



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
INGENIERIA FORESTAL

**COMPOSICIÓN QUÍMICA Y PARÁMETROS ENERGÉTICOS DE PELLETS
TORREFACTADOS OBTENIDOS DE BIOMASA DEL TIPO FORESTAL
SIEMPREVERDE**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de
Concepción para otorgar al título profesional de Ingeniero Forestal

POR: Felipe Fuentes Gallegos

**Profesor Guía: Fernando Muñoz Sáez
Profesor Co-guía: Regis Teixeira Mendonça**

**CONCEPCIÓN, CHILE
Diciembre, 2024**

© 2024, Felipe Fuentes Gallegos

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

**COMPOSICIÓN QUÍMICA Y PARÁMETROS ENERGÉTICOS DE PELLETS
TORREFACTADOS OBTENIDOS DE BIOMASA DEL TIPO FORESTAL
SIEMPREVERDE**

Profesor Guía



Fernando Muñoz Sáez

Profesor Titular Ingeniero

Forestal, Dr.

Profesor Co-guía



Regis Teixeira Mendonça

Profesor Titular Ingeniero

Químico, Dr.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, Isaías Fuentes y Elizabeth Gallegos, quienes han sido mi mayor fuente de inspiración, apoyo y fortaleza en cada paso de este camino. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo, la perseverancia y el amor incondicional.

A mis hermanos Nicole, Ignacio, Jesús, Adriana, Catalina, Paula y Pablo, quienes con su cariño y compañía han hecho que este viaje sea más llevadero y significativo. Cada uno de ustedes ha sido una motivación constante para no rendirme y seguir adelante.

A todos ustedes, que han sido parte esencial de mi vida, les dedico este logro.

AGRADECIMIENTOS

Este momento, en el que ser un Ingeniero Forestal está tan cerca de dejar de ser un sueño para convertirse en realidad, es la ocasión perfecta para expresar mi más profundo agradecimiento y gratitud a todas aquellas personas que han contribuido a hacer esto posible.

En primer lugar, a mis tutores por darme la oportunidad de participar en este proyecto. De manera especial, al Dr. Fernando Muñoz Sáez, quien siempre estuvo dispuesto a orientarme y ofrecerme sus valiosos consejos, ayudándome a superar los desafíos y a mantener la calma en los momentos difíciles.

A mis compañeros de universidad, en especial a mi gran amigo Bastián Sancho, quien fue no solo un gran compañero de casa, sino también un valioso compañero de estudio.

A todos los profesores que, a lo largo de estos años, me han transmitido sus conocimientos y experiencias, contribuyendo a mi formación profesional y personal.

A mi familia, por confiar siempre en mí.

GRACIAS

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
1 INTRODUCCIÓN	1
2 METODOLOGÍA.....	2
2.1 Origen del material torrefactado	2
2.2 Proceso de torrefacción	3
2.3 Análisis pellets torrefactados	5
2.4 Evaluación de los resultados	8
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	12
3.1 Torrefacción de Pellets del Tipo Forestal Siempreverde	12
3.2 Composición de Pellets Torrefactados	13
3.3 Composición Elemental y Contenido de Cloro en los Pellets Torrefactados	15
3.4 Características Físicas de Pellets Torrefactados	17
3.5 Poder Calorífico Superior (PCS) de Pellets Torrefactados	19
3.6 Comparación del Poder Calorífico Superior de <i>Pinus radiata</i> y Especies del Tipo Forestal Siempreverde Torrefactados.....	21
3.7 Índice de Desempeño Energético (Fuel Value Index - FVI).....	24
3.8 Rendimiento de Masa en Pellets Torrefactados del Tipo Forestal Siempreverde.....	26
3.9 Rendimiento de Energía en Pellets Torrefactados del Tipo Forestal Siempreverde.....	28
4 CONCLUSIONES.....	30
5 BIBLIOGRAFÍA	32
6 ANEXO	34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición Química de Pellets Torrefactados	13
Tabla 2. Composición Elemental de Pellets Torrefactados	15
Tabla 3. Composición Física de Pellets Torrefactados	18
Tabla 4. Poder Calorífico Superior (<i>PCS</i>) de Pellets Torrefactados	20

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Perfil temperatura - tiempo para el proceso de torrefacción (Guillén y Dávila 2014)	4
Figura 2. Pellets <i>in-natura</i> : 1-Tepa; 2-Ulmo; 3-Olivillo; 4-Canelo; 5-Coigüe; 6-Lingue; 7-Luma; 8-Laurel y 9-Radal	3
Figura 3. Reactor utilizado para torrefacción	4
Figura 4. Comparación del Poder calorífico Superior de pellets de pino v/s pellets del tipo forestal Siempreverde torrefactados	22
Figura 5. Gráfico de barras del Fuel Value Index (<i>FVI1</i> y <i>FVI2</i>) para nueve especies forestales Siempreverde: Canelo, Coigüe, Laurel, Lingue, Luma, Olivillo, Radal, Tepa y Ulmo	25
Figura 6. Rendimiento de Masa en Pellets Torrefactados para diferentes especies de biomasa evaluadas.....	27
Figura 7. Rendimiento de energía para pellets torrefactados de diferentes especies de estudio.	29

RESUMEN

La transición hacia fuentes de energía sostenible promovió el estudio de la biomasa forestal como alternativa renovable a los combustibles fósiles. Este estudio evaluó el efecto de la torrefacción sobre las propiedades físicas, químicas y energéticas de pellets elaborados con biomasa de nueve especies forestales nativas Siempreverde de Chile. Se determinó que la torrefacción aumentó significativamente el poder calorífico de los pellets, mejorando hasta un 20% su eficiencia energética. Asimismo, se observó una reducción de hasta un 50% en el contenido de cloro, lo que disminuyó los riesgos de dioxinas y mejoró su calidad como biocombustibles. Los pellets tratados exhibieron mayor estabilidad térmica y resistencia a la humedad, lo que facilitó su almacenamiento y transporte. Sin embargo, en ciertas especies se detectó una reducción en la densidad energética, evidenciando variaciones en el efecto de la torrefacción según las propiedades de cada biomasa. Estos resultados respaldaron la hipótesis de que la torrefacción mejora las características de los pellets, haciéndolos más competitivos como biocombustibles sólidos en el contexto de una matriz energética diversificada y sostenible. Finalmente, el uso de biomasa torrefactada representa una solución prometedora para fomentar la transición energética en Chile, contribuyendo a mitigar el cambio climático y avanzar hacia los objetivos de desarrollo sostenible del país.

ABSTRACT

The transition to sustainable energy sources has driven the study of forest biomass as a renewable alternative to fossil fuels. This study evaluated the effect of torrefaction on the physical, chemical, and energetic properties of pellets made from nine evergreen forest species in Chile. Torrefaction significantly increased the calorific value of the pellets, improving their energy efficiency by up to 20%. Additionally, a reduction of up to 50% in chlorine content was observed, lowering corrosion risks and enhancing their quality as biofuels. Treated pellets exhibited greater thermal stability and resistance to moisture, facilitating their storage and transportation. However, certain species showed a reduction in energy density, evidencing variations in the effect of torrefaction depending on the properties of each biomass. These results support the hypothesis that torrefaction improved pellet characteristics, making them more competitive as solid biofuels within the context of a diversified and sustainable energy matrix. Finally, the use of torrefied biomass represents a promising solution to promote Chile's energy transition, contributing to mitigating climate change and advancing the country's sustainable development goals.

1 INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de fuentes de energía sostenibles y renovables ha impulsado la investigación en el campo de la dendroenergía como una alternativa viable a los combustibles fósiles. Chile presenta una fuerte dependencia de los combustibles fósiles en su oferta de energía primaria, con casi dos tercios provenientes de hidrocarburos. Además, se destaca la presencia significativa de la leña como fuente renovable, pero en ausencia de otras tecnologías renovables (Altomonte y Coviello, 2003).

Es fundamental considerar que los recursos de combustibles fósiles son finitos, lo que implica que el agotamiento de estas fuentes de energía será inevitable si seguimos consumiéndolas al ritmo actual (García Martínez, 2016). Además, es importante destacar que los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo o el gas natural, son los principales contribuyentes al efecto invernadero y al cambio climático (Andrade-Castañeda *et al.*, 2017). En vista de estas circunstancias, surge una necesidad apremiante de buscar alternativas sólidas a los combustibles fósiles para satisfacer las demandas energéticas de nuestra sociedad.

