

Analysis of the Feasibility of Generating Solid Biofuel from *Ulex* *Europaeus* Plants

Alejandro Núñez-Moreno; Giacomo Barbieri; Gerardo Gordillo

Citación: A. Núñez-Moreno, G. Barbieri, G. Gordillo,
“Analysis of the Feasibility of Generating Solid Biofuel from
Ulex Europaeus Plants,” *Revista Facultad de Ingeniería*, vol.
29 (54), e10454, 2020.

<https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.10454>

Recibido: Agosto 01, 2019; **Aceptado:** Diciembre 13, 2019;

Publicado: Diciembre 14, 2019

Derechos de reproducción: Este es un artículo en acceso
abierto distribuido bajo la licencia [CC BY](#)



Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener
conflicto de intereses.

Analysis of the Feasibility of Generating Solid Biofuel from *Ulex Europaeus* Plants

Alejandro Núñez-Moreno¹

Giacomo Barbieri²

Gerardo Gordillo³

Abstract

The *Ulex europaeus* (also known as Common Gorse) represents a threat to the native ecosystems of different Colombian regions. Recently, the Ministry of the Environment and Sustainable Development introduced protocols for its prevention and management. Even though the *Ulex europaeus* has a high calorific value, a wide-spread solution for its post-processing is not yet available in its affected areas. In Colombia, the most common method for the disposal of the harvested plant is incineration, given that this is the suggested method by Resolution 684 of 2018. Due to the importance of the problem, this investigation is focused on studying the viability of creating solid biofuel alternatives derived from the plant. Grinded material and briquettes were produced with different log/foilage ratios in order to investigate both the domestic and industrial applications of the plant; e.g. heating, cooking and cogeneration, respectively. A proximate and ultimate analysis was performed on the produced samples. The generated solid biofuel presents 75% of the carbon heat value, a high volatile material content (83.3%), and low ash and Sulphur residues (1.41% and 0.15% respectively). These results applied to both dry and humid samples, demonstrated that the produced solid biofuel is adequate for applications oriented towards heat generation. However, further analysis and process optimization is required in order to establish the generation of solid biofuel as an

¹ Universidad de Los Andes (Bogotá-Distrito Capital, Colombia). a.nunez11@uniandes.edu.co. ORCID: [0000-0003-4787-5085](https://orcid.org/0000-0003-4787-5085).

² Ph. D. Universidad de Los Andes (Bogotá-Distrito Capital, Colombia). g.barbieri@uniandes.edu.co. ORCID: [0000-0002-7051-2875](https://orcid.org/0000-0002-7051-2875).

³ Universidad de Los Andes (Bogotá-Distrito Capital, Colombia). g.gordillo43@uniandes.edu.co.

appropriate use of the *Ulex europaeus* remnants. By further analyzing the overall process; from plant removal, through residue disposal, and finally remnant conversion, the investigations value chain can be better established and possibly established for real world implementation.

Keywords: common gorse; energy; recycling; solid biofuel; *Ulex europaeus*.

Análisis de factibilidad para la generación de biocombustible sólido a partir de la planta *Ulex Europaeus*

Resumen

La planta *Ulex Europaeus* (Retamo espinoso) representa una amenaza para los ecosistemas de diferentes regiones en Colombia, lo cual llevó al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible a definir una política que incentive la resolución a esta problemática además de protocolos para su contención y manejo. Debido a la relevancia que se le ha dado, esta investigación consiste en un primer estudio de viabilidad para la producción de biocombustible sólido a partir de la planta, que, aun teniendo propiedades caloríficas importantes, todavía no se tiene una respuesta definitiva sobre el uso y procesamiento de los residuos de la *Ulex Europaeus*. En este trabajo se hace énfasis, en la fabricación y evaluación de briquetas y mezclas de material molido con diferentes porcentajes tronco/follaje. Esto se hizo con el fin de fabricar biocombustible sólido en diferentes formas tanto para uso doméstico como industrial; p. ej. cogeneración. Las muestras producidas fueron sometidas a análisis próximo y último para la caracterización del producto generado. Los resultados demostraron que el biocombustible producido tiene un poder calorífico comparable con el del carbón (75% del carbón), un alto porcentaje de material volátil (83.3%), y bajo contenido de ceniza y azufre (1.41% y 0.51% respectivamente). Esto aplica tanto para material seco como para el húmedo indicando que el biocombustible producido a partir de la planta parecería prometedor para aplicaciones de generación de calor. Sin embargo, se necesitan ulteriores análisis y optimizaciones del proceso antes de pensar en la generación de biocombustible sólido como una posible solución para el uso de los residuos de *Ulex Europaeus*. Al analizar todo el proceso más a fondo: desde la recolección de la planta *in situ*,

pasando por la disposición del residuo final, y finalmente la conversión del material, se puede mejorar el entendimiento de la cadena de valor del mismo y buscar su implementación en el mundo real.

