

Caracterización dendroenergética de la madera y el carbón de diferentes materiales genéticos del género *Eucalyptus*

Dendroenergetic characterization of wood and charcoal from different genetic materials of the genus *Eucalyptus*

Antonio José Barotto*

Cátedra de Industrias de Transformación Química, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), La Plata, Buenos Aires, Argentina.
Laboratorio de Investigaciones en Maderas (LIMAD), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

Juan Marcelo Gauna

Cátedra de Industrias de Transformación Química, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), La Plata, Buenos Aires, Argentina.
Instituto de Fisiología Vegetal (INFIVE). Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales – Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP – CONICET, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

María Laura Tonello

Cátedra de Industrias de Transformación Química, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), La Plata, Buenos Aires, Argentina
Laboratorio de Investigaciones en Maderas (LIMAD), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, La Plata, Buenos Aires, Argentina

Leonel Harrand

Grupo de Mejoramiento Genético Forestal, Estación Experimental Agropecuaria, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (EEA INTA) Concordia, Estación Yuquerí, Concordia, Entre Ríos, Argentina

Andrés Ciro Mastrandrea

Grupo de Tecnología de la Madera, Estación Experimental Agropecuaria, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (EEA INTA) Concordia, Estación Yuquerí, Concordia, Entre Ríos, Argentina

Matías Martínez

Grupo de Tecnología de la Madera, Estación Experimental Agropecuaria, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (EEA INTA) Concordia, Estación Yuquerí, Concordia, Entre Ríos, Argentina

Gustavo Pedro Javier Oberschelp

Grupo de Mejoramiento Genético Forestal, Estación Experimental Agropecuaria, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (EEA INTA) Concordia, Estación Yuquerí, Concordia, Entre Ríos, Argentina

Natalia Raffaeli

Cátedra de Industrias de Transformación Química, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), La Plata, Buenos Aires, Argentina.
Laboratorio de Investigaciones en Maderas (LIMAD), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, La Plata, Buenos Aires, Argentina

Revista de la Facultad de Agronomía

Universidad Nacional de La Plata, Argentina

ISSN: 1669-9513

Periodicidad: Continua

vol. 122, 2023

redaccion.revista@agro.unlp.edu.ar

Recepción: 2 junio 2022

Aprobación: 24 noviembre 2022

Publicación: Febrero 2024

URL: <http://portal.amelica>

DOI: <https://doi.org/10.24215/16699513e129>

Autor de correspondencia: jose.barotto@agro.unlp.edu.ar



Resumen

En un contexto de cambio climático y mayor demanda de energía, la biomasa, en particular la leña y el carbón vegetal, constituye una alternativa valiosa para el reemplazo de combustibles fósiles, con un mejor balance de emisiones gaseosas y un gran potencial en nuestro país. En particular, el género *Eucalyptus* puede ser muy relevante en este proceso, ya que constituye el segundo género forestal a nivel nacional, siendo el noreste de Entre Ríos uno de sus mayores núcleos productivos. Una correcta caracterización de los materiales disponibles en nuestro país contribuirá a su valorización para diversos fines, entre los que se destaca el dendroenergético. El objetivo del presente trabajo fue caracterizar y comparar diversas propiedades dendroenergéticas de la madera del fuste y el carbón de diferentes materiales del género *Eucalyptus*, incluyendo especies, híbridos y clones de siete años de edad. Con respecto a la madera, los materiales testeados se ubicaron dentro del rango de maderas livianas y semipesadas, cuyas características analizadas (contenido de cenizas, poder calorífico, rendimiento de carbonización) presentaron órdenes de magnitud similares a los reportados por trabajos referentes a este género botánico. En cuanto al carbón, se encontraron resultados contrastantes en función de la variable considerada (densidad aparente relativa, cenizas, volátiles, carbono fijo y poder calorífico). En función de ello, se remarca la necesidad de continuar con los análisis, empleando diferentes protocolos, a fin de corroborar los valores obtenidos para estas características, las cuales resultan de gran importancia para establecer el potencial dendroenergético para su uso doméstico e industrial.

Palabras clave: poder calorífico superior, rendimiento de carbonización, densidad de la madera, carbono fijo, volátiles

Abstract

In a context of climate change and increased energy demand, biomass, particularly firewood and charcoal, becomes a valuable alternative for the substitution of fossil fuels, with a better balance of gaseous emissions and great potential in our country. In particular, the *Eucalyptus* genus might be very relevant in this process, since it constitutes the second forestry genus at the national level, with the northeast of Entre Ríos being one of its largest production centers. A correct characterization of the materials available in our country, and in this area in particular, will contribute to their valorization for various purposes, among which dendroenergy stands out. The objective of this work was to characterize and compare various dendroenergetic properties of stem wood and charcoal from different materials of the *Eucalyptus* genus, including species, hybrids and clones of 7 years old. Regarding wood, the tested materials were located within the range of light and medium-heavy woods, whose analyzed characteristics (ash content, calorific value and charcoal yield) presented orders of magnitude similar to those reported by works referring to this botanical genus. Regarding charcoal, contrasting results were found depending on the considered variable (apparent relative density, ash content, volatile matter, fixed carbon and calorific value). Based on this, further research is needed, using different protocols, in order to corroborate the values obtained for these characteristics, which are of great importance to establish the dendroenergetic potential for domestic and industrial use.

Keywords: higher heating value, charcoal yield, wood density, fixed carbon, volatiles

INTRODUCCIÓN

A partir de la crisis del petróleo en los años '70 y, particularmente, en el contexto actual de cambio climático y aumento de la demanda energética, la valorización de la biomasa ha cobrado cada vez mayor importancia en el escenario energético mundial (Resquin et al., 2020). Frente a la necesidad de reemplazar fuentes de energía fósiles por aquellas provenientes de recursos renovables, el interés por la madera y el carbón vegetal ha ido acrecentándose a nivel global, ya que permite reducir la emisión de gases de efecto invernadero. Este proceso de recambio ocurre en todo el mundo, con diferente intensidad, siendo liderado por los países más desarrollados, seguido por aquellos en vías de desarrollo, los cuales presentan una gran disponibilidad de fuentes de energía renovable, en particular bosques y forestaciones. A modo de ejemplo, las ventajas que presenta el carbón vegetal lo han convertido en una alternativa al carbón mineral y al coque en procesos industriales de reducción de dióxido metálico (Elyounssi et al., 2012). En Latinoamérica, el principal referente en esta materia es Brasil, cuya utilización de fuentes de energía renovable representa el 45,2% de su matriz energética, a la cual la leña y el carbón aportan en conjunto el 8,4% (Protásio et al., 2021). Esta biomasa leñosa proviene principalmente de plantaciones, siendo el principal productor mundial de carbón para fines industriales, donde se destaca la producción siderúrgica que consume aproximadamente 5,1 millones de m³ (Crisóstomo, 2021).

La matriz energética argentina depende, en gran parte, de combustibles fósiles tales como el petróleo, el carbón mineral y el gas natural, representando en conjunto el 87,5% de la oferta interna de energía (Mastronardi et al., 2019). Paralelamente, el país presenta una gran disponibilidad de recursos biomásicos, relativamente distribuidos en el territorio nacional (en particular, leña y carbón vegetal), que podrían contribuir a la generación de energía renovable, diversificando dicha matriz y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero (Denaday et al., 2020). Los usuarios de este tipo de combustibles son heterogéneos, desde grandes consumidores industriales para la producción de energía, hasta consumidores comerciales y residenciales, que los utilizan para cocinar o calefaccionar, siendo estos últimos los principales usos de la biomasa como fuente de energía en países en vías de desarrollo. Respecto a la leña, esta proviene mayoritariamente de aprovechamientos de bosque nativo, principalmente de las provincias del norte (en especial, de Chaco, Santiago del Estero, Formosa y Salta), y su producción a nivel nacional se estima en aproximadamente 1.000.000 de toneladas por año (Denaday et al., 2020). Al igual que la leña, la producción de carbón vegetal también se realiza en base a madera proveniente de bosque nativo de la zona norte del país, siendo elaborado en hornos de ladrillo del tipo "media naranja". De acuerdo con las últimas estimaciones, la producción anual de carbón a nivel nacional rondaría las 230.000 toneladas (Denaday et al., 2020). Ambas producciones, generalmente, cuentan con poco o nulo control respecto a la homogeneidad, sustentabilidad y legalidad de la materia prima.

El rendimiento de la carbonización está principal y directamente influenciado por las propiedades químicas, físicas, mecánicas y anatómicas de la madera utilizada para su elaboración, y por las condiciones a las cuales se produce el proceso, principalmente la temperatura, velocidad de calentamiento y tiempos de residencia, así como la atmósfera de reacción (Pereira et al., 2012). Actualmente, la producción de carbón vegetal, en diferentes tipos de horno, a presión atmosférica, rara vez alcanza un rendimiento superior al 30%, mientras que, en laboratorio o planta piloto, muchas veces en sistemas presurizados, puede llegar al 40% (Elyounssi et al., 2012).

