

ECUACIONES PARA ESTIMAR EL PODER CALORÍFICO DE LA MADERA DE CUATRO ESPECIES DE ÁRBOLES

EQUATIONS FOR ESTIMATING GROSS CALORIFIC VALUE OF WOOD FROM FOUR TREE SPECIES

Dimas Agostinho-Da Silva¹; Braulio Otomar-Caron²; Carlos R. Sanquetta¹; Alexandre Behling¹; Denise Schmidt²; Rogério Bamberg¹; Elder Eloy¹; Ana Paula Dalla-Corte^{1*}.

¹Departamento de Ciencias Forestales, Universidad Federal de Paraná. Av. Prof. Lothário Meissner, 900, Jardim Botânico-Campus III, 80210-170. Curitiba, Paraná, Estado de Brasil.

Correo-e: anapaulacorte@gmail.com Tel.: +55 (41) 3360-4264 (* Autora para correspondencia).

²Departamento de Agronomía. Universidad Federal de Santa María. Linha Sete de Setembro s/n, BR 386 km 40, CEP 98400-000, Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul, Brasil, Estado de Brasil.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue ajustar ecuaciones de regresión que expresen el poder calorífico superior (PCS) de la madera de cuatro especies forestales: *Acacia mearnsii* De Willd., *Eucalyptus grandis* Hill, *Mimosa scabrella* Benth. y *Ateleia glazioviana* Baill. El procedimiento de selección de variables hacia atrás se utilizó para generar ecuaciones de PCS en función de los contenidos de material volátil (CMV), ceniza (CC), carbono fijo (CCF) y materia orgánica (CMO). Las muestras se recolectaron un año después de la plantación para la determinación de dichas variables. Todas las ecuaciones obtenidas tuvieron buena correlación, presentaron coeficientes de determinación ajustados superiores a 82 %, error estándar de estimación inferior de 1.1 % y distribución adecuada de los residuos. Las ecuaciones que implican solamente el CMV para *A. mearnsii*, CC para *E. grandis* y *A. glazioviana*, y los elementos del análisis proximal para *M. scabrella*, son tan adecuadas para estimar el PCS como las ecuaciones que incluyen más variables independientes.

PALABRAS CLAVE: Bioenergía, modelado, plantaciones forestales con fines energéticos.

ABSTRACT

The objective of this study was to fit regression equations that express the gross calorific power (GCV) of wood from four tree species: *Acacia mearnsii* De Willd., *Eucalyptus grandis* Hill, *Mimosa scabrella* Benth. and *Ateleia glazioviana* Baill. The backward variable selection procedure was used to formulate GCV equations according to the volatile matter content (VMC), ash content (AC), fixed carbon content (FCC) and organic matter content (OMC). Sample collection was performed one year after planting to determine such variables. All equations performed well: fitted values for the coefficient of determination was greater than 82 %, standard error of the estimate was less than 1.1 % and distribution of residuals was adequate. The equations involving only the VMC for *A. mearnsii*, AC for *E. grandis* and *A. glazioviana*, and elements of proximate analysis for *M. scabrella* are just as effective at estimating GCV as other equations that include a greater number of independent variables.

KEYWORDS: Bioenergy, modeling, energy forest plantations



Recibido: 17 de septiembre, 2013

Aceptado: 28 de abril, 2014

doi: 10.5154/r.chscfa.2013.09.035

<http://www.chapingo.mx/revistas>

INTRODUCCIÓN

El uso de la madera en grandes cantidades para la producción de energía ha ganado cada vez más importancia en el escenario mundial y ha estimulado una mayor investigación sobre la biomasa de la madera como fuente de energía y, en particular, la biomasa derivada de las plantaciones de árboles. La madera ha sido una materia prima esencial en el suministro de energía para muchos sectores en Brasil, incluyendo los sectores residencial, agrícola e industrial. El uso racional y adecuado de la madera como fuente de energía debe ser guiado por una comprensión del crecimiento y desarrollo de la especie, y también por sus propiedades energéticas. El poder calorífico superior (PCS) ha sido una de las variables más ampliamente estudiadas para evaluar la calidad de la madera, la energía y el potencial de la especie, y la producción de biomasa (Brand, 2010; Friedl, Padouvas, & Rotter, 2005).

