación de llenado de O ₂ CAL2K-ECO-3; (c) vaso/bomba CAL2K-ECO-4; (d) balanza analítica FA2204E. -----	20
Figura 6. Cocina a leña Alcazar M70. -----	22
Figura 7. Ubicación de los puntos de medición de temperatura mediante termocuplas tipo K en la cocina: (a) cámara de combustión, (b) horno: lado derecho, lado izquierdo y succión del aire primario, y (c) cañón. -----	25
Figura 8. Tren de muestreo. -----	27
Figura 9. Caja caliente, caja fría y portafiltro. -----	28
Figura 10. Unidad de control y monitoreo para el aseguramiento del isocinetismo en el tren de muestreo. -----	28
Figura 11. Estado del lecho de brasas al alcanzar el 20% de la masa residual -----	31
Figura 12. Estado del lecho de brasas al alcanzar el 5% de la masa residual. -----	31
Figura 13. Curva de pérdida acumulada de humedad durante el secado solar de las briquetas. --	35
Figura 14. Muestras finales de briquetas cilíndricas huecas, fabricadas con cuescos de palta, SCG, aserrín y almidón. -----	36
Figura 15. Registro visual del ensayo de combustión de las briquetas experimentales en la cocina Alcázar M70. -----	37
Figura 16. Evolución de T _{HI} en función del tiempo. -----	39
Figura 17. Evolución de T _c en función del tiempo. -----	40
Figura 18. Tasa de quemado adimensional vs tiempo adimensional para Briqueta A E4 (con orificio central) y Briqueta A E10 (maciza). -----	41
Figura 19. Temperatura T _{HI} vs Tiempo para Briqueta A E4 (con orificio central) y Briqueta A E10 (maciza). -----	42
Figura 20. Tasa de quemado adimensional vs tiempo adimensional para Briqueta A E4 (con orificio central), Briqueta A E10 (maciza) y Leña. -----	42
Figura 21. Evolución temporal del rendimiento y concentración de O ₂ durante la combustión de Briqueta A E10. -----	43
Figura 22. Evolución temporal del rendimiento y concentración de O ₂ durante la combustión de Leña E9. -----	44
Figura 23. Evolución temporal del rendimiento y la Temperatura de los Gases de Escape de Briqueta A E10. -----	45
Figura 24. Evolución temporal del rendimiento y la Temperatura de los Gases de Escape de Briqueta A E10. -----	45
Figura 25. Gráfico comparativo del rendimiento de Briquetas A y Leña. -----	46
Figura 26. Evolución adimensional de la masa y emisiones de CO normalizadas: Leña E9 vs Briqueta A E10. -----	47

Figura 27. Evolución temporal de la T_{HI} y emisiones de CO normalizadas: Leña E9 vs Briqueta A E10. ----- 48

Figura 28. Evolución temporal de la T_{HI} y emisiones de NO_x normalizadas: Leña E9 vs Briqueta A E10. ----- 49

Figura 29. Evolución temporal del O₂ y emisiones de NO_x normalizadas de la Briqueta A E10. ---- 50

Figura 30. Evolución temporal del O₂ y emisiones de NO_x normalizadas de la Leña E9. ----- 50

Lista de Tablas

Tabla 1. Cuadro comparativo de las diferentes geometrías estudiadas por otros autores.	12
Tabla 2. Distribución de componentes por opción de formulación	16
Tabla 3. Composición elemental según bibliografía para el CPM, SCG, aserrín de pino y almidón de maíz en base seca.	17
Tabla 4. Composición elemental estimada para ambas formulaciones de briquetas en base seca y de la Leña en base seca.	17
Tabla 5. Características cocina a leña combustión lenta Alcazar M70 [26].	21
Tabla 6. Datos técnicos Testo 350. Fuente: testo.com	26
Tabla 7. Contenido impingers [28].	27
Tabla 8. Condiciones de ensayo.	32
Tabla 9. Serie de pesaje y secado de SCG (con balanza Truper).	33
Tabla 10. Porcentaje de humedad y pérdida de peso en cuescos de palta molidos (Secado al sol, registro cada 24 horas).....	34
Tabla 11. Resultados experimentales de Poder Calorífico de Biomasa con ecosistema CAL2K-ECO.	36
Tabla 12. Resultados de emisiones de MP y desempeño de quemado para Leña, Briqueta A y B. .	51
Tabla 13. Resultados de emisiones de MP y desempeño de quemado para Leña y Briqueta A maciza.	51

Nomenclatura

A/V	: Relación área volumen, mm^{-1}
B	: Masa de combustible quemada por hora, kg/h
B_{fl}	: Carga de combustible para régimen de encendido, kg
CO_{med}	: Concentración medida de monóxido de carbono, ppm
CO_{norm}	: Concentración de monóxido de carbono normalizado, mg/m^3
d_{CO}	: Densidad monóxido de carbono, kg/m^3
H_{bh}	: Contenido de humedad en base húmeda, %
m_f	: Masa final, g
m_i	: Masa inicial, g
NO_{med}	: Concentración medida de óxido de nitrógeno, ppm
NO_{2med}	: Concentración medida de dióxido de nitrógeno, ppm
NO_{xnorm}	: Concentración de óxido de nitrógeno normalizado, mg/m^3
O_{2med}	: Concentración medida de oxígeno, %
O_{2ref}	: Concentración de oxígeno de referencia, %
P	: Potencia térmica total, kW
P_n	: Potencia térmica nominal, kW
PCI	: Poder calorífico inferior, MJ/kg
PCS	: Poder calorífico superior, MJ/kg
Q_a	: Pérdida de calor sensible, kJ/kg
Q_b	: Pérdida de calor latente, kJ/kg
q_a	: Porcentaje de pérdida de calor sensible, %
q_b	: Porcentaje de pérdida de calor latente, %
SO_{2med}	: Concentración medida de dióxido de azufre, ppm
SO_{2norm}	: Concentración de dióxido de azufre normalizada, mg/m^3
T_{amb}	: Temperatura ambiente, $^{\circ}\text{C}$
T_c	: Temperatura de la llama en la cámara de combustión, $^{\circ}\text{C}$
T_g	: Temperatura de los gases de combustión, $^{\circ}\text{C}$
T_{HD}	: Temperatura del horno en el lado derecho, $^{\circ}\text{C}$
T_{HI}	: Temperatura del horno en el lado izquierdo, $^{\circ}\text{C}$
T_{sc}	: Temperatura succión del aire primario, $^{\circ}\text{C}$
t_b	: Intervalo de recarga de combustible, h

Símbolos griegos

η	: Rendimiento del equipo de combustión, %
--------	---

Siglas

ASTM	: American Society for Testing and Materials
BA	: Benzoic Acid
BCR	: Base como recibido
CA	: Composición A (Fórmula de briqueta 1)
CB	: Composición B (Fórmula de briqueta 2)
CPM	: Cuesco palta molido
DAQ	: Data Acquisition
ISO	: International Organization for Standardization
MP	: Material particulado

MP2,5 : Material particulado fino (menor a 2,5 micras)
NBR : Normalized Burning Rate
PET : Tereftalato de polietileno
PVC : Policloruro de vinilo
RETC : Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes
SCG : Spent Coffee Grounds

1 Introducción

1.1 Contexto: Problemática Energética y Ambiental Actual

La creciente crisis ambiental asociada al uso de combustibles fósiles y biomasa tradicional ha impulsado la búsqueda de alternativas energéticas sostenibles que permitan reducir las emisiones contaminantes y aprovechar residuos agroindustriales. En este escenario, la valorización energética de residuos orgánicos se presenta como una estrategia relevante para transitar hacia una economía circular y mitigar los impactos del cambio climático.

1.1.1 Problemática y políticas de valorización energética en Chile

En el contexto chileno, esta problemática se vuelve crítica. Según el Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC), la combustión residencial de leña constituye la principal fuente de material particulado fino (MP2,5), alcanzando 125.720 toneladas en 2022, con La Araucanía como la región más afectada [1]. Dicho contaminante se asocia a graves efectos en la salud respiratoria y cardiovascular de la población, lo que ha motivado la implementación de normas de emisión estrictas para calefactores a leña y pellet de madera (Decreto Supremo N.º 39/2011 y su revisión en el DS N.º 46/2014).

En respuesta a estos desafíos, la Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos Chile 2040 plantea la meta de valorizar al menos un 66% de los residuos orgánicos municipales hacia dicho año, promoviendo su uso para la producción de mejoradores de suelo, energía eléctrica y térmica [2]. En este marco, el aprovechamiento energético de residuos agrícolas como los cuescos y restos de poda de palta se alinea con los objetivos de sostenibilidad del país y con los compromisos internacionales asumidos en materia de carbono neutralidad al 2050.

1.1.2 Relevancia y Disponibilidad de Biomásas Residuales en el Contexto Nacional

La selección de SCG, el Cuesco de Palta y el Aserrín responde a una estrategia de Economía Circular basada en la alta disponibilidad de estos residuos en la realidad nacional chilena.

Chile se posiciona como el segundo consumidor mundial de palta Hass, con un consumo per cápita que alcanzó los 8,6 kg en 2024 [3]. Asimismo, el Comité de Paltas de Chile señala que el incremento de la demanda interna ha provocado que cerca del 45% de la producción permanezca en el país, mientras que el 55% restante se destina a mercados internacionales como Latinoamérica, Estados Unidos, Europa y Asia.

En este escenario, el consumo nacional de palta registró un aumento del 4,87% durante 2024, mientras que las exportaciones crecieron un 13,7%. De acuerdo con cifras del Banco Central, los envíos al exterior alcanzaron un valor de US\$207 millones FOB [3].

La producción de paltas en la temporada 2024-202, según cifras del Comité de Paltas de Chile, el país alcanzó las 240 mil toneladas [4]. Del volumen total cosechado, el 43% (equivalente a unas 103 mil toneladas) se destinó exclusivamente al consumo interno [4].

Considerando que el cuesco representa aproximadamente el 15% del peso total del fruto, se puede estimar que solo la demanda interna de la última temporada generó un potencial de 15.480 toneladas de biomasa residual.

Para dimensionar la relevancia local de este proyecto, se realizó una estimación basada en los primeros resultados del Censo 2024, que sitúan a la comuna de Concepción con 230 375 habitantes. Considerando el consumo per cápita nacional de 8,6 kg de palta al año, se estima que solo en la comuna de Concepción se consumen cerca de 1 981 toneladas de palta anualmente.

Dado que el cuesco representa el 15% del peso del fruto, la ciudad genera un potencial de 297 toneladas de biomasa residual cada año.

En contraste, Chile no se posiciona como uno de los mayores consumidores de café a nivel mundial, pero si es el tercer país con mayor consumo en América Latina [5]. De hecho, entre 2011 y 2018 el consumo aumentó un 175% [5]. Los chilenos consumen en promedio 10 tazas de café a la semana y según la encuesta realizada por Corpa el 28% de los encuestados prefieren el café de grano [6].

Desde el punto de vista local, la Municipalidad de Concepción en un año ha logrado reciclar 3,5 toneladas de borras de café desde el inicio de su campaña en 2023, destinándolas a la producción de compost y vermicompost. En total, 11 cafeterías participan en este programa de recolección de residuos orgánicos, donde el personal municipal retira los contenedores dos veces por semana [7]. A partir de esta noticia se estima que la generación anual de residuos de café en una cafetería mediana es de 318 kg. Proyectando este valor a 55 establecimientos de Concepción [8], se podría recaudar 17,5 toneladas anuales.

El aserrín es el principal subproducto de la industria forestal chilena. Según el Instituto Forestal (INFOR), el 52,2% de los subproductos generados por los aserraderos corresponden a aserrín primario. Su inclusión en este proyecto garantiza una base estructural estable para la briqueta, utilizando el residuo industrial más abundante de las regiones del sur del país [9].

Como se pudo apreciar, existe un potencial energético tanto en los cuescos de palta como en la borra del café, pero estos no se han estudiado en conjunto, por ende, surge la siguiente pregunta de investigación.

¿Es posible producir briquetas incorporando cuescos de palta y residuos de café a la tradicional briqueta de aserrín, y que estas posean propiedades energéticas y ambientales comparables o superiores a las de la leña tradicional, contribuyendo así a la reducción de emisiones contaminantes y a la valorización de residuos orgánicos en Chile?

La importancia de abordar esta pregunta radica en su doble contribución: por un lado, ofrecer una alternativa energética más limpia y eficiente frente a la leña, reduciendo la contaminación atmosférica; y por otro, impulsar la gestión sostenible de residuos agrícolas, en consonancia con la economía circular y las metas climáticas nacionales. Este estudio, por tanto, busca llenar una brecha en el estado del arte mediante la evaluación experimental de briquetas elaboradas con residuos de palta, café y madera, su comparación con combustibles convencionales, y su potencial inserción en la matriz energética chilena.

1.2 Estado del Arte: Valorización Energética de Residuos Orgánicos e Influencia de la Configuración Geométrica

1.2.1 Valorización Energética de Residuos de Palta

En particular, los residuos del cultivo y procesamiento de palta han despertado interés como biomasa con potencial energético. Estudios recientes han demostrado que tanto los cuescos como los restos de poda poseen propiedades combustibles comparables a las de maderas convencionales, con valores de poder calorífico superior entre 18,7 y 19,4 MJ/kg, así como bajas concentraciones de azufre y cloro, reduciendo riesgos de emisiones nocivas durante la combustión [10]. Asimismo, la aplicación de fertilizantes orgánicos como el estiércol mejora las características energéticas de estos residuos, lo que refuerza su viabilidad como biocombustible sólido. En dicho estudio, los cuescos fueron secados al aire durante al menos 72 horas y posteriormente molidos en dos etapas hasta obtener un tamaño de partícula inferior a 0,2 mm, con el fin de garantizar la homogeneidad en los análisis termoquímicos.

Fanarraga Lukuy et al. desarrollaron briquetas ecológicas a partir de cuescos de palta. El proceso contempló el lavado, secado al aire durante cinco días a 28 °C, molienda y almacenamiento del cuesco, para luego mezclarse con aserrín y almidón de yuca previamente disuelto y calentado como aglutinante natural. Posteriormente, la pasta obtenida se vertió en moldes cilíndricos (7 cm × 5 cm), fue compactada con una prensa manual y finalmente secada durante cuatro días al aire libre. Se evaluaron tres formulaciones distintas: (1) 50 g de cuesco + 20 g de aserrín + 20 g de almidón de yuca + 60 ml de agua; (2) 60 g de cuesco + 20 g de aserrín + 25 g de almidón de yuca + 80 ml de agua; y (3) 70 g de cuesco + 20 g de aserrín + 30 g de almidón de yuca + 100 ml de agua. Los resultados indicaron que la tercera combinación presentó el mejor desempeño, con menor humedad (8,75 %), mayor poder calorífico (13,4 MJ/kg), un tiempo de combustión de 106 min, bajo contenido de cenizas (1,5 %) y una significativa reducción en emisiones de CO₂, 480 ppm x 0,285 kg de combustible frente a 1.432 ppm del carbón vegetal [11].

De manera paralela, diversas investigaciones han explorado la producción de briquetas a partir de residuos sólidos de origen lignocelulósico y plásticos, evidenciando que la densificación de mezclas permite aumentar el valor calorífico, disminuir el contenido de cenizas y mejorar la durabilidad del combustible. Por ejemplo, briquetas elaboradas con mezclas de residuos de madera y botellas de PET han alcanzado poderes caloríficos superiores a 20 MJ/kg, cumpliendo con estándares europeos de biocombustibles densificados [12]. No obstante, existe aún una brecha de conocimiento en torno a la incorporación de residuos agrícolas específicos, como los de palta, en el diseño de biocombustibles sólidos, y su comparación con combustibles tradicionales como la leña.

1.2.2 Valorización Energética de Residuos de Café

Diversas investigaciones han demostrado que la borra de café constituye un residuo agroindustrial con elevado potencial para su aprovechamiento energético. En una evaluación sus propiedades combustibles en una caldera de 6,5 kW, constatando que, tras un secado al aire hasta contenidos de humedad en base húmeda inferiores al 15%, la biomasa alcanzó

un poder calorífico de 18,8 MJ/kg, con partículas predominantemente entre 100 y 500 μm . El estudio además verificó que el consumo de SCG como combustible generó emisiones de CO (643 ppm) y NOx (163 ppm), asociadas principalmente a su mayor contenido de nitrógeno en comparación con los pellets de madera, lo que evidencia la necesidad de optimizar el diseño de los equipos de combustión para reducir estos compuestos [13]. En esta investigación el contenido de agua se midió mediante un analizador de humedad (Kett, FD-720) el cual arrojó los resultados presentes en la Figura 1. En esta se puede observar que en el caso 1, con una altura de 6 mm, el contenido inicial de agua supera el 60%. Sin embargo, tras dos días de secado, este valor disminuye a menos del 15%, lo que lo hace apto para su uso como combustible. Durante el primer día, se observa una reducción del 25% en el contenido de humedad. En contraste, el caso 2, con una altura de 11 mm, requiere más de seis días para alcanzar un nivel de humedad inferior al 15%. En este caso, la disminución durante el primer día de secado es de apenas 8% [13].