En este contexto, las energías renovables se posicionan como la respuesta para impulsar una transición energética sostenible y mitigar los impactos ambientales asociados con los combustibles fósiles.

Las energías renovables se definen como aquellas que aprovechan fuentes naturales de energía que no son de origen fósil ni nuclear (Spiegeler y Cifuentes, 2016). Los bosques tienen el potencial de ser una valiosa fuente de energía renovable que respalda la diversificación de la matriz energética, la generación de energía limpia, los procesos de mitigación del cambio climático, la reducción de la pobreza energética y aportar materia prima para apoyar los emprendimientos en el área de la dendroenergía.

La biomasa, proveniente de los bosques, es ampliamente reconocida como una forma de energía renovable que contribuye a la reducción de las emisiones de CO₂ y al proceso de mitigación climática. Al utilizarla de manera adecuada, se garantiza un rendimiento eficiente en las instalaciones. Además, la biomasa se destaca por ser una fuente de energía renovable estable y única en su capacidad de ser gestionada y planificada según las necesidades y demandas energéticas (Pinilla *et al.*, 2022).

La producción de dendroenergía se basa principalmente en biomasa de ***Pinus radiata*** y en menor proporción especies como ***Eucalyptus spp***, siendo un

producto importante la producción de pellets. Las propiedades de los pellets pueden experimentar variaciones significativas, y factores como las características inherentes de la biomasa, los niveles de humedad, la temperatura y la presión juegan un papel determinante en la obtención de pellets de alta calidad.

Una forma para mejorar las características de los pellets y mitigar los problemas de contaminación es mediante el proceso térmico denominado torrefacción, el cual es un proceso de pirólisis parcial de la biomasa en un ambiente con ausencia de oxígeno, elevando su temperatura de forma controlada ($<50^{\circ}\text{C}/\text{min}$) hasta alcanzar los rangos de $200\text{-}300^{\circ}\text{C}$. Este procedimiento se lleva a cabo en distintas etapas y regímenes térmicos, controlando eficientemente el flujo de energía (Arteaga-Pérez *et al.*, 2016). De esta forma obtener un aumento de la densidad energética, dado a la degradación de los compuestos menos energéticos y más hidrófilos que posee la biomasa.

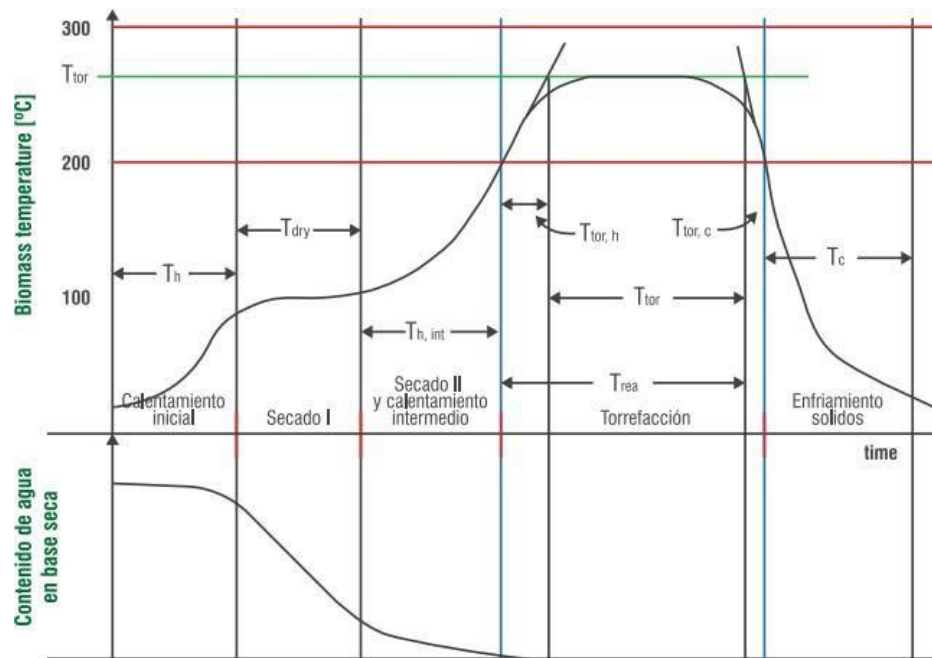


Figura 1. Perfil temperatura - tiempo para el proceso de torrefacción (Guillén y Dávila, 2014).

En el proceso de torrefacción, la biomasa ingresa a temperatura ambiente al reactor y pasa por diferentes etapas, incluyendo el calentamiento inicial, secado I, secado II, calentamiento intermedio, torrefacción y enfriamiento de sólidos. En la representación gráfica, se observa una línea verde horizontal que representa la temperatura límite de torrefacción. Además, se marcan líneas verticales que indican la división entre cada etapa del proceso. Las líneas azules verticales resaltan la incidencia específica en la etapa de torrefacción. El gráfico refleja claramente la disminución del contenido de agua a lo largo del proceso.

Según (Chen *et al.*, 2015) la torrefacción presenta como una de sus ventajas destacadas la capacidad de reducir el contenido de humedad y mejorar la resistencia a la absorción de humedad en los pellets. Esta característica resulta especialmente beneficiosa, ya que permite obtener pellets con baja higroscopicidad y una mayor resistencia al agua. Como consecuencia, se logra una prolongación de la vida útil de los pellets, lo cual se traduce en ventajas económicas al reducir los costos asociados con su manipulación, transporte y almacenamiento.

Además, es importante considerar otro parámetro de gran relevancia, como es el cloro y sus derivados, entre ellos las “dioxinas”, compuestos químicos orgánicos que se generan durante la combustión del cloro (Pegoretti Leite de Souza, 2020). La presencia de cloro en los pellets es motivo de preocupación debido a su consideración como componente perjudicial para el medio ambiente.

Un estudio llevado a cabo por Pegoretti (2020), demostró que, en el caso de *E. nitens*, el proceso de torrefacción resultó en una notable reducción de cloro en los pellets torrefactados. Específicamente, se observó que, con un tratamiento de torrefacción a una temperatura de 290° C durante 30 minutos, se logró una reducción de hasta un 50% del contenido de cloro en los pellets, alcanzando un valor de 0.02%. Estos resultados demostraron que los pellets torrefactados cumplían con la norma de calidad establecida en cuanto a su contenido de cloro.

De acuerdo con lo anterior, el proceso de torrefacción tiene la capacidad de mejorar las propiedades físicas y químicas de los pellets obtenidos de diversas especies comerciales maderables. Esto, a su vez, aumentaría la capacidad energética de los pellets torrefactados, lo que los convertiría en una alternativa sostenible y eficiente para la producción de biocombustibles y generación de energía renovables en comparación con los combustibles fósiles. En Chile no hay información publicada de pellets torrefactados producidos con biomasa nativa. De allí que el objetivo general del presente trabajo es evaluar los efectos de torrefacción en las propiedades físicas, químicas y energéticas de los pellets obtenidos de biomasa del tipo forestal Siempreverde, con el fin de evaluar su viabilidad como una alternativa sostenible y eficiente para la producción de biocombustible. Esto considera como objetivo específico caracterizar las propiedades físicas y químicas de los pellets obtenidos de diferentes especies comerciales maderables del tipo forestal Siempreverde, incluyendo aspectos como densidad aparente, contenido de humedad, composición elemental y poder calorífico, tanto antes como después del proceso de torrefacción. Otro objetivo específico es evaluar el impacto del proceso de torrefacción en la capacidad energética de los pellets, analizando el poder calorífico superior, la estabilidad térmica y la eficiencia de combustión, mediante pruebas experimentales y comparaciones con los pellets tradicionales. Y finalmente también investigar el efecto de la torrefacción en la reducción del porcentaje de cloro presente en los

pellets obtenidos de biomasa del tipo forestal Siempreverde, mediante análisis químicos y comparaciones con los pellets en estado natural, con el objetivo de cumplir con los estándares de calidad y minimizar el impacto ambiental.