Por lo general, las mediciones del PCS son caras debido al equipo sofisticado necesario, tal como la bomba calorimétrica, así como analistas altamente capacitados (Majumder, Jain, Banerjee, & Barnwal, 2008). Sin embargo, algunas expresiones empíricas utilizan los valores obtenidos en el análisis químico para estimar el PCS, los cuales corresponden al contenido de materia volátil, contenido de ceniza y contenido de carbono fijo, fácilmente determinados utilizando un horno de mufla y una escala analítica. Otras ecuaciones también utilizan los componentes químicos básicos de la madera, tales como carbono, hidrógeno y oxígeno, elementos que están altamente correlacionados con el PCS. En este contexto, el objetivo de este trabajo fue identificar las ecuaciones de regresión que expresan el poder calorífico superior de la madera de *Acacia mearnsii* De Willd. (zarzo negro), *Eucalyptus grandis* Hill (eucalipto), *Mimosa scabrella* Benth. (bracatinga) y *Ateleia glazioviana* Baill. (timbo), a través de sus contenidos químicos (sustancias volátiles, carbono fijo y cenizas) inmediatos (quemados) y del contenido de carbono orgánico.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se hizo con los datos de un experimento realizado en un terreno perteneciente al Laboratorio de Agroclimatología de la Universidad Federal de Santa María, *Campi CESNORS* (Rio Grande do Sul Centro de Educación Superior del Norte), situado a 27° 22" S; 53° 25" O, a una altitud de 480 m en el municipio de Frederico Westphalen, RS. De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, el tipo de clima de la región es Cfa. El clima es subhúmedo, subtemplado, con una temperatura anual promedio de 18.8 °C y la temperatura promedio del mes más frío es de 13.3 °C (Maluf, 2000). El municipio de Iraí se utilizó como referencia para clasificar los datos del clima de Frederico Westphalen. El sitio de estudio es ligeramente ondulado con suelo tipo latosol rojo-oscuro distrófico clásico.

INTRODUCTION

The use of wood in high quantities for energy production has gained increasing prominence on the world stage, and has spurred more research on wood biomass as an energy source and in particular biomass derived from tree plantations. Wood has been an essential raw material in supplying energy to many sectors in Brazil, including the residential, agricultural and industrial sectors. The rational and adequate use of this energy source should be guided by an understanding of the growth and development of the species and also by the energy properties of the wood material itself. Of the variables that are used to evaluate the quality of wood for energy, and the potential of the species for biomass production, the gross calorific value (GCV) has been one of the most widely studied (Brand, 2010; Friedl, Padouvas, & Rotter, 2005).

Typically, GCV measurements are expensive due to the sophisticated equipment required, such as bomb calorimeter, as well as highly trained analysts (Majumder, Jain, Banerjee, & Barnwal, 2008). However, some empirical expressions use the values obtained in chemical analysis to estimate GCV, which correspond to the volatile matter content, ash content, and fixed carbon content, easily determined using a muffle furnace and analytical scale. Other equations also use the basic chemical components of wood, such as carbon, hydrogen and oxygen, elements that are highly correlated with GCV. In this context, the objective was to identify regression equations that express the gross calorific value of wood from the tree species *Acacia mearnsii* De Willd (Black wattle), *Eucalyptus grandis* Hill (eucalyptus), *Mimosa scabrella* Benth (bracatinga) and *Ateleia glazioviana* Baill (timbo) extracted from their immediate (combusted) chemical contents (volatiles, fixed carbon and ash) and the organic carbon content.