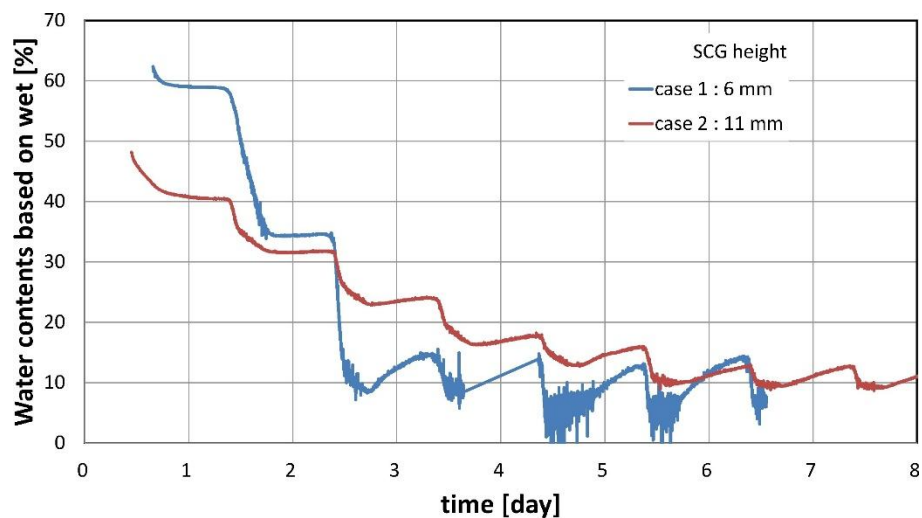


Figura 1. Resultados secados de SCG: para alturas de 6 mm y 11 mm [13].

Por otro lado, la dificultad de compactar la borra de café sin aditivos ha motivado el uso de aglutinantes orgánicos en procesos de briquetado a baja presión y temperatura. Se demostró que la incorporación de gomas naturales como xantana y guar mejora de manera significativa la densidad, la durabilidad y la resistencia al manejo de las briquetas [14]. La combinación 5% de goma xantana y 30% de humedad, comprimidas a 12 MPa, alcanzo densidades de 0,819 g/cm^3 y pérdidas por abrasión tan bajas como 3,9%. En términos combustibles, el uso de aglutinantes redujo ligeramente el poder calorífico de 25,4 MJ/kg a valores entre 23,5–24,5 MJ/kg, pero disminuyó también el contenido de nitrógeno y, en consecuencia, las emisiones de NOx en la combustión [14].

Más recientemente, la torrefacción se ha consolidado como una metodología eficaz para mejorar las propiedades energéticas y de almacenamiento de la borra de café. Se demostró que el tratamiento térmico a 300 °C durante 30 minutos permite retener hasta un 11% de lípidos en el biochar, alcanzando un poder calorífico de 28,16 MJ/kg, superior al de la biomasa sin pretratamiento [15]. Este proceso no solo incrementa la densidad energética y

la hidrofobicidad del material, sino que también mejora su estabilidad durante el almacenamiento y abre la posibilidad de producir “oilchar”, un biocombustible sólido con capacidad de adsorber hidrocarburos.

En esta investigación también se describió el proceso de obtención y tratado de los residuos. Los SCG utilizados para la investigación eran recolectados de tiendas 7-Eleven, dichas muestras poseían un porcentaje de humedad en torno al 60%. Las muestras se almacenaron inmediatamente en refrigeradores a 4°C para evitar la aparición de moho. Antes de realizar los experimentos las muestras se secaron en un horno a 105°C durante al menos 24 horas para asegurar una mayor pérdida de la humedad, perdiendo alrededor de un 80% de humedad. Posteriormente, se realizó una tamización utilizando una malla de 35 (425 µm) con el objetivo de homogeneizar el tamaño de partícula de las muestras [15].

La carbonización se realizó entre 200 y 500 °C en una atmosfera inerte, con un tiempo de reacción de 30 minutos, obteniendo biocarbón de residuos de café. Se realizó un análisis inmediato del SCG y BSCG mediante las normas ASTM D1102, ASTM E872-82 y ASTM D3172-13. El análisis elemental se realizó con un analizador elemental (PerkinElmer 2400 Series II CHNS/O). el Poder calorífico superior se midió con una bomba calorimétrica (IKA C6000). Entre otras múltiples pruebas que se realizaron [15].

1.2.3 Influencia del Diseño Geométrico

Joel Chaney, realizó una comparativa entre estas dos geometrías asegurando que la comparación fuera bajo condiciones controladas de masa, densidad y humedad. Se usó el parámetro área/volumen (A/V) para comparar briquetas rectangulares y cilíndricas. Se concluye que la geometría influye directamente en la velocidad de combustión. Las briquetas cilíndricas con orificio central presentan tasas de combustión superiores respecto de las rectangulares, efecto que se explica por un mayor cociente A/V y por la presencia de cavidades que favorecen tanto la transferencia de calor como la circulación de aire. Cabe destacar que el parámetro cinético que describe este fenómeno se mantiene independiente de la forma, confirmando que la diferencia en el rendimiento está dada principalmente por la configuración geométrica. Además, al aumenta la densidad, la tasa de combustión normalizada (NBR) disminuye de manera exponencial, lo que se atribuye a la reducción de la porosidad y, en consecuencia, a una menor disponibilidad de oxígeno en el interior del material [16].

La metodología consistió en la fabricación de briquetas de biomasa con dos geometrías, rectangulares en forma de ladrillo (150 × 150 mm con distinta altura) y cilíndricas con orificio central, utilizando moldes metálicos y posterior secado en horno hasta alcanzar humedad constante. Las briquetas fueron sometidas a ensayos de combustión al aire libre, colocadas sobre una rejilla metálica con una campana de extracción simple. Durante la combustión se registró la pérdida de masa en función del tiempo, lo que permite calcular la NBR y correlacionarla con parámetros geométricos como la relación A/V , además de analizar la influencia de la densidad y la forma en la cinética de la combustión [16].

Otra investigación analiza cómo la geometría, el tipo de aglutinante y la densidad influyen en el rendimiento térmico de briquetas elaboradas con aserrín y materia orgánica residual. Se fabricaron briquetas con tres formas geométricas, cilíndrica, triangular y esférica

utilizando distintos aglutinantes naturales, y se evaluaron mediante pruebas de ignición y combustión controlada, registrando tiempos de encendido, de quema total y estabilidad de la llama. Los ensayos se realizaron bajo condiciones reproducibles, midiendo la rapidez con que las briquetas alcanzaban la combustión autosostenida y la temperatura del agua en una prueba de ebullición [17].

Los resultados mostraron que la geometría tiene un efecto significativo en la eficiencia del encendido, las briquetas esféricas presentaron el menor tiempo de ignición (2,7 min) y una combustión más uniforme, seguidas por las triangulares (2,9 min), mientras que las cilíndricas fueron las más lentas (3,5 min) debido a una menor aireación. Aunque el tiempo total de combustión fue similar en todas (≈ 17 min), las diferencias en flujo de aire y distribución térmica influyeron en la calidad del quemado. Los valores de índice de empaquetamiento confirmaron que las briquetas esféricas (0,819) permiten un mejor equilibrio entre densidad y circulación de oxígeno. El índice de compactación corresponde a la proporción del volumen ocupado por el material sólido (las briquetas) respecto al volumen total disponible [17].

En conclusión, la investigación establece que la forma geométrica es determinante en el desempeño térmico y la eficiencia energética de las briquetas. La forma esférica se considera la más adecuada, al ofrecer una ignición más rápida y combustión estable, además de ventajas en almacenamiento y manipulación. Asimismo, se concluyó que la interacción entre la geometría y la densidad de las briquetas ejerce un efecto más determinante sobre el comportamiento térmico que el tipo de aglutinante empleado.

La Tabla 1 presentada a continuación resume las ventajas, desventajas y datos numéricos encontrados por otros investigadores con relación a diferentes formas geométricas de las briquetas.

Tabla 1. Cuadro comparativo de las diferentes geometrías estudiadas por otros autores.

	Cilíndrica maciza [17]	Triangular [17]	Esférica [17]	Rectangular [16]	Cilíndrica con orificio central [16]
Ventajas	<p>Estructura estable, fácil fabricación y control dimensional.</p> <p>Densidades altas prolongan la combustión.</p>	<p>Facilita cierta circulación de aire por los vértices.</p> <p>Mayor superficie que la cilíndrica, encendido más rápido.</p>	<p>Mejor distribución de aire y oxígeno entre briquetas.</p> <p>Encendido más rápido y combustión más uniforme.</p> <p>Fácil manipulación, transporte y almacenamiento.</p>	<p>Relación lineal entre NBR y A/V.</p> <p>Mayor A/V implica mayor velocidad de combustión.</p>	<p>Flujo de aire central proporciona una combustión más estable.</p> <p>Forma idónea para comparar efectos de presión y densidad.</p>
Desventajas	<p>Mayor tiempo de encendido por menor aireación.</p> <p>Bajas densidades arden rápido, pero con menor duración.</p>	<p>Aireación irregular; combustión menos uniforme que la esférica.</p> <p>Superficie de contacto mayor al apilarse, menor eficiencia térmica.</p>	<p>Se consumen más rápido que las de baja A/V.</p> <p>En empaques masivos se reduce contacto térmico lateral.</p>	<p>Si A/V es demasiado bajo, no se sostiene la combustión en aire libre sin calor externo.</p> <p>La geometría afecta más a bajas densidades.</p>	<p>Si la superficie expuesta es poca, la combustión se interrumpe en aire libre.</p>
Parámetros experimentales y resultados numéricos	<p>Ignición: 3.5, 3.8 y 4.0 min.</p> <p>Tiempo de combustión: \approx 17 min.</p> <p>Packing ratio: 0.760.</p> <p>Densidades ensayadas: 600, 700, 800 kg/m³</p>	<p>Ignición: 2.9 min.</p> <p>Combustión: \approx 17 min.</p> <p>Packing ratio: 0.695</p>	<p>Ignición: 2.7 min.</p> <p>Combustión: \approx 17 min.</p> <p>Packing ratio: 0.819</p>	<p>Relación A/V \approx 0.145 a 0.165 mm⁻¹.</p> <p>Densidad media: 276 kg/m³.</p>	<p>Densidad seca varió linealmente con la presión de compactación.</p>

1.3 Hipótesis

La utilización de mezclas de residuos orgánicos (aserrín, borra de café y cuescos de palta) en la elaboración de briquetas permitirá obtener un biocombustible con eficiencia energética comparable a la leña convencional y con menores emisiones de monóxido de carbono (CO) y material particulado en calefactores a leña.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Evaluar la combustión de briquetas fabricadas a partir de mezclas de residuos sólidos en calefactores a leña, considerando su eficiencia energética y las emisiones generadas, con el fin de determinar su viabilidad como alternativa sostenible a la leña tradicional.

1.4.2 Objetivos específicos

OE1: Caracterizar los residuos a utilizar.

OE2: Diseñar briquetas con geometrías que favorezcan la combustión.

OE3: Realizar pruebas de combustión en una cocina a leña a escala de laboratorio.

OE4: Analizar la eficiencia energética, las emisiones de CO y material particulado de las briquetas, y comparar su desempeño frente a la leña convencional.

2 Metodología

El esquema presente en la Figura 2 sintetiza, de manera secuencial, el procedimiento general de la investigación, desde la obtención y acondicionamiento de las materias primas hasta la fabricación caracterización de las briquetas, incluyendo los ensayos energéticos y de combustión.

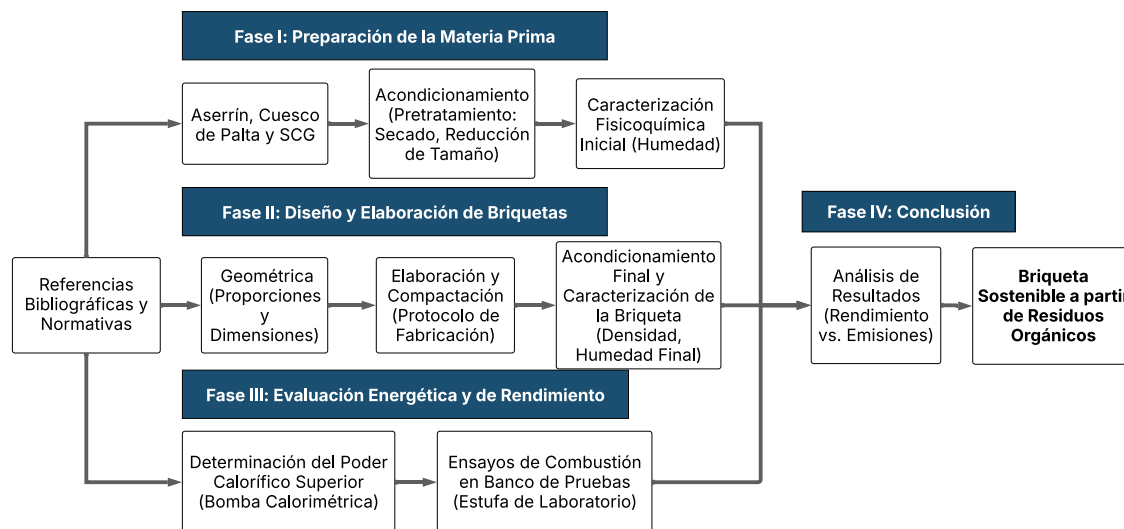


Figura 2. Esquema general del procedimiento experimental de la investigación.

Fase I: Preparación de la Materia Prima

Se seleccionan residuos orgánicos como aserrín, cuesco de palta y SCG. Estos se secan y se trituran para lograr un tamaño uniforme. Luego, secan para determinar la cantidad de humedad que pierden y el tiempo que demoran en estar listas para su uso.

Fase II: Diseño y Elaboración de Briquetas

Se define el diseño experimental basado en bibliografía y normas, eligiendo proporciones adecuadas de biomasa y aglutinante. Se fabrican las briquetas siguiendo un protocolo, se secan y se verifica su densidad antes de probar su rendimiento.

Fase III: Evaluación Energética y de Rendimiento

Se mide el poder calorífico con una bomba calorimétrica. Luego, se realizan pruebas de combustión en laboratorio, evaluando consumo, emisiones gaseosas y material particulado, según normas técnicas.

Fase IV: Conclusión

Se comparan los resultados físicos, energéticos y ambientales con los resultados entregados por la leña certificada. El estudio confirmara si las briquetas hechas con estos residuos orgánicos son viables y sostenibles.

2.1 Preparación y Acondicionamiento de la Materia Prima

2.1.1 Borra del café

De acuerdo con la literatura, el secado natural de los SCG mediante su distribución en capas delgadas de aproximadamente 6 y 11 mm de espesor expuestas al aire libre y al sol puede reducir la humedad a valores cercanos al 15% en menos de seis días [13].

Teniendo en cuenta los resultados anteriores se aplicó un procedimiento similar de secado, las muestras de café se extendieron sobre una bandeja metálica, procurando un espesor de 6 mm, estas se dejaron al sol durante 3 días. Al no contar con medidor de humedad solo se registró el peso cada 24 horas con una báscula digital Truper 15160. El contenido de humedad en base húmeda (H_{bh}) se calculó una vez finalizado el proceso de secado, utilizando la ecuación (1).

2.1.2 Cuescos de Palta

Para la preparación de las muestras de cuesco de palta, se establece un protocolo de secado natural adaptado a condiciones sin equipamiento de laboratorio, basándose en los procedimientos usado en otras investigaciones.

Los cuescos fueron extendidos en una estructura mallada y expuestos al aire y a la radiación solar durante el día, mientras que por la noche se resguardaron bajo techo en un espacio ventilado para evitar la reabsorción de humedad. El secado se prolongó durante un período de 7 a 10 días, con volteo diario de las muestras para favorecer la homogeneidad del proceso.

Los cuescos de palta, una vez secos, fueron triturados en un molino para granos manual (Corona Corn Mill) obteniendo cuesco de palta molido (CPM). Este proceso de molienda permite alcanzar una granulometría uniforme, para favorecer la cohesión con los demás residuos de las briquetas.

Posterior a la trituración, las partículas finas se colocaron nuevamente al sol, esparciendo el material molido en bandejas hasta lograr un espesor de masa de aproximadamente 6 mm. Las muestras se resguardaron durante la noche y se pesaron cada 24 horas para monitorear la pérdida de humedad hasta que el peso no variara. El H_{bh} se calculó una vez finalizado el proceso de secado, utilizando la ecuación (1).

$$H_{bh} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot 100 \quad (1)$$

2.2 Fabricación de las Briquetas

2.2.1 Formulación de las Muestras

A partir de la revisión de los antecedentes del proyecto, se define como matriz base la formulación que emplea 70 g de cuesco de palta, 20 g de aserrín y 30 g de almidón de yuca, con 100 mL de agua para el formado. Dicha combinación se selecciona por haber mostrado el mejor desempeño global dentro del estudio específico de briquetas con cuesco por

combinar menor humedad (8,75%), mayor poder calorífico (13.358 kJ/kg), tiempo de combustión elevado (106 min) y menor ceniza (1,5%) [11].

Para integrar SCG sin comprometer emisiones y aprovechando su valor energético, se sustituye parcialmente la fracción combustible (cuesco + aserrín), manteniendo fijo el aglutinante. La decisión se sustenta en que el SCG seco presenta poder calorífico inferior (PCI) elevado ($\geq 18,8$ MJ/kg) y cenizas moderadas, pero nitrógeno relevante ($\geq 1-2\%$ m/m). Teniendo en cuenta ensayos con pellets 50% SCG y 50% biomasa leñosa donde se reportan CO/NOx en rangos comparables a biomazas de referencia (pino) cuando se optimiza el aireado, lo que respalda niveles intermedios de sustitución [13]. Además, debido al aumento del volumen de la briqueta respecto al de referencia, se incrementaron las medidas de la fracción combustible ahora compuesta por CPM, SCG y aserrín de tal manera de mantener la densidad en aproximadamente $0,87$ g/cm³, como también se aumentó la medida del aglutinante. Con esto presente se define la primera composición.