2 METODOLOGÍA

2.1 Origen del material torrefactado

El material torrefactado utilizado en este proyecto se obtiene a partir de nueve especies pertenecientes al tipo forestal Siempreverde. Estas especies son las siguientes: Canelo (*Drimys winteri*), Coigüe (*Nothofagus dombeyi*), Laurel (*Laurelia sempervirens*), Lingue (*Persea lingue*), Luma (*Amomyrtus luma*), Olivillo (*Aextoxicon punctatum*), Radal (*Lomatia hirsuta*), Tapa (*Laureliopsis philippiana*) y Ulmo (*Eucryphia cordifolia*).

Estas nueve especies han sido cuidadosamente seleccionadas considerando que son especies comerciales maderables y no se encuentran en la categoría de conservación. Esta selección garantiza la disponibilidad sostenible de las especies utilizadas en la producción de pellets torrefactados, contribuyendo así a la conservación de los ecosistemas forestales y promoviendo prácticas responsables de aprovechamiento de recursos naturales. Los pellets *in-natura* de las 9 especies nativas se presentan continuación (**Figura 2**).



Figura 2. Pellets *in-natura*: 1-Tepa; 2-Ulmo; 3-Olivillo; 4-Canelo; 5-Coigüe; 6-Lingue; 7-Luma; 8-Laurel y 9-Radal.

Las muestras provienen de un proyecto de investigación de elaboración de pellets a base de biomasa de especies nativas, financiado por el Fondo de Investigación del Bosque Nativo, recolectadas en predios de la región de Los Ríos y de Los Lagos.

2.2 Proceso de torrefacción

Una vez obtenidos los pellets *in-natura* de las especies estudiadas, se procederá a realizar el proceso de torrefacción. Este proceso se llevará a cabo en un reactor especialmente diseñado, en la cual se instalará un recipiente de porcelana para limitar la entrada de oxígeno y asegurar una torrefacción adecuada (**Figura 3**). Para ello, se utilizarán aproximadamente 9 kg de pellets *in-natura* previamente

secados en una estufa a una temperatura de $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Con este proceso, se espera obtener alrededor de 5 kg de pellets torrefactados. La torrefacción se realizará a una temperatura constante de 250°C , con un tiempo de residencia de 30 minutos. Estas condiciones específicas de temperatura y tiempo han sido determinadas para lograr un grado óptimo de torrefacción y obtener los resultados deseados en cuanto a las propiedades químicas y parámetros energéticos de los pellets torrefactados.



Figura 3. Reactor utilizado para torrefacción.

En total, se utilizaron un peso total de 243 kg de pellets *in-natura* para este proceso. Esto se calculará considerando las 9 especies seleccionadas, cada una con 3 repeticiones, y utilizando una cantidad de 9 kg de pellets por repetición. Además, se recomienda que la velocidad de calentamiento del reactor sea

aproximadamente de 4°C por minuto, con el fin de garantizar un calentamiento gradual y uniforme durante la torrefacción.

Al analizar el proceso de torrefacción, el material resultante será retirado de la mufla y transferido a un desecador para su enfriamiento. Este paso es importante para evitar cualquier cambio no deseado en la composición y propiedades del material torrefactado.

2.3 Análisis pellets torrefactados

Para realizar las determinaciones en los pellets *in-natura* torrefactados, se llevarán a cabo una serie análisis y pruebas específicas con el fin de evaluar sus propiedades y características. A continuación, se detallan las normas y métodos que serán utilizados:

Contenido de humedad: Se determinará el contenido de humedad en las muestras de pellets torrefactados siguiendo las pautas establecidas por la norma UNE-EN 14774-1. Este análisis permitirá evaluar la cantidad de agua presente en los pellets torrefactados, lo cual es esencial para su calidad y desempeño.

Densidad a granel: Se utilizará la norma DIN EN 15103 para medir la densidad a granel de los pellets torrefactados (Deutsches Institut für Normung, 2010c). Este análisis nos proporcionará información para la masa por unidad de

volumen de los pellets y es importante para evaluar su capacidad de almacenamiento y transporte.

Poder calorífico superior: Se determinará el poder calorífico de los pellets torrefactados según la norma ASTM 5875. Este análisis es crucial para evaluar la capacidad de los pellets torrefactados de generar calor cuando se utilizan como combustible.

Contenidos de extractivos: Se seguirá la norma TAPPI 204 cm-97 para determinar los contenidos de extractivos presentes en los pellets torrefactados (Technical Association of the Pulp and Paper Industry [TAPPI], 1997). Este análisis permitirá identificar los componentes orgánicos solubles en solventes, lo cual es relevante para comprender la composición química de los pellets.

Contenido de lignina: Se utilizará la norma TAPPI T 222 cm-83 para determinar el contenido de lignina en los pellets torrefactados (Technical Association of the Pulp and Paper Industry [TAPPI], 1983). La lignina es un componente importante de la biomasa y su contenido puede afectar las propiedades y características de los pellets.

Contenido de cenizas: Se empleará la norma UNE-EN 14775 para determinar el porcentaje de cenizas presentes en los pellets torrefactados. Este análisis nos

permitirá evaluar la cantidad de residuos inorgánicos que permanecen después de la combustión de los pellets.

Composición elemental (CHNS – O): Se utilizará el método LRR-PEA-01 para determinar la composición elemental de los pellets torrefactados, es decir, los contenidos de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno presentes en ellos.

Porcentaje de cloro: Se seguirá la norma EN 15289: 2011 para determinar el porcentaje de cloro en los pellets torrefactados. El contenido de cloro es importante debido a sus implicaciones ambientales y su impacto en ciertas aplicaciones.

Rendimiento de masa (RM): Se calculará el rendimiento de masa, que relaciona la masa final de los pellets torrefactados con la masa inicial de los pellets in-natura. Este análisis nos permitirá evaluar la pérdida o ganancia de masa durante el proceso de torrefacción y su impacto en la calidad y cantidad de los pellets.

$$RM = \left(\frac{\text{Masa Final de la Biomasa Torrefactada}}{\text{Masa Inicial de la Biomasa}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Estos análisis exhaustivos permitirán obtener una visión completa de la composición química y los parámetros energéticos de los pellets torrefactados

obtenidos de la biomasa del tipo forestal siempreverde. Los resultados obtenidos a partir de estos análisis serán fundamentales para evaluar la calidad de los pellets torrefactados y su capacidad como fuente de energía renovable. Además, contribuirán a la comprensión científica y al desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles en el ámbito de la biomasa forestal.

Rendimiento en energía (RE): Se calculará el rendimiento en energía, que relaciona el poder calorífico superior torrefactado ($PCST$) y el poder calorífico superior *in-natura* expresado (PCS_I). Este análisis nos proporcionará información sobre la eficiencia energética de los pellets torrefactados y su capacidad para generar calor (**Ecuación 2**).

$$RE = \frac{PCS_t}{PCS_1} \times RM \quad (2)$$

2.4 Evaluación de los resultados

La etapa de Evaluación de Resultados es crucial para analizar y comprender las características fisicoquímicas y energéticas de los pellets torrefactados obtenidos de las distintas especies estudiadas. A continuación, se detallan los procedimientos que se llevarán a cabo en esta etapa:

Comprobación de la homogeneidad de la varianza. Se realizará un análisis estadístico para verificar la homogeneidad de la varianza en los datos generados para cada especie de pellets torrefactados. Este paso es esencial para garantizar la confiabilidad de los resultados y asegurar que las comparaciones posteriores sean válidas.

Análisis de varianza y comparación de medias. Se efectuará un análisis de varianza para evaluar las características fisicoquímicas y energéticas de los pellets torrefactados. Luego, se aplicará la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5% para realizar una comparación de medias. Esta comparación permitirá identificar diferencias significativas entre las propiedades de los pellets provenientes de diferentes especies.