Palabras clave: biocombustible sólido; energía; reciclaje; retamo espinoso; *Ulex Europaeus*.

Análise de factibilidade para a geração de biocombustível sólido a partir da planta *Ulex Europaeus*

Resumo

A planta *Ulex Europaeus* (Retamo espinhoso) representa uma ameaça para os ecossistemas de diferentes regiões na Colômbia, o qual levou o Ministério de Ambiente e Desenvolvimento Sustentável a definir uma política que incentive a resolução a esta problemática além de protocolos para sua contenção e manejo. Devido à relevância que se lhe tem dado, esta pesquisa consiste em um primeiro estudo de viabilidade para a produção de biocombustível sólido a partir da planta, que, ainda tendo propriedades caloríficas importantes, todavia não se tem uma resposta definitiva sobre o uso e o processamento dos resíduos da *Ulex Europaeus*. Neste trabalho faz-se ênfase, na fabricação e avaliação de briquetes e misturas de material moído com diferentes porcentagens tronco/folhagem. Isto fez-se com o fim de fabricar biocombustível sólido em diferentes formas tanto para uso doméstico como industrial; p. ex. cogeração. As amostras produzidas foram submetidas a análise próxima e última para a caracterização do produto gerado. Os resultados demonstraram que o biocombustível produzido tem um poder calorífico comparável com o do carvão (75% do carvão), uma alta porcentagem de material volátil (83.3%), e baixo conteúdo de cinza e enxofre (1.41% e 0.51% respectivamente). Isto aplica tanto para material seco como para o húmido indicando que o biocombustível produzido a partir da planta pareceria promissor para aplicações de geração de calor. Porém, necessitam-se posteriores análises e otimizações do processo antes de pensar na geração de biocombustível sólido como uma possível solução para o uso dos resíduos de *Ulex Europaeus*. Ao analisar todo o processo mais a fundo: desde a coleta da planta *in situ*, passando pela disposição do resíduo final, e

finalmente pela conversão do material, pode-se melhorar o entendimento da cadeia de valor do mesmo e buscar sua implementação no mundo real.

Palavras chave: biocombustível sólido; energia; reciclagem; retamo espinhoso; *Ulex Europaeus*.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente en Colombia se está evidenciando una problemática creciente causada por la planta invasora *Ulex Europaeus*. Esta planta es considerada entre las 100 especies invasoras más dañinas del planeta [1]. La especie, debido a su resiliencia, capacidad de germinación en lugares complejos, elevada tasa de crecimiento y reproducción por medio de esporas, representa una amenaza para ecosistemas nativos de Colombia como los que se encuentran en las zonas rurales de Cundinamarca y Boyacá [2]. En el año 2018, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible decretó que era responsabilidad de los departamentos involucrados buscar mecanismos eficientes para combatir esta problemática, ya que además de ser nociva para el medio ambiente, está demostrando ser perjudicial para el bienestar general de las poblaciones cuyas tierras de cultivo y fuentes de agua potable están siendo perjudicados por el retamo espinoso [3]. En la resolución del Ministerio se describen metodologías de control, recolección, mitigación y erradicación de la planta en cuestión. Sin embargo, no se plantean alternativas para su disposición una vez que esta se corta, tritura y transporta hasta su destino final. La resolución solo considera incinerar los desechos orgánicos con el fin de evitar dejar remanentes que puedan resultar en brotes nuevos. Asimismo, es posible que no se estén considerando alternativas diferentes a las cuales se les pueda llegar a extraer un valor agregado de mayor valor e impacto social.

Como muchos otros países alrededor del mundo, Colombia se encuentra enfrentando una creciente crisis energética y ambiental. Debido al enfoque que se le ha venido dando a políticas ambientales tales como la preservación de ecosistemas, reducción de impacto ambiental e investigación en fuentes de energías renovables, cada vez se hace más complejo depender únicamente de métodos tradicionales para suplir las necesidades energéticas que tiene el país [4]. Agregándole a todo esto las limitaciones que se le están aplicando a la industria de hidrocarburos, como la prohibición del “fracking”, se prevé que el país va a sufrir una disminución en la inversión para la exploración, teniendo como resultado el incremento en el precio de los combustibles. De esta manera, se espera una disminución en el potencial productivo de petróleo en el país [5]. Debido a esto es

importante revisar qué alternativas se pueden plantear para obtener nuevas opciones de combustibles, utilizando los recursos disponibles con los que se cuenta en Colombia.