Composición A (CA): 109 g cuesco + 18 g SCG + 36 g aserrín + 54 g almidón; agua de proceso de referencia 220 ml, también ajustable por la humedad real del SCG. Esta opción busca al caso base incorporarle SCG con el fin de aumentar el poder calorífico y ver cómo se afecta el PCI, los gases de escape y el contenido de ceniza. Esta opción limita el aporte de nitrógeno del SCG y, por ende, el potencial de formación de NO [13], [18].

La composición siguiente se define considerando los aprendizajes derivados de la fabricación de la CA y de una de las primeras pruebas de briquetas.

Composición B (CB): 54 g cuesco + 54 g SCG + 54 g aserrín + 54 g almidón; agua base 270 ml, también ajustable por la humedad real del SCG. Esta opción busca mantener la fracción combustible igual para los tres componentes manteniendo la proporción de aglutinante del caso base.

La Tabla 2 resume las proporciones usadas y las expresa en porcentaje del total de la masa.

Tabla 2. Distribución de componentes por opción de formulación

	CA		CB	
	[g]	[%]	[g]	[%]
CPM	109 ±0,5	50,0	54±0,5	25,0
SCG	18±0,5	8,3	54±0,5	25,0
Aserrín	36±0,5	16,7	54±0,5	25,0
Aglutinante	54±0,5	25,0	54±0,5	25,0
Total	218±2	100,0	218±2	100,0

Debido a las limitaciones para realizar un análisis elemental experimental de las briquetas fabricadas, se procedió a estimar su composición química teórica mediante un balance de masa ponderado, visto en la ecuación (2), Donde E_{final} es el porcentaje final del elemento químico en la briqueta, E_k el porcentaje de ese elemento en cada ingrediente individual, f_k

es la fracción de mezcla de ese ingrediente según la Tabla 2 y k representa cada ingrediente.

$$E_{final} = \sum_{k=1}^n E_k \cdot f_k \quad (2)$$

Esta caracterización teórica es fundamental para los posteriores cálculos de rendimiento y pérdidas según la norma NCh3173. La Tabla 3 muestra la composición elemental de los CPM, SCG, aserrín de pino y almidón de maíz según datos bibliográficos y la Tabla 4 presenta la composición elemental estimada para ambas formulaciones de briquetas en base seca y la leña.

Tabla 3. Composición elemental según bibliografía para el CPM, SCG, aserrín de pino y almidón de maíz en base seca.

	SCG [19]	CPM [20]	Aserrín [21]	Almidón [22]
C (%)	52,38	47,00	57,60	38,98
H (%)	9,66	6,20	7,18	7,04
N (%)	1,37	0,56	0,78	0,00
S (%)	0,05	0,04	0,45	0,00
O (%)	36,53	46,19	30,51	53,62

Tabla 4. Composición elemental estimada para ambas formulaciones de briquetas en base seca y de la Leña en base seca.

	Briqueta A	Briqueta B	Eucaliptus Globulus
C (%)	47,21	48,99	47,76
H (%)	6,86	7,52	6,32
N (%)	0,52	0,68	0,09
S (%)	0,10	0,14	0,05
O (%)	44,63	41,71	45,77

2.2.2 Diseño geométrico

Considerando la norma ISO 17225-3 “Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 3: Clases de briquetas de madera”, en la cual se establecen las geometrías aprobadas para briquetas, Entre estas se incluyen las geometrías cilíndricas,

con o sin orificio en medio y las rectangulares, como se ve en la Figura 3. Dado que la estructura cilíndrica con orificio ha mostrado un mejor desempeño en comparación con las rectangulares. Se realizan las pruebas con este tipo de geometría y con la geometría cilíndrica maciza para comparar si existe un veneficio real en este canal interno. Cabe señalar que, según dicha norma, el único requisito dimensional para las briquetas cilíndricas es que su diámetro exterior sea superior a 25 mm [23].

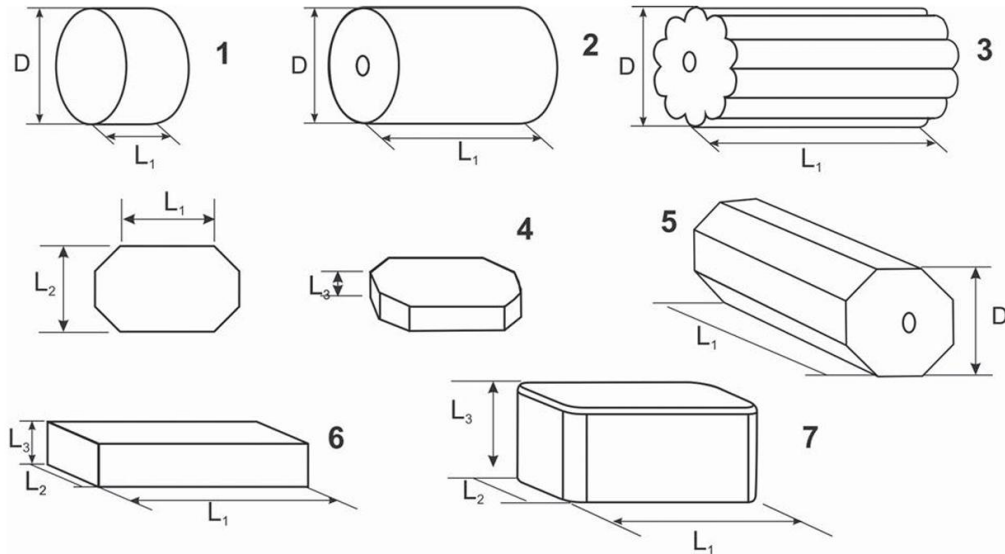


Figura 3. Dimensiones para briquetas según la norma ISO 17225-7[23].

Como molde se seleccionó un tubo de PVC, certificado mediante la norma chilena NCh1779/2017 y cuyo diámetro interno es de 7 cm. Sobre este molde se añadió una capa de PVC genérico como protección adicional, y se colocaron cuatro abrazaderas metálicas para prevenir deformaciones causadas por la presión.

Para formar el orificio central de la briketa se insertó un cilindro de madera de 1,9 cm de diámetro, que actuó como núcleo o mandril. Se utilizó una pieza de madera torneada como embolo, con un diámetro aproximado de 7 cm y un orificio interno de aproximadamente 2 cm por donde pasaba el mandril.

Una vez el material fue dispuesto en el espacio anular del molde, se procedió a su compactación. Para compactar se usó un dispositivo de fabricación no convencional construido a partir de componentes recuperados para aumentar la transferencia de fuerza y la presión de compactación. En la Figura 4 se puede ver este dispositivo, el cual se confeccionó con siguientes componentes recuperados.

- Marco Estructural: Se utilizó el armazón metálico proveniente de una antigua máquina extrusora de churros. Esta estructura sirvió como el chasis principal de esta prensa improvisada.
- Mecanismo de Actuación: La fuerza se suministró mediante un actuador hidráulico de simple efecto (Gato Hidráulico Tipo Botella), el cual posee una capacidad nominal de 2 toneladas.

- Plataforma de Ajuste y Soporte: Para asegurar la altura de trabajo óptima y una distribución uniforme de la carga en la base, se emplearon tablas. Estos calzos permitieron el ajuste de la carrera efectiva del pistón del actuador.

Esta configuración permitió estimar la presión aplicada, alcanzando un valor estimado de 5,5 MPa.



Figura 4. Conjunto de briqueteado: prensa de confección simple, molde de confinamiento en PVC con abrazaderas, mandril axial de madera y émbolo de madera torneada.

2.2.3 Proceso de Compactación y secado

Para la elaboración de las briquetas, primero se cuantifican materias primas. Las cantidades definidas de la fracción combustible y el aglutinante fueron pesadas utilizando una balanza Truper.

Posteriormente, se procedió a la preparación del aglutinante. El almidón se disuelve en agua fría, la mezcla resultante es calentada hasta alcanzar una temperatura próxima al punto de gelatinización del aglutinante.

Una vez caliente el aglutinante, se incorpora la masa de la fracción combustible. La mezcla se revuelve de manera continua a fuego lento para garantizar la homogeneización y la adecuada adhesión del aglutinante a la biomasa. El contenido resultante es vertido cuidadosamente en el molde para luego ser compactado por al menos 20 minutos.

Tras el proceso de compactación, se procede al desmoldado de las piezas y al registro de su masa inicial. Posteriormente, las briquetas se sometieron a una etapa de estabilización en sombra durante las primeras 24 horas para evitar agrietamientos por pérdida brusca de humedad. A partir del segundo día, se inició un proceso de secado natural por exposición solar, registrando el peso a diario en el mismo horario, que correspondería a las 20:00 h. Este registro periódico de la masa permite elaborar la curva de secado y determinar el

momento en que las muestras alcanzan una masa constante antes de los ensayos de combustión.

2.2.4 Determinación Experimental del Poder Calorífico

Para la determinación del poder calorífico se empleó el ecosistema CAL2K, integrado por el calorímetro de bomba CAL2K-ECO, la estación de llenado CAL2K-ECO-3 para presurización con oxígeno y el vaso/bomba CAL2K-ECO-4 que es el recipiente de combustión con sensores integrados. Como elementos de apoyo, se utilizó una balanza analítica modelo FA2204E para el pesado de las muestras, un tanque de oxígeno con regulador de alta presión y los consumibles del fabricante (crisol, alambre de ignición y algodón). Con este conjunto se determinará el poder calorífico superior (PCS) de las biomásas tanto de manera individuales, como las dos mezclas formuladas anteriormente. En la Figura 5 se muestran los tres equipos del sistema CAL2K y la balanza de precisión FA2204E usadas para determinar el PCS.



Figura 5. Equipos del sistema CAL2K para la determinación del poder calorífico: (a) unidad calorimétrica CAL2K-ECO; (b) estación de llenado de O_2 CAL2K-ECO-3; (c) vaso/bomba CAL2K-ECO-4; (d) balanza analítica FA2204E.

La puesta a punto del equipo se inició con la calibración del vaso calorimétrico mediante la combustión de tabletas de Ácido Benzoico (BA), material de referencia certificado con un valor calorífico conocido (PCS=26,454 MJ/kg). Para la calibración, se utilizó el comando de teclado CA=1 y se registró la masa exacta de la pastilla de BA en el calorimétrico, posteriormente se siguió el mismo procedimiento descrito a continuación.

Para cada ensayo, se pesaron aproximadamente 0,5 g de muestra en el crisol, con una resolución de 0,1 mg. El rango de masa aceptable es de 0,2 g a 1,999 g [24]. Se instalaron el alambre y el algodón de ignición, asegurando que el algodón de ignición toque la muestra y que el alambre de ignición no toque el crisol ni la placa deflectora.

Una vez cerrado el vaso, se presurizó con oxígeno a 3000 kPa utilizando la estación de llenado CAL2K-ECO-3. Luego se colocó el vaso en el calorímetro y se inició el ciclo automático, que comprendió las etapas de estabilización, ignición y medición. El sistema registró una elevación de temperatura cercana a 9 °C [24], valor ideal recomendado por el fabricante para igualar la calibración. Al finalizar el ciclo, el equipo mostró y almacenó el PCS corregido. Posteriormente, el vaso es retirado, despresurizado y limpiado antes de la siguiente corrida. El vaso debe enfriarse naturalmente y no debe sumergirse en agua fría [24].

Como parte del control de calidad, cada biomasa y cada mezcla fue analizada por lo menos dos veces y promediado su valor, buscando que los valores no presenten una gran dispersión, en caso de que ocurra se realiza una tercera medición. Los valores obtenidos se reportaron en MJ/kg “base como se recibe” (BCR).

2.3 Ensayos de Combustión

2.3.1 Descripción de Equipos e Instrumentación

2.3.1.1 Unidad de Combustión

Para combustionar las briquetas se hace uso de la cocina a leña Alcazar M70 presente en el laboratorio de termofluidos de la Universidad de Concepción (ver Figura 6), cuyas características se encuentran en la Tabla 5. Esta al ser un equipo de combustión de menos de 25kW de potencia, está sujeta a la norma chilena NCh 3173.of2009 la cual especifica los requisitos relativos al diseño, fabricación, montaje, seguridad, rendimiento, instrucciones y al marcado, junto con los métodos y combustibles de ensayos, correspondientes para las estufas domésticas [25].

Tabla 5. Características cocina a leña combustión lenta Alcazar M70 [26].

Alto	90 cm
Ancho	72 cm
Profundidad	56 cm
Peso	118 kg
Capacidad horno	43 L
Potencia	9 kW



Figura 6. Cocina a leña Alcazar M70.

La norma NCh 3173.of2009 define las fórmulas para calcular la cantidad de combustible requerido para los ensayos y la potencia térmica total.

A continuación, se presentan las ecuaciones y las definiciones de sus variables según los Anexos A y D de la norma NCh 3173.of2009.

La carga de combustible (B_{η}) para cada régimen de encendido se calcula utilizando la ecuación (3). Aplicando la potencia térmica nominal (P_n) en kW, el intervalo de recarga (t_b) en hora (h), PCI en kJ/kg y el rendimiento mínimo de acuerdo con esta norma o un valor superior tal como el declarado por el fabricante (η).

$$B_{fl} = 360\,000 \cdot \frac{P_n \cdot t_b}{PCI \cdot \eta} \quad (3)$$

Potencia térmica total (P) se calcula mediante la ecuación (4), a partir del rendimiento (η), la masa de combustible quemada por hora (B), y el PCI.

$$P = \frac{\eta \cdot B \cdot PCI}{100 \cdot 3\,600} \quad (4)$$

Para propósitos del cálculo de carga de combustible se asumirá el PCS igual al PCI.

El cálculo del contenido de CO normalizado en mg/m³ se realiza considerando la concentración medida de O₂ y la concentración medida de CO en ppm, ajustando los valores a un contenido de oxígeno de referencia. De acuerdo con la norma, el contenido de oxígeno normalizado se fija en 13% y se considera la densidad del CO (d) como 1,25 kg/m³ [25].

$$CO_{norm} = CO_{med} \cdot \frac{21 - O_{2\,ref}}{21 - O_{2\,med}} \cdot d_{CO} \quad (5)$$

Para calcular la concentración de NO_x y SO_2 en mg/m^3 se utilizan las ecuaciones (6) y (7) respectivamente, dichas ecuaciones no se encuentran en la norma.

$$NO_{x\ norm} = (NO_{med} + NO_{2\ med}) \cdot \frac{21 - O_{2\ ref}}{21 - O_{2\ med}} \cdot 2,05 \quad (6)$$

$$SO_{2\ norm} = SO_{2\ med} \cdot \frac{21 - O_{2\ ref}}{21 - O_{2\ med}} \cdot 2,85 \quad (7)$$

El rendimiento (η) se determina a partir de la resta de las pérdidas de calor como se muestra en la ecuación (8). Donde q_a es el porcentaje de pérdida de calor sensible en los humos, q_b es el porcentaje de pérdida de calor latente en los humos y q_r es la pérdida de calor debido a los sólidos no quemados en los residuos.

$$\eta = 100 - q_a - q_b - q_r \quad (8)$$

El porcentaje de pérdidas de calor sensible en los humos se calcula a partir de las pérdidas de calor sensible en los humos (Q_a) y el PCI como se muestra en la ecuación (9).

$$q_a = \frac{100 \cdot Q_a}{PCI} \quad (9)$$

Q_a se obtiene con la ecuación (10). Esta fórmula determina las pérdidas de calor sensible en función de la temperatura de los gases de combustión (T_g), la temperatura ambiente (T_{amb}), el contenido de carbono en los residuos (C_r), la composición de los gases CO_2 y CO , el contenido de hidrógeno y humedad (H , W), y los calores específicos C_{pmd} y C_{pmH2O} .

$$Q_a = (T_g - T_{amb}) \cdot \left[\left[\frac{C_{pmd}(C - C_r)}{0,536(CO + CO_2)} \right] + \left[\frac{C_{pmH2O} \cdot 1,92(9H + W)}{100} \right] \right] \quad (10)$$

El porcentaje de pérdidas por calor latente se calcula a partir de las pérdidas de calor latente (Q_b) y el PCI, como se muestra en la ecuación (11).

$$q_b = \frac{100 \cdot Q_b}{PCI} \quad (11)$$

Pérdidas de calor latente en los humos se calcula con la ecuación (12). Esta fórmula determina las pérdidas de calor latente en función de la concentración de monóxido de carbono (CO), el carbono del combustible (C), el carbono en el residuo (C_r), CO_2 y CO .

$$Q_b = \frac{12\ 644 \cdot CO \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (CO_2 + CO) \cdot 100} \quad (12)$$

El calor específico de los humos secos en condiciones estándar (C_{pmd}) se calcula con una fórmula polinómica compleja (ecuación (13)) que depende de t_g y del porcentaje de CO_2 .

$$C_{pmd} = 3,6 \cdot \left(0,361 + 0,008 \cdot \left(\frac{T_g}{1\,000} \right) + 0,034 \cdot \left(\frac{T_g}{1\,000} \right)^2 \right. \\ \left. + \left(0,085 + 0,19 \cdot \left(\frac{T_g}{1\,000} \right) - 0,14 \cdot \left(\frac{T_g}{1\,000} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{CO_2}{100} \right) \right. \\ \left. + \left(0,3 \cdot \left(\frac{T_g}{1\,000} \right) - 0,2 \cdot \left(\frac{T_g}{1\,000} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{CO_2}{100} \right)^2 \right) \quad (13)$$

Y por último el calor específico del vapor de agua (C_{pmH_2O}) depende de t_g y se obtiene con la ecuación (14).

$$C_{pmH_2O} = 3,6 \cdot \left(0,414 + 0,038 \cdot \left(\frac{T_g}{1\,000} \right) + 0,034 \cdot \left(\frac{T_g}{1\,000} \right)^2 \right) \quad (14)$$

Debido a la imposibilidad de realizar un análisis elemental de los residuos sólidos, se asumió el valor por defecto sugerido en la sección A.4.5 de la norma NCh 3173 para biomasa leñosa, correspondiente a una pérdida de rendimiento (q_r) del 0,5% esta aproximación se supondrá útil para las briquetas. Por el mismo motivo se considerará C_r igual a cero a efectos de cálculo.