Si consideramos la disponibilidad de madera, tanto para su uso directo como para la producción de carbón, es fundamental hablar del género *Eucalyptus* L'Hér., que comprende aproximadamente 700 especies originarias de Oceanía, y constituye uno de los principales componentes de la actividad forestal mundial, con más de 20 millones de hectáreas plantadas en el mundo, siendo el segundo género en importancia detrás de *Pinus* (Carle et al., 2002). A esto se le suman las formaciones naturales que integran los bosques nativos de su zona original de distribución, cuya superficie representaría alrededor de 85 millones de hectáreas a nivel mundial (Jakobsen, 2018). Actualmente, el cultivo de eucaliptos en Argentina ocupa un lugar de preponderancia, ubicándose en el segundo lugar en importancia, detrás del cultivo de pinos, con cerca del 25% de la superficie forestada a nivel nacional (Gorzycki, 2019). Las estimaciones disponibles más recientes, indican que hay aproximadamente 300.000 ha cultivadas con diferentes especies del género *Eucalyptus*, ubicadas principalmente en las provincias mesopotámicas (Entre Ríos, Corrientes y Misiones), que concentran casi el 90% de la superficie implantada del país (Gorzycki, 2019). Esta es, además, la región con mayor grado de industrialización y, dentro de ella, la zona noreste de Entre Ríos es considerada el mayor núcleo de eucaliptos del país.

Ante la necesidad de preservar los recursos provenientes de los bosques nativos o destinarlos a usos de mayor sustentabilidad, una posibilidad consiste en reemplazar la materia prima proveniente

de los mismos por otra que presente características similares o superiores. Para ello, resulta necesario evaluar las características de los materiales disponibles en nuestro país, con el fin de analizar la factibilidad de suplir esta demanda, a través de la selección, propagación e implantación de genotipos seleccionados para destinos productivos específicos, entre los cuales puede mencionarse el dendroenergético. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, el objetivo de este trabajo fue caracterizar las propiedades dendroenergéticas de la madera y el carbón de diferentes materiales del género *Eucalyptus*, incluyendo diferentes especies, híbridos y clones.

MATERIALES Y MÉTODOS

SITIO Y MATERIAL VEGETAL

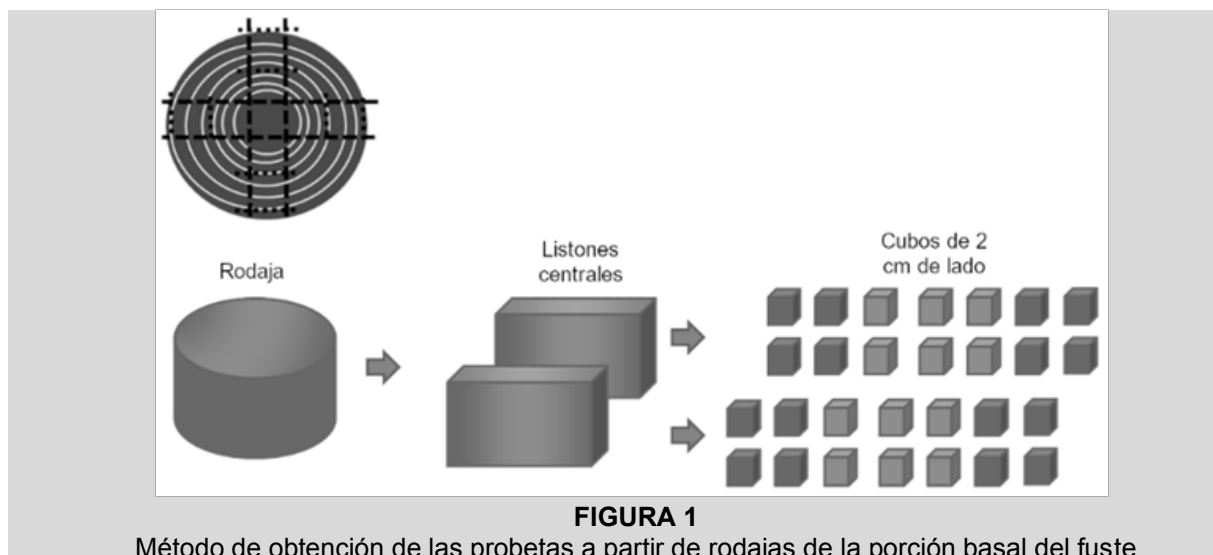
Este trabajo se desarrolló en base a dos lotes ubicados en la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Concordia del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), ubicada en Estación Yuquerí (31° 22' 28" S, 58° 07' 01" O), en cercanías de la localidad de Concordia, Entre Ríos. Los suelos sobre los que se ubicaron estos ensayos corresponden a la serie Yuquerí Grande (ER2-46C), caracterizados por ser suelos muy arenosos (> 80%), color rojizo-amarillento, depositados sobre materiales más arcillosos ubicados a una profundidad superior a 120 cm. En cuanto al clima, la temperatura media se ubica cercana a los 19 °C, con una temperatura máxima media del mes más cálido de 31 °C, y una mínima media del mes más frío ubicada alrededor de 8,7 °C. Las precipitaciones medias anuales rondan los 1.350 mm, repartidas a lo largo del año, con un máximo en abril y un mínimo en julio.

Los dos lotes evaluados fueron instalados en 2014, con un distanciamiento de 3 metros entre líneas y entre plantas, y se encuentran distanciados entre ellos por poco más de 600 metros en línea recta. A pesar de las similitudes mencionadas, estos lotes presentaron diferencias en cuanto a los materiales ensayados en cada uno. Uno de ellos, corresponde a un lote demostrativo de clones, de donde se obtuvieron los materiales GC INTA 8 (híbrido *E. grandis* x *E. camaldulensis*; abreviado GC8); GC INTA 9 (GC9); GC INTA 12 (GC12); GC INTA 24 (GC24); GC INTA 27 (GC27); GT INTA 31 (híbrido *E. grandis* x *E. tereticornis*; de aquí en adelante GT31); EG INTA 36 (EG36) y las especies puras *E. grandis* (EG), *E. dunnii* (ED) y *E. benthamii* (BE). El otro corresponde a un lote demostrativo de especies, de donde se obtuvieron los materiales *E. cloeziana* (CL), *E. camaldulensis* (EC) y *E. tereticornis* (ET). Esto totaliza 13 materiales evaluados entre especies y clones de híbridos y especies.

TOMA DE MUESTRAS Y ACONDICIONAMIENTO

El apeo de los árboles se realizó en junio de 2021, cuando los mismos contaban con aproximadamente 7 años, todos ellos con un diámetro (DAP) entre 10 y 20 cm. Se voltearon 4-5 árboles de cada material genético y de cada uno se extrajo una porción basal de 1,5 metros de longitud, de la cual se obtuvieron entre 2 y 4 rodajas de su punta superior para la elaboración de las probetas (la porción basal se conservó para posteriores análisis y como respaldo). De cada rodaja obtenida se efectuaron 2 cortes transversales (en cruz, Figura 1), obteniendo cuatro listones que luego se recortaron para obtener cubos de aproximadamente 2 cm de lado, utilizados para las evaluaciones de laboratorio. La zona central de la rodaja se descartó por poseer médula y posteriormente los cubos fueron almacenados sin distinguir aquellos provenientes de la albura y el duramen.

En agosto del mismo año se realizó el envío de las probetas para la realización de los ensayos de aptitud dendroenergética (apartado *Determinaciones*), llevados a cabo a partir de ese mismo mes por la cátedra de Industrias de Transformación Química de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata. Las muestras fueron enviadas en bolsas herméticas, una por cada material (aproximadamente 1 kg de cada una). Además, una porción de aproximadamente 50 gramos de cada material fue molida en partículas menores a 2 mm mediante un molino Wiley (Thomas-Wiley Laboratory Mill-Model 4) para evaluar el poder calorífico superior. Este análisis fue llevado a cabo en el Laboratorio de Calidad de Alimentos, Suelos y Agua de INTA Pergamino.



