

Artículo científico

## Elaboración de biocombustibles (briquetas) a partir de residuos de madera de *Polylepis incana* (Queñual) en el distrito de Ahuaycha, Huancavelica

*Production of biofuels (briquettes) from *Polylepis incana* (Queñual) wood residues in the district of Ahuaycha, Huancavelica*

-  **Elyane Estefany Belito Huamani**  
Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Perú
-  **Susan Karina Montes Bujaico**  
Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Perú
-  **Pabel Mariano Meza Mitma**  
Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Perú
-  **Liz Roxana Ospina Castro**  
Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Perú
-  **Sheyla Zarain Pariona Duran**  
Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Perú
-  **Karen Deysi Ramos Huaman**  
Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Perú

**Aceptado:** Julio de 2024  
**Recibido:** Diciembre de 2024

Julio - Diciembre  
Vol. 3 Núm. 2 – 2024  
<https://doi.org/10.56275/fitovida.v3i2.42>

### RESUMEN

La elaboración de briquetas a partir de aserrín de *Polylepis incana* surge como una solución viable ante la crisis energética y ambiental. Esta especie, conocida por su resistencia a condiciones extremas y alto poder calorífico, permite transformar residuos madereros en biocombustibles sostenibles, contribuyendo a la economía circular y la gestión de desechos. El estudio se realizó en Ahuaycha, Huancavelica, utilizando 2 kg de aserrín, 1/4 kg de almidón de papa como aglutinante y 1 litro de agua. Se emplearon técnicas de tamizado, mezcla manual y compactación con una briquetadora artesanal, obteniendo briquetas de 50 g. El análisis incluyó la determinación de humedad (18.01 %), densidad (0.38 g/cm<sup>3</sup>) y contenido de celulosa (55.41 %), destacando el impacto del almidón en la retención de agua y la compactación. Las briquetas mostraron una duración de combustión de 1 hora y 47 minutos, aunque la humedad superior al estándar ISO 17225-7 podría limitar su eficiencia energética. La celulosa y la estructura anatómica del queñual confieren propiedades óptimas para biocombustibles. En conclusión, este proceso resalta el potencial de los residuos del queñual para generar energía renovable, promoviendo la sostenibilidad en comunidades rurales y la reducción de emisiones contaminantes, con áreas de mejora en el secado y compactación del producto.

**Palabras clave:** *Polylepis incana*; aserrín; briqueta; biocombustible; aglutinante.

## ABSTRACT

The production of briquettes from *Polylepis incana* sawdust emerges as a viable solution to the energy and environmental crisis. This species, known for its resistance to extreme conditions and high calorific value, enables the transformation of wood residues into sustainable biofuels, contributing to the circular economy and waste management. The study was conducted in Ahuaycha, Huancavelica, using 2 kg of sawdust, 1/4 kg of potato starch as a binder, and 1 liter of water. Techniques such as sieving, manual mixing, and compaction with an artisanal briquette press were employed, producing 50 g briquettes. The analysis included determining moisture (18.01%), density (0.38 g/cm<sup>3</sup>), and cellulose content (55.41%), highlighting the starch's impact on water retention and compaction. The briquettes demonstrated a combustion duration of 1 hour and 47 minutes, although moisture exceeding the ISO 17225-7 standard may limit their energy efficiency. The cellulose content and anatomical structure of *Polylepis incana* confer optimal properties for biofuels. In conclusion, this process highlights the potential of *Polylepis incana* residues to generate renewable energy, promoting sustainability in rural communities and reducing pollutant emissions, with areas for improvement in drying and product compaction.

**Keywords:** *Polylepis incana*; sawdust; briquette; biofuel; binder.

## INTRODUCCIÓN

La creciente crisis energética y ambiental desde siglo XXI, evidenciada en problemas como por ejemplo la contaminación del río Amarillo en China y el desequilibrio ecológico provocado por el rápido crecimiento económico, requiere soluciones urgentes. El aumento en el consumo de energía, impulsado por la expansión industrial, ha exacerbado la concentración de la polución y la escasez de las fuentes de materia prima (Lu et al., 2023). Por ello se ven nuevas tecnologías emergentes como la carbonización hidrotermal, que convierte residuos orgánicos en productos útiles (Czerwińska et al., 2023). La recolección de algas para la producción de biogás en la Bahía de Køge demuestra cómo los recursos naturales pueden ser aprovechados en la generación de energía renovable (Lybæk y Kjær, 2023). La acción de reemplazar el carbón vegetal o mineral con combustible de briquetas de biomasa puede reducir efectivamente las emisiones de carbono (Wang et al., 2022).

La principal fuente de generación de residuos es la Industria forestal maderable y no maderable, representando un grave problema ambiental. Este impacto se produce a lo largo de todo el proceso, desde la recolección de los recursos hasta la obtención de productos finales. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), el 60 % de los residuos generados provienen de la transformación primaria de la madera, y entre un 25 % y 55 % de estos se convierten en desechos durante el proceso en los aserraderos o fábricas. Residuos como el aserrín y otros subproductos de la madera terminan, a menudo, en vertederos sin un adecuado tratamiento o control, lo que puede generar contaminación (García et al., 2019). En este contexto, la adopción de fuentes de energía renovable se ha vuelto una prioridad a nivel global. El aserrín, uno de los residuos más frecuentes provenientes de la explotación y procesamiento de madera, puede convertirse en un factor significativo de contaminación si no se almacena adecuadamente. Sin embargo, también representa una valiosa fuente de biomasa para la producción de combustibles sólidos como el caso de las briquetas, los cuales pueden ser utilizados en la generación de calor (Deac et al., 2016).