MATERIALS AND METHODS

The study was conducted using data from an experiment on land belonging to the Agroclimatology Laboratory of the Federal University of Santa Maria, *Campi CESNORS* (Rio Grande do Sul North Higher Education Center), located at 27° 22" S; 53° 25" W, at 480 m altitude, in the municipality of Frederico Westphalen, RS. According to Köppen climate classification, the climate type of the region is Cfa. The municipality of Iraí was used as a reference to classify climate data in Frederico Westphalen and there the climate is sub-humid, subtemperate, with average annual temperature of 18.8 °C and the average temperature of the coldest month is 13.3 °C (Maluf, 2000). The study site is slightly undulating, with classical dystrophic deep Red Latosol soil type.

This study cover studied four tree species: *A. mearnsii* (Black wattle), *E. grandis* (Eucalyptus), *M. scabrella* (bracatinga) and *A. glazioviana* (timbo) at different spacings:

En este trabajo se estudiaron cuatro especies de árboles: *A. mearnsii* (zarzo negro), *E. grandis* (eucalipto), *M. scabrella* (bracinga) y *A. glazioviana* (timbo) a diferentes distancias: 3 x 1 m, 3 x 1.5 m, 2 x 1 m y 2 x 1.5 m. En la planificación, los tratamientos se establecieron en un diseño 4 x 4 bi-factorial: cuatro especies de árboles y cuatro separaciones realizadas con tres repeticiones. Se utilizó un diseño de bloques al azar con parcelas divididas, donde la parcela se representó con una combinación de especies y separaciones y las subparcelas fueron representadas por la edad de los datos de referencia. Cada bloque incluyó 16 unidades experimentales, donde las cuatro especies se distribuyeron en todos los niveles de separación. Cada unidad experimental tuvo 45 plantas en cinco líneas y cuatro subparcelas de tres plantas cada una, las cuales a su vez fueron evaluadas.

La colecta de muestras se realizó un año después de la siembra (2009) mediante la evaluación de la biomasa de una subparcela de acuerdo con el diseño del proyecto. Se muestrearon tres árboles de cada tratamiento (uno por repetición) mediante la eliminación de un disco de madera de aproximadamente 2 cm de grosor a 0 %, 25 %, 50 % y 75 % de la altura total del árbol con los cuales se monta una muestra compuesta. Las muestras se molieron en un molino Willey y se secaron en un horno de circulación e inyección de aire. El poder calorífico superior (PCS) se determinó con una bomba calorimétrica (C5000, IKA WORKS, Alemania) (según la norma NBR 8633, 1984) y el contenido de carbono se determinó con un analizador de carbono (C-144, LECO, EE.UU.). Otra fracción de la misma muestra se utilizó para el análisis químico basándose en la norma NBR 8112 (1986).

El método de selección de variables en regresión se utilizó para formular ecuaciones de PCS al nivel de probabilidad del 5 %. Este método paso a paso en regresión comienza con la composición del modelo que incluye todas las variables independientes y, sucesivamente, las elimina con cada retroceso, siendo el resultado de un modelo simplificado con la mejor precisión estadística (Schneider, 1998). La expresión matemática (Draper & Smith, 1966) detrás de la metodología es:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n + e_i,$$

Donde:

Y = Variable dependiente

b_0, b_1, \dots, b_n = Coeficientes de regresión, provenientes de los datos experimentales

X_1, X_2, \dots, X_n = Variables independientes

e_i = Error experimental

Los análisis estadísticos se realizaron con el software SAS 8.01 (SAS Learning Edition, 2002).

Las variables independientes de entrada en los modelos fueron: contenido de material volátil (CMV, %), contenido de cenizas (CC, %), contenido de carbono fijo (CCF, %) y conteni-

3 x 1 m, 3 x 1.5 m, 2 x 1 m, and 2 x 1.5 m. In planning, the treatments used a bi-factorial 4 x 4 design: four tree species and four spacings conducted with three replications. A randomized block design with split-plots was used, where the plot was represented by a combination of species and spacings and subplots represented by the age of benchmarking data. Each block included 16 experimental units, throughout which the four species were distributed at all spacing levels. Each experimental unit had 45 plants in five lines and four subplots of three plants each, which themselves were evaluated.