DETERMINACIONES

En madera

Se determinó la densidad básica (g/cm^3), calculada como el cociente entre el peso seco y el volumen verde, en 4 cubos de cada material. Para ello, primero se sumergieron los cubos en agua durante un lapso de 3 días para lograr una completa saturación y luego se le determinó el volumen por inmersión. Esos cubos luego fueron llevados a estufa, a $105\text{ }^\circ\text{C}$, hasta peso constante.

$$\text{Densidad básica (g/cm}^3\text{)} = \text{peso seco} / \text{volumen verde}$$

La determinación de la proporción de cenizas (%) se realizó en una mufla eléctrica regulable en laboratorio (Marca Indef, modelo 134, de fabricación nacional), según el siguiente protocolo: ascenso de temperatura a una rampa de $8\text{ }^\circ\text{C/min}$ hasta alcanzar $900\text{ }^\circ\text{C}$, permanencia a esa temperatura por 2 horas, y descenso natural hasta alcanzar temperatura ambiente (protocolo propio, derivado de la norma ASTM D1762 "Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal"). Al término del procedimiento, las muestras se dejaron estabilizar en un desecador y luego se efectuaron las mediciones gravimétricas. Se trabajó con alícuotas de 10 a 15 gramos por repetición, con tres repeticiones por material, colocando los cubos de madera sólida en crisoles de porcelana sin tapa. La proporción de cenizas se calculó como:

$$\text{Proporción de cenizas (\%)} = \text{peso cenizas} / \text{peso madera} * 100$$

Para la cuantificación del rendimiento de carbonización (%), la madera fue sometida a un proceso de pirólisis en laboratorio bajo condiciones controladas, utilizando una mufla eléctrica. Se trabajó con alícuotas entre 30 y 50 gramos, con dos repeticiones por cada material, colocadas en crisoles de porcelana con tapa. Se siguió un protocolo propio derivado de las consideraciones sugeridas por FAO en su manual de carbonización (FAO, 1983), el cual consistió en un ascenso de temperatura a una rampa de $1\text{ }^\circ\text{C/min}$ hasta alcanzar los $500\text{ }^\circ\text{C}$, permanencia a esa temperatura por 4 horas y descenso natural hasta alcanzar temperatura ambiente. El rendimiento de carbonización se calculó como:

$$\text{Rendimiento de carbonización (\%)} = \text{peso carbón} / \text{peso madera} * 100$$

Como se mencionó anteriormente, la determinación del poder calorífico superior de la madera (kcal/kg) fue llevada a cabo en el Laboratorio de Calidad de Alimentos, Suelos y Agua de INTA Pergamino. Estos análisis fueron realizados mediante la utilización de una bomba calorimétrica siguiendo la norma europea Fpr EN 14918 ("Solid biofuels - Determination of calorific value"). A partir de los valores medios para cada material, se determinó la densidad energética (Mcal/m^3) de la siguiente manera:

$$\text{Densidad energética (Mcal/m}^3\text{)} = \text{Poder calorífico superior} * \text{Densidad básica}$$

A fines comparativos, los resultados correspondientes a proporción de cenizas, rendimiento de carbonización y poder calorífico superior están referidos a peso seco de madera. Para ello, previo a cada determinación, se cuantificó el contenido de humedad de cada material de la siguiente manera:

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = (\text{peso húmedo} - \text{peso seco}) / \text{peso seco} * 100$$

En carbón

Con el carbón resultante de la pirólisis en mufla se efectuaron diversas determinaciones, entre ellas la densidad aparente relativa (g/cm^3), para la cual se trabajó con el carbón en forma de cubos (tal como resultaron de la pirólisis de la madera en la mufla). Esta fue calculada en base a la norma brasilera NBR 9165/85, siguiendo la siguiente fórmula:

$$\text{Densidad aparente relativa (g/cm}^3\text{)} = \text{peso seco} / \text{volumen húmedo}$$

Para la cuantificación del volumen húmedo, se sumergieron los cubos de carbón durante 3 días en agua hasta lograr una completa saturación y luego se determinó por desplazamiento de fluidos. El peso seco es el obtenido luego de secar los carbones en estufa a $105\text{ }^\circ\text{C}$ hasta peso constante.

Para las demás determinaciones sobre carbón, como primer paso, se efectuó una molienda en mortero para cada material, de manera de reducir y homogeneizar su tamaño. Luego, se llevaron a cabo las diferentes determinaciones sobre estas muestras molidas. Al igual que para madera, una de las determinaciones fue la de proporción de cenizas (%), para la cual se tomaron alícuotas de aproximadamente 2 gramos de carbón molido, se colocaron en crisoles sin tapa y se llevaron a mufla, utilizando el mismo protocolo que en el caso de madera. Se realizaron 3 repeticiones por cada material.

$$\text{Proporción de cenizas (\%)} = \text{peso cenizas} / \text{peso carbón} * 100$$

Se determinó la proporción de volátiles (%) de las muestras de carbón, empleando mufla eléctrica y siguiendo un protocolo propio: ascenso de temperatura a una rampa de $8\text{ }^\circ\text{C/min}$ hasta alcanzar los $600\text{ }^\circ\text{C}$, permanencia a esta temperatura por 60 minutos y descenso natural hasta alcanzar temperatura ambiente. Se trabajó con alícuotas de 1 gramo por muestra de carbón molido, con triplicados por cada material, y se emplearon crisoles de porcelana con tapa. Su valor se obtuvo mediante el siguiente cálculo:

$$\text{Proporción de volátiles (\%)} = \frac{\text{peso con volátiles} - \text{peso sin volátiles}}{\text{peso con volátiles}} * 100$$

Tal como en el caso de madera, los cálculos de proporción de cenizas y volátiles se referenciaron a peso seco del carbón, para lo cual fue necesario tomar alícuotas de 2 gramos por cada material, se llevaron a estufa a $105\text{ }^\circ\text{C}$ durante 72 horas y luego se pesaron, calculándose el contenido de humedad del carbón de la siguiente manera:

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = (\text{peso húmedo} - \text{peso seco}) / \text{peso seco} * 100$$

El contenido de humedad del carbón fue estimado durante el desarrollo de todas las determinaciones, las cuales se desarrollaron en el lapso de un mes, estableciéndose al final de dicho período el contenido de humedad de equilibrio para cada material. La proporción de cenizas y volátiles y el contenido de humedad de los carbones se emplearon para el cálculo del carbono fijo (%) y el rendimiento de carbono fijo (%), a través de los siguientes cálculos:

$$\text{Carbono fijo (\%)} = 100 - (\text{Cont. Humedad} + \text{Prop. volátiles} + \text{Prop. cenizas})$$

$$\text{Rendimiento de carbono fijo (\%)} = \text{carbono fijo} * \text{rendimiento de carbonización}$$

De manera análoga a la madera, la determinación del poder calorífico superior del carbón (kcal/kg) fue llevada a cabo en el Laboratorio de Calidad de Alimentos, Suelos y Agua de INTA Pergamino, en bomba calorimétrica, siguiendo la misma norma. Para ello se envió desde La Plata al mencionado laboratorio una alícuota de cada material carbonizado y molido en mortero. La densidad energética (cal/cm^3) fue calculada como:

$$\text{Densidad energética (Mcal/m}^3\text{)} = \text{Poder calorífico superior} * \text{Densidad aparente relativa}$$

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Una vez realizadas todas las determinaciones, para aquellas en las cuales se realizaron repeticiones (Tabla 1), se utilizó la prueba de análisis de la varianza (ANOVA) y la prueba de comparaciones múltiples LSD de Fisher para evaluar la existencia o no de diferencias significativas entre los materiales, para un nivel de probabilidad del 5%. Para aquellas características evaluadas a partir de valores únicos (poder calorífico y densidad energética), solo se estableció un ordenamiento de los materiales en función de esos valores.

RESULTADOS

En la Tabla 1 se observan los resultados para las variables dendroenergéticas analizadas en madera de los 13 materiales de *Eucalyptus* evaluados. Por otro lado, en cuanto a las propiedades del carbón elaborado con estos materiales, los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 2.

TABLA 1

Características dendroenergéticas analizadas en muestras de madera correspondientes a 13 materiales del género *Eucalyptus*. Las variables se encuentran ordenadas en la tabla en función de la densidad básica de la madera. Para las variables densidad básica, proporción de cenizas y rendimiento de carbonización, se visualiza de izquierda a derecha, el número de repeticiones (n), valor observado y grupo asignado en función de su clasificación mediante el test de comparaciones múltiples LSD de Fisher, aplicado sobre los resultados del análisis de varianza (ANOVA), para cada variable. Para el resto de las características analizadas, los números precedidos por asteriscos corresponden al ordenamiento relativo, en orden descendente, del material respecto a esa característica.

Material	Densidad básica (g/cm ³)	Proporción de cenizas (%)	Rendimiento de carbonización (%)	Poder calorífico superior (kcal/kg)	Densidad energética (Mcal/m ³)
ET	4 0,56 a	2 0,49 fg	2 32,3 ab	4.666 *4	2.613 *1
CL	4 0,54 ab	3 0,06 a	2 33,1 ab	4.651 *7	2.525 *2
GT31	4 0,52 bc	3 0,18 abc	2 31,0 c	4.682 *1	2.421 *3
EC	4 0,52 bc	2 0,40 efg	2 31,5 b	4.636 *8	2.388 *4
GC27	4 0,48 cd	2 0,24 bcde	2 27,1 de	4.653 *6	2.252 *5
GC8	4 0,47 d	3 0,19 abcd	2 27,0 de	4.673 *3	2.196 *6
GC9	4 0,46 d	3 0,34 cdef	2 30,9 d	4.628 *10	2.138 *7
GC24	4 0,46 d	2 0,31 cdef	2 23,8 e	4.655 *5	2.123 *9
BE	4 0,45 d	2 0,33 cdef	2 34,6 a	4.682 *1	2.126 *8
ED	4 0,45 d	2 0,60 g	2 26,3 de	4.618 *11	2.073 *10
GC12	4 0,45 d	3 0,33 def	2 26,9 de	4.629 *9	2.069 *11
EG	4 0,38 e	2 0,30 cdef	2 33,0 c	4.611 *12	1.738 *12
EG36	4 0,38 e	2 0,07 ab	2 25,0 e	4.566 *13	1.731 *13

TABLA 2

Características dendroenergéticas analizadas en muestras de carbón correspondientes a 13 materiales del género *Eucalyptus*. Las variables se encuentran ordenadas en función de la densidad aparente relativa del carbón. Para las variables densidad aparente relativa, proporción de cenizas y proporción de volátiles, se visualiza de izquierda a derecha, el número de repeticiones (n), valor observado y grupo asignado en función de su clasificación mediante el test de comparaciones múltiples LSD de Fisher, aplicado sobre los resultados del análisis de varianza (ANOVA), para cada variable. Para el resto de las características analizadas, los números precedidos por asteriscos corresponden al ordenamiento relativo, en orden descendente, del material respecto a esa característica.

