

Microondas como pretratamiento de biomasa lignocelulósica: Influencia del tiempo y la potencia de microondas en la eliminación de humedad

Diego Venegas-Vásconez¹, César Ayabaca-Sarria², Luis Tipanluisa-Sarchi³, Serguei Alejandro-Martín⁴

¹ Escuela de Ingenierías, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador. Email: dfvenegasv@pucesa.edu.ec

² Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador. Email: cesar.ayabaca@epn.edu.ec

³ Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador. Email: luis.tipanluisa@espoch.edu.ec

⁴ Departamento de Ingeniería de Maderas, Universidad del Bío-Bío, Chile. Email: dvenegas@ubiobio.cl

Resumen

La biomasa lignocelulósica es considerada una materia prima utilizada en procesos de transformación para generar productos valiosos que reemplacen a equivalentes de base petrolífera. A pesar de que su uso sigue basándose en el ciclo de carbono, lo que significa que se genera CO₂ a lo largo de su procesamiento, la huella de carbono generada se compensa con la fotosíntesis producida en el crecimiento de la planta, por lo que es una fuente sostenible en términos de contaminación ambiental. Sin embargo, por su naturaleza, contiene agua en su estructura, lo cual es perjudicial para su procesamiento como combustible. Las microondas es un tratamiento de autohidrólisis que se utiliza para separar los componentes de la biomasa. La aplicación de microondas como pretratamiento ofrece varias ventajas: proceso con bajo consumo de energía, tratamiento eficiente y limpio que reduce el contenido de humedad de la biomasa en procesos de transformación termoquímica. En el presente trabajo se realiza un pretratamiento con microondas a biomasa (*Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*), para establecer las variables más significativas del proceso. Luego del pretratamiento, se determinó que la potencia de irradiación es el factor más significativo en la eliminación de humedad para posteriores transformaciones termoquímicas.

Palabras clave: Microondas, biomasa, potencia, tiempo.

Abstract

Lignocellulosic biomass is considered a raw material used in transformation processes to generate valuable products that replace petroleum-based equivalents. Although its use is still based on the carbon cycle, meaning that CO₂ is generated throughout its processing, the carbon footprint generated is offset by the photosynthesis produced during plant growth, making it a sustainable source in terms of environmental pollution. However, due to its nature, it contains water in its structure, which is detrimental to its processing as fuel. Microwaves are a method of autohydrolysis used to separate the components of biomass. The application of microwaves as a pretreatment offers several advantages: a low-energy consumption process, efficient and clean treatment that reduces the moisture content of biomass in thermochemical transformation processes. In this work, a microwave pretreatment is performed on biomass (*Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus*) to establish the most significant variables of the process. After the pretreatment, it was determined that irradiation power is the most significant factor in moisture removal for subsequent thermochemical transformations.

Keywords: Microwave, biomass, power, time

1. Introducción

La disponibilidad a corto y mediano plazo de recursos y productos energéticos e industriales a base del

petróleo es cada vez más limitada [1]. Este panorama ha hecho que los investigadores busquen nuevas alternativas como reemplazo de los combustibles fósiles, y han señalado a las renovables (geotérmica,

solar, eólica, hidroeléctrica, mareomotriz y biomasa) como potenciales fuentes de producción de energía y recursos valiosos [2]. La biomasa lignocelulósica es un conjunto de productos energéticos que se originan a partir de materia orgánica formada por medios biológicos y es la materia prima disponible más abundante en la tierra para la obtención de biocombustibles sostenibles y productos con alto valor en la industria [3]. Principalmente se compone de: celulosa, hemicelulosa, lignina y en menor proporción de: ceniza, proteínas, extraíbles y compuestos inorgánicos además, en su condición primaria contiene cantidades significativas de agua [4].

La descomposición térmica de la biomasa provoca rotura de enlaces que pueden transformarse en productos de alto valor agregado [5]. Sin embargo, Este contenido de agua es perjudicial en procesos posteriores de su transformación en productos de alto valor comercial e industrial. Un pretratamiento que minimice el problema de la humedad de la materia prima puede convertirse en el paso crítico para la conversión de biomasa lignocelulósica en productos energéticos sustentables, además que puede deconstruir la organización de la pared celular de la biomasa (celulosa, hemicelulosa y lignina), con el fin de facilitar sus procesos de transformación [6].