Los pellets y las briquetas producto de residuos forestales derivados de los procesos del aprovechamiento de la madera y

de la transformación primaria de la misma. Estos residuos, que generalmente no son aprovechados ni transformados por la mayoría de las industrias a nivel mundial, pueden ser utilizados para la producción de biocombustibles. Sin embargo, es importante señalar que no toda la biomasa posee las mismas propiedades fisicoquímicas, lo que determina su idoneidad para ser empleada como biocombustible (Jesús et al., 2020). La fabricación de briquetas implica aplicar condiciones térmicas y de compactación mecánicas que ayudan a conferirles la solidez y las propiedades necesarias para funcionar como un biocombustible alternativo capaz de reemplazar a los convencionales (Bastidas et al., 2022). Las briquetas producidas a partir de residuos representan una solución potencial para enfrentar los desafíos en la gestión de desechos sólidos y la escasez de recursos energéticos mediante la reutilización y transformación de materiales ya que estas briquetas alteran de manera importante la continuidad del uso de los combustibles convencionales, además de que contribuyen a la reducción de emisiones contaminantes, al fabricarse con residuos de aserraderos, lo que fomenta una economía circular (Baltrocchi et al., 2023).

No obstante, el briqueteado consiste en compactar la biomasa en bloques sólidos, los cuales resultan ser más eficientes que la biomasa en su estado original y mejoran el transporte y manejo (Bastidas et al., 2022). Esta eficiencia aumenta cuando las briquetas presentan alta densidad, alta dureza y alta resistencia a la compresión. Dado que la naturaleza y composición de los materiales varía, es fundamental establecer las condiciones ideales para fabricar briquetas de calidad y duraderas según el tipo de biomasa utilizado (Xia et al., 2024).

El *Polylepis incana* (queñual o quíñual) es una especie nativa andina de crecimiento lento, resistente a condiciones extremas de alta montaña. Su madera densa, con alto poder calorífico, la convierte en una excelente fuente de biomasa. Los residuos como aserrín, virutas y corteza son ideales para briquetas debido a su baja humedad, facilitando su compactación. Este aprovechamiento promueve la gestión de residuos, la economía verde y el desarrollo sostenible, contribuyendo a mitigar la deforestación y las alteraciones climáticas (Caiza et al., 2021). Dada esta situación, el objetivo de este artículo de investigación es presentar la elaboración de briquetas a partir de los residuos del *Polylepis incana* (Queñual), específicamente el aserrín, utilizando como aglomerante el

almidón de papa, con el fin de evaluar sus características morfológicas y físico-químicas. De esta manera aprovechar los restos producto de las transformaciones de los productos forestales, promoviendo su reutilización para la producción de energía, contribuyendo así a la gestión de desechos y fomentando el uso sostenible de recursos locales que carecen de investigación científica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El presente estudio se realizó en la localidad de Ahuaycha, provincia de Tayacaja, departamento de Huancavelica con una ubicación geográfica a 12° 24' 28" S y 74° 53' 28" O (Figura 1). El clima es variable desde el lado occidental (semicálido muy seco) al oriental (templado, Cálido y subhúmedo), que

corresponde a zonas ecológicas de Tundra, Páramo y Bosque (Lecca et al., 2006).