2.3.1.2 Sistema de Registro de Masa

Para registrar la variación de la masa a lo largo del tiempo, la cocina se encuentra posicionada sobre la Balanza LP-7516, la cual permite cuantificar las pérdidas de peso del sistema asociadas al proceso de combustión. Esta balanza consta de un indicador digital, el cual incorpora una interfaz programable que optimiza la visualización como la recopilación de datos.

2.3.1.3 Sistema de Adquisición y Registro de Datos de Temperatura

El programa Personal DaqView Plus (Simulated) se utiliza para la configuración, visualización y el registro de datos capturados por el Módulo de Adquisición de Datos USB (DAQ). Este módulo multi-canal recibe la señal analógica (voltaje) proveniente de las termocuplas tipo K instaladas en el equipo de combustión y la digitaliza. En la Figura 7 se presenta la ubicación de las termocuplas tipo K instaladas en las distintas partes de la cocina, se mide la temperatura de la llama en la cámara de combustión (T_c), la temperatura del horno en el lado derecho (T_{HD}) y lado izquierdo (T_{HI}), la temperatura de succión del aire primario (T_{sc}), y la temperatura de los gases en el cañón (T_g).



Figura 7. Ubicación de los puntos de medición de temperatura mediante termocuplas tipo K en la cocina: (a) cámara de combustión, (b) horno: lado derecho, lado izquierdo y succión del aire primario, y (c) cañón.

2.3.1.4 Instrumento de Monitoreo y Cuantificación de Emisiones Gaseosas

El monitoreo de los gases emitidos por la combustión de briquetas se realiza mediante el analizador Testo 350, equipado con una sonda de muestreo la cual se introduce por un orificio en el cañón de la estufa. La recopilación de datos se realiza de manera digital a través del software provisto por el fabricante "EasyEmission". Este instrumento permite la medición de concentraciones de O₂, CO₂, CO, NO_x y SO_x, etc. Así como de la temperatura de los gases de combustión y la eficiencia del sistema. La Tabla 6 muestra los datos técnicos del testo 350 relacionados muestreos de gases.

Tabla 6. Datos técnicos Testo 350. Fuente: testo.com

	Rango	Exactitud	Resolución
O ₂	0 hasta +25% Vol.	±0,8% del f.e.	0,01% Vol
CO	0 hasta +10000 ppm	±5 % del v.m. (+200 hasta +2000 ppm) ±10 % del v.m. (+2001 hasta +10000 ppm) ±10 ppm (0 hasta +199 ppm)	1 ppm (0 hasta +10000 ppm)
NO	0 hasta +4000 ppm	±5 ppm (0 hasta +99 ppm) ±5 % del v.m. (+100 hasta +1999 ppm) ±10 % del v.m. (+2000 hasta +4000 ppm)	1 ppm (0 hasta +4000 ppm)
NO ₂	0 hasta +500 ppm	±5 % del v.m. (+100 hasta +500 ppm) ±5 ppm (0 hasta +99,9 ppm)	0,1 ppm (0 hasta +500 ppm)
SO ₂	0 hasta +5000 ppm	±5 ppm (0 hasta +99 ppm) ±5 % del v.m. (+100 hasta +2000 ppm) ±10 % del v.m. (+2001 hasta +5000 ppm)	1 ppm (0 hasta +5000 ppm)
CO ₂	0 hasta CO ₂ máx.	Calculado a partir del O ₂ ±0,2 % Vol.	0,01 % Vol.

2.3.1.5 Sistema de Cuantificación del Material Particulado

Para la ejecución válida de este ensayo, se requiere la integración de un "tren de muestreo" (ver Figura 8). Este sistema está constituido por una boquilla de acero inoxidable cuyo diámetro se selecciona específicamente para igualar la velocidad de succión con la velocidad del gas en la chimenea (condición isocinética), una sonda que transporta los gases desde la boquilla hasta el portafiltro, un conjunto de tubos Pitot tipo S para la medición de velocidad, y un termopar tipo K para la temperatura de la chimenea.



Figura 8. Tren de muestreo.

Se tiene el portafiltro, esta aloja el filtro de fibra de vidrio (previamente pesado). El portafiltro se introduce en la caja caliente, a caja mantiene una temperatura controlada para asegurar que el material particulado se capture en seco y que el agua pase en estado gaseoso hacia los condensadores [27], [28], [29].

La unidad condensadora o caja fría compuesta por cuatro impactadores (impingers) en serie en la Tabla 7 muestra el contenido de cada uno. La Figura 9 muestra las dos cajas antes mencionadas.

Tabla 7. Contenido impingers [28].

Primer impinger	150 ml de agua destilada o desionizada
Segundo impinger	150 ml de agua destilada o desionizada
Tercer impinger	Vacío
Cuarto impinger	200 a 300 g de sílica gel



Figura 9. Caja caliente, caja fría y portafiltro.

Finalmente, el control de flujo se gestiona mediante una unidad de control o consola (Figura 10). Mide el volumen total de gas seco muestreado, controla la succión de la bomba y permite al operador ajustar el caudal mediante válvulas para mantener el isocinetismo.



Figura 10. Unidad de control y monitoreo para el aseguramiento del isocinetismo en el tren de muestreo.

2.3.2 Procedimiento Experimental

El protocolo experimental se diseñó mediante una integración técnica de las normas NCh 3173 y el Método CH-28.

2.3.2.1 *Puesta en Marcha y Periodo de Preensayo*

Previo al inicio, se pone en marcha el sistema de extracción de humos y se registra la lectura inicial de la báscula. Posteriormente, se carga el artefacto con combustible suficiente para asegurar el encendido, pudiendo apoyarse con papel de diario arrugado y astillas, como se menciona en el método CH-28. Una vez estabilizado el encendido, se incorpora la masa de combustible calculada para el período de encendido la cual es la misma para el preensayo y ensayo, posterior a la carga de combustible se registra el valor indicado por la báscula y la masa de combustible añadida.

El periodo de encendido se considera finalizado una vez que la lectura de la báscula indica que el combustible se redujo hasta alcanzar el 20-25% de la masa de la carga de ensayo como indica el método CH-28, se introduce una nueva carga de combustible y se da inicio al periodo de preensayo. Se registran el valor de la báscula antes y después de la introducción de la carga y el peso del combustible introducido.

El objetivo de esta etapa es alcanzar una carbonización uniforme del lecho de combustible y estabilizar térmicamente el calefactor antes de la medición oficial. Durante los 15 minutos previos al inicio del ensayo, se restringe la apertura de la puerta a un máximo de un minuto, permitiendo únicamente el uso de un atizador para homogenizar las brasas. A diferencia de antes, el periodo de preensayo se considera finalizado una vez que la lectura de la báscula indica que el combustible se redujo hasta alcanzar el 10-5% de la masa de la carga de ensayo, con el fin de minimizar la interferencia analítica de la leña sobre el combustible de estudio. Al reducir el lecho de brasas a este porcentaje, se garantiza la estabilidad térmica necesaria del artefacto según NCh 3173, al mismo tiempo que se asegura que los factores de emisión y el rendimiento térmico registrados sean representativos de la biomasa en estudio, evitando la dilución de datos por mezcla de combustibles de distinta naturaleza. Para los ensayos solo de leña también se redujo hasta estos porcentajes para que sean comparables los ensayos. En la Figura 11 se muestra lecho de brasas al alcanzar el 20% de la masa residual y en la Figura 12 se muestra el lecho de brasas al alcanzar el 5% de la masa residual, se puede notar que el 20% de la carga de combustible aun presenta una llama viva y estable que actuaría como una fuente significativa de interferencia, mezclando las emisiones y la liberación de energía de la leña de preensayo con las del prototipo en estudio.

Previo al inicio del periodo de ensayo se pesa el filtro de fibra de vidrio hasta obtener un peso constante. Se preparan los impingers, los dos primeros se cargan con agua destilada, pero para estos ensayos se usó agua común, el tercero se deja vacío y el cuarto se llena con sílica gel. Posteriormente, se ensambla el tren de muestreo asegurando la hermeticidad mediante grasa de sellado y pinzas, cuidando de no contaminar el interior del sistema.

Se realizan las pruebas de hermeticidad. Para ello, se taponan la entrada de la boquilla de los impingers y se activa la bomba hasta alcanzar un vacío de 15 pulgadas de mercurio [27], se conecta el portafiltro a los impinger y se verifica nuevamente que no haya fugas. En

esta etapa también se verifica el correcto funcionamiento de los sistemas de calefacción del filtro y la sonda.

2.3.2.2 Corrida de Medición y Adquisición de Datos

La transición al periodo de ensayo comienza inmediatamente después de alcanzar la masa crítica del lecho de brasas (correspondiente al 10-5% de la carga de combustible). En este punto, se realiza la recarga con la biomasa de estudio, registrando el peso añadido y al valor de la báscula después de la recarga. El método CH-28 permite, durante los primeros cinco minutos de esta fase, tener la puerta del calefactor abierta y ajustar los controles del suministro de aire. Todos los ensayos y preensayos se realizaron con el máximo suministro de aire (tiraje completamente abierto) y no se modificó en ningún momento.

Durante la corrida de medición, se registra de forma continua las temperaturas de las termocuplas y el peso de la báscula. El Testo se introduce en el cañón transcurridos 10 minutos desde el inicio del ensayo y mide de manera continua mediante su software. También se realiza la medición del MP.

La medición del MP se da inicio al tras poner la carga de combustible. Se inicia la succión y se debe monitorear constantemente el manómetro diferencial del tubo Pitot, ajustando la válvula de control fino de la consola para establecer un en el orificio calibrado que asegure una velocidad de muestreo isocinética, generalmente entre el 90% y el 110% de la velocidad real [28]. Durante el muestreo se registran periódicamente, cada cinco minutos, las lecturas de temperatura de la chimenea, temperatura del filtro, vacío y presiones.

2.3.2.3 Finalización y Registro de Resultados

El término del período de ensayo se establece cuando la lectura de la báscula indica nuevamente la misma masa de reserva de brasas más cenizas registrada al finalizar el preensayo. En consistencia con el método CH-28, la corrida finaliza cuando el peso de la carga combustible restante alcanza los 0,0 kg y se mantiene constante durante al menos 30 segundos, momento en el cual se detiene el muestreo de partículas y se registraron los valores finales, incluyendo el peso final, el tiempo total de corrida y las mediciones finales. Se recupera la muestra de la caja caliente y se traslada a un área limpia donde se desmonta el filtro con pinzas y se guarda en su respectiva placa Petri para su posterior análisis gravimétrico.



Figura 11. Estado del lecho de brasas al alcanzar el 20% de la masa residual



Figura 12. Estado del lecho de brasas al alcanzar el 5% de la masa residual.

En la Tabla 8 se muestra las condiciones de 5 ensayos utilizados en esta investigación. En los primeros tres ensayos, se utiliza una carga de aproximadamente 2,6 kg. Esta decisión respondió a una limitación en la disponibilidad de materia prima para la fabricación de la Briqueta B (E5). Con el fin de garantizar una comparación bajo las mismas condiciones de volumen en la cámara de combustión, se normalizaron las masas de la Briqueta A y la Leña de al mismo valor. Para la segunda etapa de medición (E9 y E10) si se trabajo con la masa de ensayo para potencia nominal obtenida mediante la ecuación (3) que es de 2,8 kg aproximadamente.

Tabla 8. Condiciones de ensayo.

Ensayo	Muestra	Masa (kg)	Ensayo	Masa ensayo (kg)	Pre	T _{amb} Promedio (°C)	P ambiente promedio (mbar)
E4	Briqueta A	2,5900±0,00005		2,5106±0,0176		25,5±0,19	1014
E5	Briqueta B	2,5020±0,00005		2,5116±0,0198		25,9±0,29	1015
E6	Leña	2,5991±0,00005		2,5110±0,0127		24,9±0,14	1017
E9	Leña	2,8078±0,00005		2,7968±0,0171		24,1±0,17	1017
E10	Briqueta A	2,8502±0,00005		2,8116±0,0022		26,5±0,28	1011

3 Resultados y discusión

3.1 Preparación y Acondicionamiento SCG y CPM

El procedimiento consistió en esparcir una porción de muestra en bandejas y exponerla al sol, registrando su peso cada 24 horas durante un período total de cinco días con una balanza de resolución $\pm 0,5$ g. La Tabla 9 presenta los resultados obtenidos del proceso de secado aplicado a los SCG.

Tabla 9. Serie de pesaje y secado de SCG (con balanza Truper).

Muestra de SCG	Masa Dia 0 (g)	Masa Dia 1 (g)	Masa Dia 2 (g)	%H _{bh}
1	346 \pm 0,5	281 \pm 0,5	270 \pm 0,5	22,0 \pm 0,2
2	370 \pm 0,5	348 \pm 0,5	344 \pm 0,5	7,0 \pm 0,2
3	402 \pm 0,5	335 \pm 0,5	320 \pm 0,5	20,4 \pm 0,1
4	290 \pm 0,5	240 \pm 0,5	230 \pm 0,5	20,7 \pm 0,2
5	515 \pm 0,5	430 \pm 0,5	395 \pm 0,5	23,3 \pm 0,1

Se observa que el porcentaje de H_{bh} calculado entre el Día 0 y el Día 3 resultó inferior a los valores teóricos esperados para un SCG. Este fenómeno se atribuye a las condiciones de almacenamiento previo de las muestras bajo refrigeración. Los sistemas de refrigeración convencionales generan un ambiente de baja humedad relativa, promoviendo la transferencia de masa húmeda desde la muestra hacia el aire circundante. En consecuencia, la masa registrada en el "Día 0" corresponde a una matriz que ya había experimentado un proceso de deshidratación parcial involuntaria.

La Tabla 10 presenta los resultados obtenidos del proceso de secado aplicado a los CPM. Como se aprecia en la Tabla 10, los datos se presentan únicamente hasta el tercer día, ya que en los registros posteriores no se observaron variaciones en el peso de las muestras.

Tabla 10. Porcentaje de humedad y pérdida de peso en cuescos de palta molidos (Secado al sol, registro cada 24 horas)

Muestra de CPM	Masa Dia 0 (g)	Masa Dia 1 (g)	Masa Dia 2 (g)	Masa Dia 3 (g)	%H _{bh}
1	124±0,5	74±0,5	74±0,5	74±0,5	40,3±0,6
2	149±0,5	96±0,5	95±0,5	95±0,5	36,2±0,5
3	110±0,5	62±0,5	60±0,5	60±0,5	45,5±0,7
4	170±0,5	100±0,5	98±0,5	98±0,5	42,4±0,4
5	120±0,5	78±0,5	74±0,5	74±0,5	38,3±0,6
6	155±0,5	95±0,5	88±0,5	88±0,5	43,2±0,5

A partir de estos resultados, no es posible asegurar que la pérdida de humedad haya sido total, a pesar de que el peso se mantuvo constante en los días posteriores. Para confirmar este aspecto, sería necesario realizar análisis complementarios siguiendo las normas ASTM D-3302, D-5373 y D-5875.

Cabe señalar que la balanza utilizada tenía una resolución de 1 g. Dado que las muestras eran pequeñas, esta limitación generó una incertidumbre propagada en las mediciones.

Otra consideración importante es la posible reabsorción de humedad por parte de las muestras. Este fenómeno ocurre principalmente durante la noche, cuando la humedad relativa del aire tiende a aumentar y las temperaturas descienden. En este estudio, el pesaje se realizó a las 20:00 horas, momento en que ya no había exposición directa al sol y las muestras se encontraban frías. Bajo estas condiciones, es probable que se haya producido cierta reabsorción de humedad. Teniendo en cuenta la información entregada en la Figura 1 a partir del tercer día la humedad suele ser de un 15% en bh.

3.2 Resultado Briquetas

3.2.1 Secado de Briquetas

A continuación, la Figura 13 exhibe el comportamiento promedio de la pérdida de humedad acumulada para el conjunto de 7 briquetas seleccionadas aleatoriamente sometidas a secado bajo el sol. El gráfico ilustra la evolución diaria del porcentaje de masa evaporada respecto al peso inicial, donde las barras de error representan la desviación estándar entre las muestras promediadas.