Sample collections took place one year after planting (2009) by assessing the biomass of a subplot according to the project design. Three trees from each treatment (one per replicate) were sampled by removing a wooden disc approximately 2 cm thick at 0 %, 25 %, 50 % and 75 % of the total tree height with which to mount a composite sample. The samples were ground in a Willey mill and dried in a circulation and air injection kiln. The gross calorific value (GCV) was determined in a bomb calorimeter (C5000, IKA WORKS, Germany) (according to the NBR 8633 standard, 1984) and carbon content was determined using a carbon analyzer (C-144, LECO, USA). Another fraction of the same sample was used for the chemical analysis based on the NBR 8112 standard (1986).

The backward variable selection method was used to formulate equations for gross calorific value at the 5 % probability level. This backward stepping method begins with the model composition including all independent variables and successively eliminates variables with each step backward, the result being a simplified model with the best statistical accuracy (Schneider, 1998). The mathematical expression (Draper & Smith, 1966) behind the methodology is:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n + e_i,$$

Where:

Y = Dependent variable

b_0, b_1, \dots, b_n = Regression coefficients, fitted from the experimental data

X_1, X_2, \dots, X_n = Independent variables

e_i = Experimental error

The statistical analyses were performed using SAS 8.01 (SAS Learning Edition, 2002).

The independent input variables in the models were: volatile material content (VMC, %), ash content (AC, %), fixed carbon content (FCC, %) and organic carbon content (OMC, %). The dependent variable is gross calorific value (GCV, kcal·kg⁻¹). Pearson correlation analyses between the GCV and the elements of the chemical analysis (VMC, AC and FCC) and organic carbon content were significant ($P \leq 0.05$) using the t-test.

do de carbono orgánico (CMO, %). La variable dependiente es el poder calorífico superior (PCS, kcal·kg⁻¹). El análisis de correlación de Pearson entre el PCS y los elementos del análisis químico (CMV, CC y CCF) y el contenido de carbono orgánico fueron significativos ($P \leq 0.05$) usando la prueba t.

Cuatro espaciamientos y dos repeticiones produjeron en total ocho observaciones que fueron utilizadas para el cálculo de las ecuaciones de regresión. La tercera repetición se utilizó para validar las ecuaciones. Para seleccionar la mejor ecuación y evaluar la calidad de los ajustes se utilizaron los siguientes criterios: coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj} , %), error estándar de la estimación (S_{yx} , kcal·kg⁻¹ y %), valor F para $P \leq 0.05$ y la gráfica de residuos en función de los valores estimados (%) (Draper & Smith, 1966; Schneider, 1998). El ajuste de los modelos obtenidos se comprobó mediante una prueba X^2 con $P \leq 0.05$, para establecer la existencia de diferencias estadísticamente significativas.

La validación involucró la retención de un conjunto de cuatro observaciones para cada especie; es decir, se realizó una evaluación adicional para cada disposición de espaciado dentro del tercer bloque del experimento. La validación de la ecuación siguió los preceptos de Prodan, Peters, Cox, y Real (1997), quienes consideran que la muestra de validación debe ser independiente del conjunto de datos principales y cubrir todas las edades, lugares y condiciones de manejo. La segunda ronda de validación consistió en estimar el PCS utilizando las mejores ecuaciones de rendimiento y comparar las estimaciones con su PCS real con X^2 ($P \leq 0.05$), para establecer la existencia de diferencias estadísticamente significativas. Los posibles sesgos, se verificaron a través de un análisis gráfico de los residuos en un valor absoluto y en porcentaje.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El poder calorífico superior (PCS) promedio y los contenidos de material volátil, cenizas, carbono fijo y carbono orgánico de *E. grandis*, *A. mearnsii*, *M. scabrella* y *A. glazioviana* se muestran en el Cuadro 1. En general, se observó un bajo coeficiente de variación y error estándar de la muestra, lo que sugiere una alta precisión en los análisis realizados.

CUADRO 1. Valores promedio del poder calorífico superior (PCS), contenido de material volátil (CMV), contenido de cenizas (CC), contenido de carbono fijo (CCF) y contenido de carbono orgánico (CMO) de cuatro especies de árboles.