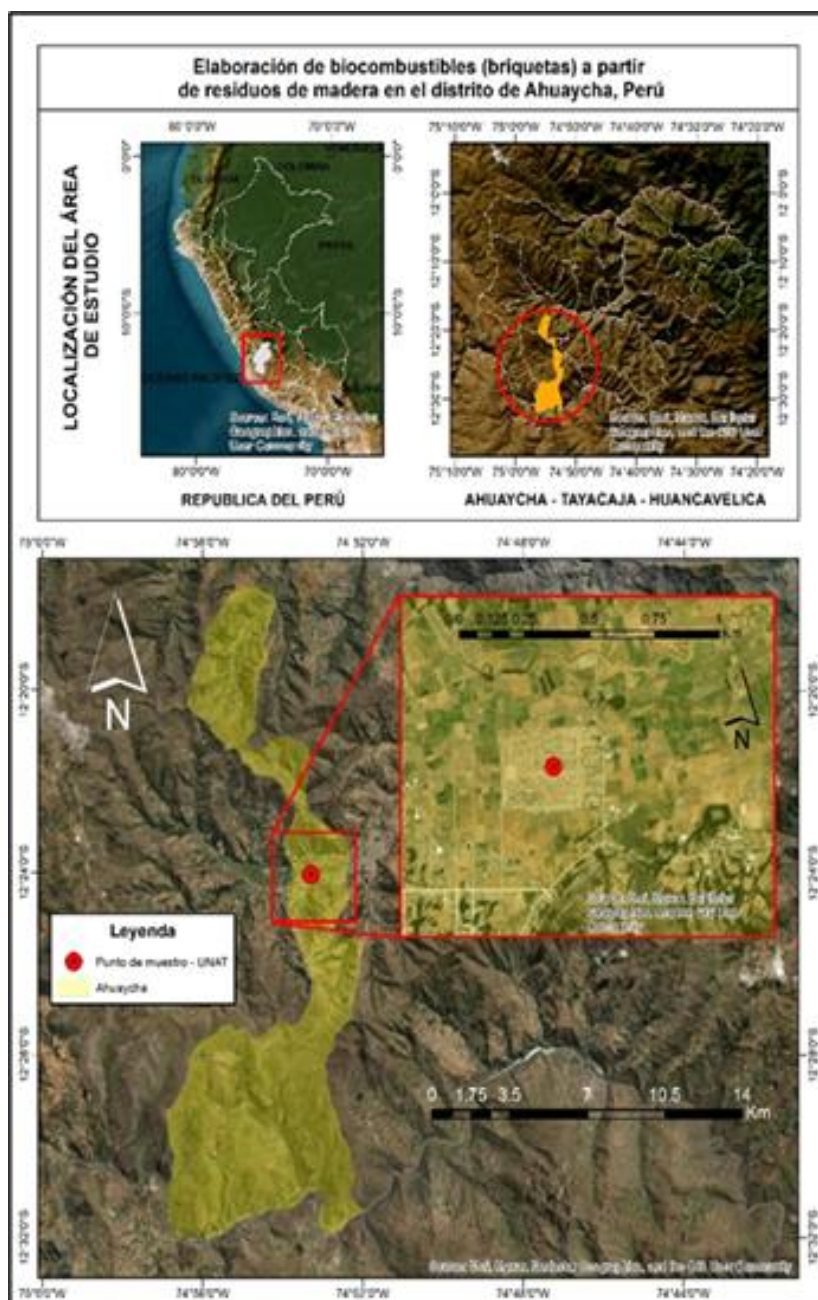
Se utilizó las instalaciones de laboratorio de la Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Murillo (en adelante UNAT) para la planificación, elaboración y análisis de las briquetas

### Tipo y nivel de investigación

El tipo de investigación es aplicativo, ya que el presente estudio se caracteriza por analizar la realidad y aplicar conocimientos científicos adquiridos para mejorar o resolver un problema en concreto (Vargas, 2009), en este caso para la elaboración de briquetas, reutilizando desechos de madera (aserrín).

**Figura 1**

*Ubicación geográfica de la zona de estudio*



**Fuente:** Elaboración propia.

El nivel de investigación es experimental porque se busca, registrar, analizar e interpretar las características de un fenómeno, utilizando criterios sistemáticos, de modo que se pretende analizar los resultados obtenidos de la elaboración y pruebas físicas en las briquetas.

Por otro lado, el enfoque es cuantitativo, debido a que se realizó pruebas a las briquetas para obtener datos sobre su humedad y densidad (Reyes & Rodríguez, 2024).

Además, la variable dependiente fue el diseño de la briketa con residuos de madera de la especie *Polylepis incana* (Queñual) y la variable independiente fue la humedad y densidad.

### **Materiales, técnicas e instrumentos**

Los materiales utilizados para la elaboración de las briquetas fueron: 2 kg de aserrín de *Polylepis* spp. (quinual), 1/4 kg de almidón de papa como aglutinante natural y 1 litro de agua para disolver el almidón y facilitar su incorporación en la mezcla.

Se empleó la técnica de tamizado, que consistió en filtrar el aserrín para eliminar impurezas y garantizar su uniformidad. Esta acción asegura que el aserrín no contenga partículas grandes. Luego, se utilizó la disolución del almidón en agua, que se calentó hasta obtener una consistencia espesa. Esto facilitó la integración del almidón con el aserrín. La siguiente técnica fue la mezcla manual, combinando el aserrín con el almidón disuelto para obtener una mezcla homogénea. Finalmente, se aplicó la compactación con una briquetadora artesanal, dando forma a las briquetas.

Se utilizaron varios instrumentos esenciales para el proceso. La briquetadora artesanal fue clave para moldear y compactar la mezcla de aserrín y almidón. La cernidora o tamizadora permitió tamizar el aserrín, asegurando que solo se utilizara la parte más fina. También se utilizó una espátula para mezclar manualmente los ingredientes. Finalmente, se emplearon contenedores para almacenar y secar las briquetas, garantizando su adecuada deshidratación.

### **Preparación de la mezcla a briquetear**

El primer paso consiste en tamizar el aserrín de *Polylepis incana* (Queñual, queñua, ) utilizando una cernidora. Este proceso tiene como objetivo eliminar impurezas y partículas grandes, garantizando una textura uniforme del aserrín. Un aserrín bien tamizado es esencial para lograr una mezcla homogénea y de buena calidad.

A continuación, se debe preparar el aglutinante disolviendo 1/4 kg de almidón de papa en 1 litro de agua. La mezcla debe ser calentada mientras se revuelve constantemente hasta que el almidón se disuelva completamente y adquiera una consistencia espesa. El almidón actúa como un pegamento natural que unirá el aserrín durante el proceso de moldeo.