Índice de desempeño energético (Fuel Value Index - *FVI*). Se utilizará el índice de combustibilidad (*FVI*) para clasificar y jerarquizar los pellets de cada especie según su potencial energético. Por un lado, el poder calorífico superior (*PCS*) y la densidad de la madera se consideran propiedades deseables desde el punto de vista energético, ya que influyen positivamente en el rendimiento energético de los pellets. Por otro lado, el porcentaje de cenizas y el contenido de humedad se consideran propiedades negativas, ya que afectan negativamente el rendimiento energético. Dado que el contenido de humedad de la madera puede variar a lo largo del tronco y en diferentes estaciones del año, se utilizará el *FVI*,

que incluirá tanto la **ecuación 3**, que considera el porcentaje de humedad, como la **ecuación 4**, que no lo toma en cuenta.

$$FVI_1 = \left(\frac{\text{Mayor valor de calentamiento (MJ Kg}^{-1}\text{)} \times \text{Densidad aparente}}{\text{Humedad (\%)} \times \text{Contenido de cenizas (\%)}} \right) \quad (3)$$

$$FVI_2 = \left(\frac{\text{Mayor valor de calentamiento (MJ Kg}^{-1}\text{)} \times \text{Densidad aparente}}{\text{Contenido de cenizas (\%)}} \right) \quad (4)$$

Además, se verificará el cumplimiento de las normas internacionales para los pellets producidos utilizando la norma DIN EN 14961-2 del Deutsches Institut Für Normung (2011b). Esta norma es ampliamente reconocida y utilizada para evaluar la calidad de los pellets producidos con especies maderables. Se compararán los resultados obtenidos en las propiedades fisicoquímicas y energéticas con los límites establecidos por la norma para determinar si los pellets cumplen con los estándares requeridos.

La etapa de evaluación de resultados permitirá obtener conclusiones significativas sobre las características fisicoquímicas y energéticas de los pellets torrefactados, así como su clasificación en términos de potencial energético utilizando el índice de combustibilidad (*FVI*). Además, se asegurará el cumplimiento de las normas internacionales aplicables. Estos resultados proporcionarán una base sólida para evaluar la viabilidad y la aplicación práctica

de los pellets torrefactados obtenidos de la biomasa del tipo forestal Siempreverde.

Presentación de los resultados. Los resultados serán presentados en tablas gráficos e histogramas que permitirán comparar las características energéticas de las 9 especies nativas evaluadas.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Torrefacción de Pellets del Tipo Forestal Siempreverde

En este estudio se analizaron pellets torrefactados de nueve especies representativas del tipo forestal Siempreverde: Olivillo, Ulmo, Coigüe, Lingue, Luma, Laurel, Radal, Canelo y Tapa.

El análisis físico de los pellets torrefactados permitió caracterizar su densidad, largo y ancho, así como las variaciones de masa derivadas del proceso de torrefacción. Estos datos son esenciales para determinar su rendimiento de masa y rendimiento de energía. Los valores específicos obtenidos se encuentran resumidos en la **Tabla A.1** (Anexo), la cual cumple con las normas internacionales DIN EN 15103 e ISO 17829:2015. Por otro lado, los análisis químicos incluyeron la determinación del poder calorífico, contenido de extraíbles, lignina, cenizas y la composición elemental de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y cloro, siguiendo protocolos normalizados. Estos datos disponibles en la **Tabla A.2** (Anexo), reflejan la influencia del proceso de torrefacción en la calidad energética y estabilidad térmica de los pellets.

3.2 Composición de Pellets Torrefactados

Los resultados de la química inmediata (humedad, ceniza, extraíble y lignina total) de los pellets torrefactados de las especies pertenecientes al tipo forestal Siempreverde son presentados en la **Tabla 1**. A partir de estos valores, se puede analizar la influencia de cada parámetro en la calidad y el rendimiento de los pellets, destacando las especies más adecuadas para su producción en base a criterios químicos.

Tabla 1. Composición Química de Pellets Torrefactados

Especie	Humedad (% p/p)	Ceniza (% p/p)	Extraíble (% p/p)	Lignina (% p/p)
Canelo (<i>Drimys winteri</i>)	0,43 ^A	0,92 ^B	1,06 ^A	60,79 ^E
Coigüe (<i>Nothofagus dombeyi</i>)	0,80 ^C	1,14 ^{BC}	0,96 ^A	54,96 ^C
Laurel (<i>Laurelia sempervirens</i>)	4,91 ^I	2,13 ^E	6,50 ^E	64,80 ^F
Lingue (<i>Persea lingue</i>)	1,44 ^F	0,64 ^A	1,66 ^B	49,26 ^A
Luma (<i>Amomyrtus luma</i>)	0,72 ^B	1,46 ^D	3,40 ^D	56,29 ^D
Olivillo (<i>Aextoxicon punctatum</i>)	1,18 ^D	2,59 ^F	1,76 ^B	61,31 ^E
Radal (<i>Lomatia hirsuta</i>)	1,51 ^G	0,77 ^{BC}	2,61 ^C	52,68 ^B
Tepa (<i>Laureliopsis philippiana</i>)	2,39 ^H	2,72 ^F	1,54 ^B	80,07 ^G
Ulmo (<i>Eucryphia cordifolia</i>)	1,39 ^E	0,94 ^{BC}	2,74 ^C	54,63 ^C

Obs: Letras diferentes indican diferencias significativas.

La humedad presente en los pellets torrefactados varió entre 0,43% en Canelo y 4,91% en Laurel. Una baja humedad en los pellets es favorable, ya que mejora la eficiencia en la combustión del producto. Se destaca la especie más favorable el Canelo por su bajo contenido de humedad a diferencia del Laurel por su alto contenido.

El contenido de ceniza osciló entre 0,64 % en Lingue y 2,72 % en Tepa. Este parámetro es clave, ya que un contenido bajo minimiza los residuos y facilita el mantenimiento de los equipos de combustión. Lingue mostró el menor contenido de cenizas, siendo ideal para pellets limpios y sostenibles, a diferencia de Tepa que presentó el contenido más alto, lo que podría generar mayores residuos inorgánicos.

El contenido de extraíbles fluctuó entre 0,96% en Coigüe y 6,50% en Laurel. Los extraíbles pueden interferir en la compactación y aumentar las emisiones durante la combustión. De esta forma Coigüe y Canelo presentaron los valores más bajos, favoreciendo la estabilidad de los pellets. Por otro lado, Laurel tuvo el contenido más alto, lo que podría afectar negativamente la calidad energética.

El contenido de lignina en los pellets actúa como un aglutinante durante el proceso de compactación, lo que mejora la resistencia mecánica y durabilidad en los pellets torrefactados. Un pellet con alto contenido de lignina tiene mayor integridad estructural, lo que los hace más fáciles de manipular, transportar y almacenar sin generar finos. Tepa se destacó como la especie más favorable en este parámetro, garantizando pellets robustos y de alta calidad. Por otro lado, Lingue tuvo el contenido más bajo, limitando su uso para pellets duraderos.

3.3 Composición Elemental y Contenido de Cloro en los Pellets Torrefactados

La composición elemental de los pellets torrefactados de las especies nativas evaluadas se presenta en la **Tabla 2**, donde se destacan los valores de carbono, hidrógeno, oxígeno y cloro. Estos elementos son clave para determinar la eficiencia energética, la calidad ambiental y la sostenibilidad de los pellets. A continuación, se analizan cada uno de estos parámetros en relación con su impacto en la combustión y calidad de los pellets.

Tabla 2. Composición Elemental de Pellets Torrefactados

Especie	Carbono (%p/p)	Nitrógeno (%p/p)	Hidrógeno (%p/p)	Azufre (%p/p)	Oxígeno (%p/p)	Cloro (%p/p)
Canelo (<i>Drimys winteri</i>)	56,50 ^{AB}	ND	5,99 ^C	ND	35,50 ^{AB}	0,015 ^A
Coigüe (<i>Nothofagus dombeyi</i>)	55,00 ^{AB}	ND	5,90 ^{ABC}	ND	37,20 ^{AB}	0,011 ^A
Laurel (<i>Laurelia sempervirens</i>)	56,70 ^{AB}	ND	6,40 ^{AB}	ND	34,90 ^{AB}	0,025 ^B
Lingue (<i>Persea lingue</i>)	51,10 ^A	ND	5,60 ^{BC}	ND	41,30 ^{AB}	0,011 ^A
Luma (<i>Amomyrtus luma</i>)	53,60 ^{AB}	ND	6,00 ^{ABC}	ND	38,40 ^{AB}	0,036 ^C
Olivillo (<i>Aextoxicon punctatum</i>)	54,30 ^{AB}	ND	5,80 ^{ABC}	ND	37,90 ^{AB}	0,045 ^D
Radal (<i>Lomatia hirsuta</i>)	55,90 ^{AB}	ND	6,50 ^A	ND	35,60 ^{AB}	0,012 ^A
Tepa (<i>Laureliopsis philippiana</i>)	60,60 ^B	ND	5,50 ^{ABC}	ND	31,90 ^A	0,016 ^A

Ulmo (<i>Eucryphia cordifolia</i>)	54,30 ^{AB}	ND	6,20 ^{ABC}	ND	37,50 ^{AB}	0,010 ^A
---	---------------------	----	---------------------	----	---------------------	--------------------

Obs: Letras diferentes indican diferencias significativas; *ND*: No detectable.