TABLE 1. Average values of the gross calorific value (GCV) with the volatile matter content (VMC), ash content (AC), fixed carbon content (FCC) and organic carbon content (OMC) of four tree species.

Especie / Species	PCS / GCV (kcal·kg ⁻¹)	CMV / VMC (%)	CC / AC (%)	CCF / FCC (%)	CMO / OMC (%)
<i>Eucalyptus grandis</i>	4,467	82.90	1.14	15.96	47.40
<i>Acacia mearnsii</i>	4,528	75.33	1.46	23.21	47.23
<i>Mimosa scabrella</i>	4,545	78.98	1.28	19.74	47.68
<i>Ateleia glazioviana</i>	4,507	79.14	1.75	19.10	46.76

Four spacings and two replications, in total eight observations were used for the calculation of the regression equations. The third replication was used to validate the equations. To select the best equation and evaluate the quality of the fits, the following criteria were used: adjusted coefficient of determination (R^2_{adj} , %), standard error of the estimate (S_{yx} , kcal·kg⁻¹ and %), F value for $P \leq 0.05$, residual plot as a function of the estimated values (%) (Draper & Smith, 1966; Schneider, 1998). To verify the fit of the models obtained, a X^2 test was performed at $P \leq 0.05$, to establish the existence of statistically significant differences.

Validation involved withholding a set of four observations for each species. That is, an additional assessment was conducted for each spacing arrangement within the third block of the experiment. Equation validation followed the precepts of Prodan, Peters, Cox, & Real (1997), *i. e.*, the validation sample must be independent of the main data set and cover all ages, sites and management conditions. The second validation round consisted of estimating the GCV using the best performing equations and comparing the estimates with their actual GCV by X^2 at ($P \leq 0.05$) probability to establish the existence of statistically significant differences. To verify the possible biases, we performed a graphical analysis of residuals in absolute value and in percentage.

RESULTS AND DISCUSSION

The average gross calorific value (GCV), volatile materials, ash, fixed carbon and organic carbon for *E. grandis*, *A. mearnsii*, *M. scabrella* and *A. glazioviana*, are shown Table 1. In general, we observed low coefficients of variation and sample standard error, suggesting high accuracy for the analyses that were performed.

Table 2 shows the equations for the four species under the backward method. We observe that the method were effective in achieving the goal proposed in this paper. The coefficients of determination (R^2) indicate that all the independent variables: concentrations of volatiles (VMC), ash (AC), fixed carbon (FCC) and organic carbon (OMC), explain well the variation in the gross calorific value (GCV) for every species.

En el Cuadro 2 se muestran las ecuaciones de las cuatro especies bajo el método de regresión. Observamos que el método fue eficaz para lograr la meta propuesta en este trabajo. Los coeficientes de determinación (R^2) indican que todas las variables independientes (CMV, CC, CCF y CMO) explican adecuadamente la variación del PCS de cada especie.

All linear correlations were significant ($P < 0.05$) by the t-test, proving a linear relationship between the variables (Table 3). A positive correlation was observed between the GCV and the FCC and OMC; *i. e.*, higher GCV values tended to be associated with higher FCC and OMC percentages. The opposite was observed in the concentrations of VMC and

CUADRO 2. Estimaciones de ecuaciones del poder calorífico superior (PCS) como una función del contenido de materia volátil (CMV), contenido de cenizas (CC), contenido de carbono fijo (CCF) y contenido orgánico (CMO) de cuatro especies de árboles en diferentes espaciamientos: 2 x 1 m, 2 x 1.5 m, 3 x 1 m y 3 x 1.5 m.