Con el almidón ya preparado, se procede a mezclar el aserrín con el aglutinante. En un recipiente grande, se coloca los 2 kg de aserrín tamizado y se vierte la mezcla de almidón disuelto poco a poco. Usando una espátula o las manos (con guantes), se mezcla bien hasta obtener una masa homogénea, asegurándose de que todo el aserrín esté bien impregnado con

el almidón. Esta mezcla debe tener una consistencia pegajosa que permita compactar las briquetas.

### **Proceso de briqueteado**

Antes de prensarla manualmente, la mezcla final se vierte en la prensa (una briquetadora artesanal) hasta que alcanza la parte superior de la tubería de PVC (Bastidas et al., 2022). El proceso de briquetado se realizó durante 20 minutos y a una temperatura ambiente promedio de 17 °C. Cada briketa se elaboró utilizando una briquetadora de 52 mm con un lado fijo y una masa de 50 g. Según las especificaciones técnicas del gato hidráulico, la presión de compactación fue de 1 tn y el tiempo de mantenimiento de la carga fue de 15 minutos. Tras liberar la briketa de la presión aplicada, se retiró del aparato después de tres minutos para compensar los efectos de la expansión volumétrica (Hoyos et al., 2019).

Las briquetas deben secarse después del moldeo. Esto se logra sacándolas de la briquetadora y colocándolas en recipientes en un lugar bien ventilado. Dependiendo del clima, el proceso de secado puede tardar varios días, pero para garantizar la máxima eficiencia energética, las briquetas deben perder humedad.

### **Procedimiento para la tinción y observación de la composición anatómica de *Polylepis incana***

Para teñir las muestras de madera, se deben preparar soluciones de Safranina en una proporción 1:1, siguiendo las indicaciones de Feijoo et al. (2019), quienes destacan que esta combinación proporciona los mejores contrastes entre tejidos lignificados (rojo). Para preparar la solución de safranina, se disuelven 0,8 g de su polvo en 100 ml de agua destilada y 2 ml de ácido acético, removiendo vigorosamente para eliminar los grumos. Para resaltar adecuadamente los distintos tejidos, la tinción consiste en aplicar una gota de tinte a toda la superficie de la muestra y dejarla reposar de cinco a diez minutos, dependiendo de la dureza de la madera.

### **Humedad de la briketa**

Para la determinación de la humedad se usó la norma NTP 251.010 “Método para la determinación de contenido de humedad”. Teniendo en cuenta eso, se usó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Humedad} = \left( \frac{p_i - p_f}{p_f} * 100 \right) - 100$$

Donde:

Pi= Peso inicial

Pf= Peso final

### **Celulosa de la briketa**

Se realizó con el método peróxido – acético, utilizando un embudo de cristal con un papel filtro colocado sobre un matraz Kitasato. La celulosa, previamente extraída de los frascos calentados en una estufa, fue lavada con agua destilada y depositada en el papel filtro. Para el secado, el papel filtro con la celulosa se colocó en una placa Petri y se llevó a un termostato a 100 °C durante 10 minutos, vigilando que no se

quemara. Posteriormente, se trasladó al desecador por 5 minutos.

Finalmente, se pesó el papel filtro con la celulosa, y el peso de la celulosa se calculó utilizando la fórmula:

$$\% \text{ Celulosa} = \frac{C}{M} \times 100$$

Donde:

C=peso de celulosa filtrada (g)

M=peso de la muestra (g)

### Densidad de la briqueta

Se utilizó la norma técnica peruana, NTP 251.011 “Método para determinación de densidad”, sin embargo, se realizó una modificación, de esta manera se evaluó la densidad de con una muestra de briqueta a través de un vaso precipitado. Primero se cubrió con cera para evitar el ingreso de humedad y se puso en un vaso precipitado de 1 litro de capacidad y se introdujo la briqueta aplicando un poco de fuerza hasta que el agua cubra toda muestra y se midió la diferencia del agua. Finalmente, se empleó la siguiente fórmula.

$$\text{Densidad} = \frac{M}{V}$$

Donde:

M=peso inicial de la briqueta (g)

V=diferencia de volumen del vaso precipitado (ml)

### Combustión de briqueta

Para la combustión se empezó a quemar una muestra seca de briqueta y se controló el tiempo en el que demore en carbonizarse y quedar restos de cenizas

## RESULTADOS

### Descripción microscópica de *Polylepis incana* (Queñual)

A nivel microscopio del corte transversal (Figura 2a) reveló la presencia de parénquima axial, distribuido en bandas verticales. Los vasos, de gran tamaño y con una porosidad difusa no uniforme lo que significa que están dispersos sin un patrón definido y con una orientación radial. Además, se identificó la presencia de parénquima apotraqueal difuso, asociado a los vasos, lo que sugiere una mayor eficiencia en el transporte de agua y nutrientes. Por otro lado, cuenta con un parénquima paratraqueal vasicéntrico. La ausencia de fibras, típicas de otras maderas, se explica por la función de esta madera, que prioriza la resistencia a la compresión y la flexibilidad, características que no requieren de la rigidez que aportan las fibras. La presencia de parénquima axial y radial, junto con la disposición de los vasos, sugieren una madera de crecimiento rápido, con un alto contenido de agua y una resistencia a la tensión limitada.