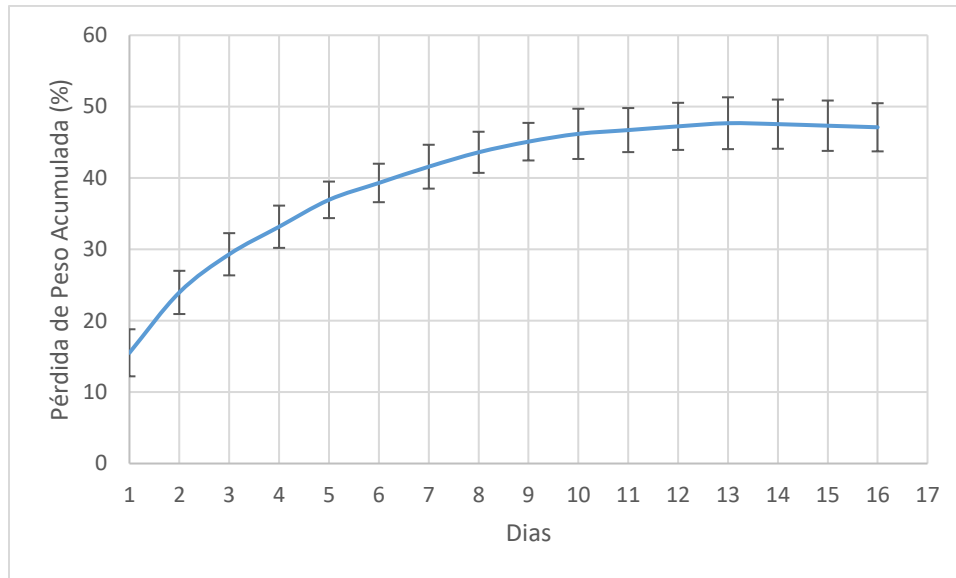


Figura 13. Curva de pérdida acumulada de humedad durante el secado solar de las briquetas.

El gráfico muestra que la pérdida de peso acumulada de las muestras se incrementa rápidamente durante los primeros días del proceso, alcanzando aproximadamente un 50% hacia el día 12. A partir de ese punto, la curva se estabiliza, indicando que el proceso de secado ha alcanzado un equilibrio en el que la tasa de pérdida de humedad es mínima o nula.

Este comportamiento sugiere que la mayor parte del agua libre fue eliminada en las etapas iniciales, mientras que la humedad restante corresponde probablemente a agua retenida más internamente, cuya eliminación requiere condiciones más intensas o prolongadas. La estabilización de la curva también indica que extender el secado más allá del día 12 no genera una reducción significativa adicional en el peso, lo que puede ser útil para optimizar tiempos en el proceso de secado solar.

3.2.2 Manufactura de Briquetas

La Figura 14 muestra el resultado final del proceso de elaboración. Las dimensiones promedio registradas fueron un diámetro externo de 7 cm aproximadamente, un diámetro interno de 1,9 cm y una altura promedio de 8,4 cm. A partir de estas magnitudes, se determinó que el volumen promedio de cada briqueta es de aproximadamente 299,45 cm³.

Respecto a la masa, se obtuvo un valor promedio de 163 g. Al relacionar esta masa con el volumen calculado, la densidad resultante fue de aproximadamente 0,544 g/cm³. Es importante destacar que este valor no alcanzó la densidad objetivo, planteada inicialmente en la investigación ni tampoco la densidad mínima pedida en la norma ISO 17225-7:2014. La causa principal de esta desviación se atribuye a limitaciones técnicas durante el proceso de compactación. Se observó una pérdida significativa de materia prima durante la etapa de compresión, debido al escurrimiento del material a través de los bordes del molde, lo que impidió continuar ejerciendo fuerza y alcanzar una compactación superior.



Figura 14. Muestras finales de briquetas cilíndricas huecas, fabricadas con cuercos de palta, SCG, aserrín y almidón.

3.2.3 Poder Calorífico

La Tabla 11 presenta los resultados del PCS obtenidos para las muestras de biomasa BCR mediante el uso del calorímetro CAL2K-ECO. Las muestras analizadas fueron aserrín, Briquetas A y B, cuercos de palta molidos, leña y SCG.

Tabla 11. Resultados experimentales de Poder Calorífico de Biomasa con ecosistema CAL2K-ECO.

Muestra	Numero de experiencias realizadas	Poder Calorífico Superior promedio obtenido experimentalmente (MJ/kg)	Poder Calorífico Superior obtenido por otros autores (MJ/kg)	Coefficiente de Variación (%)
Aserrín	2	14,13	17,86[11]	0,02
Briqueta A	3	16,31	13,36[11]	2,78
Briqueta B	3	17,04	-	1,00
CPM	2	16,75	18,74[10]	0,01
Leña	3	17,31	19,54	0,08
SCG	3	22,13	18,80[13]	0,42

Debido a la naturaleza del pre-tratamiento de secado, no se puede garantizar una humedad del 0%, por lo que los resultados se presentan sin corrección a base seca, reflejando el poder calorífico de la biomasa en su estado actual de humedad residual.

Los resultados muestran que la briqueta A alcanza un poder calorífico superior al reportado por Fanárraga et al. Como se esperaba esta diferencia se debe a la incorporación SCG en su formulación, dado que este posee un valor energético mayor al de los demás residuos utilizados.

Un aspecto interesante es que las briquetas A y B presentan valores de poder calorífico muy similares, pese a que se esperaba que la briqueta B, con mayor proporción de café, mostrara un PCS superior.

Por otra parte, el poder calorífico de las briquetas obtenidas se aproxima al de la leña obtenida experimentalmente. Este hallazgo respalda la viabilidad de utilizar briquetas elaboradas con mezclas de aserrín y SCG como sustituto parcial o total de la leña tradicional, ofreciendo un desempeño energético comparable. En cuanto a los demás residuos se observa una baja en los valores de PCS respecto a la información presente en la literatura a excepción de los SCG, que se obtuvo un valor más elevado.

Finalmente se presenta el mayor coeficiente de variación en la Briqueta A con un 2,78%, un valor muy bajo, esto indica que las mediciones del poder calorífico para estas muestras son consistentes entre sí, con poca dispersión respecto al valor medio.

3.3 Resultados Ensayos de Combustión en Cocina a Leña

Primero, he de mencionar que durante la carga de combustible de ensayo se pudo observar visualmente el comportamiento de la llama, esta encendió de inmediato al ponerse sobre la cama de brasas, en la Figura 15 se observa que las briquetas lograron encender y mantener una llama constante.



Figura 15. Registro visual del ensayo de combustión de las briquetas experimentales en la cocina Alcázar M70.

También hay que mencionar que, durante los ensayos iniciales, la alta concentración de volátiles generó advertencias en el analizador de gases por saturación de los sensores debido al exceso de gases contaminantes, lo que obligó a posponer el registro de datos estables hasta alcanzar una fase de combustión más controlada. Debido a esto los datos no eran comparables entre sí, ya que correspondían a diferentes fases de la combustión. Por ende, en la sección de rendimiento y de emisiones no se presentan resultados relacionados a la Briqueta B.

En una segunda fase del proyecto, se realizaron nuevos ensayos para mejorar la calidad de los datos obtenidos. En esta etapa, se soluciona el problema técnico del analizador de gases que causaba saturación por exceso de contaminantes al inicio, gracias a este ajuste, fue posible registrar las emisiones en un rango de tiempo más amplio, Obteniendo mejores datos para la Briqueta A y la Leña.

3.3.1 Evolución Térmica del Proceso de Combustión

La Figura 16 muestra el cambio en la temperatura registrada por la termocupla ubicada a la izquierda del horno, para las tres biomásas de estudio. Como se puede observar la Briqueta A presenta el calentamiento más rápido y el máximo térmico más elevado alcanzando los 455 °C alrededor de los 25 min, seguida por la Briqueta B con una temperatura máxima de 420 °C alrededor de los 30 min, lo que sugiere una entrega de energía más intensa por parte de las briquetas pero que no se sostiene y decae rápidamente. En contraste, la Leña muestra un incremento más gradual y sostenido en el tiempo, con una temperatura máxima de 340 °C pero que se mantiene por más tiempo. También mantiene una temperatura relativamente más alta en la fase de quemado de brasas, superando a ambas briquetas a partir de los 55 min hasta el término del ensayo, lo que indica un mayor sostén térmico durante el agotamiento.

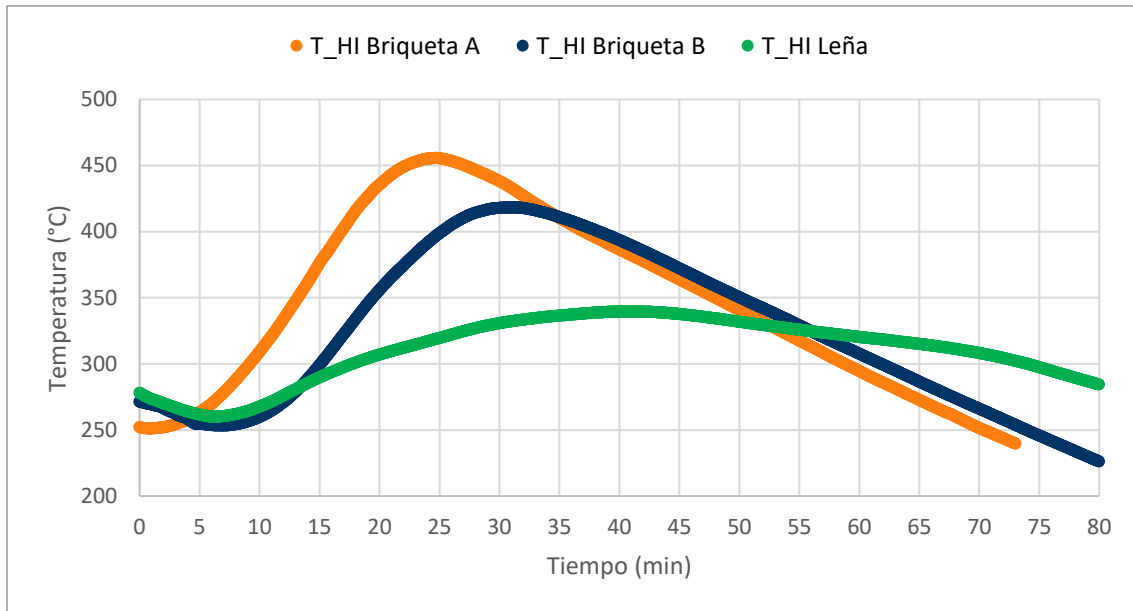


Figura 16. Evolución de T_{HI} en función del tiempo.

En la Figura 17 se muestra la temperatura registrada por la termocupla ubicada dentro de la cámara de combustión y sobre el combustible. Al analizar las temperaturas de la llama, se observa que la leña mantiene valores más altos y por más tiempo, lo que explica por qué la temperatura del horno demora más en decaer. Sin embargo, es importante precisar que estas lecturas superiores de la leña están influenciadas por el mayor alcance vertical y volumen de sus llamas, las cuales tienen contacto directo con la termocupla ubicada en la parte alta de la cámara. Por el contrario, las briquetas generan una llama más compacta que no llega a tocar el sensor, lo que se traduce en registros de temperatura menores, pero más representativos de la radiación del lecho. En este sentido, la Briqueta A destaca por una estabilidad superior y sin fluctuaciones, ofreciendo un encendido más parejo y controlado que la leña convencional. Por su parte, la Briqueta B requirió más tiempo para encender, aunque una vez iniciada la combustión se mantuvo estable por un período más prolongado que la llama de la Briqueta A.

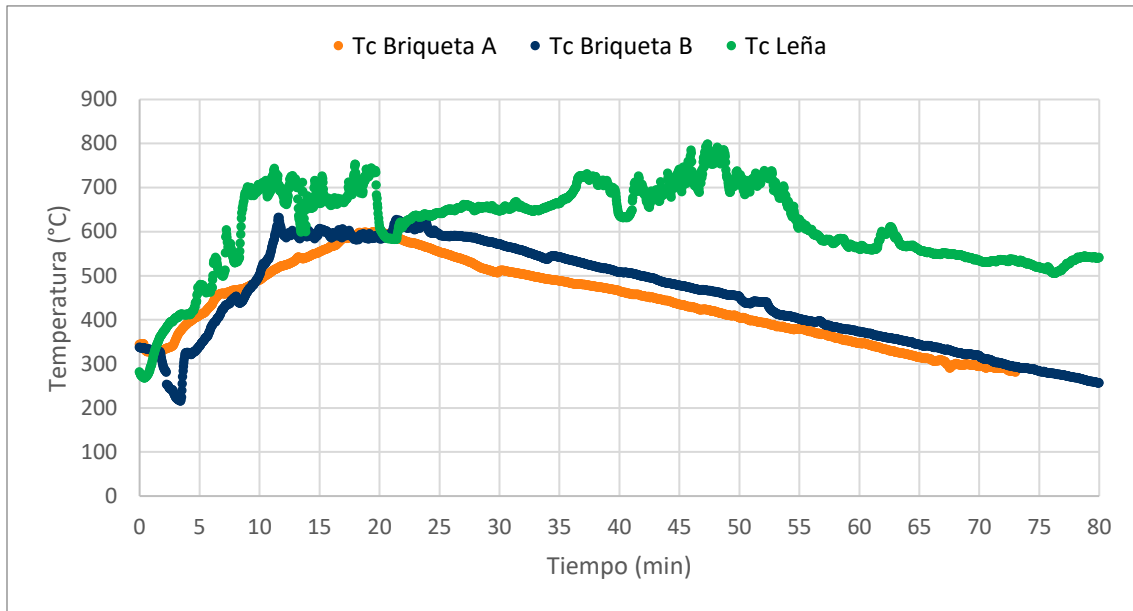


Figura 17. Evolución de Tc en función del tiempo.

3.3.2 Influencia de la Geometría en Briquetas

La Figura 18 muestra la evolución de la tasa de quemado adimensional para dos configuraciones de briqueta: Briqueta A E4 (con orificio central) y Briqueta A E10 (maciza). Al comienzo del ensayo, la Briqueta A E4 muestra valores más altos, lo que indica que gran parte del combustible se quema rápidamente en esa primera etapa. Luego, su comportamiento cambia de forma brusca, la combustión se ralentiza y los valores caen de manera marcada, reflejando un consumo mucho más lento en la fase posterior.

Por su parte, la Briqueta A E10 sigue un patrón distinto. Tiene un arranque más lento y su descenso es más suave y progresivo, lo que permite mantener una combustión más estable y sostenida durante buena parte del tiempo total.

Este contraste confirma que el orificio central actúa como un canal de aireación que 'acelera' el fuego, mientras que la estructura sólida reparte el consumo de manera más equilibrada a lo largo de todo el ensayo.

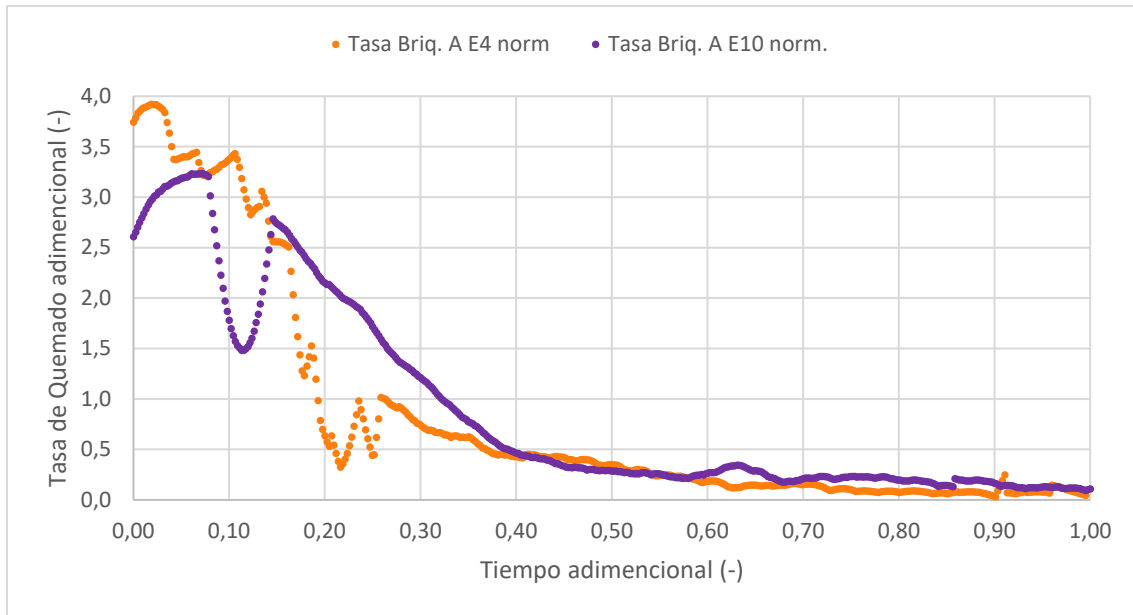


Figura 18. Tasa de quemado adimensional vs tiempo adimensional para Briqueta A E4 (con orificio central) y Briqueta A E10 (maciza).

Se puede relacionar este comportamiento con la evolución de T_{Hi} observada en la Figura 19. Se puede ver que la Briqueta A E4 presenta un aumento de temperatura más rápido, alcanzando el máximo en menor tiempo, lo que es consistente con una combustión inicial más intensa. Mientras que la Briqueta A E10 tiene un descenso de la temperatura más controlado debido a que también tiene un consumo más controlado. Además, se observa que la Briqueta A E10 inició el ensayo a una temperatura más alta y alcanzó casi la misma temperatura máxima que la Briqueta A E4. Esto implica que, si ambas hubieran partido desde una condición térmica similar, la temperatura máxima lograda por la Briqueta A E10 habría sido inferior a la alcanzada por la Briqueta A E4.

En conjunto, estos resultados indican que la geometría con orificio tiende a concentrar la combustión en la etapa inicial, mientras que la briqueta maciza favorece un consumo más uniforme y un enfriamiento más controlado.