Material	Densidad aparente relativa (g/cm ³)	Proporción de cenizas (%)	Proporción de volátiles (%)	Carbono fijo (%)	Rendimiento de carbono fijo (%)	Humedad de equilibrio (%)	Poder calorífico superior (kcal/kg)	Densidad energética (Mcal/m ³)
GC9	2 0,431 a	2 1,10 de	4 41,2 a	57,8 *1	18,1 *1	8,57 *11	7.298 *2	3.145 *1
EC	2 0,424 a	2 1,40 g	4 48,3 ab	50,3 *10	16,1 *7	8,93 *10	7.171 *6	3.041 *2
ED	2 0,408 a	3 2,00 h	3 55,3 b	42,7 *13	11,5 *13	10,04 *2	7.045 *9	2.874 *3
GC8	2 0,404 a	3 0,80 c	3 44,2 ab	55,0 *2	15,0 *8	9,71 *6	7.278 *3	2.940 *4
GC27	2 0,403 a	3 0,80 c	4 46,1 ab	53,1 *6	14,5 *10	9,54 *8	7.180 *5	2.894 *5
ET	2 0,398 a	2 1,50 g	4 45,9 ab	52,6 *8	17,3 *5	7,29 *13	7.329 *1	2.917 *6
BE	2 0,374 ab	3 1,20 ef	4 49,2 ab	49,7 *11	17,4 *4	9,87 *5	6.952 *12	2.600 *7
GC12	2 0,364 ab	2 1,30 f	3 45,2 ab	53,5 *5	14,6 *9	9,93 *4	7.166 *7	2.608 *8
CL	2 0,362 ab	3 0,30 a	4 45,9 ab	53,8 *3	17,8 *2	8,20 *12	7.266 *4	2.630 *9
GC24	2 0,358 ab	3 1,10 ef	3 49,7 ab	49,2 *12	11,9 *12	9,58 *7	7.009 *10	2.509 *10
GT31	2 0,321 bc	3 0,60 b	3 45,6 ab	53,8 *3	16,8 *6	9,15 *9	7.057 *8	2.265 *11
EG36	2 0,283 c	3 0,70 c	3 47,4 ab	51,9 *9	13,0 *11	10,50 *1	6.945 *13	1.965 *12
EG	2 0,280 c	3 1,00 d	3 46,0 ab	53,0 *7	17,6 *3	10,00 *3	6.993 *11	1.958 *13

DISCUSIÓN

CARACTERÍSTICAS DENDROENERGÉTICAS DE LA MADERA

En cuanto a la densidad de la madera, esta osciló entre 0,38 y 0,56 g/cm³, lo cual ubica a estos materiales dentro del rango de maderas livianas (0,35 - 0,50 g/cm³) y semipesadas (0,5 - 0,75 g/cm³) (Mastrandrea, 2020). En este último grupo se ubicarían ET, CL, GT31 y EC, mientras que las maderas más livianas corresponderían a EG y EG36, los cuales se separaron estadísticamente del resto de los materiales, conformados por los híbridos GC, ED y BE. Dentro de los híbridos *E. grandis* x *E. camaldulensis*, GC27 fue el de mayor densidad básica, mientras que el resto presentó valores similares, sin diferencias significativas entre ellos. En términos generales, los valores de densidad básica hallados concuerdan con los reportados en la bibliografía para los materiales analizados (p. ej. López et al., 2016; Resquin et al., 2020). La densidad básica de la madera es uno de los principales criterios de selección para genotipos de *Eucalyptus* destinadas a la producción de carbón, ya que una mayor densidad resulta en un aumento en la producción de carbón para el mismo volumen de madera dentro del horno, además de afectar la calidad para diversos propósitos y facilitar su manejo (Pereira et al., 2012).

Respecto a la proporción de cenizas de la madera (Tabla 1), esta varió entre el 0,06 y 0,6%, correspondiendo estos valores a CL y ED, respectivamente. Luego de ED, los materiales con mayor contenido de cenizas fueron ET, EC, GC9 y BE, mientras que aquellos que siguieron a CL con menor proporción fueron EG36, GT31, GC8 y GC27. Los resultados hallados en este trabajo, salvo alguna excepción puntual, se encuentran por debajo o dentro del rango de variación de los contenidos de cenizas reportados para estos materiales (p. ej. Sánchez Acosta, 2012; Bobadilha et al., 2018). Por otro lado, para el caso de los híbridos GC y GT y el clon EG36, estos son los primeros reportes de contenido de ceniza, los cuales coinciden con lo reportado habitualmente para *Eucalyptus* (menor al 1%). Este es un aspecto muy favorable para su empleo en la producción de carbón, ya que reduce la carga mineral en el producto resultante (Simetti et al., 2018), así como su uso como dendrocombustible en la alimentación de equipos, tales como calderas (Sánchez Acosta, 2012). En

este sentido, las cenizas reducen el poder calorífico de la biomasa, debido a que no intervienen en su combustión. Además, se pueden acumular en las superficies de los intercambiadores de calor, reduciendo la eficiencia en la transferencia de calor, y pueden causar corrosión de los elementos metálicos de los quemadores (Oliveira et al., 2021). Así, un bajo contenido de cenizas favorece y/o disminuye las labores de limpieza de equipos (Sánchez Acosta, 2012).

En cuanto al poder calorífico superior de la madera (Tabla 1), los resultados obtenidos variaron entre 4.566 y 4.682 kcal/kg, lo cual representa una variación del 2,54% entre los materiales de mayor y menor poder calorífico superior. Entre los primeros, encontramos GT31, BE, GC8, ET y GC24, mientras que entre los segundos podemos mencionar EG36, EG, ED, GC9 y GC12. Estos valores de poder calorífico superior coinciden con la bibliografía consultada, la cual reporta un rango entre 4.300 - 5.000 kcal/kg para las especies y cruzamientos aquí evaluados (Santos et al., 2011; Pereira et al., 2012; Sánchez Acosta 2012; Silva et al., 2015; De Magalhães et al., 2017; Simetti et al., 2018; Oliveira et al., 2021). El poder calorífico es una expresión de la cantidad de energía liberada en la combustión de un material, expresada por unidad de masa. La bibliografía referente al tema reporta poca variación de esta propiedad para la madera del género *Eucalyptus*, estando principalmente influenciada por la composición química de la madera, en particular el contenido de carbono, hidrógeno, lignina y extractivos, relacionados de manera positiva, y el contenido de oxígeno y cenizas, que la disminuyen (Pereira et al., 2012, 2013; Simetti et al., 2018). Sería deseable ampliar este estudio para analizar la composición química de la madera en los materiales probados, a fin de corroborar estas relaciones.

Respecto a la densidad energética de la madera, la misma se ubicó entre 1.731 y 2.613 Mcal/m³ (Tabla 1). Debido a su forma de cálculo, generalmente presenta una alta correlación con la densidad básica y el poder calorífico de la madera. En este sentido, al existir una escasa variación en el poder calorífico superior, las diferencias observadas en densidad energética entre genotipos fueron similares a las observadas en densidad básica de la madera, al igual que lo reporta Simetti et al. (2018). Así, entre los materiales que presentaron mayor densidad energética se destacan ET, CL, GT31 y EC, mientras que los materiales de *E. grandis* (EG y EG36), debido a su baja densidad, fueron los que presentaron menor concentración de energía. Estos valores son acordes con los reportados para diferentes especies de *Eucalyptus*, entre las que se encuentran las aquí evaluadas, con un rango de variación entre 1.400 y 2.900 Mcal/m³ (Silva et al., 2015; De Magalhães et al., 2017; Jesus et al., 2017; Simetti et al., 2018; Oliveira et al., 2021). La densidad energética se relaciona directamente con la energía contenida en un determinado volumen de madera (Silva et al., 2015) y es una variable importante de tener en cuenta al momento de calcular los costos de transporte (De Magalhães et al., 2017).