Estudios previos realizados sobre el retamo espinoso (Ulex Europaeus) han dado indicios de que este posee propiedades aprovechables en el ámbito energético [6,7]. Luego de realizar pruebas de termo gravimetría, Lizarazo evidenció que, debido a la composición elemental, el material contiene un alto porcentaje de carbón viable para efectos de combustible [6]. Osorio [7] logró brindar información adicional a aquella suplida por Lizarazo. Más allá de corroborar la composición elemental, Osorio brindó una aproximación al poder calorífico propio de la planta, al igual que la composición de aceites esenciales que podrían llegar a explicar la inflamabilidad del retamo y brindar mejor concepto sobre las propiedades únicas que tiene la planta. Estos estudios, además de ser apoyados por aquellos análisis realizados por Milquez-Sanabria [8], generaron un concepto más profundo de lo que puede ser la utilidad del retamo, y dieron evidencia de que esta planta puede llegar a ser una oportunidad, en vez de una amenaza.

A partir del contexto presentado, este artículo investiga la viabilidad de producir biocombustible sólido para el consumo tanto casero como industrial, con el fin de dar soporte a las ventajas que surgirían al volver el retamo espinoso en cultivo energético. El artículo está estructurado de la siguiente manera: en la sección II se ilustran los materiales y métodos, en la sección III se describen los resultados, en la sección IV se discuten los resultados y en la sección V se dan la conclusión y el planteamiento de trabajos futuros.

II. MÉTODOS

El proceso que se llevó a cabo durante la investigación consistió en analizar una alternativa de aprovechamiento integral haciendo uso de la planta Ulex Europaeus; es decir, desde el proceso de recolección hasta la entrega del producto final. Se definió como área geográfica para desarrollar el muestreo para este trabajo las veredas cercanas a Tausa (Cundinamarca) por la disponibilidad de retamo en dicha área. Sin embargo, la misma investigación se podrá hacer a futuro para otras áreas

geográficas y comparar si los resultados son aplicables independientemente del área geográfica de procedencia de la planta.

La Figura 1 muestra la secuencia de etapas planteadas para la obtención de biocombustible sólido. Se puede apreciar que este trabajo investiga la generación de dos productos: planta molida y briquetas. El trabajo se basa en la hipótesis de que la forma del primer producto podría ser útil para consumo industrial, mientras la del segundo para uso doméstico. Las etapas propuestas son:

1) Recolección. Siguiendo los protocolos planteados por la resolución 684 para evitar la propagación [3].

2) Trituración y empaquetamiento. En un posible escenario futuro de aprovechamiento de la planta, el material tendrá que ser transportado desde el campo hacia un centro de procesamiento. Por lo tanto, la etapa de trituración es propuesta porque genera una reducción de volumen, disminuye la posibilidad de propagación de la semilla y disminuye del precio de transporte.

3) Molido. Necesario para homogenizar y así facilitar el mezclado y la extrusión del material.

4) Mezclado. Proceso de reintegración de las diferentes partes que componen el retamo. Esto, con el fin de obtener un primer acercamiento de los porcentajes tronco/follaje que generen el mayor valor agregado.

5) Extrusión. Para la generación de briquetas. Sin embargo, a futuro se pueden evaluar otros procesos mecánicos que requieran una menor inversión energética.

En el proceso se observó que una etapa intermedia de secado entre la trituración y el molido, genera eficiencias en el proceso de molido. Sin embargo, un estudio detallado sobre su efecto es recomendable para trabajos futuros.

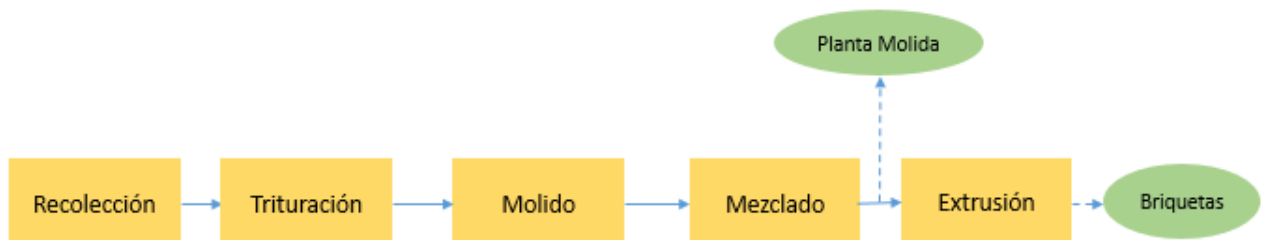


Fig. 1. Etapas propuestas para el aprovechamiento de la planta *Ulex Europaeus* como biocombustible sólido.

A. Metodología experimental

En esta sección se ilustran los pasos que se implementaron para la investigación de la viabilidad de obtención de biocombustible sólido a partir de la planta Ulex Europaeus. El objetivo principal del proyecto es definir un porcentaje tronco/follaje que permita encontrar un equilibrio satisfactorio entre el poder calorífico del producto y el mejor aprovechamiento posible de la planta.