Un alto contenido de carbono es altamente favorable, ya que está directamente relacionado con el poder calorífico de los pellets, al ser el principal componente de la biomasa. La especie más favorable bajo este parámetro es Tapa (60,60%), el cual mostró el mayor contenido de carbono, destacándose como la especie más adecuada para pellets de alto rendimiento energético. Laurel (56,70%) y Canelo (56,50%) también mostraron valores elevados de carbono. Especies con bajo carbono, como Lingue (51,10%), podrían ofrecer menor eficiencia energética en comparación con las demás.

El hidrógeno contribuye a la generación de vapor de agua y, en menor medida, a la eficiente energética de los pellets. Radal (6,50%) presentó el mayor contenido, lo que sugiere una mayor producción de energía secundaria durante la combustión, por otra parte, Tapa (5,50%) mostró el menor contenido, pero su alto contenido de carbono compensa este aspecto. Un contenido adecuado de hidrógeno favorece la combustión completa, pero valores demasiado altos podrían generar más vapor de agua, reduciendo ligeramente la eficiencia de los pellets.

El contenido de oxígeno varió entre 31,90% en Tapa y 41,30% en Lingue. Este parámetro es inversamente proporcional al poder calorífico, ya que el oxígeno representa peso adicional en compuestos no combustibles. Tapa presentó el menor contenido de oxígeno, maximizando su poder calorífico. Lingue mostró el mayor contenido, lo que afecta negativamente su eficiencia energética.

El contenido de cloro osciló entre 0,010% en Ulmo y 0,045% en olivillo. Este parámetro es crítico, ya que, durante la combustión, el cloro puede formar compuestos tóxicos, como dioxinas y furanos, que son peligrosos para la salud y el medio ambiente. Además, el cloro contribuye a la corrosión de equipos industriales debido a la formación de sales y ácidos a altas temperaturas. Las especies más favorables bajo este parámetro en particular son Ulmo (0,010%) y Coihue (0,011%) presentaron el menor contenido de cloro, siendo las especies más seguras para el uso en pellets. Olivillo (0,045%) presentó el mayor contenido, lo que lo convierte en una opción menos deseable desde una perspectiva ambiental y técnica.

3.4 Características Físicas de Pellets Torrefactados

La calidad física de los pellets es fundamental para garantizar su eficiencia en aplicaciones energéticas. Propiedades como el largo, diámetro y densidad a

granel determinan su comportamiento durante el transporte, almacenamiento y combustión. Un pellet de calidad debe tener dimensiones consistentes y una alta densidad, ya que esto asegura una mejor compactación, mayor contenido energético por unidad de volumen y compatibilidad con equipos automatizados de combustión. La **Tabla 3** presente analiza estas propiedades en pellets torrefactados de especies nativas del tipo forestal Siempreverde.

Tabla 3. Composición Física de Pellets Torrefactados

Especie	Diámetro (mm)	Largo (mm)	Densidad Granel (Kg/m ³)
Canelo (<i>Drimys winteri</i>)	5,74 ^{CD}	12,88 ^{CD}	580,39 ^A
Coigüe (<i>Nothofagus dombeyi</i>)	6,13 ^A	12,92 ^{AB}	595,27 ^{ABC}
Laurel (<i>Laurelia sempervirens</i>)	5,9 ^{BC}	11,24 ^{AC}	586,15 ^{ABC}
Lingue (<i>Persea lingue</i>)	6,04 ^{AB}	9,69 ^{AC}	604,36 ^B
Luma (<i>Amomyrtus luma</i>)	5,79 ^{CD}	14,76 ^B	712,48 ^D
Olivillo (<i>Aextoxicon punctatum</i>)	5,80 ^{CD}	9,74 ^C	631,94 ^E
Radal (<i>Lomatia hirsuta</i>)	6,05 ^{AB}	10,25 ^{AC}	601,88 ^{BC}
Tepa (<i>Laureliopsis philippiana</i>)	5,65 ^D	14,18 ^B	580,64 ^A
Ulmo (<i>Eucryphia cordifolia</i>)	5,93 ^{ABC}	12,73 ^{AB}	632,33 ^E

Obs: Letras diferentes indican diferencias significativas.

La densidad a granel es el parámetro más crítico, ya que determina la cantidad de energía almacenada y transportada por unidad de volumen. Valores altos son indicativos de una mejor compactación y mayor eficiencia de combustión. Luma destacó con la densidad más alta (712,48 kg/m³) lo que garantiza una mayor eficiencia de transporte y almacenamiento, haciendo de esta especie una opción superior para pellets, a diferencia de Canelo (580,39 kg/m³) y Tepa (580,64kg/m³) mostraron las densidades más bajas, lo que podría limitar su capacidad de almacenamiento energético.

El largo de los pellets afecta la manejabilidad y compatibilidad con sistemas de alimentación automatizada. Valores consistentes y moderados son ideales para evitar problemas operativos. Luma (14,76 mm) y Tapa (14,18 mm) destacan por sus largos superiores, ideales para equipos que requieren pellets uniformes y consistentes, a diferencia de Lingue (9,69 mm) y Olivillo (9,74 mm) lo que podría comprometer su integridad estructural y manejabilidad.

El diámetro estándar asegura la compatibilidad con la mayoría de los sistemas de combustión, además de influir en la densidad y el flujo durante la alimentación. Dado el siguiente criterio la especie más favorable es Coigüe que presentó el mayor diámetro (6,13 mm) garantizando una mejor compactación y estabilidad durante su combustión a diferencia de Tapa (5,65 mm) que presentó menor diámetro.

3.5 Poder Calorífico Superior (PCS) de Pellets Torrefactados

El Poder Calorífico Superior (PCS) representa la cantidad máxima de energía liberada durante la combustión completa de los pellets. Es un indicador clave para evaluar la eficiencia energética de los biocombustibles. A continuación, se analizan los valores de PCS en función de su impacto en la calidad de los pellets.

Tabla 4. Poder Calorífico Superior (PCS) de Pellets Torrefactados

Especie	Poder Calorífico Superior	
	(Kcal/kg)	(MJ/Kg)
Canelo (<i>Drimys winteri</i>)	5233,50 ^A	21,89 ^A
Coigüe (<i>Nothofagus dombeyi</i>)	5113,50 ^A	21,39 ^A
Laurel (<i>Laurelia sempervirens</i>)	5419,50 ^B	22,67 ^B
Lingue (<i>Persea lingue</i>)	5114,50 ^A	21,39 ^A
Luma (<i>Amomyrtus luma</i>)	5196,00 ^A	21,74 ^A
Olivillo (<i>Aextoxicon punctatum</i>)	5490,00 ^{BC}	22,97 ^{BC}
Radal (<i>Lomatia hirsuta</i>)	5143,00 ^A	21,51 ^A
Tepa (<i>Laureliopsis philippiana</i>)	5593,50 ^C	23,40 ^C
Ulmo (<i>Eucryphia cordifolia</i>)	5448,00 ^D	22,79 ^D

Obs: Letras diferentes indican diferencias significativas.