Para finalizar, el rendimiento de carbonización, es decir, la eficiencia del proceso de transformación de la madera en carbón, osciló entre 23,8 y 34,6% (Tabla 1). Los genotipos que presentaron mayor rendimiento fueron BE, CL, EG, ET y EC, mientras que aquellos ubicados en el extremo opuesto resultaron GC24, EG36, ED, GC12 y GC8. La gran mayoría de trabajos donde se analiza el rendimiento de carbonización, así como para el resto de determinaciones llevadas a cabo sobre madera y carbón del género *Eucalyptus*, proviene de estudios llevados a cabo en Brasil (p. ej. Vella et al., 1989; Pereira et al., 2012 y 2013; Siebeneichler et al., 2017; Simetti et al., 2018; Marchesan et al., 2020). Particularmente para el caso de rendimiento, los trabajos analizados evalúan algunas de las especies aquí estudiadas o clones de las mismas, hallando resultados de similar magnitud (en general, entre 25 y 45% de rendimiento, pero mayormente entre 30 y 35%). Nuevamente, para los híbridos GC y GT, así como para EG36, estos son los primeros datos de los que se tiene conocimiento. Un rendimiento alto del proceso de carbonización es deseable, ya que aumenta la eficiencia del proceso y la cantidad de producto final, pudiendo considerarse satisfactorios aquellos cercanos o por encima del 30%. Sin embargo, además de las características propias de la madera, otro factor fundamental para determinar el rendimiento son las condiciones del proceso que, a su vez, afectan otras propiedades del producto resultante, tales como el contenido de carbono fijo y el poder calorífico (Simetti et al., 2018, Marchesan et al., 2020). En este sentido, existieron diferencias en las temperaturas finales, tiempos de residencia y velocidades de calentamiento (rampa de ascenso de temperatura) entre este estudio y los diferentes trabajos citados, por lo que la variación en rendimientos puede haberse debido a cambios en los parámetros del proceso, quedando pendiente una investigación más detallada acerca del efecto de estas condiciones sobre los materiales testeados. Más allá de los valores absolutos obtenidos, al trabajar bajo las mismas condiciones, los resultados encontrados permiten establecer una valoración relativa de los genotipos ensayados, lo cual es valioso para el establecimiento de un ranking.

CARACTERÍSTICAS DENDROENERGÉTICAS DEL CARBÓN

En cuanto a las propiedades del carbón elaborado con los diferentes materiales, una de las características más importantes es la densidad aparente relativa, la cual está determinada por las condiciones de la pirólisis y por la densidad de la madera a partir de la cual se obtiene (Silva et al., 2018; Ramos et al., 2019). Una mayor densidad del carbón, generalmente, aumenta su resistencia mecánica y es una característica fundamental a ser tenida en cuenta cuando su destino es la producción siderúrgica (Santos et al., 2011; De Magalhães et al., 2017; Ramos et al., 2019). Es por ello que resulta deseable que las densidades sean tan altas como sea posible ($> 0,25 - 0,3 \text{ g/cm}^3$; Andrade et al., 2018; Dufourny et al., 2019). Los resultados obtenidos en este trabajo (Tabla 2) se encuentran por encima de ese rango, con valores extremos de $0,280$ y $0,431 \text{ g/cm}^3$, con un efecto significativo de los materiales probados. Entre aquellos de mayor densidad se encuentran GC9, EC, ED, GC8, GC27 y ET, los cuales no se diferenciaron estadísticamente entre sí. Por otro lado, y de manera análoga a lo ocurrido para densidad básica de la madera, los materiales de menor densidad resultaron EG y EG36. Los valores encontrados coinciden, en gran medida, con aquellos reportados por la bibliografía para diferentes materiales de *Eucalyptus*, donde se reporta un rango de variación general entre $0,25$ y $0,45 \text{ g/cm}^3$ (Santos et al., 2011; Castro et al., 2016; De Magalhães et al., 2017; Andrade et al., 2018; Simetti et al., 2018; Silva et al., 2018; Dufourny et al., 2019; Ramos et al., 2019; Marchesan et al., 2020). Dentro de este rango se ubican algunas de las especies evaluadas en este trabajo, mientras que los resultados obtenidos para los híbridos GC y GT31, así como para el clon EG36, son los primeros resultados reportados de los que se tiene conocimiento.

La proporción de cenizas de los materiales analizados (Tabla 2) osciló entre $0,3$ y 2% , con un efecto significativo de los diferentes genotipos sobre esta característica. En este sentido CL, GT31, EG36, GC8 y GC27 fueron aquellos con menor proporción de cenizas, todos ellos por debajo del 1% , mientras que ED fue el material que presentó mayor proporción, separado estadísticamente del resto de los materiales que se ubicaron por debajo de $1,5\%$. La bibliografía consultada presenta un rango de variación similar al encontrado en este trabajo, con valores entre $0,17$ y $1,9\%$, dependiendo de las especies, híbridos o clones considerados (Pereira et al., 2013; Castro et al., 2016; Santos et al., 2016; Jesus et al., 2017; Andrade et al., 2018; Silva et al., 2018; Simetti et al., 2018; Ramos et al., 2019; Marchesan et al., 2020; Protasio et al., 2021). Al igual que en la madera, las cenizas afectan negativamente el poder calorífico, además de repercutir en las tareas de mantenimiento y limpieza de hornos y calderas. Por otro lado, de acuerdo con Ramos et al. (2019), las cenizas de los materiales de *Eucalyptus* están compuestas principalmente por óxidos metálicos que, durante la producción de acero, son transferidos a la aleación metálica, contaminándola y afectando su composición química. Por lo tanto, los minerales que componen las cenizas pueden afectar las propiedades reductoras de estos materiales. En este sentido, varios autores mencionan que, en siderurgia, el contenido de cenizas del carbón debe ser lo más bajo posible, siendo deseable un contenido en torno o menor al 1% (p. ej. Pereira et al., 2013; Santos et al., 2016; Jesus et al., 2017; Andrade et al., 2018; Simetti et al., 2018; Marchesan et al., 2020). Respecto a este punto, Protasio et al. (2021) destacan que, comparado con el carbón de origen mineral (que puede contener entre 5 y 35% de cenizas), los porcentajes observados en el carbón vegetal representan una gran ventaja. Si tomamos como referencia un 1% de contenido de cenizas, los materiales CL, GT31, EG36, GC8, GC27 y EG serían aptos para este uso industrial, mientras que EG9 y EG24 ($1,1\%$) serían marginalmente aptos.

En cuanto a su uso doméstico, un buen carbón vegetal tiene, típicamente, un contenido de cenizas de alrededor del 3% , lo cual dependerá de la especie considerada, la cantidad de corteza incluida en la madera que generó el carbón y la cantidad de contaminación con tierra y arena (De Bedia, 2018). A nivel internacional existen normas para orientar a los consumidores y definir el destino y los costos. En Rusia, la norma GOST 7657-84 permite un contenido de 4% ; en Serbia, la Norma SRPS D.B9.020 permite un contenido máximo del 5% (Canul Tun, 2013). Por otro lado, la norma alemana DIN 51749 establece un contenido menor al 6% (DIN, 1989) y la europea EN 1860-2, menor al 8% (EN 2005) (Vargas et al., 2017). En nuestro continente, la norma N° 40 de la Secretaría de Agricultura y Abastecimiento de Brasil establece como valor de referencia aceptable para el uso doméstico un contenido de cenizas menor a $1,5\%$ (Marchesan et al., 2020). En base a estos valores de referencia, podemos concluir que los materiales testeados cumplen con todos ellos, salvo el caso de ED para la mencionada norma brasileña, la cual puede considerarse relativamente exigente. Para finalizar, si bien las cenizas son consideradas residuos, pueden tener aplicaciones industriales. En este sentido, Couto et al. (2019) presentan un estudio inicial sobre la utilización de cenizas como aditivo mineral en hormigón, citando trabajos donde se destaca que las cenizas de *Eucalyptus* de muy baja granulometría (muy finas) permiten el reemplazo de cemento de hasta el 15% en peso, con una ganancia de resistencia marginal, lo cual además implicaría beneficios económicos, técnicos y ambientales, principalmente a través del efecto de relleno.

La fracción de volátiles consiste en la cantidad de materia volátil residual en el carbón y se compone principalmente de hidrógeno, hidrocarburos, CO y CO₂ (Reis et al., 2012). Esta evidenció poca variación entre materiales, si bien presentó un alto valor absoluto (Tabla 2). En este sentido, el material que menor contenido de volátiles evidenció fue GC9, mientras que aquel con mayor proporción de volátiles fue ED, los cuales se diferenciaron estadísticamente de los demás genotipos, que se mantuvieron en una situación intermedia. La proporción de volátiles evidenciada por los materiales evaluados, que presentó un rango de variación entre 41,2 y 55,3% resulta sensiblemente más elevada que la reportada por la bibliografía para carbón proveniente de *Eucalyptus*. En este sentido, las publicaciones relevadas indican tenores de volátiles que se ubican entre 12 y 35%, y más usualmente entre 20-30% (Pereira et al., 2013; Castro et al., 2016; Santos et al., 2016; Jesus et al., 2017; Andrade et al., 2018; Silva et al., 2018; Simetti et al., 2018; Ramos et al., 2019; Marchesan et al., 2020; Protasio et al., 2021). Las diferencias observadas podrían deberse a diferencias metodológicas en el protocolo seguido para la determinación de esta propiedad. En este sentido, más allá de los valores absolutos hallados en este trabajo, resulta interesante el ordenamiento relativo de los diferentes materiales. Estos valores deberían compararse con los obtenidos mediante otro protocolo, a fin de poder establecer una relación entre ambos y confirmar (o descartar) el comportamiento relativo de estos genotipos.