Para esto, se comenzó con la caracterización del porcentaje tronco/follaje del retamo espinoso de Tausa. En seguida, se generaron muestras de material molido con diferentes porcentajes tronco/follaje. Finalmente, una parte de estas muestras se extrudieron para la generación de briquetas. El siguiente es el detalle de la metodología experimental paso a paso:

1) Recolección de muestras de Ulex Europaeus. Se recolectaron 10 muestras de retamo maduro siguiendo el protocolo planteado en la resolución 684 [3].

2) Separación tronco de follaje. Se separó el follaje (espinas, hojas, semilla y fruto) del tronco del retamo para luego pesarlo y caracterizar la distribución de peso del retamo espinoso de la vereda el Salitre de Tausa-Cundinamarca.

3) Trituración (Chipeadora). Se trituró el tronco y el follaje por separado y se midió de manera aproximada el volumen de reducción alcanzado.

4) Caracterización del porcentaje tronco/follaje. Se pesaron las muestras recolectadas por separado para determinar el porcentaje del peso total que ocupa el tronco y el follaje.

5) Molido (Molino de cuchillas). Se molió el tronco y el follaje por separado para homogenizar y así facilitar el mezclado y la extrusión del material.

6) Mezclado. Usando una batidora, se mezclaron las cantidades requeridas hasta obtener una mezcla homogénea adecuada para la producción del biocombustible sólido. Se generaron muestras con diferentes porcentajes tronco/follaje.

7) Extrusión (Extrusora mono-tornillo). Se insertaron algunas de las mezclas realizadas en una extrusora para la generación de briquetas.

8) Realización de análisis próximo y último. Se seleccionaron muestras características y se enviaron para ser analizadas en laboratorio con el fin de

determinar: composición elemental, poder calorífico, material volátil, ceniza, azufre, carbón fijo y humedad. Esto se hizo con el fin de entender el comportamiento del material resultante y poder concluir si el material es adecuado como biocombustible sólido.

B. Análisis de las muestras

Para calcular el *porcentaje tronco/follaje* se trató la población como una variable aleatoria y se usó la teoría del error aleatorio [9]:

$$x = x_{PROM} \pm \frac{3*\sigma}{\sqrt{N}} \text{ (99.7\%)} \quad (1)$$

donde N es el número de muestras analizadas, y x_{PROM} y σ el promedio y la desviación estándar.

Mientras, los resultados obtenidos en los *análisis próximos y últimos* cuentan con certificación de la ASTM y se implementaron con los siguientes métodos:

Próximo:

- Humedad Total: ASTM D3302/D3302M-15
- Cenizas: ASTM D3174-12
- Material Volátil: ASTM D3175-17
- Carbono Fijo: ASTM D3172-13
- Contenido de Azufre: ASTM D4239-17 Método A
- Poder Calorífico Bruto: ASTM D5865-13

Último:

- Humedad: ASTM D3173-11
- Cenizas % masa: ASTM D3174-12
- Azufre Total % masa: ASTM D4239-14e2 Método A
- Carbono Total % masa: ASTM D5373-14
- Hidrogeno Total % masa: ASTM D5373-14
- Nitrógeno % masa: ASTM D5373-14
- Oxígeno % masa: ASTM D3176-09 (by diff)

C. Implementación de la metodología experimental

Como indicado en la resolución 684 [3], el retamo requiere de un manejo cuidadoso ya que su fruto, al propagarse por medio de esporas (eyección de la planta), tiende a expulsar semillas una vez su flor alcanza la madurez. Esto implica que la planta debe ser empacada *in situ* ya que cualquier transporte que se realice a la intemperie solo fomentará la propagación de la semilla de esta planta.

Teniendo esto en cuenta, la máquina de triturado usada (Figura 2), contó con resguardos superiores en las toberas y con salida directa al empaque, para evitar propagación no deseada en el momento de triturar la planta.



Fig. 2. Trituradora comercial “Trapp 300” usada para triturar y empacar las muestras *in situ*.

Una vez que se tenían las muestras, se molió el material para luego mezclar las proporciones requeridas. Como se puede ver en la Tabla 1, las muestras consistían en diferentes porcentajes tronco/follaje y tanto en simple producto molido como en briquetas generadas después de un proceso de extrusión. Esto con el fin de investigar las alternativas doméstica e industrial. Finalmente, se evaluaron diferentes composiciones para identificar la que permitiera encontrar un balance satisfactorio entre el poder calorífico del producto y el mayor aprovechamiento posible de la planta.

Tabla 1. Muestras preparadas y analizadas.