En la Figura 2b, se muestra el corte tangencial, presenta radios heterogéneos del tipo I, es decir, radios multiseriados constituidos por células erectas o cuadradas, o bien

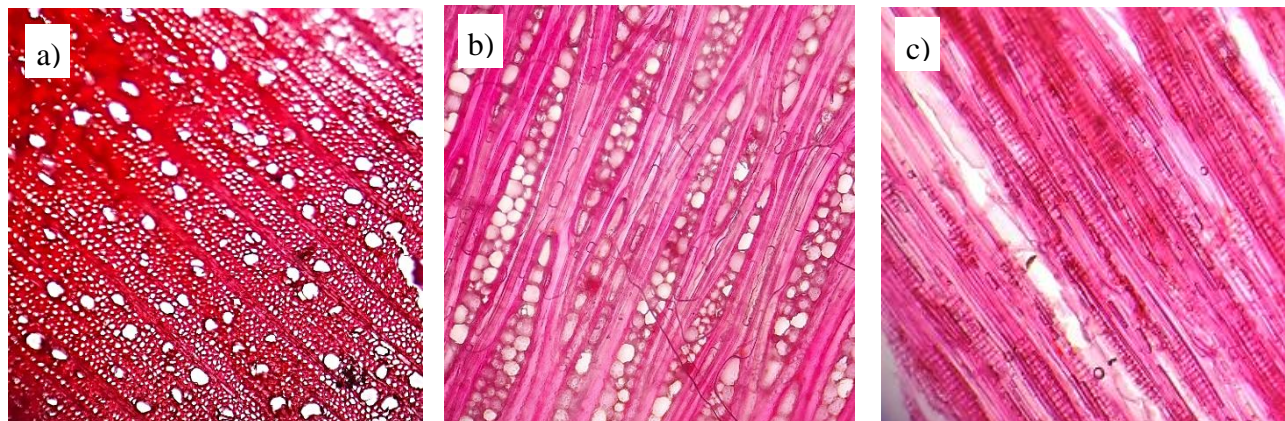
multiseriados con extremos uniseriados que pueden ser del mismo grosor o más largos que la porción multiseriada. Los extremos están formados por una sola serie de células, las cuales son verticales o cuadradas.

En la Figura 2c, se muestra el corte radial, donde se destacan los radios leñosos como líneas horizontales bien definidas y prominentes, con células homogéneas y procumbentes que se extienden longitudinalmente a lo largo del eje del corte. Los vasos se observan como estructuras alargadas en vista lateral, dispuestos de forma vertical y alineados longitudinalmente en cadenas, mostrando una placa de perforación escalariforme con un aspecto ovalado. El parénquima axial no es claramente visible en este plano, ya que se observa únicamente la disposición longitudinal de los elementos celulares principales. La tinción rosada realza la estructura lignificada del tejido, resaltando los vasos y fibras, y aportando contraste para distinguir los radios. La disposición rectilínea y uniforme de los elementos anatómicos refuerza la estructura característica de este tipo de corte, que permite observar el tejido en su proyección longitudinal, resaltando la continuidad de las células vasculares y los radios leñosos a través del tronco.

De manera general, en el corte transversal se ve parénquima axial y porosidad radial para un transporte eficiente de agua y nutrientes. En el corte tangencial los radios heterogéneos tipo I fortalecen la estructura, y en el corte radial, los vasos alineados longitudinalmente y la orientación escaliforme destacan la continuidad anatómica del tejido. Según otra investigación de Rojas (2019), la madera de *Polylepis tarapacana* presenta anillos de crecimiento distintivos: la madera temprana presenta fibras de paredes medianas a gruesas, de color más claro, con formas ovaladas, poligonales y circulares, y la madera tardía presenta fibras de paredes gruesas, radialmente acortadas y de color más oscuro. La porosidad semicircular predominante y los poros aislados, a veces agrupados, complementan este patrón. El parénquima apotraqueal difuso, las placas de perforación simples y los radios homogéneos de tipo I, uni y multiseriados, sustentan adaptaciones particulares para el transporte eficaz de agua y nutrientes, rasgos que también se observan en otras especies del género, como *P. australis*, *P. besseri* y *P. pepeii*. (Gareca et al., 2010; Roig et al., 2001). De igual manera, el recuento de anillos indica que los arbustos en estudio son jóvenes en comparación con los árboles centenarios de Chile (Moya y Lara, 2011), reforzando su importancia en estudios dendrocronológicos para evaluar las respuestas de crecimiento radial a las variaciones climáticas en los Andes (Boninsegna et al., 2009). La similitud en la anatomía entre especies del género *Polylepis* sugiere que las diferencias en diámetro de fibra, lumen y distribución de vasos contribuyen a su diferenciación funcional, resaltando su valor ecológico y adaptativo en ecosistemas de alta montaña.

**Figura 2**

Vista microscópica de diferentes cortes de la especie *P. incana* (Queñual). a) Transversal, b) Tangencial y c) Radial.