El tenor de volátiles puede relacionarse, por un lado, con el contenido de celulosa de la madera de origen. Durante la pirólisis, parte del carbono de la madera se elimina con los volátiles, por lo que estos y el nivel de carbono fijo varían de manera inversamente proporcional (Pereira et al., 2013). Por otro lado, la proporción de volátiles es afectada por los parámetros del proceso de carbonización, principalmente su duración y la temperatura alcanzada (Castro et al., 2016; Marchesan et al., 2020). Marchesan et al. (2020) mencionan un límite de 25,5% para el contenido de volátiles de la norma N° 40 de la Secretaría de Agricultura y Abastecimiento de Brasil para uso doméstico. Respecto a esto, según Frederico (2009, citado por Santos et al., 2016), un alto contenido de volátiles aumenta significativamente la producción de humo, además de una menor eficiencia energética en la cocción. Una alta proporción de volátiles tampoco es deseable para fines siderúrgicos, ya que se pierden por evaporación y combustión con el oxígeno (Jesus et al., 2017), siendo recomendables contenidos del 25% o incluso menores (Pereira et al., 2013; Andrade et al., 2018). Además, al variar inversamente con el carbono fijo, imponen un compromiso a la eficiencia reductora del carbón. Sin embargo, una fracción de volátiles es deseable y necesaria en siderurgia, puesto que esta determina la estabilidad de la llama y la velocidad de combustión, promueve un aumento de la permeabilidad de la carga en el alto horno y una disminución de la reactividad del carbón vegetal (Santos et al., 2016).

El porcentaje de carbono fijo presentó un rango de variación entre 42,7 y 57,8%, cuyos extremos estuvieron representados por los mismos materiales que para volátiles (ED y GC9, respectivamente; Tabla 2). Estos valores se encuentran por debajo de los reportados en la bibliografía de referencia para diferentes materiales del género *Eucalyptus*, con rangos de variación aproximados entre 63 - 87%, más usualmente entre 70-80% (Pereira et al., 2013; Castro et al., 2016; Santos et al., 2016; Jesus et al., 2017; Andrade et al., 2018; Silva et al., 2018; Simetti et al., 2018; Ramos et al., 2019; Marchesan et al., 2020; Protasio et al., 2021). Este resultado es producto de la metodología de cálculo de carbono fijo (como diferencia entre el peso del carbón y la sumatoria de los contenidos de humedad, cenizas y volátiles) y como consecuencia de los altos niveles de volátiles medidos. Si bien es necesario, tal como se mencionó previamente, validar estos resultados, resultan indicativos del ordenamiento relativo de los diferentes materiales probados, con GC9, GC8, CL, GT31 y GC12 como aquellos genotipos que presentaron el mayor contenido de carbono fijo, mientras que ED, GC24, BE y EC fueron aquellos que se ubicaron en el extremo opuesto.

Al igual que las demás características analizadas, el contenido de carbono fijo dependerá de las características de la madera utilizada y las características del proceso de carbonización, principalmente su duración y temperatura final (Castro et al., 2016). Respecto a las características de la madera, en general, el carbono fijo se relaciona positivamente con el contenido de lignina, debido a la estabilidad térmica y alta proporción de carbono elemental de esta última (Pereira et al., 2013; Castro et al., 2016; Santos et al., 2016). Marchesan et al. (2020) y Protasio et al. (2021) mencionan un límite de 73% para carbono fijo, de acuerdo con la norma N° 40 de la Secretaría de Agricultura y Abastecimiento de Brasil para uso doméstico. Para el uso siderúrgico se recomienda un contenido incluso mayor. Andrade et al. (2018) establecen que son preferibles contenidos de carbono fijo mayores al 75%, mientras que Pereira et al. (2013) proponen un rango entre 75-80%. Por otro lado, Castro et al. (2016) mencionan un rango más amplio, entre 70-80%. A mayor contenido de carbono fijo, mayor estabilidad térmica, lo cual hace que se queme más lentamente, con mayor tiempo de residencia y menor volumen ocupado, siendo uno de los indicadores más importantes de la calidad del carbón vegetal como termorreductor en la industria siderúrgica. Para esta función, el carbón actúa

como proveedor del carbono necesario para remover el oxígeno del mineral de hierro, por lo que mientras mayor sea su contenido, mayor será la contribución al aumento en la productividad de los altos hornos (Santos et al., 2016; Silva et al., 2018; Marchesan et al., 2020).

Muy relacionado con la propiedad anterior, el rendimiento de carbono fijo resulta de multiplicar la proporción de carbono fijo por el rendimiento de carbonización, y presentó para este trabajo una variación entre 11,5 y 18,1 (Tabla 2), repitiéndose los materiales ubicados en los extremos (ED y GC9, respectivamente, al igual que para carbono fijo y volátiles). Estos valores resultan inferiores a los reportados por otros autores para diferentes genotipos de *Eucalyptus*. En este sentido, Pereira et al. (2013) reportan un rango de 25,5 - 27% para *E. grandis* y *E. camaldulensis*, mientras que Simetti et al. (2018) encontraron una variación entre 24 y 27% para tres de las especies abarcadas en este trabajo (*E. grandis*, *E. dunnii*, *E. benthamii*). Por otro lado, Protasio et al. (2021) trabajando con diferentes clones de este género obtuvieron un valor medio de 25,9%. Estos resultados se desprenden, directamente, de la baja proporción de carbono fijo e, indirectamente, del alto contenido de volátiles de los materiales ensayados. A pesar de este hecho, como ya se mencionó, estos valores podrían darnos una idea del ordenamiento relativo de los diferentes genotipos, siendo aquellos con mayor rendimiento de carbono fijo GC9, CL, EG, BE y ET. En el otro extremo se ubicarían ED, GC24, EG36 y GC27. El rendimiento de carbono fijo es una medida de la cantidad de carbono presente en la madera y, por lo tanto, es influido por su composición elemental (Simetti et al., 2018). Además, puede ser usado como medida de la eficiencia del proceso, y resulta importante para establecer el potencial de un material para la producción de carbón y para su uso como bioreductor (Pereira et al., 2013; Simetti et al., 2018).

En cuanto a la humedad de equilibrio, esta se ubicó entre 7,29 y 10,5% (Tabla 2). Los materiales que presentaron un menor nivel de humedad fueron ET, CL, GC9, EC y GT31, todos ellos por debajo del 9,2%. En el otro extremo, se ubicaron EG36, ED y EG, con un contenido de humedad superior al 10%. Los valores encontrados se encuentran dentro de los contenidos usualmente reportados por la bibliografía, que varían entre 2 y 10%, más comúnmente entre 4 - 9% (Quinhones, 2011; Briseño-Urbe et al., 2015; Basso, 2017; Siebeneichler et al., 2017, Costa, 2020). De manera análoga a la madera (aunque en un nivel menor), el carbón vegetal es un material higroscópico cuya estructura porosa y gran superficie específica le permiten adsorber vapor de agua, variando su contenido de humedad según las condiciones de humedad relativa del ambiente (Costa, 2020). Esta característica puede verse influida, a su vez, por las características de la madera de origen y los parámetros del proceso de carbonización, como la temperatura final o la tasa de calentamiento (Quinhones, 2011; Briseño-Urbe et al., 2015; Siebeneichler et al., 2017, Costa, 2020). En este sentido, un aumento en la temperatura produce un aumento en el volumen de microporos (a través de una reducción del tamaño y aumento en la frecuencia de los mismos) y de la superficie específica, lo cual afecta su capacidad higroscópica, independientemente de las condiciones ambientales a las que se exponga el material (Costa, 2020).

Para uso doméstico, el estándar europeo NBN M11-001 pone un límite del 7%, mientras que la norma N° 40 de la Secretaría de Agricultura y Abastecimiento de Brasil establece un contenido máximo del 5%. En el caso de la industria siderúrgica, el contenido de humedad es una de las características del carbón vegetal que interfieren directamente en el funcionamiento de los altos hornos, siendo deseables contenidos menores al 7%, si bien suele aceptarse hasta 10%, aunque en estos casos se aplican descuentos por calidad. Esto se debe a que altos niveles de humedad afectan la operación del alto horno, ya que la vaporización del agua resulta en pérdidas de energía, aumentando el consumo de carbón para compensar la reducción de temperatura en el interior del horno. Este hecho reduce el volumen que debe ocupar la carga metálica (mineral de hierro), lo que implica una disminución de la productividad, afectando la eficiencia del proceso (Costa, 2020). Se estima que la producción de los altos hornos se ve comprometida en un 10 % con cargas de humedad entre el 8 y el 20% (Quinhones, 2011). El contenido de humedad del carbón vegetal puede influir en otras características, como la resistencia mecánica y la generación de finos, lo que lleva a una reducción de la permeabilidad de la carga. Además, los altos niveles de humedad pueden provocar una liberación excesiva de gases y retrasar la ignición del carbón (Costa, 2020). A este respecto, los materiales ensayados se encontrarían dentro del rango aceptable para su uso siderúrgico, si bien los contenidos de humedad reportados son ligeramente superiores a los óptimos. Es necesario remarcar que estos valores fueron obtenidos a partir de muestras molidas, por lo que sería conveniente realizar nuevos ensayos sobre muestras de carbón con dimensiones similares a las utilizadas en esta industria para validar los resultados encontrados.