El tratamiento de microondas (MW) a la biomasa se está popularizando entre otras por las siguientes ventajas: calentamiento rápido, selectivo, volumétrico, uniforme, fácil de controlar, operación a bajas temperaturas, ahorro de energía en el proceso y los equipos utilizados son portátiles [7]. La biomasa lignocelulósica es un material que absorbe MW y en su interior las convierte en energía calorífica [8]. Este tratamiento induce ruptura en su estructura a través de la colisión molecular provocada por la polarización dieléctrica; la radiación de MW acelera los procesos químicos, biológicos y físicos generando calor debido a la vibración de las moléculas polares y el movimiento iónico [9]. Este movimiento de moléculas polares genera un rápido calentamiento en consecuencia los tiempos de proceso son más bajos comparados con otras formas de calentamiento [10]. La efectividad de la irradiación por MW en la biomasa lignocelulósica depende de varios factores, entre los cuales los más importantes son la potencia y el tiempo de irradiación [11]. El incremento del tiempo y potencia de irradiación produce vibración y forma puntos calientes al interior de la biomasa, lo cual elimina agua [12], además, reorienta y fracciona las cadenas cristalinas de la celulosa, rompe diversos enlaces en la hemicelulosa y lignina, lo cual puede alterar la composición química de la biomasa tratada [13].

Chile es un país forestal y su superficie acumulada de plantaciones a diciembre de 2017 fue de 2.289.525 ha, de las cuales el *Pinus radiata* cubría el 55,8% y el *Eucalyptus globulus* el 25,7% siendo las especies más representativas, y la Región del Biobío representaba el

39% de la superficie total nacional plantada (895.648 ha) [14].

En el presente trabajo se realizó un tratamiento con microondas a *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* provenientes de la Región del Bío-Bío en Chile. Se investigaron los cambios producidos por la MW en la composición química, morfología superficial y grupos funcionales de la biomasa lignocelulósica.

2. Materiales y metodología

2.1. Materiales

La empresa Investigaciones Forestales Bioforest S.A., de Bío Bío, Chile, proporcionó muestras de biomasa (*Pinus radiata* (PR) y *Eucalyptus globulus* (EG)) en forma de astillas. Las muestras fueron molidas y tamizadas para lograr un tamaño de partícula promedio de 0.33 mm y se almacenaron en un desecador hasta su uso posterior.

2.2. Metodología

2.2.1. Irradiación con microondas

El tratamiento con microondas se realizó en un horno Thomas TH-18B03 (230 V, 50 Hz, frecuencia de operación 2450 MHz). Las potencias de irradiación fueron: 259, 462, 595 y 700 W, y los tiempos de irradiación fueron 1, 2, 3 y 5 min. La temperatura promedio (TP) se obtuvo usando una cámara infrarroja Optris PI160 (320x240 pixeles) y el software PI Connect. Los valores TP corresponden al promedio de temperatura registrado en 6 puntos de la muestra irradiada. Se registró la pérdida de masa (Per) en una balanza digital Boeco (BAS 31 Plus) con apreciación de 1×10^{-4} g, y la humedad de las muestras se midió en una termobalanza modelo XY200MW con apreciación de 1×10^{-3} g.

2.2.2. Análisis estadístico

Se utilizó el software Design Expert, a través de un diseño de experimentos categórico multinivel se evaluaron los factores de mayor influencia en las variables de respuesta: temperatura promedio (T_{prom}), temperatura máxima (T_{max}) y pérdida de humedad (P_{hum}). Los ensayos se hicieron por triplicado, y el análisis estadístico se realizó en Design Expert, y para un valor $\alpha=0.05$.

2.2.3. Composición química

Para separar los extraíbles de la materia prima, se requiere 300-400 mg. de madera molida y tamizada entre 45-60 mesh. El procedimiento se realizó en un aparato Soxhlet con acetona al 90% durante 16 h según TAPPI T 280 pm-99 (2015) y conectado a flujo

permanente de agua, según el procedimiento reportado por Cruz et. al. [15]. La holocelulosa se obtuvo por oxidación de la madera libre de extraíbles según TAPPI T 9 m-54 (2015), según lo reportado previamente por Aguayo et. al. [16]. Se cuantificó la alfa-celulosa insoluble mediante solución concentrada de NaOH al 17,5% p/v, y por diferencia se obtuvo el porcentaje de hemicelulosa. Finalmente, a través del método Klason según Tappi T22 om-06 (2006) se determinó la composición de lignina según procedimiento descrito por Mendonça et. al. [17].

2.2.4. Morfología superficial

Los cambios en la superficie de la biomasa resultantes del pretratamiento con microondas (MWI) fueron analizados en un microscopio electrónico de barrido (SEM) JEOL JSM-6610LV (JEOL, Tokio, Japón) operando a 5 kV y con un aumento de 500X.