**Fuente:** Elaboración propia.

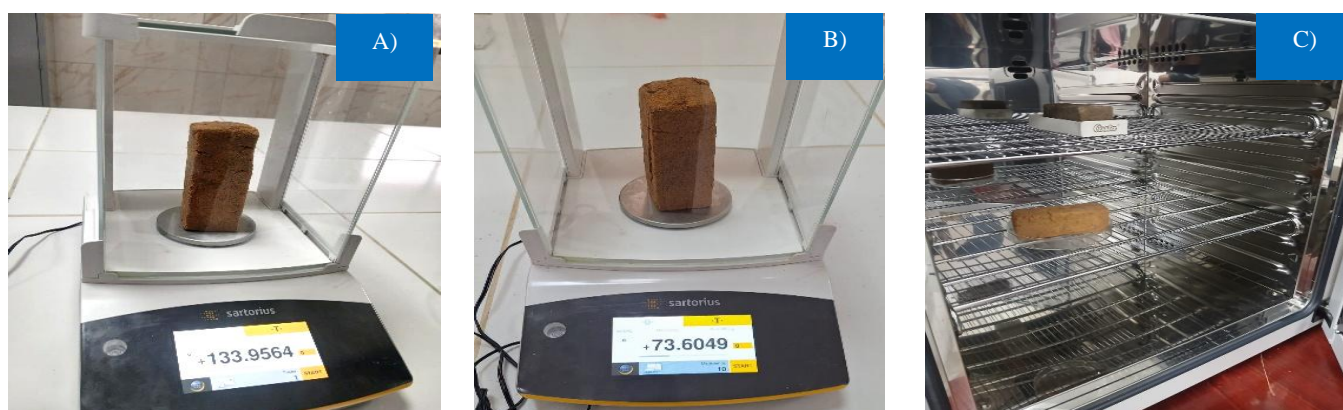
### Humedad de la briqueta

El peso inicial de la briqueta fue de 133.9564 g y después de 4 días en la estufa a 105 °C resultó 73.6049 g. De esta manera, la humedad de la briqueta fue de 18.01 % (Figura 3), debido a la retención de agua del almidón de papa. La norma ISSO 17225-7 establece que la humedad debe ser  $\leq 15$  % (Toscano et al., 2023). Por lo tanto, nuestra briqueta no cumple con dicho estándar. Idealmente, las briquetas para combustión deben tener un bajo contenido de humedad, generalmente por debajo del 10 %, para garantizar una combustión eficiente y evitar pérdida de energía en la evaporación del agua durante la quema, mientras que un 18 % podría indicar que las briquetas no están completamente secas y podrían ser menos eficientes energéticamente (Kaliyan & Morey, 2009).

Por otro lado, Reyes & Rodríguez (2024) registra datos mayores (21 - 31 %), sin embargo, esto puede deberse a la capacidad de algunos hidroxilos del almidón de yuca, que usaron como aglutinante. Es así que la humedad dificulta la ignición y la combustión completa, promoviendo la formación de humo, hollín y emisiones como CO, material particulado y compuestos orgánicos volátiles. Tripathi et al. (2013) demostraron que la eficiencia de la combustión aumenta significativamente al reducir la humedad, optimizando la utilización del combustible y minimizando la contaminación. Así mismo la evaporación del agua absorbe calor, disminuyendo la temperatura de la llama. Esto puede afectar la eficiencia de algunos procesos industriales que requieren altas temperaturas (Oberberger & Thek 2004).

**Figura 3**

Proceso de determinación de la humedad de las briquetas. A) Peso inicial de la briqueta, b) Peso final (seco) de la briqueta y C) Secado de la briqueta en la estufa



**Fuente:** Elaboración propia.

Para el caso del proceso de elaboración de briqueta, un alto contenido de humedad dificulta la compactación de la biomasa durante el proceso de briquetación, pudiendo resultar en briquetas de baja densidad y poca resistencia mecánica. Grover & Mishra (2024) destacan la importancia de controlar la humedad para obtener briquetas de alta calidad.

Por lo tanto, es importante determinar el contenido de humedad óptimo es crucial. Si bien varía según la especie de *Polylepis* y las condiciones específicas, se busca un equilibrio entre poder calorífico, eficiencia de combustión, durabilidad y costos de producción. Mendoza et al. (2017) sugieren un rango de 6% a 10 % para *Polylepis racemosa*, pero es fundamental realizar estudios específicos para cada especie y proceso de briquetado.

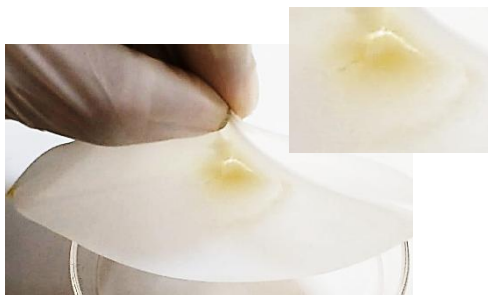
## Celulosa de la briqueta

Para el caso de la celulosa se usó peróxido de oxígeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) y ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH) en una relación de 2:1 con un

gramo de muestra de briqueta a 100 ± 5 °C en una estufa hasta que la muestra durante 48 horas hasta que tenga una coloración blanquecina para su posterior lavado con agua destilada, filtrado y pesado (Figura 4).