Respecto al poder calorífico superior, la bibliografía consultada sobre carbón de especies de *Eucalyptus* reporta rangos de variación relativamente amplios, entre 6.800 y 8.800 kcal/kg, aunque son más usuales aquellos ubicados entre 7.000 y 8.000 kcal/kg (Vella et al., 1989; Oliveira et al.,

2010; Reis et al., 2012; Pereira et al., 2013; Castro et al., 2016; Santos et al., 2016; De Magalhães et al., 2017; Silva et al., 2018; Simetti et al., 2018; Marchesan et al., 2020; Protásio et al., 2021). En este sentido, los valores obtenidos en este trabajo se ubican dentro de la porción inferior de estos rangos, con valores extremos de 6.945 y 7.329 kcal/kg (Tabla 2). Entre los materiales testeados, aquellos que presentaron mayores niveles para esta propiedad se pueden mencionar ET, GC9, GC8, CL y GC27, mientras que aquellos ubicados en el extremo opuesto resultaron EG36, BE, EG, GC24 y ED.

El poder calorífico del carbón es superior al de la madera que le dio origen, ya que en esta última la mayoría de los componentes que tienen enlaces poco estables son degradados durante la pirólisis, quedando aquellos que son más resistentes a la acción del calor (Pereira et al., 2013). Es así que, comúnmente, se muestra dependiente del contenido de lignina y extractivos, en forma positiva, y de cenizas, negativamente (Pereira et al., 2013; Santos et al., 2016; Silva et al., 2018; Resquin et al., 2020). A su vez, existen antecedentes que relacionan esta propiedad con los parámetros del proceso de carbonización, entre ellos la velocidad de calentamiento (Vella et al., 1989), el tiempo de residencia y, principalmente, la temperatura final alcanzada (Oliveira et al., 2010; Castro et al., 2016; Marchesan et al., 2020). Estos parámetros afectarían el poder calorífico a través de cambios en el rendimiento de carbonización, proporción de volátiles y de carbono fijo, los cuales terminan repercutiendo sobre la cantidad de energía liberada por el carbón al quemarse (Reis et al., 2012). En este sentido, Castro et al. (2016) sostienen que es necesario establecer un protocolo apropiado en función del material genético seleccionado, teniendo en cuenta los diferentes parámetros del proceso, para lograr maximizar esta propiedad. Un mayor poder calorífico proporcionará, en el caso de su uso en siderurgia, un menor consumo de carbón (insumo reductor) para un mismo nivel de productividad (Santos et al., 2016). Respecto a esta industria, Andrade et al. (2018) establecen que son deseables poderes caloríficos superiores a 7.500 kcal/kg.

De la extensa búsqueda bibliográfica realizada, se encontraron escasos trabajos donde se analice la densidad energética del carbón obtenido de especies del género *Eucalyptus*. En ellos se reporta un rango de variación aproximado entre 1.500 y 4.000 Mcal/m³ (De Magalhães et al., 2017; Silva et al., 2018; Simetti et al., 2018; Protasio et al. 2021). Si extendemos el análisis y consideramos aquellos trabajos donde fueron determinados el poder calorífico superior y la densidad del carbón y efectuamos el cálculo de densidad energética, obtenemos un rango de variación similar al mencionado previamente, pero centrado en valores entre 2.200 y 3.200 Mcal/m³ (Vella et al., 1989; Oliveira et al., 2010; Reis et al., 2012; Castro et al., 2016; Santos et al., 2016; Marchesan et al., 2020). Ambos rangos son coincidentes con los resultados obtenidos en este trabajo, donde se observó una variación entre 1.958 y 3.145 Mcal/m³ (Tabla 2). Entre los materiales de mayor densidad energética se encuentran GC9, EC, ED, GC8 y GC27, mientras que en el extremo opuesto se ubicaron GC24, GT31, EG36 y EG. De manera análoga a lo observado en los análisis de la madera, el ordenamiento de los materiales para esta propiedad fue el mismo que el observado para densidad aparente relativa del carbón. En este sentido, debido a la metodología de cálculo y a la escasa variación normalmente observada en poder calorífico superior bajo similares condiciones de carbonización, esta característica muestra una variación que se relaciona de manera directa con la variación en densidad (De Magalhães et al., 2017; Silva et al., 2018; Simetti et al., 2018; Protasio et al. 2021). Este hecho remarca la importancia de la densidad del carbón como variable *proxy* para la selección de materiales con mayor densidad energética.

CONCLUSIONES

En la presente investigación se logró caracterizar las propiedades dendroenergéticas de la madera y del carbón de diferentes materiales del género *Eucalyptus*. Con respecto a la madera, fue posible establecer que los materiales testeados se ubicaron dentro del rango de maderas livianas y semipesadas, con un contenido de cenizas, rendimiento de carbonización, poder calorífico superior y densidad energética en órdenes de magnitud similares a los reportados por trabajos referentes a este género botánico. Se destacaron positivamente ET, GT31 y CL, mientras que EG36 y ED presentaron un bajo desempeño relativo. En cuanto al carbón, se encontraron resultados dispares dependiendo de la variable considerada. En este sentido, los valores de densidad aparente relativa, contenido de cenizas, poder calorífico y densidad energética encontraron correspondencia con aquellos rangos comúnmente reportados para este género, mientras que el contenido de volátiles resultó sensiblemente superior al referido por la bibliografía, lo que, en última instancia, determinó rangos de variación de carbono fijo y rendimiento de carbono fijo por debajo de los esperados. Al igual que para madera, EG36 y ED demostraron el comportamiento menos adecuado, mientras que los carbones de GC9, CL y ET ofrecieron la mejor performance. Se destaca la necesidad de continuar con los análisis

de estos materiales, empleando diferentes protocolos de carbonización y determinación de volátiles, a fin de corroborar los valores obtenidos para estas características, las cuales resultan de gran importancia para establecer el potencial dendroenergético para su uso doméstico e industrial.

Financiamiento

El presente trabajo fue financiado con aportes de INTA a través de los proyectos: PL 385 "Aportes a la diversificación productiva y el agregado de valor en el Noreste de Entre Ríos", PE 1146 "Mejoramiento genético de especies forestales cultivadas y nativas de rápido crecimiento", PE 1148 "Procesos y tecnologías sostenibles para el agregado de valor en las cadenas y regiones" y PE 1149 "Bioenergía en origen como estrategia para el desarrollo de la agroindustria y el desarrollo territorial sostenible".

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, F.W.C., Filho, M.T. y Moutinho, V.H.P.** (2018). Influence of wood physical properties on charcoal from *Eucalyptus* spp. *Floresta e Ambiente*, 25(3), e20150176. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.017615>
- Basso, S.** (2017). *Análise do carvão vegetal para uso doméstico*. Tesis de grado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, Paraná, Brasil.
- Bobadilha, G.d.S., Vidaurre, G.B., Câmara, A.P., Valin, M., Oliveira, J.T.d.S., Soliman, E.P. y Lopez, Y.M.** (2018). Efecto del ataque de *Leptocybe invasa* en plantaciones de eucalipto destinadas a la producción de pulpa de celulosa kraft. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 20(2), 171-182. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2018005002201>.
- Briseño-Urbe, K.C., Carrillo-Parra, A., Bustamante García, V., González-Rodríguez, H. y Foroughbachk, R.** (2015). Firewood production, yield and quality of charcoal from *Eucalyptus camaldulensis* and *E. microtheca* planted in the semiarid land of northeast Mexico, *International Journal of Green Energy*, 12(9), 961-969. <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.891121>
- Canul Tun, S.A.** (2013). *Rendimiento y calidad del carbón vegetal elaborado en horno tipo fosa con subproductos forestales de *Piscidia piscipula* (L.) sarg. y *Lonchocarpus castilloi* standl. en Campeche*. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. México.
- Carle, J., Vuorinen, P., y Del Lungo, A.** (2002). Status and trends in global forest plantation development. *Forest Products Journal*, 52(7/8), 12-23.
- Castro, A.F.N.M., Castro, R.V.O., Carneiro, A.C.O., dos Santos, R.C., Carvalho, A.M.M.L., Trugilho, P.F. y de Melo, I.C.N.A.** (2016). Correlations between age, wood quality and charcoal quality of *Eucalyptus* clones. *Revista Árvore*, 40(3), 551-560. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000300019>
- Costa, L.J.** (2020). *Relação água-carvão vegetal de eucalipto produzido em diferentes temperaturas*. Tesis de doctorado. Universidade Federal De Viçosa. Brasil.
- Couto, A.F.d., Nogueira, G.S.F., Sandoval, G.F.B., Schwantes-Cezario, N. y Morales, G.** (2019). Initial study of *Eucalyptus* Wood Ash (EWA) as a mineral admixture in concrete. *DYNA*, 86(208), 264-270. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.74580>
- Crisóstomo, M.C., Silva, M.F.d., Vale, A.T.d. y Chaves, B.S.A.** (2021). Caracterização energética de madeira de *E. grandis*, *Pinus* sp., *T. vulgaris* e *P. lecointei*. En R.J. de Oliveira & R.C Moreira (coordinadores). *Recursos Naturais: Energia de Biomassa Florestal*. (pp. 49-61). Editora Científica Digital, Brasil. <https://doi.org/10.37885/210203270>
- De Bedia, G.** (2018). *Carbón de Madera Santiagueño: sus usos y calidad*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. EEA Santiago del Estero.
- De Magalhães, M.A., Carneiro, A.D.C.O., Vital, B.R., Da Silva, C.M.S., De Souza, M.M. y Fialho, L.D.F.** (2017). Estimates of mass and energy of different genetic material *Eucalyptus*. *Revista Árvore*, 41(3), e410302. <https://doi.org/10.1590/1806-90882017000300002>
- Denaday, F., Escartín, C., Parodi, G. y Spinazzola, E.** (2020). *Actualización del balance de biomasa con fines energéticos en la Argentina*. Colección Documentos Técnicos N° 19. Buenos Aires. <https://doi.org/10.4060/ca8764es>
- DIN** (1989). DIN 51749 *Testing of solid fuels- Grill charcoal and grill charcoal briquettes: Requirements and test methods*. Deutsches Institut für Normung.