2.2.5. Grupos funcionales

Los grupos funcionales presentes en la estructura de las muestras de biomasa se identificaron mediante espectroscopia de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR). Los espectros se registraron en un espectrómetro Thermo Scientific modelo Nicolet is10, con detector DTGS en la longitud de onda 600–4000 cm^{-1} con una resolución de 4 cm^{-1} . La exploración del espectro se realizó con intervalos de 32 s.

3. Análisis de resultados

3.1. Tratamiento con microondas

En la Tabla 1 se muestra el registro de temperatura promedio (T_{prom}), temperatura máxima (T_{max}) y la pérdida de masa (P_{hum}), según las potencias y tiempos de irradiación para las muestras de PR y EG. El secado es un proceso térmico para eliminar agua de la biomasa, y se produce entre la temperatura ambiente y los 150 °C [18]. Conforme se incrementan la potencia y el tiempo de irradiación, la temperatura promedio, temperatura máxima y pérdida de masa aumentan proporcionalmente. Los mayores diferenciales de temperatura se obtuvieron en las mayores potencias (700 W) y tiempos de irradiación (5 min). Similares resultados obtuvieron Oliveira & Franca [19] en el estudio del efecto de la potencia, tiempo de irradiación con MW y humedad de cebada, canola y trigo. Esto además es compatible con lo concluido por Manickavasagan et. al. [20] quienes concluyeron que los diferenciales de temperatura son mayores en tiempos de procesos altos debido a la mayor energía entregada. La mayor temperatura se alcanzó en PR en la condición (700 W – 5 min), esto posiblemente porque inicialmente PR tiene mayor contenido de agua,

lo cual permite mayor absorción de energía ya que la molécula de agua tiene naturaleza polar [21].

3.2. Análisis estadístico

En la Tabla 2 se tienen los resultados del ANOVA (F-value) para los factores: potencia y tiempo de irradiación y su interacción. Los valores presentados corresponden a un p-value < 0,05 con lo cual todos los modelos presentados son significativos. Se muestra además el valor de la desviación estándar y el R^2 .

En el análisis ANOVA las variables de respuesta T_{prom} y T_{max} son las más significativas para la potencia de irradiación, y el tiempo es la variable más significativa para la pérdida de humedad. Se tiene mayor desviación estándar en la T_{max} comparado con T_{prom} . La interacción entre los dos factores es significativa para los modelos, excepto para P_{hum} en PR. Los resultados de R^2 en todos los modelos es superior al 80%, por tanto, los modelos son robustos. Por lo anterior, se puede afirmar que la variación de potencia es el factor más significativo en la T_{prom} y T_{max} alcanzadas durante el tratamiento con MW. Por esta razón, los análisis posteriores se presentan para ver los cambios más significativos entre la menor y mayor potencia (259-700 W) en el tiempo máximo de irradiación (5 min).

3.3. Composición química

La Tabla 3 muestra la variación en la composición química de PR y EG después del tratamiento con microondas. La diferencia entre la desviación estándar y la media aritmética es menor al 6%, excepto para los extraíbles en la condición de 700 W-5 min, que alcanza el 10.52%. La alineación de las moléculas polares causada por la irradiación con microondas fuerza a los dipolos de las moléculas a alinearse en el campo de radiación (polarizado). La reorganización de las moléculas polares produce un desplazamiento dentro del material que genera calor [22].

En la máxima condición (700 W-5 min), el contenido de celulosa disminuyó después del pretratamiento de 43.1% a 41.3% en PR y de 53.0% a 50.4% en EG. Esta variación es producto de colisiones moleculares debido a la polarización dieléctrica, lo que potencialmente descompone el contenido de celulosa [23]. Los grupos hidroxilo (-OH) de la estructura de la celulosa son de naturaleza polar. Por tanto, a medida que las MW atraviesan estas moléculas polares, las realinean y las hacen vibrar, aumentando su temperatura interna y produciendo desplazamiento [24]. En (700 W-5 min) el contenido de lignina disminuyó después del tratamiento, de 26.6% a 24.4% en PR y de 23.9% a 22.3% en EG. La temperatura de transición vítrea de la lignina (130–200 °C) suele ser más baja que la de la

celulosa (230–250 °C) y cercana a la de la hemicelulosa (160–200 °C) en estado seco [25]; por lo tanto, la disminución de la lignina puede estar asociada con el inicio de la descomposición al alcanzar su temperatura de transición vítrea. Además, bajo esta condición, se pueden generar nuevos extraíbles debido a la degradación de la lignina [26]. Es por esta razón de su incremento desde 1.8% a 7.2% en PR y desde 1.9% a 6.7% en EG.