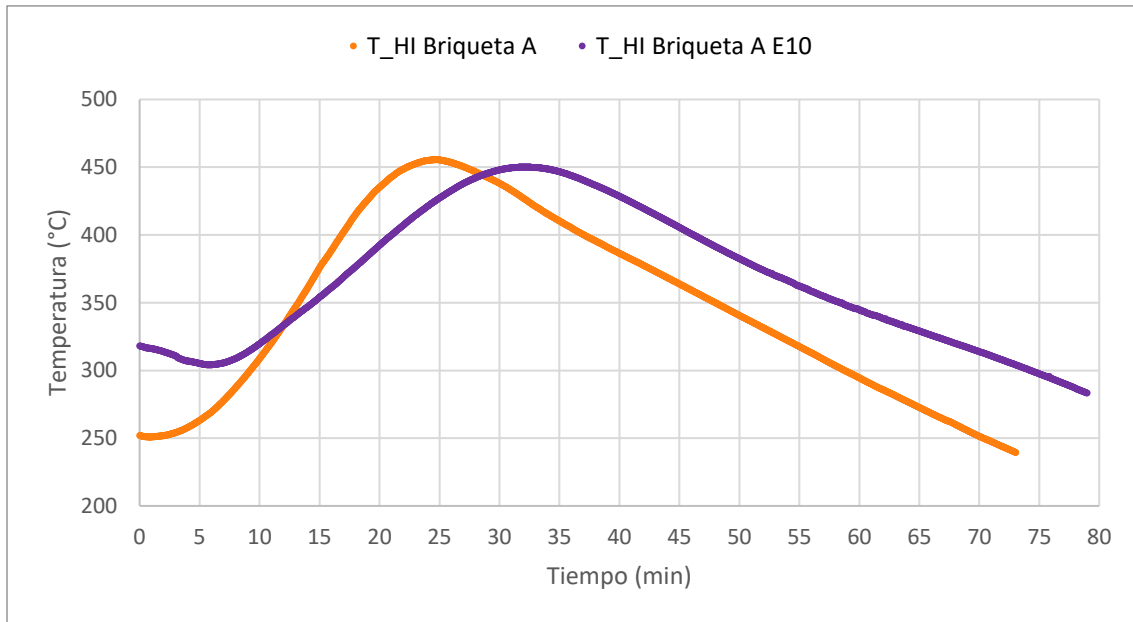


Figura 19. Temperatura T_{HI} vs Tiempo para Briqueta A E4 (con orificio central) y Briqueta A E10 (maciza).

Finalmente se incorpora la tasa de quemado de la leña en la Figura 20, para señalar que la Briqueta maciza se comporta similar a la Leña en cuanto a tasa de quemado. Ambas curvas presentan un máximo temprano durante el primer porcentaje de tiempo, quemándose más rápido la Briqueta maciza y luego una disminución progresiva de la tasa a medida que avanza la combustión, tendiendo a valores cercanos a cero hacia el final del ensayo.

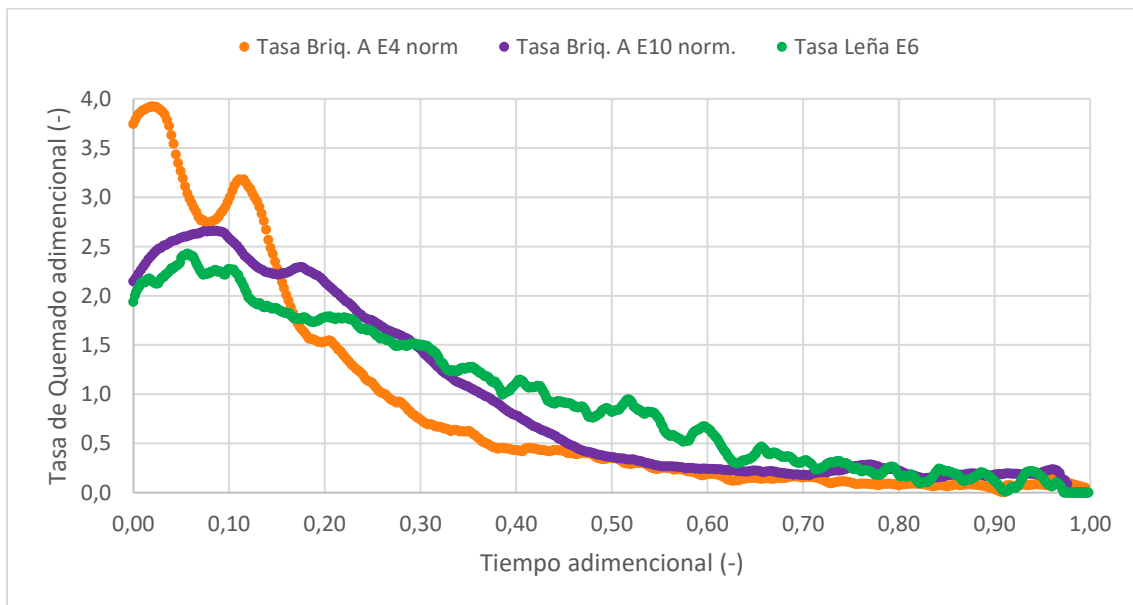


Figura 20. Tasa de quemado adimensional vs tiempo adimensional para Briqueta A E4 (con orificio central), Briqueta A E10 (maciza) y Leña.

3.3.3 Rendimiento Leña y Briquetas

En la evaluación del rendimiento según la norma NCh 3173, dos variables son especialmente influyentes, el contenido de O_2 en los humos y la T_g . Como se observa en la ecuación presentada anteriormente (ecuación (10)), el rendimiento queda directamente ligado a estos parámetros, ya que ambos controlan la magnitud de las pérdidas asociadas a los gases de combustión.

El $\%O_2$ refleja el exceso de aire con el que opera el sistema, a mayor O_2 en los humos, generalmente existe más aire del necesario, aumenta el caudal de gases evacuados e incrementando las pérdidas. Por su parte, una T_g elevada indica que una fracción importante del calor generado se está yendo por la chimenea, mientras mayor sea la diferencia entre T_g y la temperatura ambiente, mayor será el calor sensible perdido y menor el rendimiento obtenido.

La Figura 21 muestra la evolución del rendimiento junto a los niveles de O_2 durante el tramo de medición de la combustión de la Briqueta A. El gráfico respalda que el rendimiento depende fuertemente del O_2 , con un O_2 entre el 11 y el 13% el rendimiento está alto, al derredor del 75%, y cuando el O_2 sube al 17–19% el rendimiento cae bastante, alcanzando menos del 50% llegando a un mínimo de 30% de rendimiento.

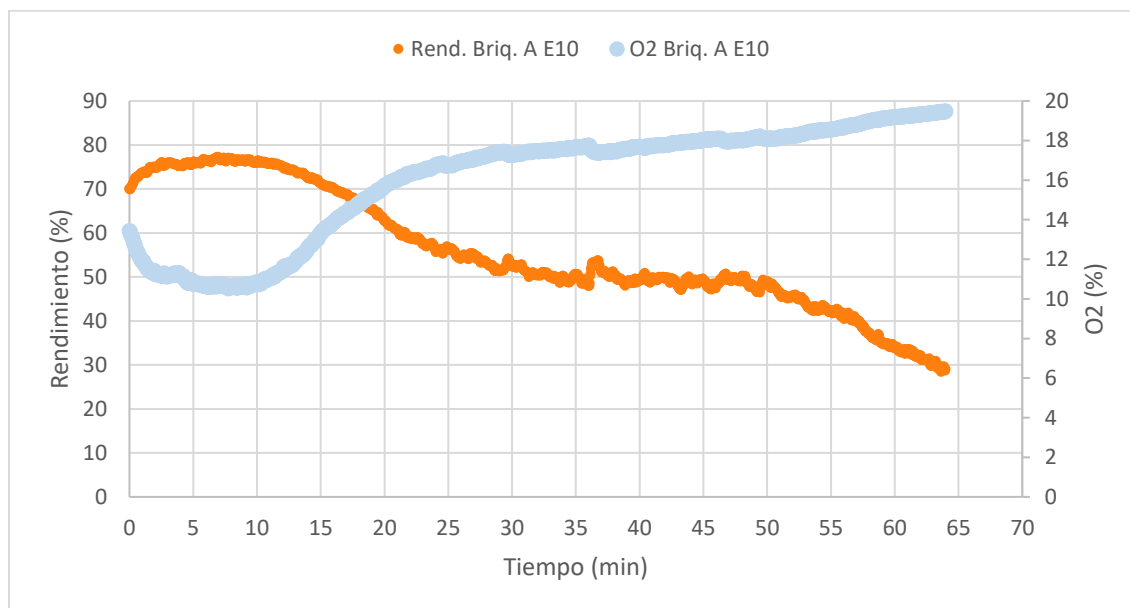


Figura 21. Evolución temporal del rendimiento y concentración de O_2 durante la combustión de Briqueta A E10.

La Figura 22 muestra la evolución del rendimiento junto a los niveles de O_2 durante el tramo de medición de la combustión de la Leña. Similar al ensayo anterior con el aumento del O_2 disminuye el rendimiento. Durante los primeros 15 minutos se tiene un rendimiento entre el 77 y el 80% con niveles de O_2 entre el 10 y 11% pero más fluctuaciones en comparación a la Briqueta. Cuando sube el O_2 baja el rendimiento hasta un mínimo de 45%.

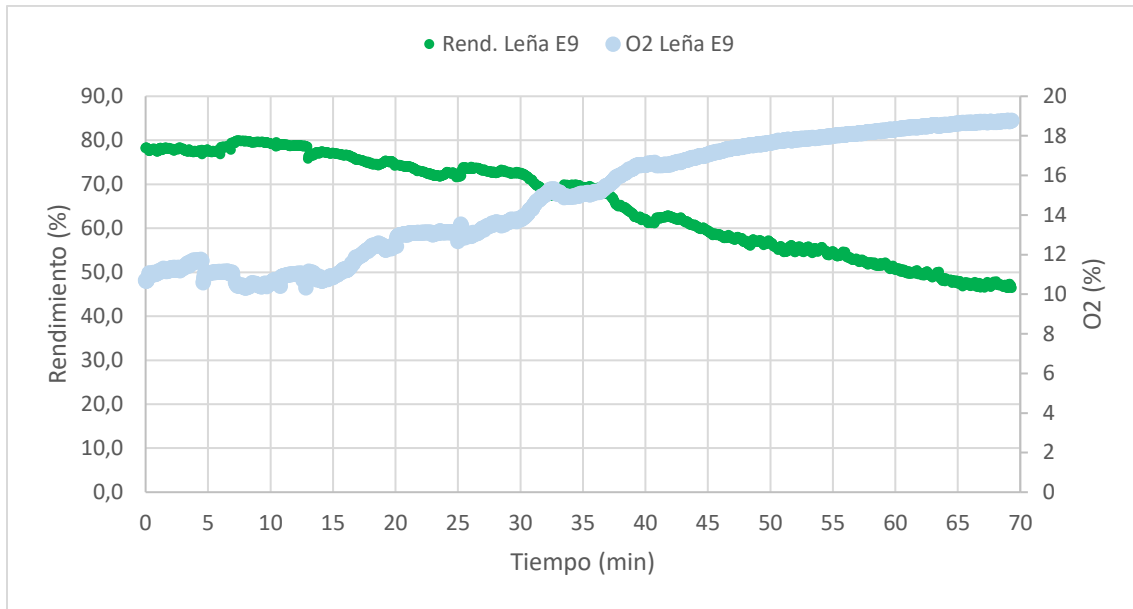


Figura 22. Evolución temporal del rendimiento y concentración de O₂ durante la combustión de Leña E9.

La Figura 23 y la Figura 24 muestran cómo cambia el rendimiento a medida que cambia T_g para la Briqueta A y la Leña respectivamente. En ambos gráficos la T_g sube al inicio hasta un máximo entre el minuto 10 y el minuto 15, luego desciende de forma sostenida hacia el final. El rendimiento acompaña esa tendencia, manteniéndose alto al comienzo y disminuyendo progresivamente a medida que avanza el ensayo. La diferencia principal es que en leña la T_g alcanza un peak más alto, de aproximadamente 320° C y con mayor variación en esa zona, mientras que en Briqueta A (E10) el peak es más bajo, de 290 °C y la caída de T_g es más uniforme. Al final, ambos ensayos terminan con T_g similares, entre 170 y 180 °C, pero el rendimiento cae mucho más en briqueta.

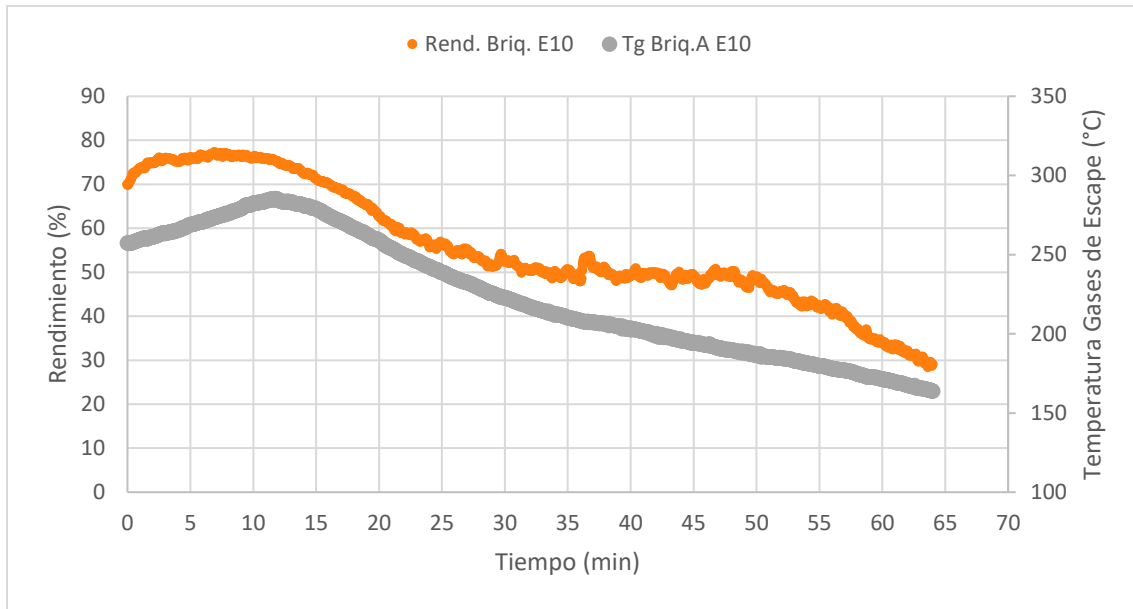


Figura 23. Evolución temporal del rendimiento y la Temperatura de los Gases de Escape de Briqueta A E10.

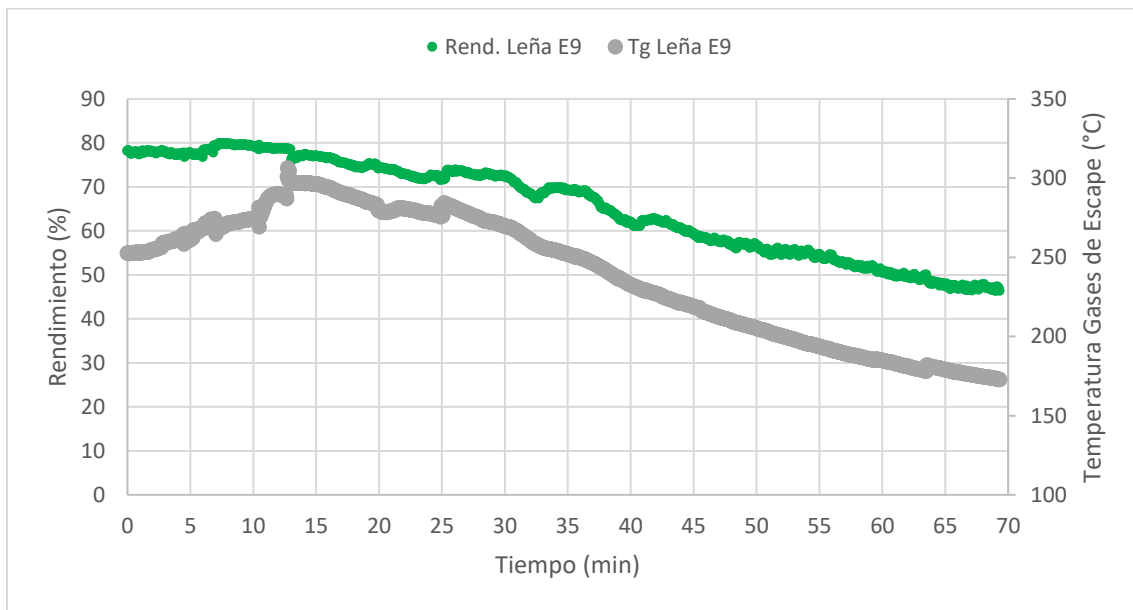


Figura 24. Evolución temporal del rendimiento y la Temperatura de los Gases de Escape de Briqueta A E10.

Por último, la Figura 25 compara ambos rendimientos. En la comparación directa se ve que ambos ensayos parten con rendimientos altos, pero el comportamiento luego se separa. La Leña mantiene un rendimiento más alto y estable durante casi todo el período, bajando de forma gradual hasta el 47% aproximadamente. En cambio, la Briqueta A presenta una caída más temprana y pronunciada. Después de los 15 minutos el rendimiento desciende con mayor pendiente y termina alrededor del 30%, es decir, 17 puntos porcentuales por debajo de la leña en la etapa final. En resumen, la diferencia más importante es que la leña

conserva mejor el rendimiento en el tiempo, mientras que la briqueta pierde eficiencia más rápido.