Muestra	Contenido	Tipo
1	100% Tronco	Barra
2	60% Tronco – 40% Follaje	Barra
3	60% Tronco – 40% Follaje	Molido
4	50% Tronco – 50% Follaje	Barra

5	50% Tronco – 50% Follaje	Molido
6	50% Tronco – 50% Follaje + 15% Aceite de Oliva	Barra

Una vez mezcladas, se sometió al proceso de extrusión una muestra de cada porcentaje. El proceso de extrusión se seleccionó debido a que se deseaba alcanzar la presión y temperatura requerida para inducir la sinterización del producto resultante para poder así producir la briqueta [10]. Como el material era desconocido, la extrusora permitía la variación de los parámetros con el fin de determinar las condiciones óptimas para la manipulación del mismo.

Para realizar el proceso de extrusión se usó la maquina Brabender Plasti-Corder PLE 331 (Figura 3) y se le variaron las condiciones de temperatura y de presión para poder alcanzar un nivel de compactación que permitiera mantener su forma luego del procesamiento. Se encontró que, con una temperatura de 80°C y una presión de 900 psi, se obtienen briquetas compactas a partir de muestras que no fueron sometidas a proceso de secado. Algunas de las muestras obtenidas están presentadas en la Figura 4. Finalmente, se enviaron las muestras al laboratorio CQR Cotecna para el análisis próximo y último.



Fig. 3. Extrusora Brabender PLE 331.



Fig. 4. Ejemplos de muestras extruidas enviadas a laboratorio.

III. RESULTADOS

A. Reducción de volumen

Se estimó que el retamo espinoso recolectado ocupaba un volumen aproximado de 0.19m³ (187661cm³). Este valor fue cuantificado a partir de la carretilla usada para su transporte. Una vez que se finalizó el proceso de triturado, el volumen ocupado por todas las muestras recolectadas fue de 0.055m³ (55000cm³). Este valor fue cuantificado a partir de la bolsa en la cual fue empaquetado para su transporte y manejo. Se puede ahora calcular la reducción de volumen de la siguiente manera:

$$\text{Reducción de Volumen} = \left(1 - \frac{\text{Volumen Final}}{\text{Volumen Inicial}}\right) \times 100 = \left(1 - \frac{55000 \text{ cm}^3}{187661 \text{ cm}^3}\right) \times 100 = 71\%$$

A partir de los datos obtenidos, se evidencia que una vez triturado, el retamo pierde aproximadamente el 70% de su volumen, permitiendo así un transporte más eficiente y fácil. Esto es relevante para el estudio planteado ya que no sólo indica la facilidad de procesamiento que tiene el material sino también la oportunidad de reducción de costos de transporte.

B. Porcentaje tronco/follaje

Se analizaron 10 muestras para caracterizar las plantas de la vereda el Salitre de Tausa con respecto al porcentaje tronco/follaje. Los resultados están reportados en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultado de pesaje de muestras recolectadas.

Muestra	Tronco (kg)	Follaje (kg)	Peso Muestra	% Tronco
1	1.7	1.7	3.4	50
2	1.9	1.6	3.5	54
3	2.2	1.9	4.1	54
4	1.5	2.1	3.6	42
5	1.7	1.4	3.1	55
6	1.6	1.5	3.1	52
7	2.1	2	4.1	51
8	1.6	1.6	3.2	50
9	1.7	1.8	3.5	49

10	1.8	1.8	3.6	50
Promedio	1.78	1.74	3.52	50.6
Peso Total	17.8	17.4	35.2	

Aplicando la Ecuación 1 (error aleatorio) y hallando la desviación estándar del peso, se obtiene lo siguiente:

$$\frac{3 * \sigma}{\sqrt{N}} (99.7\%) = \text{error aleatorio tronco} = \frac{3 * 0.23}{\sqrt{10}} = 0.218$$

$$\frac{3 * \sigma}{\sqrt{N}} (99.7\%) = \text{error aleatorio follaje} = \frac{3 * 0.22}{\sqrt{10}} = 0.209$$

Se puede ahora calcular el rango de pesos:

Tronco:

$$m_{Tronco} = (1.78 \pm 0.218)kg \rightarrow (1.562 - 1.998)kg$$

Follaje:

$$m_{Follaje} = (1.74 \pm 0.209)kg \rightarrow (1.513 - 1.949)kg$$

Por medio de este resultado se logra evidenciar que la distribución de pesos se puede asumir como aproximadamente equitativa (50:50). Por ende, las muestras 4 y 5 que se presentan en la Tabla 1 fueron seleccionadas para poder aprovechar la planta en su totalidad.

C. Análisis próximo

Para evaluar las muestras producidas, se realizaron análisis próximos sobre todas las muestras. Las Tablas 3 y 4 reportan los resultados del análisis próximo para las seis muestras preparadas respectivamente con humedad y secadas. En la Tabla 4 se adicionan los valores de carbón [11] y de madera [12] como comparación. Los números de muestras corresponden a aquellos descritos en la Tabla 1.