3.4. Morfología superficial

La Figura 1 muestra la variación en la estructura superficial de PR y EG. Para ambas especies la superficie sin irradiación mantiene una forma de bloque con una estructura compacta. En 259 W – 5 min, la estructura se va agrietando. Finalmente, en 700 W – 5 min el agrietamiento de la estructura lignocelulósica es más pronunciado, incluso se pueden apreciar algunos fragmentos desprendidos de la superficie de la biomasa. Similares resultados observaron Liang et. al [27] en el aserrín de pino tratado con MW. Según Cantero et. al. [28] el calentamiento rápido y localizado de las microondas cambia la estructura de la biomasa, dejándola más porosa y con mayor área superficial.

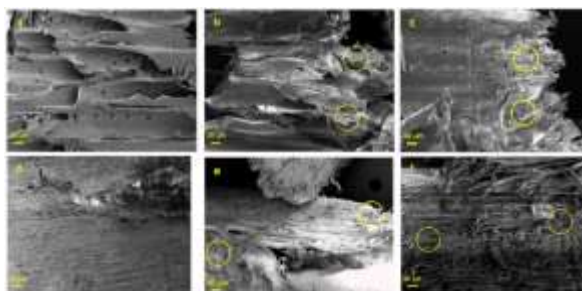


Figura 1. Imágenes SEM a) PR S/T, b) PR 259 W- 5 min, c) PR 700 W – 5 min, d) EG S/T, e) EG 259 W – 5 min, f) EG 700 W – 5 min. Fuente: [8]

3.5. Grupos funcionales

La Figura 2 muestra los espectros FTIR de PR y EG. El análisis de las bandas de absorción se realizó en el rango de longitudes de onda de 3600 cm^{-1} a 800 cm^{-1} , ya que este rango exhibe los mayores cambios después del pretratamiento con microondas (MW). La discusión se enfoca en dos sub-regiones: (i) de 3600 cm^{-1} a 2800 cm^{-1} y (ii) de 1800 cm^{-1} a 800 cm^{-1} . La primera incluye las bandas de estiramiento O-H y C-H a 3400 cm^{-1} y 2800 cm^{-1} , respectivamente. La segunda se asigna a diferentes vibraciones por estiramiento de la celulosa, hemicelulosa y lignina en el rango de 1800–800 cm^{-1} [29].

La región de estiramiento O-H (3400 cm^{-1}) muestra una banda ancha en las muestras de EG producto de variaciones en el enlace hidrógeno entre grupos

hidroxilo en los estados cristalinos de celulosa, hemicelulosa, lignina y agua [30]. Esta banda se debilita a medida que se incrementa el tratamiento de MW, ya que el -OH puede disociarse en forma de deshidratación de los anillos de celulosa. Este fenómeno de disociación se facilita a medida que la temperatura aumenta producto de la aplicación de MW [31]. Dos bandas en el rango de 2900–2800 cm^{-1} están compuestas por la superposición de las vibraciones de estiramiento asimétrico de -CH₂- (generalmente alrededor de 2935–2915 cm^{-1}) y -CH₃ (2970–2950 cm^{-1}) y por la superposición de las vibraciones de estiramiento simétrico de -CH₂- (2865–2845 cm^{-1}) y -CH₃ (2880–2860 cm^{-1}). El desplazamiento en la frecuencia de la banda máxima de CH se debe a cambios estructurales y de composición, así como cambios en el nivel de cristalinidad de la celulosa, que influye en las frecuencias de estiramiento C-H y O-H [32].

La banda alrededor de 1740 cm^{-1} se asigna a las vibraciones de estiramiento C=O de los grupos carboxilo y acetilo en la hemicelulosa. La intensidad de este pick se mantiene constante después del tratamiento, lo cual se ve reflejado en la mínima variación ocurrida en la hemicelulosa [33]. La banda alrededor de 1600 cm^{-1} se atribuye a la vibración de la lignina aromática. Se relaciona con la vibración de estiramiento del doble enlace carbono-carbono (C=C). La intensidad de esta banda tiende a debilitarse a medida que aumenta la temperatura de tratamiento, lo que sugiere una reducción en los enlaces C=C debido al incremento en la intensidad de MW [31]. La banda alrededor de 1514 cm^{-1} se asocia con la vibración del anillo de benceno (C=C) en la lignina. La disminución en la intensidad de esta señal es consecuencia de la ruptura de enlaces β -O-4 a medida que aumenta la potencia de las microondas [32]. La intensidad relativa de esta banda es mayor en PR que en EG, debido a su mayor contenido de lignina [34]. En la banda de 1460 cm^{-1} (deformaciones asimétricas C-H en la lignina), se observó una ligera disminución. Este cambio fue causado por la degradación de la lignina y la ruptura de grupos metoxilo durante el tratamiento con MW [32]. La banda de absorción en la región de 1372 cm^{-1} se asocia a la deformación de los enlaces C-H (CH₂) en la estructura de la celulosa [35]. La intensidad de estos picks disminuye a medida que aumenta el tratamiento con MW, lo que sugiere una reducción en el contenido de celulosa. La banda a 1340 cm^{-1} se asigna al anillo de guayacilo, una estructura presente en la lignina [34]. Estos picks se intensificaron con el aumento de la potencia de MW. Esto sugiere una ruptura de enlaces β -O-4 en la lignina.