Entre las especies estudiadas, Tepa destaca con el PCS más alto (23,40 MJ/kg), seguida de Ulmo (22,79 MJ/Kg) y Olivillo (22,97 MJ/Kg). Estos valores elevados están correlacionados con un mayor contenido de carbono, que es el principal elemento energético en la biomasa. En el caso de Tepa, su contenido de carbono es el más alto de todas las especies analizadas (60,60%), lo que explica su superior rendimiento calórico. Por otro lado, Ulmo y Olivillo presentan contenidos de carbono intermedios (54,30%) pero una buena combinación de otros parámetros, como un contenido de lignina moderado (54,63% en Ulmo) y una densidad a granel alta (631,94 Kg/m³ en Olivillo), lo que mejora su eficiencia energética. Adicionalmente, la lignina contribuye significativamente al PCS debido a su alto poder energético intrínseco. Por ejemplo, Tepa tiene el contenido de lignina más alto de todas las especies (80,07%), lo que refuerza su alto PCS.

En contraste, las especies con los *PCS* más bajos, como Coigüe (21,39 MJ/Kg) y Lingue (21,39 MJ/Kg), presentan características químicas y físicas menos favorables. Ambas tienen menores contenidos de carbono (55,00% en Coigüe y 51,10% en Lingue) y densidades a granel moderadas o bajas (595,27 Kg/m³ y 604,36 Kg/m³, respectivamente), lo que disminuye su capacidad de generación de energía. Asimismo, su contenido de lignina es significativamente inferior (54,96% en Coigüe y 49,26% en Lingue), reduciendo la proporción de compuestos con alta energía en sus estructuras químicas. El contenido de oxígeno también juega un papel importante, ya que un oxígeno elevado está inversamente relacionado con el *PCS* debido a su contribución al material volátil y a su tendencia a reducir la eficiencia energética. Lingue tiene un contenido de oxígeno más alto (41,30%), lo que explica su menor *PCS* en comparación con especies como Tepa o Ulmo, que presentan valores más bajos de oxígeno.

3.6 Comparación del Poder Calorífico Superior de *Pinus radiata* y Especies del Tipo Forestal Siempreverde Torrefactados

En el contexto de la generación de bioenergía, los pellets de madera representan una fuente de combustible clave debido a su eficiencia energética y baja huella ambiental. Actualmente, la biomasa utilizada para la fabricación de pellets comerciales en diversas regiones proviene principalmente de *Pinus radiata*, una especie de rápido crecimiento y buen rendimiento energético. Sin embargo, es fundamental comparar el poder calorífico de esta especie con el de otras

especies pertenecientes al tipo forestal Siempreverde para determinar su competitividad y posibles mejoras en la industria de los biocombustibles.

El gráfico presentado a continuación muestra una comparación del poder calorífico superior (PCS) entre pellets de pino torrefactado v/s las 9 especies del tipo forestal Siempreverde torrefactadas. Esta comparación permite evaluar la eficiencia de *P. radiata* en relación con otras especies que podrían ofrecer ventajas en la producción de pellets.

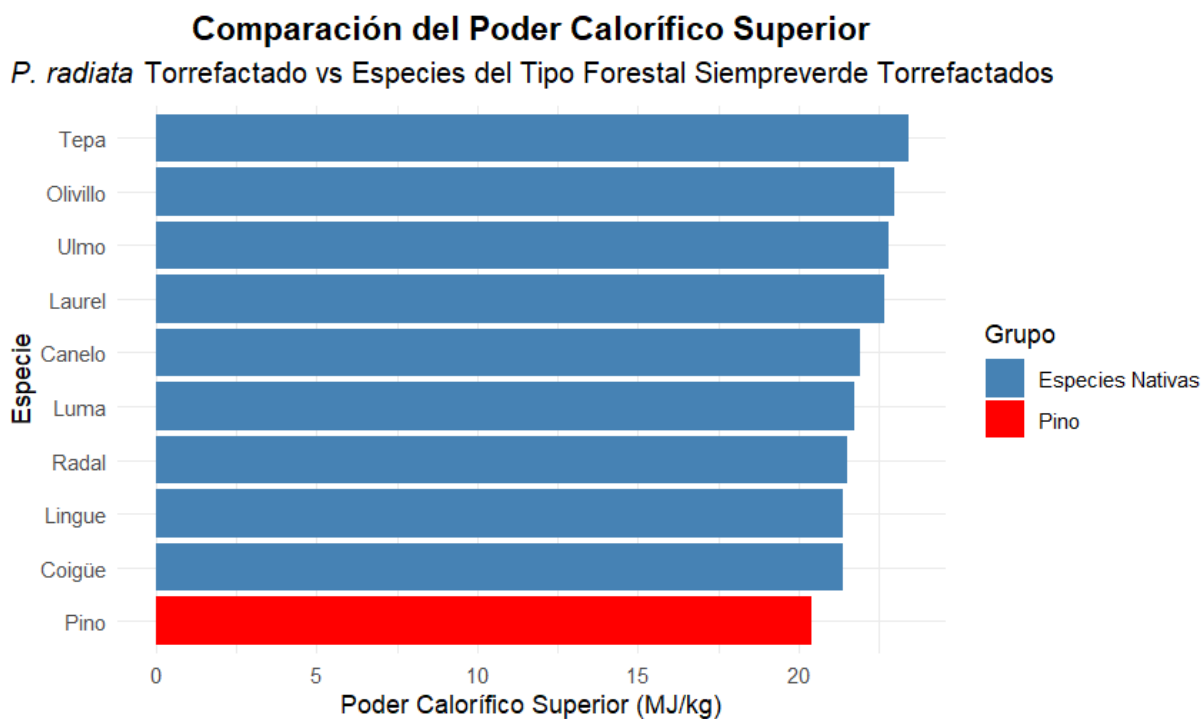


Figura 4. Comparación del Poder calorífico Superior de pellets de pino v/s pellets del tipo forestal Siempreverde torrefactados

Como se observa en el gráfico, ***P. radiata*** presenta un poder calorífico inferior (20,40 MJ/kg) en comparación con especies como Tapa (23,4 MJ/kg), Olivillo (22,97 MJ/kg) y Ulmo (22,79 MJ/kg). Esta diferencia notable en el poder calorífico superior puede atribuirse principalmente al proceso de torrefacción. Este resultado es consistente con estudios previos que analizan las propiedades energéticas de diversas especies forestales con potencial para la elaboración de biocombustibles sólidos.

La importancia de la calidad de los pellets según García-Maraver *et al.*, (2011), la calidad de los pellets está regulada por estándares europeos que establecen parámetros como el contenido energético, la humedad y la densidad de la biomasa. Estos estándares, como los definidos en ENplus ® (n.d.), son fundamentales para garantizar la eficiencia y el desempeño del biocombustible en aplicaciones industriales y residenciales.

La diferencia en la calidad del pellet según la especie quedó demostrada según investigaciones más recientes, las cuales evidencian que la calidad del pellet varía significativamente en función de la especie forestal utilizada. Especies con mayor densidad y poder calorífico, como las analizadas en el gráfico, generan pellets más eficientes en términos de energía liberada por kilogramo de biomasa. La temperatura a la que se sometieron los pellets de ***P. radiata*** torrefactado fue de 250 °C, con un tiempo de residencia de 30 minutos (Pegoretti,2020).

3.7 Índice de Desempeño Energético (Fuel Value Index - *FVI*)

El Índice de Desempeño Energético o Fuel Value Index (*FVI*) es una herramienta ampliamente utilizada para evaluar la calidad energética de las especies forestales como biocombustibles. Este índice proporciona una medida cuantitativa que combina propiedades esenciales como el poder calorífico, la densidad, el contenido de humedad y el contenido de cenizas, permitiendo clasificar las especies en función de su rendimiento energético.

En este análisis, se evaluaron dos variantes de *FVI*:

1. *FVI*₁, utiliza un enfoque más completo, considerando como factores positivos el valor calorífico (KJ/g) y la densidad (g/cc) mientras que el contenido de humedad (%) y el contenido de cenizas (%) se considera como un factor que afecta negativamente el rendimiento energético.
2. *FVI*₂, no considera el % de humedad, centrándose únicamente en el contenido de cenizas como elemento negativo.

La inclusión o exclusión del contenido de humedad en los cálculos es fundamental, ya que la humedad reduce la eficiencia de combustión al consumir parte de la energía para evaporar el agua presente en la biomasa. Esto genera

diferencias notables entre los valores obtenidos para FVI_1 y FVI_2 , lo cual queda reflejado claramente en el gráfico presentado a continuación.