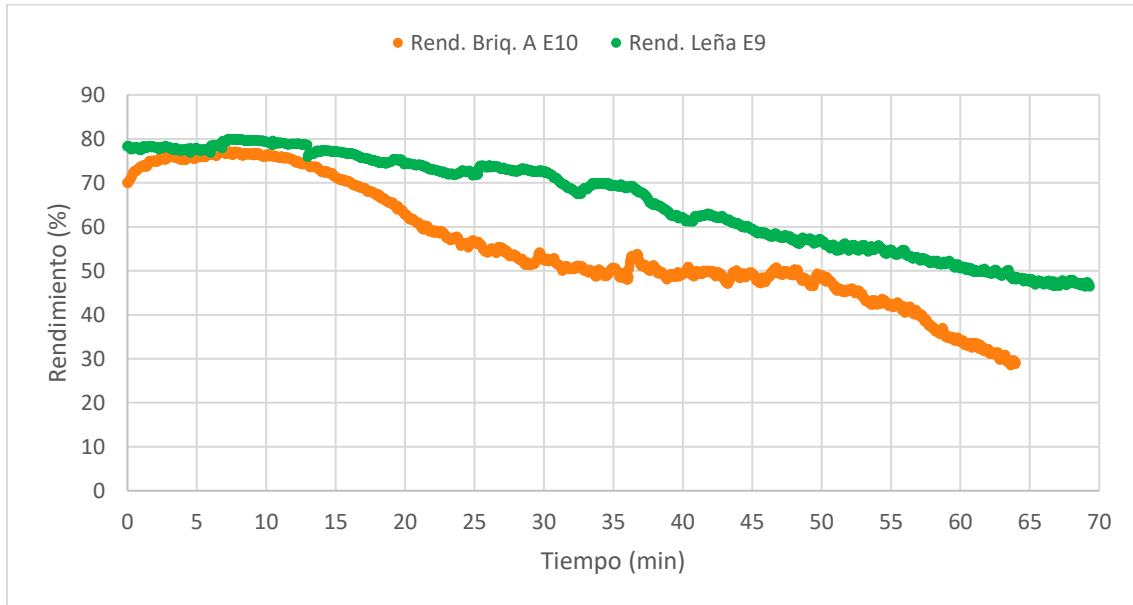


Figura 25. Gráfico comparativo del rendimiento de Briquetas A y Leña.

3.3.4 Emisiones

3.3.4.1 Emisiones CO

En esta sección se presentan y analizan los perfiles de emisión de CO y NO_x obtenidos durante las corridas experimentales de la Leña y la Briquetas A.

La Figura 26 presenta la evolución de la masa adimensional y de las emisiones de CO normalizadas (corregidas) en función del tiempo adimensional, comparando los ensayos Leña E9 y Briqueta A E10. En esta figura se observa que la masa adimensional de la leña y de la Briqueta A disminuye de forma muy parecida, lo que indica las etapas de combustión (inicio, fase principal y agotamiento) ocurre en condiciones comparables para ambos ensayos. Sin embargo, al contrastar esto con las emisiones de CO normalizado, se evidencia que, aun con un consumo de combustible similar, la Briqueta A presenta niveles de CO significativamente mayores y más persistentes en gran parte del período, mientras que la leña mantiene valores más bajos y concentrados en ciertos tramos. Esto sugiere que la diferencia no está asociada a cuánto combustible se consume, sino a otro factor.

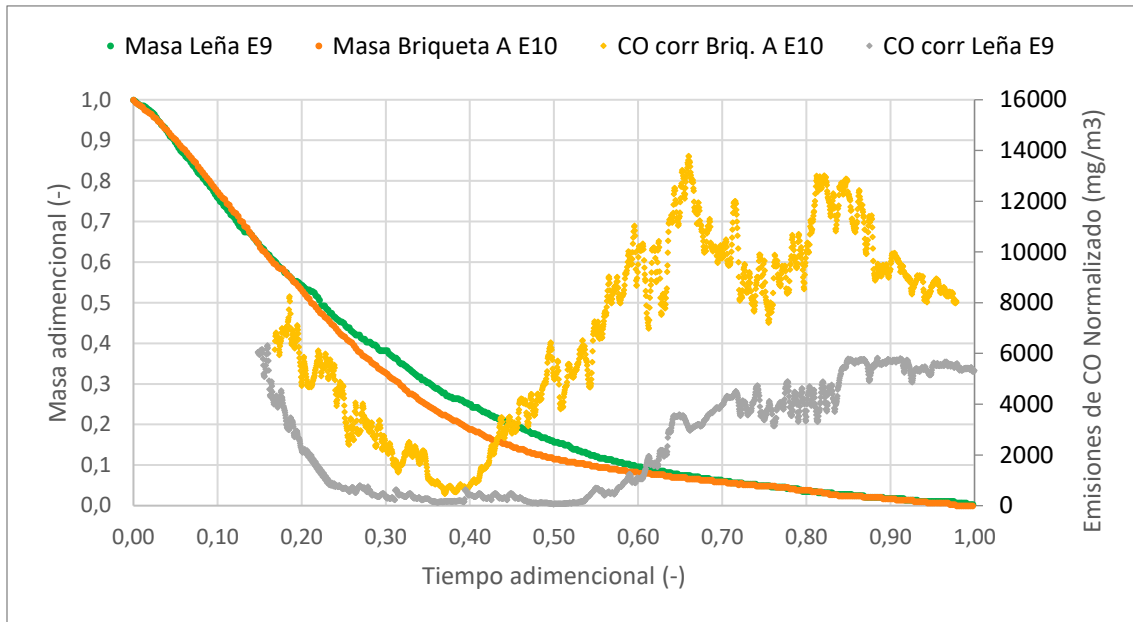


Figura 26. Evolución adimensional de la masa y emisiones de CO normalizadas: Leña E9 vs Briqueta A E10.

En la Figura 27 se presenta la evolución de la temperatura T_{HI} y de las emisiones de CO normalizadas durante un período de 80 minutos, correspondientes a los ensayos Leña E9 y Briqueta A E10. En ambos casos, la temperatura aumenta de manera progresiva hasta alcanzar un máximo cercano a $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre los 30 y 35 minutos, para luego descender hacia el final del ensayo. No obstante, la Leña E9 comenzó el ensayo con una temperatura inicial superior y por eso se mantiene valores ligeramente superiores en la segunda mitad del ensayo, porque como se vio en la Figura 16 bajo condiciones iniciales similares, la leña mantiene una temperatura más estable, pero sin los pick de temperatura máxima que presentan las briquetas.

En cuanto a las emisiones, la Leña E9 presenta un tramo de combustión más estable, con concentraciones muy bajas de CO entre los 35 y 45 minutos, coincidente con la etapa de mayor temperatura. En contraste, la Briqueta A E10 registra un incremento marcado y sostenido de CO a partir de los 35 minutos, alcanzando niveles elevados durante gran parte de la segunda mitad del ensayo, del orden de $8.000\text{--}14.000\text{ mg/m}^3$, lo que refleja una combustión incompleta en la fase de combustión de brasas, la cual no es debido a deficiencia de oxígeno, porque como se vio en los gráficos de rendimiento el oxígeno presente en la fase final de los ensayos está entre el 17 y 19%, sino que lo podemos relacionar a la disminución de la temperatura que impide la correcta oxidación del CO.

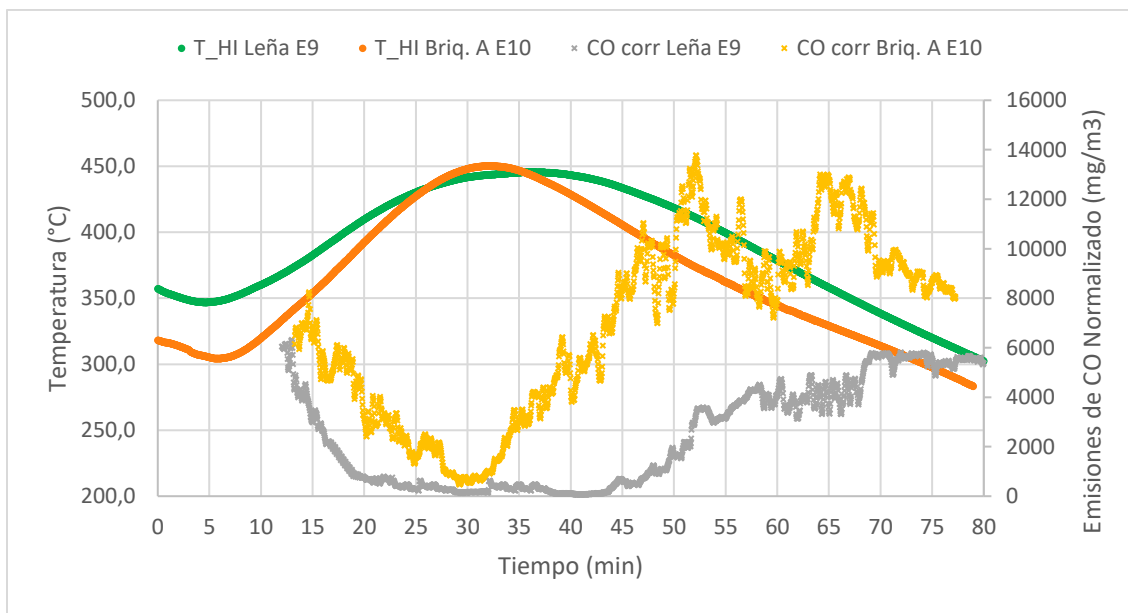


Figura 27. Evolución temporal de la T_{HI} y emisiones de CO normalizadas: Leña E9 vs Briqueta A E10.

En términos generales, los resultados evidencian una relación inversa entre temperatura y emisiones de CO, a mayor estabilidad térmica, menor producción de CO. Asimismo, bajo las condiciones evaluadas, la briqueta muestra una mayor emisión de CO en la etapa principal y la etapa de combustión de brasa. Para validar estas conclusiones se sugiere realizar un mayor número de ensayos.

3.3.4.2 Emisiones NO_x

La Figura 28 presenta la temperatura T_{HI} y las emisiones de NO_x normalizadas para el ensayo de Leña E9 y Briqueta A E10. Respecto al NO_x , se observan diferencias claras. La Leña se mantiene en valores relativamente bajos y estables durante casi todo el ensayo, entre 120 y 180 mg/m^3 aproximadamente, con pequeñas variaciones asociadas a cambios de régimen, pero sin aumentos bruscos. En cambio, la Briqueta A presenta irregularidades durante los primeros minutos de registro y luego un aumento pronunciado hasta alcanzar valores altos de aprox. 400–520 mg/m^3 , manteniéndose elevado en gran parte del ensayo.

Al relacionar NO_x con las temperaturas T_{HI} , se puede apreciar que los niveles más altos de NO_x de la briqueta aparecen principalmente durante la etapa en que T_{HI} está en su máximo y también se sostienen aun cuando la temperatura comienza a disminuir, esto sugiere que las emisiones de NO_x no se explican por temperatura, como ocurriría con el CO, sino por otra condición de combustión propias del combustible como puede ser su composición elemental, donde la Briqueta A posee casi 6 veces más nitrógeno que la leña, 0,52 vs 0,09 como se ve en la Tabla 4.

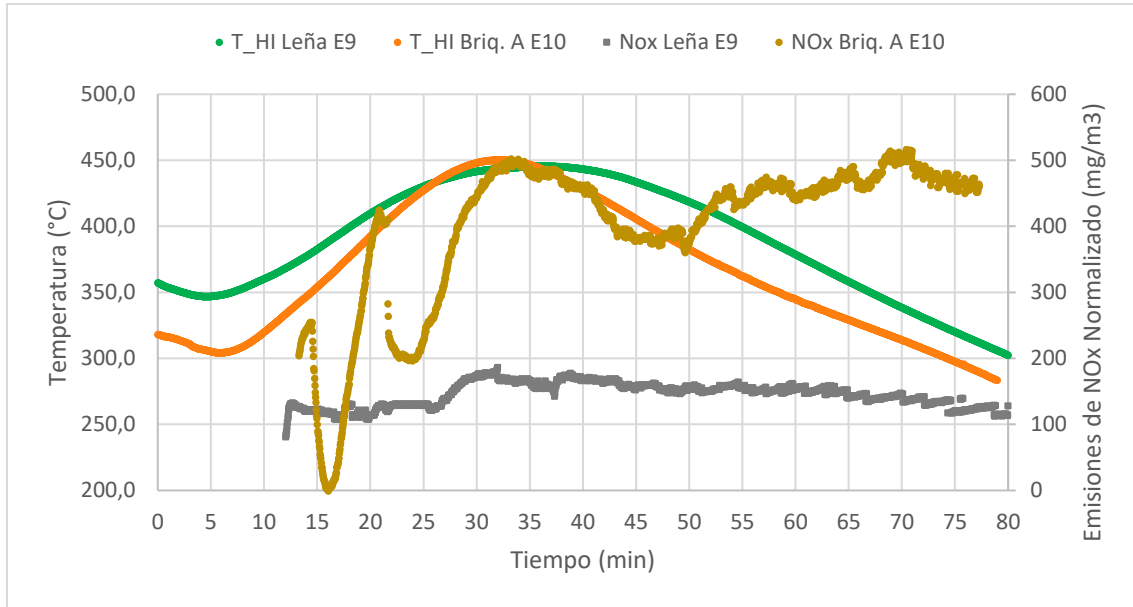


Figura 28. Evolución temporal de la T_{HI} y emisiones de NO_x normalizadas: Leña E9 vs Briqueta A E10.

Tampoco se puede relacionar el comportamiento oscilatorio del NO_x con el oxígeno, ya que, según se observa en la Figura 29 en los primeros minutos de medición del Testo, los valores oxígeno era normal para esa fase de la combustión. Esto sugiere que el sistema se encontraba en fase de estabilización de llama, al contrastar estos datos con los datos de CO de la Figura 26, donde se observa una alta inestabilidad con fluctuaciones constantes y un mínimo pronunciado entre los minutos 28 y 33, seguido de un nuevo incremento errático. Esta dinámica permite interpretar que la Briqueta A carece de una fase de llama estable y prolongada, experimentando una transición acelerada desde el encendido hacia el quemado de brasas en un intervalo de apenas 5 minutos.

En la Figura 30 se muestra la evolución temporal del O₂ y del NO_x para la Leña. Aunque el O₂ aumenta bastante con el tiempo, el NO_x no se dispara, sino que se mantiene relativamente estable incluso llegando a disminuir.

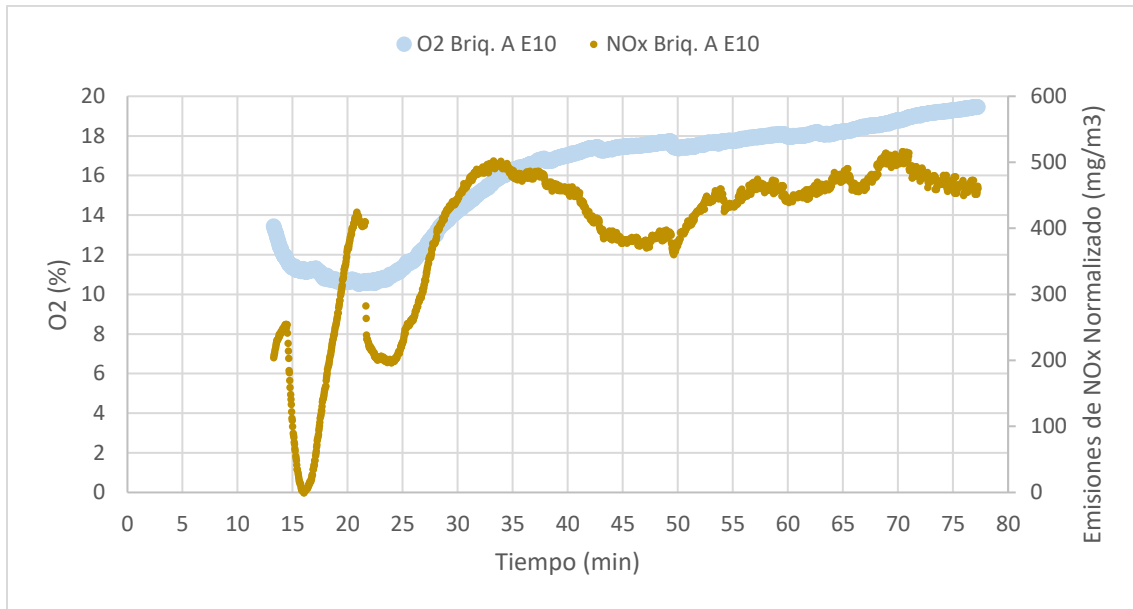


Figura 29. Evolución temporal del O₂ y emisiones de NOx normalizadas de la Briqueta A E10.