- Dufourny, A., Van De Steene, L., Humbert, G., Guibal, D., Martin, L. y Blin, J.** (2019). Influence of pyrolysis conditions and the nature of the wood on the quality of charcoal as a reducing agent. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 137, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.10.013>
- Elyounssi, K., Collard, F.-X., Mateke, J.-A.N. y Blin, J.** (2012). Improvement of charcoal yield by two-step pyrolysis on *Eucalyptus* wood: A thermogravimetric study. *Fuel*, 96, 161-167. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.01.030>
- FAO** (1983). Métodos simples para fabricar carbón vegetal. Estudio FAO: Montes 41. Disponible en: www.fao.org
- Gorzycki, R.** (2019). *Informes de Cadenas de Valor: Forestal, papel y muebles*. Marzo 2019. Año 4 – N° 14. Ministerio de Hacienda. Argentina.
- Jakobsen, E.** (17 - 21 de septiembre de 2018). Unlocking the mechanisms of *Eucalyptus* plasticity and resistance. *Eucalyptus 2018: Managing Eucalyptus plantations under global changes*. Montpellier, Francia.
- Jesus, M., Costa, L., Ferreira, J., Freitas, F., Santos, L. y Rocha, M.** (2017). Caracterização energética de diferentes espécies de *Eucalyptus*. *Floresta*, 47(1), 11-16. <http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v47i1.48418>
- López, J.A., Harrant, L., Marcó, M.A. y López, A.J.** (2016). Variación genética de clones híbridos de *Eucalyptus*. *Quebracho - Revista de Ciencias Forestales*, 24(1), 5-17.
- Marchesan, R., de Oliveira D.N., da Silva, R.C., de Carvalho, L.A., Gomes, R.T. y Almeida, V.C.** (2020). Quality of charcoal from three species of the *Eucalyptus* and the *Corymbia citriodora* species planted in the south of Tocantins. *Floresta*, 50(3), 1643-1652. <http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v50i3.65303>
- Mastrandrea, C.** (2020). Madera de calidad: ¿todas las maderas para todos los usos? Hoja informativa Nro. 23. INTA, PNFOR. Proyecto Silvicultura de Bosques cultivados.
- Mastronardi, L.J., Vila Martinez, J.P., Lapun, P.G., Barbaran, G., Caratori, L., Vallés Puertas, D.G., Ramirez, G.A., Kampel, D., Christensen, J., Rivas, I.A., Natale O.H., Rodríguez, R., Miranda, M.E., Bobillo, E., Ramón, M., Rivero, V. y Koutoudjian, G.** (2019). *Escenarios Energéticos 2030. Documento de síntesis*. Ministerio de Hacienda.
- Oliveira, A.C., Carneiro, A.D.C.O., Vital, B.R., Almeida, W., Pereira, B.L.C. y Cardoso, M.T.** (2010). Quality parameters of *Eucalyptus pellita* F. Muell. wood and charcoal. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*, 38(87), 431-439.
- Oliveira, R.D.S., Santos, L.T.V., Melo, S.C., Chagas, M.P., Ribeiro, D., Reis, C.A.F., Novaes, E. y Sette Jr, C.R.** (2021). Wood energy yield for *Eucalyptus* clones growing under seasonal drought-stress in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 154, 106264. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106264>
- Pereira, B.L.C., Oliveira, A.C., Carvalho, A.M.M.L., Carneiro, A.D.C.O., Santos, L.C. y Vital, B.R.** (2012). Quality of Wood and Charcoal from *Eucalyptus* Clones for Ironmaster Use. *International Journal of Forestry Research*, 2012, 523025. <https://doi.org/10.1155/2012/523025>
- Pereira, B.L.C., Carneiro, A.D.C.O., Carvalho, A.M.M.L., Colodette, J.L., Oliveira, A.C. y Fontes, M.P.F.** (2013). Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties. *BioResources*, 8(2), 4574-4592
- Protásio, T.P., Roque Lima, M.D., Scatolino, M.V., Silva, A.B., Rodrigues de Figueiredo, I.C., Gherardi Hein, P.R. y Trugilho, P.F.** (2021). Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. *Renewable Energy*, 164, 34-45. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.057>
- Quinhones, R.** (2011). *Relações entre as características da madeira de Eucalyptus sp. e as do carvão produzido a diferentes temperaturas finais de carbonização*. Tesis de doctorado. Universidade Federal de Lavras. Brasil.
- Ramos, D.C., Carneiro, A.D.C.O., Tangstad, M., Saadieh, R. y Pereira, B.L.C.** (2019). Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for metallurgical use. *Floresta e Ambiente*, 26(2), e20180435. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.043518>
- Reis, A.A.d., Protásio, T.P., de Melo, I.C.N.A., Trugilho, P.F. y Carneiro, A.D.C.O.** (2012). Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 32(71), 277-290. <https://doi.org/10.4336/2012.pfb.32.71.277>
- Resquin, F.; L. Carrasco-Letelier; C. Rachid-Casnatti & R. Navarro-Cerrillo.** (2020). Producción de biomasa del fuste de *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cabbage, *Eucalyptus dunnii* Maiden y *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden en plantaciones de corta rotación en Uruguay. Trabajos de investigación 2019. Red IBEROMASA: Optimización de los procesos de extracción de biomasa sólida para uso energético. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

- Sánchez Acosta, M.** (2012). *Caracterización de la madera del nuevo híbrido Eucalyptus grandis, Hill ex Maiden x Eucalyptus tereticornis, Smith, su aptitud de usos en Argentina*. Tesis de doctorado. Universidad de Valladolid.
- Santos, R.C.D., Carneiro, A.D.C.O., Castro, A.F.M., Castro, R.V.O., Bianche, J.J., De Souza, M.M. y Cardos, M.T.** (2011). Correlation of quality parameters of wood and charcoal of clones of *Eucalyptus*. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*, 39(90), 221-230.
- Santos, R.C.D., Carneiro, A.D.C.O., Vital, B.R., Castro, R.V.O., Vidaurre, G.B., Trugilho, P.F. y Castro, A.F.N.M.** (2016). Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. *Ciencia Florestal*, 26(2), 657-669. <https://doi.org/10.5902/1980509822765>
- Siebeneichler, E.A., Costa, L.M.D., Figueredo, N.A., Tronto, J. y Rocha, P.A.** (2017). Influência de temperatura e taxas de aquecimento na resistência mecânica, densidade e rendimento do carvão da madeira de *Eucalyptus cloeziana*. *Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, 8(2), 82-94. <https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v8n2p82-94>
- Silva, D.A., Müller, B.V., Kuiaski, E.C., Eloy, E., Behling, A. y Colaço, C.M.** (2015). Propriedades da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de energia. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 35(84), 481-485. <https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.84.677>
- Silva, M.F.d., Fortes, M.M. y Sette, C.R.** (2018). Characteristics of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones. *Floresta e Ambiente*, 25(3), e20160350. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.035016>
- Simetti, R., Bonduelle, G.M. y Silva, D.A.** (2018). Wood quality of five *Eucalyptus* species planted in Rio Grande do Sul, Brazil for charcoal production. *Journal of Tropical Forest Science*, 30(2), 175-181. <https://doi.org/10.26525/jtfs2018.30.2.175181>
- Vargas, U.B., Aquino, F.R., García, W.S. y Juárez, W.S.** (2017). Evaluación de la calidad del carbón vegetal elaborado a partir de madera de encino en horno de ladrillo. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 4(2), 127-137.
- Vella, M.M.C.F., Valente, O.F., Vital, B.R., y Lelles, J.G.D.** (1989). Influência da velocidade de carbonização da madeira nos rendimentos e nas propriedades do carvão produzido. *IPEF Piracicaba*, 41-42, 64-76.