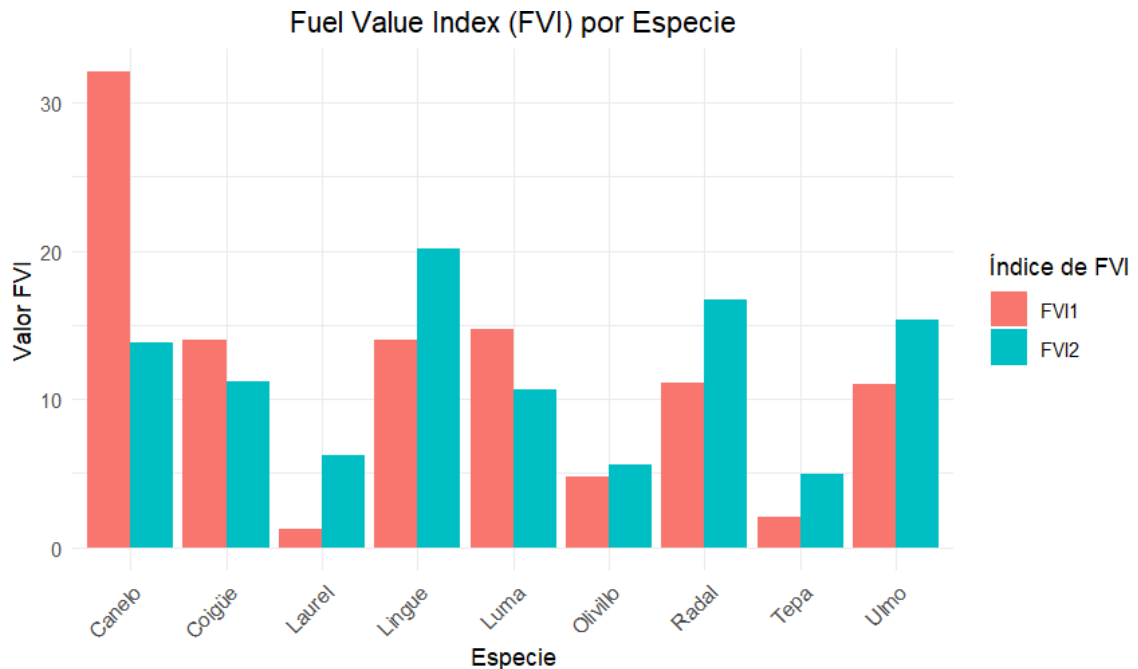


Figura 5. Gráfico de barras del Fuel Value Index (FVI_1 y FVI_2) para nueve especies forestales Siempreverde: Canelo, Coigüe, Laurel, Lingue, Luma, Olivillo, Radal, Tepa y Ulmo.

Canelo destaca con el FVI_1 más alto (32,03) lo que indica un excelente desempeño energético cuando se considera el contenido de humedad. Sin embargo, su FVI_2 disminuye significativamente a 13,77 sugiriendo que esta especie tiene un alto contenido de humedad, lo cual penaliza su eficiencia energética durante la combustión.

Lingue sobresale en FVI_2 con 20,15 convirtiéndose en la especie más favorable cuando el contenido de humedad no se considera. Además, su FVI_1 de 13,99 se mantiene relativamente alto, lo que indica que esta especie posee un bajo contenido de humedad y cenizas, siendo una opción eficiente y estable.

Radal y Ulmo también presentan valores competitivos en FVI_2 (16,72 y 15,33, respectivamente). Aunque sus valores de FVI_1 son más bajos (11,07 y 11,03), siguen mostrando un buen potencial como biomasa de alto rendimiento debido a sus características energéticas balanceadas.

Por otro lado, especies como Laurel y Tapa muestran los valores más bajos en ambos índices. Laurel, con un FVI_1 de 1,27 evidencia un alto contenido de humedad y cenizas, mientras que Tapa, con un FVI_1 de 2,08, también presenta características poco favorables como biocombustible sólido.

3.8 Rendimiento de Masa en Pellets Torrefactados del Tipo Forestal Siempreverde

El rendimiento de masa (RM) en pellets torrefactados es un indicador crucial en el análisis de biomasa, ya que refleja la proporción de materia sólida que permanece después del proceso de torrefacción. Este proceso mejora las propiedades físicas y energéticas de la biomasa, aumentando su densidad energética y estabilidad. Evaluar el RM permite determinar la eficiencia del

proceso y seleccionas las especies más adecuadas para aplicaciones energéticas.

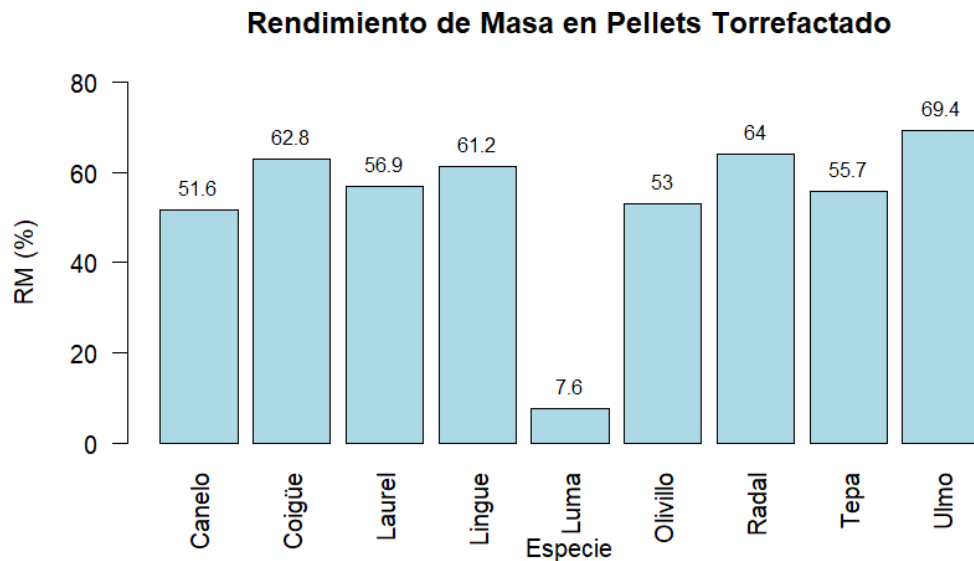


Figura 6. Rendimiento de Masa en Pellets Torrefactados para diferentes especies de biomasa evaluadas.

La **Figura 6** muestra el rendimiento de masa torrefactado para diferentes especies de biomasa estudiadas. El análisis revela diferencias notables entre las especies.

Ulmo destaca como la especie con mayor rendimiento de masa (69,4%), seguido por Radal (64%) y Coigüe (62,8). Estas especies se perfilan como las más favorables para la producción de pellets debido a su alta capacidad de retención de masa tras la torrefacción.

Por otro lado, especies como Luma, con un rendimiento significativo menor (7,6%), presentan una menor viabilidad en términos de eficiencia de masa.

Estas diferencias reflejan variaciones en las propiedades físicas y químicas de cada especie, lo que subraya la importancia de una adecuada selección en función del propósito energético.

3.9 Rendimiento de Energía en Pellets Torrefactados del Tipo Forestal Siempreverde

Es importante señalar que el cálculo del rendimiento de energía esta intrínsecamente ligado al rendimiento de masa (RM), ya que este último determina la fracción de la biomasa inicial que se conserva tras el proceso de torrefacción. De esta forma, un buen rendimiento de masa proporciona una base sólida para garantizar un rendimiento energético elevado, asegurando que la biomasa procesada maximice su potencial como fuente de energía.