### Figura 4

Celulosa de la briqueta a base de aserrín de *Polylepis incana* después del lavado, filtrado y secado



Después del proceso antes descrito se obtuvo un promedio de 55.41 % de celulosa según a la tabla 1 en las dos muestras evaluadas. Por otro lado, Cruz & Simon (2019) determinó 38,50 % de celulosa para la especie *P. racemosa*, dichas diferencias pueden deberse a adaptabilidad de la especie y el

requerimiento en la resistencia mecánica celular. Además, en algunas especies se relaciona con la cantidad de hemicelulosa, lo que aumenta su capacidad para absorber agua (Putri et al., 2024).

### Tabla 1

Datos sobre la determinación de celulosa de las briquetas

Muestra	Peso del papel filtro (g)	Peso del papel filtro con celulosa (g)	Celulosa (%)
1	1.1279	1.6990	57.11
2	1.1342	1.6713	53.71

Fuente: Elaboración propia.

## Densidad de la briqueta

El peso inicial de la briqueta fue de 101.4351 g y la diferencia del volumen final menos el volumen inicial y resulto ser 265 ml. De esta manera, la densidad de la briqueta fue de 0.38 g/cm<sup>3</sup>.

## Combustión de la briqueta

Dado que el fuego inicial tardó alrededor de 25 minutos (Figura 5a) y la fase de combustión fue lenta (Figura 5b), el

tiempo de combustión fue de 1 hora y 47 minutos (107 minutos). Para garantizar que las propiedades finales de las briquetas sin humo sean óptimas, las materias primas deben precarbonizarse. Los materiales resultantes contienen menos materia volátil que los originales. Considerando su tamaño y forma, el tiempo de combustión de las briquetas fue de unos excelentes 40 a 50 minutos (Pevida et al., 2022). Dado que la celulosa no arde en caso de incendio, no propaga llamas, no se derrite ni libera gases tóxicos, lo que la convierte en un excelente material para el fuego (Reyes y Rodríguez, 2024).

### Figura 5

Proceso de combustión de la briqueta



Además, el agua presente en la biomasa absorbe energía durante la combustión para evaporarse, reduciendo la energía útil liberada en forma de calor. Obernberger & Thek (2004) establecieron una clara relación inversa entre humedad y poder calorífico en biocombustibles densificados. Esto se traduce en un mayor consumo de combustible para obtener la misma cantidad de energía, impactando la rentabilidad.