	Ecuaciones para el poder calorífico superior (kcal·kg ⁻¹)	R ² (%)	R ² _{adj} (%)	S _{yx} (kcal·kg ⁻¹)	S _{yx} (%)	F	χ ²	α	χ ² _{Validación}	α _{Validación}
<i>Acacia mearnsii</i>										
1	PCS = 136,889 - 1,307.9741 * CMV - 1374.3572 * CC - 1,286.7296 * CCF - 41.6619 * CMO	97.42	91.24	10.58	0.23	28.28*	0.108	0.999	1.508	0.681
2	PCS = 7,304.3499 - 19.3460 * CMV - 70.1160 * CC - 25.9414 * CMO	96.40	93.43	10.08	0.22	35.74*	0.099	0.999	1.340	0.720
3	PCS = 5,811.33 - 16.2865 * CMV - 43.7865 * CC	95.90	94.10	10.02	0.22	58.54*	0.112	0.999	1.011	0.799
4	PCS = 6,202.8470 - 22.3083 * CMV	94.07	93.14	10.81	0.24	95.14*	0.155	0.999	1.066	0.785
<i>Mimosa scabrella</i>										
1	PCS = 30,561 - 312.9368 * CMV - 479.0184 * CC - 337.7507 * FCC + 125.1328 * CMO	99.22	97.65	7.73	0.17	63.92*	0.027	0.999	1.6652	0.645
2	PCS = 2,5149 - 204.3807 * CMV - 410.9526 * CC - 200.0208 * CCF	98.81	97.64	7.76	0.17	83.25*	0.041	0.999	1.9637	0.580
<i>Eucalyptus grandis</i>										
1	PCS = -2751.8605 + 14.2498 * CMV - 316.6643 * CC + 25.5335 * CCF + 126.0480 * CMO	96.52	91.88	47.96	1.08	20.80*	1.557	0.999	2.5498	0.466
2	PCS = -1,964.5502 - 305.0789 * CC + 8.8498 * CCF + 139.6968 * CMO	96.49	93.86	41.71	0.94	36.65*	1.57	0.999	2.6718	0.445
3	PCS = -2,514.7144 - 315.3765 * CC + 154.5386 * CMO	96.41	94.47	37.74	0.85	67.08*	1.612	0.999	2.3572	0.502
4	PCS = 5,137.7462 - 601.3702 * CC	92.76	92.76	48.91	1.1	76.83*	3.312	0.999	0.8068	0.848
<i>Ateleia glazioviana</i>										
1	PCS = -1,357.7725 + 39.5629 * CMV - 185.02063 * CC + 41.8057 * CCF + 48.348 * CMO	90.24	87.24	32.42	0.72	6.94*	0.71	0.998	0.4806	0.923
2	PCS = 1,875.4921 + 5.1465 * CMV - 183.4721 * CC + 54.3555 * CMO	89.77	82.10	28.75	0.64	11.70*	0.745	0.998	0.3904	0.942
3	PCS = 1,999.0619 - 149.7787 * CC + 59.1740 * CMO	89.64	84.05	27.14	0.61	37.9*	0.755	0.998	0.4781	0.924
4	PCS = 4,979.5591 - 272.4774 * CC	87.10	84.95	26.36	0.59	40.52*	0.941	0.996	0.5835	0.900

R²: Coeficiente de determinación, R²_{adj}: Coeficiente de determinación ajustado, S_{yx}: Error estándar de la estimación, F y χ²: P ≤ 0.05

TABLE 2. Equation estimates of gross calorific value (GCV) as a function of the volatile matter content (VMC), ash content (AC), fixed carbon content (FCC) and organic content (OMC) of four tree species at different spacings: 2 x 1 m, 2 x 1.5 m, 3 x 1 m and 3 x 1.5 m.