La banda a 1278 cm^{-1} disminuye en intensidad y corresponde a la vibración de C-O en la lignina, y a la vibración de los grupos acetilo y carboxílico [36]. Las bandas en el área de 1190 a 950 cm^{-1} se atribuyen a las vibraciones C-O y C-H derivadas de enlaces alifáticos

CH₂ u OH fenólicos. La ligera disminución en la absorbancia en esta región indicó la degradación gradual de los grupos metilo e hidroxilo.

La banda a 1028 cm⁻¹ (grupos metoxilo en la lignina) disminuyó permanentemente a medida que se intensificó el tratamiento. Esta tendencia es atribuible a la desmetoxilación parcial de la lignina [35]. El peak alrededor de 890 cm⁻¹ se debe a los enlaces β-glucosídicos del anillo de glucosa dentro de la estructura de la celulosa [37].

Las bandas a 1430 cm⁻¹ y 890 cm⁻¹ representan la región de celulosa cristalina y amorfa (deformación C-H de la celulosa), respectivamente [32]. La intensidad de la señal se debilita a medida que aumenta la irradiación con microondas debido a la deshidratación de la celulosa, lo que indica que el pretratamiento con microondas favorece la reducción de la cristalinidad de la celulosa [38].

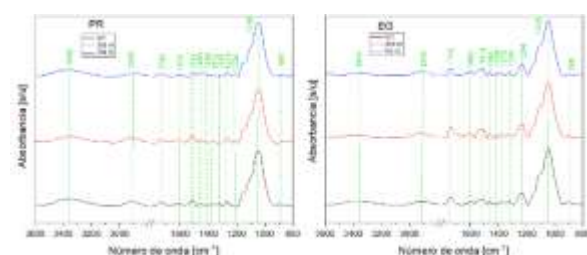


Figura 2. Espectros FTIR a) *Pinus radiata*, b) *Eucalyptus globulus*. Fuente: Elaboración propia

4. Conclusiones

En este trabajo se presentan los efectos del tratamiento con microondas en *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*. El tratamiento a 700 W-5 min logró una pérdida de masa de 11.06% y 5.17% alcanzando temperaturas máximas de 147.69 °C y 130.71 °C para *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, respectivamente. El tratamiento de microondas influyó en la disminución del contenido de celulosa debido a la vibración y realineación de los grupos (-OH) y en la reducción del contenido de lignina al alcanzar su temperatura de transición vítrea. La reorganización de los componentes generó nuevos extraíbles, es por ello de su incremento desde 1.8% a 7.2% en PR y desde 1.9% a 6.5% en EG.

Las microondas tuvieron su efecto positivo en el inicio de la descomposición estructural de la biomasa, lo cual pudo ser confirmado a través de la observación en el microscopio de barrido.

La comparación de las bandas FTIR durante el tratamiento con microondas en las muestras de biomasa permitieron confirmar la modificación de sus componentes.

El tratamiento con microondas en biomasa lignocelulósica promovió cambios en su composición química y estructura superficial que pueden ser posteriormente aprovechados en procesos de

transformación termoquímica para obtención de derivados con valor comercial e industrial.