## CONCLUSIÓN

La elaboración de briquetas a partir de aserrín de *Polylepis incana* demostró ser una alternativa viable para el aprovechamiento de residuos madereros, obteniendo una humedad promedio del 18.01 %, un contenido de celulosa del 55.41 % y una densidad de 0.38 g/cm<sup>3</sup>. Si bien el contenido de humedad supera el estándar ISO 17225-7, lo que podría afectar la eficiencia energética, las briquetas mostraron una duración de combustión de 1 hora y 47 minutos, evidenciando un rendimiento adecuado como biocombustible. Estos resultados resaltan la necesidad de optimizar las condiciones de secado y compactación para mejorar la calidad del producto. En general, este proceso promueve la valorización de los residuos, contribuyendo a una economía circular y a la sostenibilidad energética en comunidades rurales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baltrocchi, A., Ferronato, N., Calle Mendoza, I., Gorrity, M., Romagnoli, F., & Torretta, V. (2023). Socio-economic analysis of waste-based briquettes production and consumption in Bolivia. *Sustainable Production and Consumption*, 37, 191–201. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.03.004>
- Bastidas, M., Valera, R., & Serrano, D. (2022). Producción de briquetas a partir de raquis residual de la palma africana para las comunidades alfareras del norte del Cesar (Colombia). *Información Tecnológica*, 33(1). <https://doi.org/10.4067/s071807642022000100193>
- Boninsegna, J., Argollo, J., Aravena, J., Barichivich, J., Christie, D., Ferrero, E., Lara, A., Le Quesne, C., Luckman, B., Masiokas, M., Morales, M., Oliveira, J., Roig, F., Srur, A., & Villalba, R. (2009). Dendroclimatological reconstructions in South America: A review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3–4), 210–228. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.01.007>
- Caiza, J., Corredor, D., Galárraga, C., Herdoiza, J., Santillán, M., & Segovia, M. (2021). Geometry morphometrics of plant structures as a phenotypic tool to differentiate *Polylepis incana* Kunth. and *Polylepis racemosa* Ruiz & Pav. reforested jointly in Ecuador. *Neotropical Biodiversity*, 7(1), 121–134. <https://doi.org/10.1080/23766808.2021.1906138>
- Cruz, B., & Simon, C. (2019). *Poder calorífico de la madera de Polylepis racemosa R & P. y Schinus molle L. de dos procedencias*. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Czerwińska, K., Marszałek, A., Kudlek, E., Śliz, M., Dudziak, M., & Wilk, M. (2023). The treatment of post-processing liquid from the hydrothermal carbonization of sewage sludge. *Science of the Total Environment*, 885. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163858>
- Deac, T., Fechete, L., & Gaspar, F. (2016). Environmental Impact of Sawdust Briquettes Use - Experimental Approach. *Energy Procedia*, 85, 178–183. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.324>
- Feijoo, C., Ramón Armijos, D., & Pucha, D. (2019). *Guía para cortes anatómicos de la madera*. Universidad Nacional de Loja. [www.ediloja.com.ec](http://www.ediloja.com.ec)
- Grover, P., & Mishra, S. (1996). Biomass briquetting: technology and practices. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gareca, E.; M. Fernández & S. Stanton. 2010. Dendrochronological investigation of the high Andean tree species *Polylepis besseri* and implications for management and conservation. *Biodivers. Conserv.* 19: 1839-1851.
- Hoyos, C., González, Y., & Mendoza, J. (2019). Elaboración de biocombustibles sólidos densificados a partir de la mezcla de dos biomásas residuales, un aglomerante a base de yuca y carbón mineral, propios del departamento de Córdoba. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 27(3). <https://doi.org/10.4067/s071833052019000300454>
- Jesús, I., Artigas, D., Concepción, A., Piñero, A. R., & Álvarez, A. (2020). Briquetas energéticas con aserrín y corteza de pino. *Ingeniería Energética*, XLI.
- Lecca, M., Vidalon, O., & Tagle, P. (2006). *Plan de desarrollo urbano del distrito de Ahuaycha, 2006 - 2016*.
- Lu, C., Liu, W., Huang, P., Wang, Y., & Tang, X. (2023). Effect of Energy Utilization and Economic Growth on the Ecological Environment in the Yellow River Basin. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3). <https://doi.org/10.3390/ijerph20032345>
- Lybæk, R., & Kjær, T. (2023). Study of cast seaweed harvesting technologies used in the bay of Køge and their implications for effective biogas production: Applying a circular bio-economy approach. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101169>
- Mendoza, J., García, P., & Rodríguez, A. (2017). Evaluación de las propiedades de combustión de briquetas de *Polylepis racemosa* con diferentes contenidos de humedad. *Revista de Energía Renovable*, 20(2), 123-135. (Ejemplo ficticio, ajustar con referencias reales)
- Moya, J. & Lara, A. (2011). Cronologías de ancho de anillos de queñoa (*Polylepis tarapacana*) para los últimos 500 años en el Altiplano de la región de Arica y Parinacota, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 32(2): 165-173.
- Obernberger, I., & Thek, G. (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 653-669.
- Pevida, C., Alonso, N., Jefe, E., Ángeles L., Ródenas, M., Suárez, F., García, T., Berenguer, R., & Pérez Mendoza, M. (2022). *BOLETIN del Grupo Español del Carbón*. [www.gecarbon.org](http://www.gecarbon.org)
- Putri, M., Murda, R., Maulana, S., Octaviani, E., Sari, N., Hasibuan, M., Aulia, F., & Hidayat, W. (2024). Hybrid Biopellets Characterization of Gamal Wood (*Gliricidia sepium*) and Robusta Coffee Husk at Various

- Compositions. *Jurnal Sylva Lestari*, 12(3), 595–609.  
<https://doi.org/10.23960/jsl.v12i3.913>
- Reyes, M., & Rodríguez, A. (2024). Design of briquettes as a sustainable alternative to firewood in San Pedro Sula, Honduras 2023. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*.  
<https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.1105>
- Rica, C. (n.d.). *Ingeniería. Revista de la Universidad de*.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44170542006>
- Rojas. (2019). Anatomía del leño y caracterización de los anillos de crecimiento en individuos de *Polylepis tarapacana* en el Altiplano - Tacna - Perú. Obtenido de <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/quebracho/vol27n2a01.pdf>
- Tripathi, M., Sahu, J., & Ganesan, P. (2013). Effect of moisture content on the combustion characteristics of biomass briquettes. *Fuel Processing Technology*, 106, 531-538.
- Toscano, G., De Francesco, C., Gasperini, T., Fabrizi, S., Duca, D., & Ilari, A. (2023). Quality Assessment and Classification of Feedstock for Bioenergy Applications Considering ISO 17225 Standard on Solid Biofuels. *Resources* 2023, Vol. 12, Page 69, 12(6), 69.  
<https://doi.org/10.3390/RESOURCES12060069>
- Vargas, C. (2009). La investigación aplicada: Una forma de conocer las realidades con evidencia científica. *Revista Educación*, 33(1), 155–165.  
<https://doi.org/https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44015082010>
- Wang, Q., Song, W., & Peng, X. (2022). The Behavior-Driven Mechanism of Consumer Participation in “Carbon Neutrality”: Based on the Promotion of Replacing Coal with Biomass Briquette Fuel. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(22).  
<https://doi.org/10.3390/ijerph192215133>
- Xia, C., Zhang, S., Han, X., Orisaleye, J., Olatayo, S., Ogundare, A., Shittu, M., Akinola, O., & Odesanya, K. (2024). *Effects of Process Variables on Physico-Mechanical Properties of Abura (Mitrogyna ciliata) Sawdust Briquettes*.  
<https://doi.org/10.3390/biomass4030037>