Tabla 3. Resultados análisis próximo *Como se Recibió (As Received – con humedad).*

Muestra	% Humedad	% Ceniza	% Material Volátil	% Carbono Fijo	% Azufre	Poder Calorífico (kJ/kg)
1	15.41	0.71	70.53	13.35	0.11	1614
2	12.51	1.23	72.04	14.22	0.14	1878
3	24.08	1.09	62.58	12.25	0.07	1490
4	17.1	5.58	62.87	14.45	0.24	1594
5	40.8	4.89	45.76	8.60	0.22	1229
6	11.91	1.73	71.85	14.51	0.22	1938

Tabla 4. Resultados análisis próximo *Básico Seco* (*Dry Basic* – sin humedad)

Muestra	% Ceniza	% Material Volátil	% Carbono Fijo	% Azufre	Poder Calorífico (kJ/kg)
1	0.84	83.38	15.78	0.13	1908
2	1.41	82.34	16.25	0.16	2146
3	1.44	82.43	16.13	0.09	1962
4	6.73	75.83	17.44	0.29	1923
5	8.25	77.24	4.51	0.38	2073
6	1.96	81.57	16.47	0.24	2251
Carbón	18.27	43.44	30.69	0.82	3023
Madera	3.38	80.87	12.68	0.42	1744

D. Análisis Último muestra 50:50

Los análisis de próximo básico seco muestran valores de poder calorífico parecidos para las diferentes muestras. Por lo tanto, se decidió evaluar de forma detallada, a través de un análisis de último, solamente la muestra 4 ya que permite aprovechar la planta en su totalidad. Los resultados obtenidos del análisis están reportados en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados análisis último de la muestra 4 (Barra 50% Tronco – 50% Follaje).

Muestra	% Humedad	% Ceniza	% S	% C	% H	% N	% O
Tipo	AR	AR	AR	AR	AR	AR	AR
4	10.4	6.0	0.3	45.6	5.9	1.0	30.7

E. Composición DAF muestra 50:50

A partir de los resultados del análisis último, se calculó la composición seca y sin ceniza (Dry Ash Free en inglés, DAF) para poder llegar a la formulación química del biocombustible sólido generado. Para el cálculo de la composición DAF se usó la aproximación mostrada en seguida, para el carbono:

$$C_{DAF} = \frac{C_{AR}}{1 - Humedad - Ceniza} = \frac{45.6}{1 - 0.104 - 0.06} = 54.55\%$$

Aplicando el mismo procedimiento para los diferentes elementos se obtienen los porcentajes reportados en la Tabla 6.

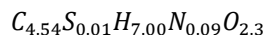
Tabla 6. Composición DAF de la muestra 4 (Barra 50% Tronco – 50% Follaje)

Muestra	% S	% C	% H	% N	% O
Tipo	DAF	DAF	DAF	DAF	DAF
4	0.36	54.55	7.06	1.20	36.72

A partir de este porcentaje y de la masa atómica, se puede calcular el número de moles presentes en el biocombustible sólido. Nuevamente se reporta la aproximación utilizada con el ejemplo del carbono:

$$N_C = \frac{C_{DAF}}{C_{Pa}} = \frac{54.55}{12.0107} = 4.54$$

Aplicando el mismo procedimiento para los diferentes elementos, se obtiene la siguiente composición química:



IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El estudio realizado surgió a partir de la premisa: “el retamo espinoso cuenta con propiedades adecuadas para ser usado como combustible sólido, con fines de generación de calor en ámbitos caseros e industriales, de bajo costo”. En esta sección se discuten los resultados para evaluar la premisa ya mencionada.

En la Tabla 3 se muestran los resultados de las muestras *Como se Reciben* (AR, por sus siglas en inglés). Sin embargo, como el propósito de este estudio es evaluar las propiedades del material, se tendrá en cuenta la Tabla 4: *Secado Básico* (DB, por sus siglas en inglés).

Al analizar los datos obtenidos, se puede ver que, en cuanto a ceniza (material remanente después del proceso de quemado), la mejor alternativa es el producto de tronco únicamente. Al agregarle más componentes al producto, este tiende a dejar más remanente detrás del mismo.

El material volátil, al indicar la facilidad de combustión que presenta el producto, se demuestra que con follaje o sin follaje, el material permite la ignición.

En la Figura 5 se presenta un ejemplo de quema del material, el cual prendió con facilidad y logró sostener una llama luego de ser expuesto brevemente a una fuente de calor.

El contenido de azufre es muy bajo en todas las muestras, el máximo siendo de 0.38% para la muestra 50:50 molida.

Adicionalmente, el contenido de carbón fijo indica la cantidad de material con el que realmente cuenta la planta, que puede llegar a ser aprovechado durante la combustión. Es decir, este es el porcentaje de material que va a mantener y generar

calor. Como se puede ver en la Tabla 4, el material 50:50 en briqueta contiene el mayor contenido de carbón fijo entre las muestras analizadas y supera el valor de la madera común por un margen significativo.