5. Referencias

1. Xiu, S.; Shahbazi, A. Bio-Oil Production and Upgrading Research: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2012**, *16*, 4406–4414, doi:10.1016/j.rser.2012.04.028.
2. Ahmed, S.F.; Liu, G.; Mofijur, M.; Azad, A.K.; Hazrat, M.A.; Chu, Y.M. Physical and Hybrid Modelling Techniques for Earth-Air Heat Exchangers in Reducing Building Energy Consumption: Performance, Applications, Progress, and Challenges. *Solar Energy* **2021**, *216*, 274–294, doi:10.1016/j.solener.2021.01.022.
3. Azevedo, S.G.; Sequeira, T.; Santos, M.; Mendes, L. Biomass-Related Sustainability: A Review of the Literature and Interpretive Structural Modeling. *Energy* **2019**, *171*, 1107–1125, doi:10.1016/j.energy.2019.01.068.
4. Amit, K.; Nakachew, M.; Yilkal, B.; Mukesh, Y. A Review of Factors Affecting Enzymatic Hydrolysis of Pretreated Lignocellulosic Biomass. *Res J Chem Environ* **2018**, *22*, 62–67.
5. Venegas-Vásquez, D.; Orejuela-Escobar, L.; Valarezo-Garcés, A.; Guerrero, V.H.; Tipanluisa-Sarchi, L.; Alejandro-Martín, S. Biomass Valorization through Catalytic Pyrolysis Using Metal-Impregnated Natural Zeolites: From Waste to Resources. *Polymers (Basel)* **2024**, *16*, 1912, doi:10.3390/polym16131912.
6. Ahmed, S.F.; Mofijur, M.; Chowdhury, S.N.; Nahrin, M.; Rafa, N.; Chowdhury, A.T.; Nuzhat, S.; Ong, H.C. Pathways of Lignocellulosic Biomass Deconstruction for Biofuel and Value-Added Products Production. *Fuel* **2022**, *318*, 123618, doi:10.1016/j.fuel.2022.123618.
7. Cao, X.; Zhang, M.; Fang, Z.; Mujumdar, A.S.; Jiang, H.; Qian, H.; Ai, H. Drying Kinetics and Product Quality of Green Soybean under Different Microwave Drying Methods. *Drying Technology* **2017**, *35*, 240–248, doi:10.1080/07373937.2016.1170698.
8. Venegas-Vásquez, D.; Arteaga-Pérez, L.E.; Aguayo, M.G.; Romero-Carrillo, R.; Guerrero, V.H.; Tipanluisa-Sarchi, L.; Alejandro-Martín, S. Analytical Pyrolysis of Pinus Radiata and Eucalyptus Globulus: Effects of Microwave Pretreatment on Pyrolytic Vapours Composition. *Polymers (Basel)* **2023**, *15*, doi:10.3390/polym15183790.