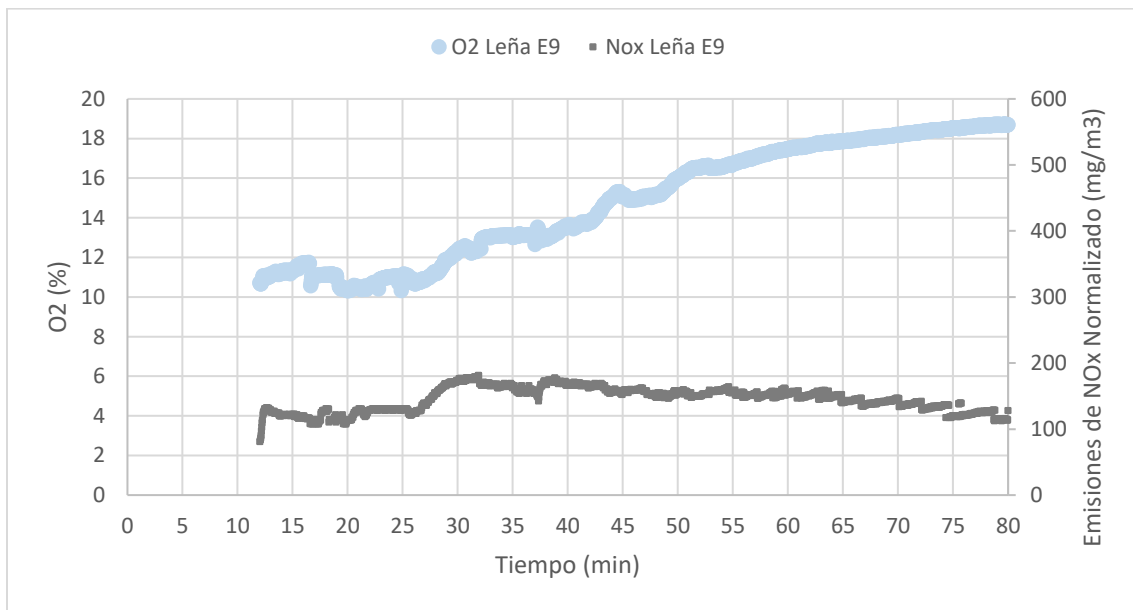


Figura 30. Evolución temporal del O₂ y emisiones de NOx normalizadas de la Leña E9.

En síntesis, aunque ambos ensayos alcanzan temperaturas internas similares, la briqueta A muestra una tendencia a emitir significativamente más NOx que la leña a lo largo del período evaluado.

3.3.4.3 Emisiones Material Particulado

La Tabla 12 muestra los resultados obtenidos en los primeros ensayos de MP. La Leña es el combustible más limpio en cuanto a emisiones de MP. Tiene la concentración de material particulado más baja 29,0 mg/m³ y las emisiones totales más bajas 8,05 g. Mientras que la Briqueta B es el combustible más contaminante. Sus emisiones totales 30,20 g son casi 4 veces mayores que las de la leña y casi el doble que las de la Briqueta A. La Briqueta A se sitúa en un punto intermedio, pero sigue contaminando aproximadamente el doble que la leña.

Tabla 12. Resultados de emisiones de MP y desempeño de quemado para Leña, Briqueta A y B.

Parámetro	Leña E6	Briq. A E4	Briq. B E5
Concentración MP (mg/m ³)	29,0	63,6	120,3
Emisiones totales de partículas (g)	8,05	16,18	30,20
Tasa de quemado (kg/h)	2,4	1,9	2,0
Velocidad de emisión MP (g/h)	6,9	13,9	25,9
Velocidad de emisión MP ajustada (g/h)	9,0	16,1	27,1

La Tabla 13 muestra la comparación de emisiones de MP entre Leña (E9) y Briqueta A maciza (E10). Se evidencia una diferencia en la generación de MP, a pesar de que la tasa de combustión es prácticamente equivalente (2,0 vs 2,2 kg/h). Los resultados muestran que la briqueta presenta concentraciones de MP de 199,4 mg/m³ frente a 58,4 mg/m³ en la leña, lo que representa un aumento aproximado de 3,4 veces. Asimismo, las emisiones totales alcanzan 46,12 g en la briqueta maciza frente a 14,49 g de la leña, es decir, unas 3,2 veces más. De manera similar, la velocidad de emisión de partículas se eleva de 10,9 g/h en la leña a 36,9 g/h en la briqueta, mientras que el valor ajustado pasa de 13,2 g/h a 36,4 g/h, lo que implica un incremento de entre 2,8 y 3,4 veces.

Tabla 13. Resultados de emisiones de MP y desempeño de quemado para Leña y Briqueta A maciza.

Parámetro	Leña E9	Briq. A E10
Concentración MP (mg/m ³)	58,4	199,4
Emisiones totales de partículas (g)	14,49	46,12
Tasa de quemado (kg/h)	2,0	2,2
Velocidad de emisión MP (g/h)	10,9	36,9
Velocidad de emisión MP ajustada (g/h)	13,2	36,4

Al comparar los dos ensayos de Briqueta A (maciza vs con orificio), se observa que el mayor MP de la briqueta maciza no se explica solo por haber quemado más masa (2,8 vs 2,5 kg), ya que al normalizar las emisiones totales se obtiene un factor de emisión significativamente mayor 16,5 g/kg para la briqueta maciza vs 6,4 g/kg para la briqueta con orificio. Esto sugiere que la geometría del combustible pudo influir en la formación de material particulado, en donde el paso del aire por el canal interno favorecería en parte la combustión. para poder validar esto se requeriría la realización de más ensayos.

4 Conclusiones

La presente investigación logró cumplir con el objetivo principal de evaluar la viabilidad técnica y ambiental de briquetas fabricadas a partir de residuos agroindustriales como alternativa a la leña tradicional. A través de la caracterización fisicoquímica y los ensayos de combustión, se demostró que, si bien es posible valorizar estos desechos para generar un biocombustible con capacidad calórica similar a la leña, su viabilidad ambiental presentó limitaciones significativas bajo las condiciones estudiadas.

En relación con la eficiencia energética, los hallazgos validan parcialmente la hipótesis planteada. Las briquetas obtenidas poseen un PCS de 16,31 MJ/kg para la mezcla A y 17,04 MJ/kg para la mezcla B, valores que se aproximan notablemente a los 17,31 MJ/kg de la leña certificada utilizada como referencia.

La comparación de las temperaturas del horno y de la cámara de combustión evidencian que las briquetas entregan energía de manera más intensa en las primeras fases, con temperaturas máximas de 450 °C y 440°C para las Briquetas A y B respectivamente. La Briqueta A destacando por su estabilidad de llama y la Briqueta B por su duración. Sin embargo, la leña, pese a alcanzar temperaturas máximas menores (345 °C), ofrece un sostén térmico más prolongado en la etapa de brasas y mantiene la cámara de combustión caliente por más tiempo gracias a la mayor extensión de sus llamas. En conjunto, los resultados muestran un contraste entre la eficiencia inicial de las briquetas y la resistencia térmica sostenida de la leña, lo que sugiere que cada biomasa presenta ventajas específicas según la etapa del proceso de combustión.

Respecto al diseño geométrico planteado en el segundo objetivo específico, la elección de la forma cilíndrica con orificio central demostró funcionar la cocina Alcázar M70. Durante los ensayos de combustión, se observó que el canal central facilitó el flujo de aire lo cual aceleró el consumo de combustible en la primera etapa de quemado. En cambio, la briqueta maciza tiene un arranque más lento y su descenso es más suave y progresivo, similar al comportamiento de la leña, lo que permite mantener una combustión más estable y sostenida durante buena parte del tiempo total.

Se concluye que, bajo condiciones de tiraje máximo, la leña conserva una mayor eficiencia térmica en el tiempo gracias a una entrega de calor más sostenida en la fase de brasas. El rendimiento sensible al exceso de aire y la temperatura de los gases de escape. Por su parte las Briqueta A alcanzo un rendimiento máximo alrededor del 75% entre los primeros 10 a 15 minutos de medición para después decaer progresivamente hasta un mínimo de 30%, principalmente por la caída de la temperatura. Por su parte la Leña tiene un rendimiento alrededor del 80% en sus primeros 15 minutos de medición y un descenso mas sostenido con un mínimo de rendimiento del 45% aproximadamente.

Por otro lado, el desempeño ambiental de las briquetas no fue superior al de la leña, lo que refuta la segunda parte de la hipótesis inicial respecto a la reducción de contaminantes. Los resultados muestran que, aunque la dinámica de consumo de combustible es similar entre leña y briqueta, las emisiones de CO difieren notablemente. La briqueta presenta una combustión menos eficiente en la fase de brasas, con acumulación de CO debido a la caída

de temperatura que limita la oxidación (8.000–14.000 mg/m³), mientras que la leña logra mantener un perfil más estable y con menores emisiones en los momentos críticos (4000-5800 mg/m³). Se confirma una relación inversa entre estabilidad térmica y generación de CO, lo que posiciona a la leña como un combustible con menor impacto en emisiones contaminantes bajo las condiciones evaluadas. No obstante, se recomienda ampliar el número de ensayos para consolidar estas conclusiones y evaluar la consistencia de los resultados.

En cuanto a las emisiones de NO_x los resultados evidencian que las emisiones de NO_x están fuertemente condicionadas por la composición del combustible más que por la temperatura o el oxígeno disponible. La briqueta, con mayor contenido de nitrógeno (0,52 vs 0,09 de la leña), genera emisiones significativamente más altas y persistentes (350-500 mg/m³), además de mostrar inestabilidad en la fase de llama y una transición acelerada hacia brasas. En contraste, la leña mantiene un perfil más estable y con menores emisiones, incluso bajo variaciones de oxígeno. Esto posiciona a la leña como un combustible con menor impacto en emisiones de NO_x.

Finalizando con los resultados de las emisiones, se confirman que la leña es el combustible más limpio en términos de material particulado, mientras que las briquetas, especialmente la maciza, generan emisiones significativamente más altas. En los primeros tres ensayos se obtuvo que la Leña emite una menor concentración de MP (29,0 mg/m³) y emisiones totales más bajas (8,05 g). La Briqueta B es más contaminante, con emisiones totales de 30,20 g aproximadamente 4 veces más que la leña, y el doble que la Briqueta A, siendo esta última la opción intermedia, pero aún emite el doble que la leña. La diferencia no se explica únicamente por la masa quemada, sino por la geometría del combustible. Al comparar los resultados con la Briqueta A ahora sin el orificio central se obtuvo que la briqueta maciza genera más MP que la briqueta con orificio 16,5 g por kg de combustible vs 6,4 g por kg de combustible, sugiriendo que el canal interno favorece la combustión y reduce partículas. En conjunto, se evidencia que las briquetas requieren ajustes de diseño para mitigar su impacto ambiental, mientras que la leña mantiene una ventaja clara en emisiones de MP. No obstante, se recomienda realizar más ensayos para validar la influencia de la geometría en la reducción de partículas.

En cuanto a las limitaciones y alcance de los resultados, es importante señalar que los resultados de emisiones y comportamiento térmico presentados corresponden a una caracterización experimental a escala de laboratorio de un único ensayo para cada biomasa comparada. Dado el número de ensayos realizados, los hallazgos deben interpretarse como tendencias indicativas del comportamiento de estas mezclas y no como valores absolutos de certificación. Para obtener conclusiones estadísticas definitivas, se requiere un mayor número de experiencias y la evaluación en diferentes regímenes de potencia.

Estos resultados tienen implicaciones importantes para el estado del arte de la valorización de residuos en Chile. Si bien se ratifica el potencial calórico de estos desechos, su implementación masiva requiere optimizaciones técnicas antes de ser considerada una alternativa totalmente "limpia". Para futuras investigaciones, se sugiere priorizar el mejoramiento del proceso de densificación para alcanzar estándares ISO, lo que podría estabilizar la quema y reducir el material particulado.

Si bien la literatura sugiere una reducción de emisiones al valorizar estos residuos individualmente, los resultados experimentales demostraron que la mezcla evaluada no logró superar el desempeño ambiental de la leña tradicional. Dado que las emisiones fueron superiores, se recomienda para futuros trabajos explorar nuevas formulaciones de mezcla y aglutinantes.

Referencias

- [1] D. E. Emisiones *et al.*, *INFORME CONSOLIDADO Coordinación general*.
- [2] “ESTRATEGIA NACIONAL DE RESIDUOS ORGÁNICOS CHILE 2040.”
- [3] Franco López, “Con más de ocho kilos por persona al año: Chile es el segundo mayor consumidor de palta en el mundo,” *Biobiochile*. Accessed: Dec. 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.biobiochile.cl/noticias/economia/actualidad-economica/2025/03/12/con-mas-de-ocho-kilos-por-persona-al-ano-chile-es-el-segundo-mayor-consumidor-de-palta-en-el-mundo.shtml>
- [4] Comité de Paltas Chile, “Chile alcanza récord en producción de paltas,” *paltahass.cl*. Accessed: Dec. 29, 2025. [Online]. Available: <https://paltahass.cl/chile-alcanza-record-en-produccion-de-paltas/>
- [5] Alta Coffe, “¿CUÁNTAS TAZAS DE CAFÉ CONSUMEN LOS CHILENOS AL DÍA?” Accessed: Dec. 29, 2025. [Online]. Available: <https://alta.coffee/blogs/noticias/cuantas-tazas-de-cafe-consumen-los-chilenos-al-dia#:~:text=%C2%BFY%20los%20dem%C3%A1s%20pa%C3%ADses%20de,seg%C3%BAn%20un%20informe%20de%20Euromonitor.>
- [6] Nicolás Díaz, “¿Instantáneo o en grano? Revelan los hábitos de consumo de café en Chile,” *biobiochile.cl*. Accessed: Dec. 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.biobiochile.cl/noticias/servicios/toma-nota/2025/07/08/instantaneo-o-en-grano-revelan-los-habitos-de-consumo-de-cafe-en-chile.shtml>
- [7] Equipo Digital, “Municipalidad de Concepción recicla más de 3 toneladas de borras de café para compostaje,” *Diario Concepción*.
- [8] Antonella Fuentealba, “Concepción dentro de las comunas chilenas con más cafeterías,” *Periodismo Udec*.
- [9] Catelicán Vera and Luis Gysling Caselli, “Subproductos madereros de la industria del aserrío 2024,” *Santiago*, 2024.
- [10] S. Paniagua, S. Reyes, F. Lima, N. Pilipenko, and L. F. Calvo, “Combustion of avocado crop residues: Effect of crop variety and nature of nutrients,” *Fuel*, vol. 291, p. 119660, May 2021, doi: 10.1016/J.FUEL.2020.119660.
- [11] D. C. Fanárraga Lukuy, R. J. Jihuallanca Sánchez, C. A. Castañeda-Olivera, and E. H. Acosta Suasnabar, “Production of Ecological Briquettes from Avocado Pit Waste as Biofuel,” *Chem Eng Trans*, vol. 92, pp. 193–198, 2022, doi: 10.3303/CET2292033.
- [12] P. E. Akhator, L. Bazuaye, A. Ewere, and O. Oshiokhai, “Production and characterisation of solid waste-derived fuel briquettes from mixed wood wastes and waste pet bottles,” *Heliyon*, vol. 9, no. 11, p. e21432, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.HELİYON.2023.E21432.

- [13] S. B. Kang, H. Y. Oh, J. J. Kim, and K. S. Choi, "Characteristics of spent coffee ground as a fuel and combustion test in a small boiler (6.5 kW)," *Renew Energy*, vol. 113, pp. 1208–1214, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.RENENE.2017.06.092.
- [14] S. Espuelas, S. Marcelino, A. M. Echeverría, J. M. del Castillo, and A. Seco, "Low energy spent coffee grounds briquetting with organic binders for biomass fuel manufacturing," *Fuel*, vol. 278, p. 118310, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.FUEL.2020.118310.
- [15] K. T. Lee, Y. T. Shih, S. Rajendran, Y. K. Park, and W. H. Chen, "Spent coffee ground torrefaction for waste remediation and valorization," *Environmental Pollution*, vol. 324, p. 121330, May 2023, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2023.121330.
- [16] by Joel Chaney and Ms. Physics with French, "Combustion Characteristics of Biomass Briquettes."
- [17] P. Aguko Kabok, D. M. Nyaanga, J. M. Mbugua, and R. Eppinga, "Effect of Shapes, Binders and Densities of Faecal Matter - Sawdust Briquettes on Ignition and Burning Times," *J Pet Environ Biotechnol*, vol. 09, no. 02, 2018, doi: 10.4172/2157-7463.1000370.
- [18] S. Espuelas, S. Marcelino, A. M. Echeverría, J. M. del Castillo, and A. Seco, "Low energy spent coffee grounds briquetting with organic binders for biomass fuel manufacturing," *Fuel*, vol. 278, p. 118310, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.FUEL.2020.118310.
- [19] Felipe Venegas, "Estudio del aprovechamiento de residuos orgánicos del café y su impacto como briquetas sostenibles para uso doméstico.," 2025.
- [20] S. Paniagua, S. Reyes, F. Lima, N. Pilipenko, and L. F. Calvo, "Combustion of avocado crop residues: Effect of crop variety and nature of nutrients," *Fuel*, vol. 291, p. 119660, May 2021, doi: 10.1016/J.FUEL.2020.119660.
- [21] A. Maaoui *et al.*, "Assessment of pine wood biomass wastes valorization by pyrolysis with focus on fast pyrolysis biochar production," *Journal of the Energy Institute*, vol. 108, p. 101242, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.JOEI.2023.101242.
- [22] M. Zhao, B. Li, J. X. Cai, C. Liu, K. G. McAdam, and K. Zhang, "Thermal & chemical analyses of hydrothermally derived carbon materials from corn starch," *Fuel Processing Technology*, vol. 153, pp. 43–49, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.FUPROC.2016.08.002.
- [23] International Organization for Standardization (ISO), "Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 3: Graded wood briquettes (ISO 17225-3:2014).," 2014.
- [24] "CAL2K-ECO OPERATING MANUAL V2.3-27 May 2013 Website."
- [25] "NCh 3173 Of 2009".
- [26] Alcazár, "Ficha técnica: Línea M (Modelos M70, M80 y M90)," Jan. 2024.
- [27] "METODO_CH-5G".

- [28] "METODO CH-5: DETERMINACION DE LAS EMISIONES DE PARTICULAS DESDE FUENTES ESTACIONARIAS."
- [29] "LIBRO DE METODOLOGÍAS APROBADAS Código : Método CH-28 Revisión : 2 Fecha : Noviembre 2013 Pagina : 1 de 36."