Finalmente, el poder calorífico demostró que el material si cuenta con propiedades importantes. Más allá de la baja emisión de productos nocivos para el ser humano, y de los pocos remanentes sólidos que quedan después de ser quemado, el material realmente muestra características energéticas competitivas. El carbón de cocina, considerado como una de las mejores alternativas de biocombustible sólido actualmente, deja una cantidad de remanente considerable y cuenta con poco material volátil para su ignición, lo cual implica tiempo y costos para su limpieza e implementación. Al comparar los resultados obtenidos, el material, en su mejor resultado (60:40 en barra) alcanzó un valor cercano al 70% del poder calorífico del carbón. Al ser comparado con el potencial energético de otros materiales [7] usados como combustibles sólidos, la planta Ulex Europaeus demuestra un potencial significativo para su uso como biocombustible (Tabla 7).

Tabla 7. Resultados analisis último (Barra 50% Tronco – 50% Follaje).

Material	Poder Calorífico (MJ/kg)
Cáscara de Almendras	36.80
Cáscara de Nueces	32.00
Carbón	30.23
Ulex Europaeus (60:40 DB)	21.46
Briquetas Comerciales [9]	20.93
Corteza de Pino	20.40
Ulex Europaeus (50:50 DB)	19.23
Pellets de Maíz [12][13]	18.60
Cáscara de Trigo	15.80
Cáscara de Arroz	15.30

Muchos de los materiales descritos en la Tabla 7 están entre los biocombustibles sólidos más usados hoy en día. Sin embargo, los costos asociados a su transformación, recolección y adquisición hacen que estos no sean viables para su uso masivo y llevan a que no se les de mucha importancia.

Por todo lo anterior, la muestra que amerita un estudio a fondo más detallado, y que representa el mejor aprovechamiento de la problemática serían las muestras 4 y 5.

Estas aprovechan el material completamente y sin la necesidad de agregar productos aditivos como aceite. Además, estas muestras cuentan con las características adecuadas para la generación de biocombustible sólido tanto para aplicaciones caseras (luego de ser sinterizados), como para uso industrial tras su trituración y molido.



Fig. 5. Briquetas producidos al ser quemadas con un vela comercial.

El proceso que se llevó a cabo, aunque requiere de optimización para poder generar productos con características aún más competitivas, dio una visión general de la potencialidad que tiene el retamo espinoso como combustible sólido.

A continuación, se describen las conclusiones que se pueden definir a partir del estudio desarrollado:

1. La trituración es un paso imperativo ya que no solo facilita el proceso de molido para el procesamiento del material, sino que además reduce alrededor del 70% el volumen que ocupa la planta y facilita su manejo después de la recolección.
2. Aunque la composición y propiedades no varían a gran medida entre las muestras secas y las húmedas, es recomendable someter las muestras a secado (exposición a la intemperie prolongada o secado forzado en horno) en caso tal que se desee obtener los mejores resultados de los componentes útiles para la generación de calor: Tabla 3 vs. Tabla 4.
3. Mediante los procedimientos implementados y usando todas las partes de la planta sin aditivos, se lograron obtener características comparables con

valores de biocombustibles sólidos comerciales encontrados hoy en día a nivel mundial.

4. Los parámetros de presión y temperatura usados para la generación de briquetas (900 psi y 80°C respectivamente) indican que el proceso no requiere necesariamente de una extrusora para su manipulación. Con esto, en investigaciones futuras sería de interés revisar diferentes alternativas para la manufactura de briquetas. Es recomendable basar los primeros ensayos en las investigaciones/ pruebas realizadas por *Valderrama et al [14]*, en cuanto se refiere a métodos económicos para la fabricación de briquetas.
5. El estudio de factibilidad dio como resultado un acercamiento inicial, a lo que podría llegar a ser un proceso que no solo serviría para contener y evitar la propagación descontrolada del retamo espinoso, sino también crear la oportunidad de convertir una problemática ambiental, en una fuente de energía 100% eco amigable.
6. No solo se puede aprovechar el material en forma de briquetas, sino que también se puede aprovechar el material molido [15]. Ambas formas presentan buenas propiedades de generación de calor, la única diferencia siendo el bajo costo energético que requeriría usar el material molido vs el procesado.
7. Teniendo en cuenta lo descrito previamente, se recomienda aprovechar la planta en su totalidad, relación 50:50 tronco/follaje, ya que así se le logra obtener el mayor provecho de los residuos que actualmente se están desechando. Más aun, con procesos optimizados, estos mismos pueden llegar a ser una fuente energética única en el mercado, ya que da uso a una planta invasora, mitiga la tala de árboles para uso doméstico y genera energías limpias.