9. Bhutto, A.W.; Qureshi, K.; Harijan, K.; Abro, R.; Abbas, T.; Bazmi, A.A.; Karim, S.; Yu, G. Insight into Progress in Pre-Treatment of Lignocellulosic Biomass. *Energy* **2017**, *122*, 724–745, doi:10.1016/j.energy.2017.01.005.
10. Aguilar-Reynosa, A.; Romaní, A.; Ma. Rodríguez-Jasso, R.; Aguilar, C.N.; Garrote, G.; Ruiz, H.A. Microwave Heating Processing as Alternative of Pretreatment in Second-Generation Biorefinery: An Overview. *Energy Convers Manag* **2017**, *136*, 50–65, doi:10.1016/j.enconman.2017.01.004.
11. Saini, A.; Aggarwal, N.K.; Sharma, A.; Yadav, A. Prospects for Irradiation in Cellulosic Ethanol Production. *Biotechnol Res Int* **2015**, *2015*, 1–13, doi:10.1155/2015/157139.
12. Hu, Z.; Wen, Z. Enhancing Enzymatic Digestibility of Switchgrass by Microwave-Assisted Alkali Pretreatment. *Biochem Eng J* **2008**, *38*, 369–378, doi:10.1016/j.bej.2007.08.001.
13. Bichot, A.; Lerosty, M.; Radoiu, M.; Méchin, V.; Bernet, N.; Delgenès, J.P.; García-Bernet, D. Decoupling Thermal and Non-Thermal Effects of the Microwaves for Lignocellulosic Biomass Pretreatment. *Energy Convers Manag* **2020**, *203*, 112220, doi:10.1016/j.enconman.2019.112220.
14. INFOR *Anuario Forestal 2019*; 2019;
15. Cruz, N.; Bustos, C.; Aguayo, M.G.; Cloutier, A.; Castillo, R. THM Densification of Wood. *Bioresources* **2018**, *13*, 2268–2282.
16. Aguayo, M.G.; Quintupill, L.; Castillo, R.; Baeza, J.; Freer, J.; Mendonça, R.T. Determination of Differences in Anatomical and Chemical Characteristics of Tension and Opposite Wood of 8-Year Old Eucalyptus Globulus. *Maderas: Ciencia y Tecnología* **2010**, *12*, 241–251, doi:10.4067/S0718-221X2010000300008.
17. Mendonça, R.T.; Jara, J.F.; González, V.; Elissetche, J.P.; Freer, J. Evaluation of the White-Rot Fungi *Ganoderma Australe* and *Ceriporiopsis Subvermispora* in Biotechnological Applications. *J Ind Microbiol Biotechnol* **2008**, *35*, 1323–1330, doi:10.1007/s10295-008-0414-x.
18. Wang, S.; Dai, G.; Yang, H.; Luo, Z. Lignocellulosic Biomass Pyrolysis Mechanism: A State-of-the-Art Review. *Prog Energy Combust Sci* **2017**, *62*, 33–86, doi:10.1016/j.peccs.2017.05.004.
19. Oliveira, M.E.C.; Franca, A.S. Microwave Heating of Foodstuffs. *J Food Eng* **2002**, *53*, 347–359.
20. Manickavasagan, A.; Jayas, D.S.; White, N.D.G. Non-Uniformity of Surface Temperatures of Grain after Microwave Treatment in an Industrial Microwave Dryer. *Drying Technology* **2006**, *24*, 1559–1567, doi:10.1080/07373930601030796.
21. Wang, X.; Chen, H.; Luo, K.; Shao, J.; Yang, H. The Influence of Microwave Drying on Biomass Pyrolysis. *Energy and Fuels* **2008**, *22*, 67–74, doi:10.1021/ef700300m.
22. Motasemi, F.; Afzal, M.T. A Review on the Microwave-Assisted Pyrolysis Technique. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2013**, *28*, 317–330, doi:10.1016/j.rser.2013.08.008.
23. Mankar, A.R.; Pandey, A.; Modak, A.; Pant, K.K. Pretreatment of Lignocellulosic Biomass: A Review on Recent Advances. *Bioresour Technol* **2021**, *334*, 125235, doi:10.1016/j.biortech.2021.125235.
24. Aguilar-Reynosa, A.; Romaní, A.; Ma. Rodríguez-Jasso, R.; Aguilar, C.N.; Garrote, G.; Ruiz, H.A. Microwave Heating Processing as Alternative of Pretreatment in Second-Generation Biorefinery: An Overview. *Energy Convers Manag* **2017**, *136*, 50–65, doi:10.1016/j.enconman.2017.01.004.
25. Tsubaki, S.; Azuma, J.-I. Application of Microwave Technology for Utilization of Recalcitrant Biomass. *Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials* **2011**, 697–722, doi:10.5772/14040.
26. Li, L.; Wang, X.; Wu, F. Chemical Analysis of Densification, Drying, and Heat Treatment of Scots Pine (*Pinus Sylvestris* L.) through a Hot-Pressing Process. *Bioresources* **2016**, *11*, 3856–3874.
27. Liang, J.; Xu, X.; Yu, Z.; Chen, L.; Liao, Y.; Ma, X. Effects of Microwave Pretreatment on Catalytic Fast Pyrolysis of Pine Sawdust. *Bioresour Technol* **2019**, *293*, 122080, doi:10.1016/j.biortech.2019.122080.
28. Cantero, D.; Jara, R.; Navarrete, A.; Pelaz, L.; Queiroz, J.; Rodríguez-Rojo, S.; Cocero, M.J. Pretreatment Processes of Biomass for Biorefineries: Current Status and Prospects. *Annu Rev Chem Biomol Eng* **2019**, *10*, 289–310, doi:10.1146/annurev-chembioeng-060718-030354.
29. Henrique, P.; Pereira, F.; Fernandes, L.; Benini, K.; Pereira, B.; Ornaghi, H.; Cioo, M.O. Different Sequential Chemical Treatments Used to Obtain Bleached Cellulose from Orange Bagasse. *Journal of Natural Fibers* **2022**, *19*, 12849–12861, doi:10.1080/15440478.2022.2077506.
30. Carrillo, I.; Mendonça, R.T.; Ago, M.; Rojas, O.J. Comparative Study of Cellulosic Components Isolated from Different