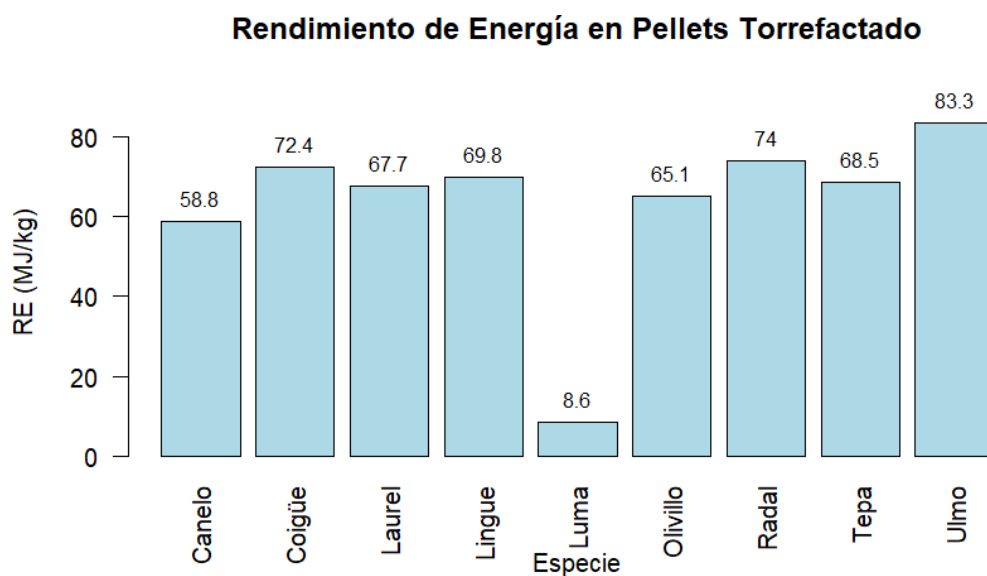


Figura 7. Rendimiento de energía para pellets torrefactados de diferentes especies de estudio.

Entre las especies evaluadas, Ulmo se posiciona como la especie más favorable, con mayor *RE* (83,3 MJ/kg), destacando su excelente capacidad de retención energética tras la torrefacción.

Radal (74 MJ/kg), Coigüe (72,4 MJ/kg), y Lingue (69,8 MJ/kg) también exhiben valores altos de rendimiento energético, lo que las convierte en opciones viables para procesos energéticos sostenibles.

Por otro lado, Luma presenta el menor *RE* (8,6 MJ/kg) lo que refleja una baja eficiencia en su capacidad de conservación energética tras la torrefacción.

4 CONCLUSIONES

La comparación presentada evidencia que, si bien ***P. radiata*** es la biomasa más utilizada en la producción de pellets comerciales, existen especies Siempreverdes, como Tapa, Olivillo y Ulmo, que poseen un mayor poder calorífico superior. Esto sugiere que explorar y diversificar el uso de estas especies en la producción de pellets podría mejorar disponibilidad, los costos de producción y el manejo forestal deben considerarse para implementar estas alternativas de manera sostenible.

El análisis Fuel Value Index (*FVI*) revela que la consideración del contenido de humedad juega un papel crítico en la evaluación del desempeño energético de las especies forestales. Mientras que el FVI_1 refleja el impacto negativo de la humedad, el FVI_2 proporciona una evaluación más directa basada únicamente en el contenido de cenizas.

Lingue se destaca como la mejor opción para la producción de pellets torrefactados, debido a sus valores estables en ambos índices y su bajo contenido de humedad y cenizas. Adicionalmente, especies como Radal y Ulmo también presentan un rendimiento energético favorable y podrían considerarse como alternativas viables para el desarrollo de biocombustibles sólidos.

5 BIBLIOGRAFÍA

1. Altomonte H., M. Coviello. 2003. Sostenibilidad energética en América Latina y el Caribe: el aporte de las fuentes renovables. CEPAL, Santiago, Chile.
2. Andrade-Castañeda H.J., C.C. Arteaga-Céspedes, M.A. Segura-Madrigal. 2017. Emisión de gases de efecto invernadero por uso de combustibles fósiles en Ibagué, Tolima (Colombia). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 18(1): 103-112.
3. Arteaga-Pérez L.E., C. Segura, K.D. Santana. 2016. Procesos de torrefacción para valorización de residuos lignocelulósicos. Análisis de posibles tecnologías de aplicación en Sudamérica. *Afinidad* 73(573).
4. Chen W.-H., J. Peng, X.T. Bi. 2015. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44: 847-866.
5. Deutsches Institut für Normung 2011b. DIN EN 14961-2: Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 2: Wood pellets for non-industrial use. Berlín: CEN, 2011b. 15 p
6. Deutsches Institut für Normung. 2010c. DIN EN 15103: Determination of bulk density. Berlín: CEN, 2010. 14 p.
7. García Martínez L. 2016. Densificación y torrefacción de biomasa de chumbera (*Opuntia* spp) y jara (*Cistus* spp). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
8. García-Maraver, A., Popov, V., & Zamorano, M. (2011). A review of European standards for pellet quality. *Renewable Energy*, 36(12), 3537–3540.
9. Guillén R.V., J.P. Dávila. 2014. Aprovechamiento sostenible de los residuos forestales para la producción de pellets de biomasa leñosa torrefactada. *Saber y Hacer* 1(2): 88-123.
10. Name of the Document: ENplus® wood pellets -Requirements for companies. (n.d.). Enplus-Pellets.Eu. Retrieved September 6, 2023
11. Pegoretti Leite de Souza H.J. 2020. Evaluación de propiedades de diferentes especies con potenciales energéticos para la elaboración de pellets de calidad con fines energéticos. Universidad Federal de Paraná, Curitiba, Brasil.
12. Pinilla J.C., K.L. Vergara, M.N. Torres, F.N. Ulloa. 2022. Antecedentes de abastecimiento de biomasa con fines energéticos, el caso del pellet en Chile. *Ciencia & Investigación Forestal*: 57-69.
13. Spiegel C., J.I. Cifuentes. 2016. Definición e información de energías renovables. Editorial Energías Limpias, Santiago, Chile.
14. Technical Association of the Pulp and Paper Industry [TAPPI]. 1985. TAPPI T 222 cm-83. Sampling and preparing wood for analysis. Atlanta: TAPPI, 1985.
15. Technical Association of the Pulp and Paper Industry [TAPPI]. 1997. TAPPI T 204 cm-97. Solvent extractives of wood and pulp. Atlanta: TAPPI, 1997.

6 ANEXO

Tabla A.1 Parámetros Físicos Pellets Torrefactados

Especie	Densidad a granel (kg/m³)	Largo pellets (mm)	Ancho pellets (mm)	Masa inicial (g)	Pellet torrefactado (g)
	Norma				
	DIN EN 15103	ISO 17829:2015	ISO 17829:2015		
Olivillo	631,9	9,7	5,8	1503,21	795,95
Ulmo	632,3	12,7	5,9	1484,26	1029,54
Coigüe	595,3	12,9	6,1	1491,81	937,11
Lingue	604,4	9,7	6	1457,59	891,8
Luma	712,5	17,8	5,8	1491,61	114,09
Laurel	586,2	11,2	5,9	1496,28	851,19
Radal	601,9	10,2	6,1	1495,55	956,63
Canelo	580,4	12,9	5,7	1500,05	773,91
Tepa	580,6	14,2	5,6	1500,63	835,82

Tabla A.2 Parámetros Químico Pellets Torrefactados

Especie	Poder calorífico (MJ/kg)	Extraíbles (%p/p)	Lignina (%p/p)	Cenizas (%p/p)	Composición elemental Carbono (%p/p)	Composición elemental Hidrógeno (%p/p)	Composición elemental Nitrógeno (%p/p)	Composición elemental Azufre (%p/p)	Cloro (%p/p)
	Norma								
	ASTM 5875	T 204 cm-97	T 222 om-83	UNE-EN 14775	LRR-PEA-01	LRR-PEA-01	LRR-PEA-01	LRR-PEA-01	EN 15289: 2011
Olivillo	23	1,76	61,31	2,59	54,3	5,8	ND	ND	0,045
Ulmo	22,8	2,74	54,63	0,94	54,3	6,2	ND	ND	0,01
Coigüe	21,4	0,96	54,96	1,14	55	5,9	ND	ND	0,011
Lingue	21,4	1,66	49,26	0,64	51,1	5,6	ND	ND	0,011
Luma	21,7	3,4	56,29	1,46	53,6	6	ND	ND	0,036
Laurel	22,7	6,5	64,8	2,13	56,7	6,4	ND	ND	0,025
Radal	21	2,61	52,68	0,77	55,9	6,5	ND	ND	0,012
Canelo	21,9	1,06	60,79	0,92	56,5	5,99	ND	ND	0,015
Tepa	23,4	1,54	80,07	2,72	60,6	5,5	ND	ND	0,016

ND: No Detectable