Por el contexto que plantean las fuentes consultadas a lo largo de la investigación, y con los hallazgos que resultaron del estudio realizado, la planta *Ulex Europaeus* tendría el potencial para ser considerada como una posible fuente de energía alternativa. Por sus características de crecimiento y resiliencia, de la mano con los potenciales valores energéticos discutidos a lo largo de este artículo, el retamo podría volverse un cultivo energético enfocado en generación de calor casero o

inclusive industrial. Sin embargo, es necesario desarrollar estudios posteriores antes de poder afirmar que es posible convertir una problemática ambiental, en una oportunidad energética de gran valor agregado. Algunos posibles estudios son: (i) calcular la eficiencia del proceso: consumo energético para la producción de biocombustible sólido contra la energía de combustión producida; (ii) evaluar formas más eficientes de producción de briquetas; (iii) estudiar un proceso completo que incluya los costos logísticos y las dinámicas de la región para evaluar la factibilidad financiera de la solución propuesta; (iv) tener en cuenta el impacto ambiental que pudiese llegar a tener el producto y establecer un procedimiento que sea eficiente y cuente con una huella de carbono optimizada.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Alejandro Núñez: Planteamiento de la problemática, investigación del contexto, adquisición de muestras, procesamiento de muestras, seguimiento a pruebas de laboratorio, análisis y discusión de los resultados obtenidos. Giacomo Barbieri: Delimitación de la problemática, asesoría durante todo el transcurso de la investigación; técnicas de procesamiento de resultados, revisión de documento final. Gerardo Gordillo: Asesoría en: planteamiento de la metodología, análisis y discusión de los resultados.

REFERENCIAS

- [1] P. Bingelli, *Woody Plant Ecology*, 1997. <https://members.lycos.co.uk/WoodyPlantEcology/docs/docs/webasp18>
- [2] S. Lowe, M. Browne, S. Boudjelas, and M. De Poorter, *100 de las especies exóticas invasoras más dañinas del mundo. Una selección del Global Invasive Species Database*, 2004. <https://www.iucngisd.org/gisd/pdf/100Spanish.pdf>
- [3] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *Resolución 0684*, 2018. <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/5b-res%20684%20de%202018.pdf>
- [4] S. Clavijo, "Desafíos del mercado energético de Colombia," *La República*, 2018. <https://www.larepublica.co/analisis/sergio-clavijo-500041/desafios-del-mercado-energetico-de-colombia-2776774>
- [5] Redacción, "Sin fracking, el país tendría un dólar a 5.000 pesos: Ministra de Minas," *El Heraldo*, 2019. <https://www.elheraldo.co/colombia/sin-fracking-el-pais-tendria-un-dolar-5000-pesos-ministra-de-minas-664461>

- [6] M. J. Lizarazo, *Caracterización de Retamo Espinoso por Medio de Termo Gravimetría para uso Como Biocombustible*, Graduate Thesis, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia, 2017.
- [7] D. F. Osorio, *Análisis Estadístico de las Partes Funcionales de Ulex Europaeus Respecto a la Altitud y Caracterización del Retamo Espinoso (Ulex Europaeus) y Retamo Liso (Genista Monosperulana)*, Graduate Thesis, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia, 2018.
- [8] H. A. Milquez-Sanabria, "Production and Characterization of Activated Carbon of Gorse (Ulex Europaeus)," *Publicaciones e Investigación*, vol. 11 (2), pp. 89-97, 2017. <https://doi.org/10.22490/25394088.2790>
- [9] J. Taylor, *Introduction to error analysis, the study of uncertainties in physical measurements*, 1997.
- [10] J. I. G. Romero, *Briquetas y Carbon - Las Briquetas más que un sustituto de la leña*, 2016. <https://briquetasycarbon.com>
- [11] T. Onuegbu, I. Ogbu, N. Ilochi, U. Ekpunobi, and A. Ogbuagu, "Enhancing the Properties of Coal Briquette Using Spear Grass (Imperata Cylindrica)," *Leonardo Journal of Sciences*, vol. 17, pp. 47-58, 2010.
- [12] Ministry of Agriculture, *Proximate Analysis of Biofuels - Biomass Burn Characteristics*, Ontario, 2019.
- [13] N. Kaliyan, and R. Vance, "Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass," *Biorsource Technology*, vol. 101 (3), pp. 1082-1090, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.064>
- [14] A. Valderrama, H. Curo, C. Quispe, V. Llantoy, and J. Gallo, "Briquetas de residuos sólidos orgánicos como fuente de energía calorífica en cocinas no convencionales," in *XVII CONIMERA*, Lima, 2007.
- [15] M. C. G. Garcia, *Blusterpellet-Living Territoriweb*, 2019. <https://www.blusterpellet.com>