- Eucalyptus Species. *Cellulose* **2018**, 25, 1011–1029, doi:10.1007/s10570-018-1653-2.
31. Dai, L.; He, C.; Wang, Y.; Liu, Y.; Yu, Z.; Zhou, Y.; Fan, L.; Duan, D.; Ruan, R. Comparative Study on Microwave and Conventional Hydrothermal Pretreatment of Bamboo Sawdust: Hydrochar Properties and Its Pyrolysis Behaviors. *Energy Convers Manag* **2017**, 146, 1–7, doi:10.1016/j.enconman.2017.05.007.
32. Esteves, B.; Marques, A.V.; Domingos, I.; Pereira, H. Chemical Changes of Heat Treated Pine and Eucalypt Wood Monitored by F_{IR}. *Maderas: Ciencia y Tecnologia* **2013**, 15, 245–258, doi:10.4067/S0718-221X2013005000020.
33. Gu, X.; Ma, X.; Li, L.; Liu, C.; Cheng, K.; Li, Z. Pyrolysis of Poplar Wood Sawdust by TG-FTIR and Py-GC/MS. *J Anal Appl Pyrolysis* **2013**, 102, 16–23, doi:10.1016/j.jaap.2013.04.009.
34. Pandey, K.K. *A Study of Chemical Structure of Soft and Hardwood and Wood Polymers by FTIR Spectroscopy*; 1969; Vol. 71;.
35. Kubovský, I.; Kačíková, D.; Kačík, F. Structural Changes of Oak Wood Main Components Caused by Thermal Modification. *Polymers (Basel)* **2020**, 12, doi:10.3390/polym12020485.
36. Dubey, M. Improvements in Stability, Durability and Mechanical Properties of Radiata Pine Wood after Heat-Treatment in a Vegetable Oil, 2010.
37. Wang, Z.; Yao, Z.J.; Zhou, J.; Zhang, Y. Reuse of Waste Cotton Cloth for the Extraction of Cellulose Nanocrystals. *Carbohydr Polym* **2017**, 157, 945–952, doi:10.1016/j.carbpol.2016.10.044.
38. Tajmiriahi, M.; Karimi, K.; Kumar, R. Effects of Pinewood Extractives on Bioconversion of Pinewood. *Fuel* **2021**, 283, 119302, doi:10.1016/j.fuel.2020.119302.

Tabla 1. Variables del tratamiento con microondas.

Biomasa		259 W			462 W			595 W			700 W		
	Tiempo (min)	T _{prom} (°C)	T _{prom} (°C)	P _{hum} (%)	T _{prom} (°C)	T _{prom} (°C)	P _{hum} (%)	T _{prom} (°C)	T _{prom} (°C)	P _{hum} (%)	T _{prom} (°C)	T _{prom} (°C)	P _{hum} (%)
PR	1	54.7	64.4	1.44	78.3	86.0	3.76	77.7	84.8	4.23	80.6	93.5	5.48
	2	63.0	66.1	4.01	80.0	86.3	5.38	84.6	92.0	6.25	87.5	103.6	7.31
	3	65.5	69.6	6.24	88.6	96.8	7.86	95.3	104.2	8.97	103.5	120.3	10.04
	5	73.4	78.1	7.61	94.6	106.8	8.26	102.9	115.7	10.15	115.2	147.7	11.06
EG	1	42.8	46.1	0.69	57.8	65.7	1.10	72.6	80.0	1.33	72.4	79.2	1.80
	2	50.4	57.0	1.51	68.7	75.9	2.14	78.4	84.9	3.00	94.8	106.6	3.47
	3	1.0	57.7	2.63	78.9	86.0	3.23	83.7	97.9	4.12	99.8	118.0	4.58
	5	54.7	59.7	3.12	90.3	106.6	3.72	97.5	109.1	4.70	102.0	130.7	5.17

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. ANOVA para PR y EG.

	F-value PR			F-value EG		
	T _{prom} (°C)	T _{prom} (°C)	P _{hum} (%)	T _{prom} (°C)	T _{prom} (°C)	P _{hum} (%)
Modelo	53.64	53.92	177.19	93.47	106.13	350.33
Potencia	166.48	169.46	98.75	337.25	355.44	434.03
Tiempo	91.10	79.78	255.63	108.74	142.25	1287.18
Potencia-tiempo	3.54	6.79	NA	7.13	10.99	10.14
Desviación estándar	3.78	5.14	0.54	3.45	4.13	0.13
R ²	0.96	0.96	0.96	0.97	0.98	0.99

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Composición química de la biomasa lignocelulósica.

Biomasa	Tratamiento	Hemicelulosa	Celulosa	Lignina	Extraíbles
PR	S/T	28.6 ± 0.8	43.1 ± 0.1	26.6 ± 1.6	1.8 ± 0.3
	259 W-5 min	29.3 ± 1.5	41.0 ± 0.4	24.5 ± 1.3	3.0 ± 0.0
	700 W-5 min	28.8 ± 0.7	41.3 ± 0.4	24.6 ± 1.5	7.2 ± 0.1
EG	S/T	26.3 ± 0.3	53.0 ± 0.2	23.9 ± 2.1	1.9 ± 0.0
	259 W-5 min	28.0 ± 0.5	50.0 ± 0.3	22.8 ± 1.7	3.8 ± 0.4
	700 W-5 min	31.2 ± 0.2	50.4 ± 0.2	22.3 ± 0.5	6.5 ± 0.2

Fuente:[8].