Equations for gross calorific value (kcal·kg ⁻¹)	R ² (%)	R ² _{adj} (%)	S _{yx} (kcal·kg ⁻¹)	S _{yx} (%)	F	χ ²	α	χ ² _{Validation}	α _{Validation}
<i>Acacia mearnsii</i>									
1 GCV = 136,889 - 1,307.9741 * VMC - 1374.3572 * AC - 1,286.7296 * FCC - 41.6619 * OMC	97.42	91.24	10.58	0.23	28.28*	0.108	0.999	1.508	0.681
2 GCV = 7,304.3499 - 19.3460 * VMC - 70.1160 * AC - 25.9414 * OMC	96.40	93.43	10.08	0.22	35.74*	0.099	0.999	1.340	0.720
3 GCV = 5,811.33 - 16.2865 * VMC - 43.7865 * AC	95.90	94.10	10.02	0.22	58.54*	0.112	0.999	1.011	0.799
4 GCV = 6,202.8470 - 22.3083 * VMC	94.07	93.14	10.81	0.24	95.14*	0.155	0.999	1.066	0.785
<i>Mimosa scabrella</i>									
1 GCV = 30,561 - 312.9368 * VMC - 479.0184 * AC - 337.7507 * FCC + 125.1328 * OMC	99.22	97.65	7.73	0.17	63.92*	0.027	0.999	1.6652	0.645
2 GCV = 2,5149 - 204.3807 * VMC - 410.9526 * AC - 200.0208 * FCC	98.81	97.64	7.76	0.17	83.25*	0.041	0.999	1.9637	0.580
<i>Eucalyptus grandis</i>									
1 GCV = -2751.8605 + 14.2498 * VMC - 316.6643 * AC + 25.5335 * FCC + 126.0480 * OMC	96.52	91.88	47.96	1.08	20.80*	1.557	0.999	2.5498	0.466
2 GCV = -1,964.5502 - 305.0789 * AC + 8.8498 * FCC + 139.6968 * OMC	96.49	93.86	41.71	0.94	36.65*	1.57	0.999	2.6718	0.445
3 GCV = -2,514.7144 - 315.3765 * AC + 154.5386 * OMC	96.41	94.47	37.74	0.85	67.08*	1.612	0.999	2.3572	0.502
4 GCV = 5,137.7462 - 601.3702 * AC	92.76	92.76	48.91	1.1	76.83*	3.312	0.999	0.8068	0.848
<i>Ateleia glazioviana</i>									
1 GCV = -1,357.7725 + 39.5629 * VMC - 185.02063 * AC + 41.8057 * FCC + 48.348 * OMC	90.24	87.24	32.42	0.72	6.94*	0.71	0.998	0.4806	0.923
2 GCV = 1,875.4921 + 5.1465 * VMC - 183.4721 * AC + 54.3555 * OMC	89.77	82.10	28.75	0.64	11.70*	0.745	0.998	0.3904	0.942
3 GCV = 1,999.0619 - 149.7787 * AC + 59.1740 * OMC	89.64	84.05	27.14	0.61	37.9*	0.755	0.998	0.4781	0.924
4 GCV = 4,979.5591 - 272.4774 * AC	87.10	84.95	26.36	0.59	40.52*	0.941	0.996	0.5835	0.900

R²: Coefficient of determination, R²_{adj}: Adjusted coefficient of determination, S_{yx}: Standard error of the estimate, F and χ²: P ≤ 0.05

Todas las correlaciones lineales fueron significativas (P < 0.05) por la prueba de t, lo que demuestra una relación lineal entre las variables (Cuadro 3). Se observó una correlación positiva entre el PCS y el CCF y CMO; es decir, los valores de PCS más altos tendieron a estar asociados con porcentajes más altos del CCF y CMO. Lo contrario se observó en el CMV y CC, que se correlacionaron negativamente con el PCS; es decir, los valores de PCS tendieron a disminuir cuando las concentraciones de estos componentes químicos aumentaron.

Las ecuaciones estadísticas fueron muy similares entre sí, para todas las especies (Cuadro 2). La especie *A. mearnsii* reveló

AC, which were negatively correlated with GCV values; that is, GCV values tended to decrease when concentrations of these chemicals increased.

Equation statistics were very similar to each other for all species (Table 2). The species *A. mearnsii* revealed a standard error of the estimate less than 0.3 %, with the independent variable VMC present in all steps. In both steps obtained for the species *M. scabrella* the standard error of the estimate was less than 0.2 % and yielded a more significant F value for the equation that included explanatory variables containing the chemical analysis concentrations. As for the spe-

CUADRO 3. Correlación de Pearson entre el poder calorífico superior (PCS) y el contenido de materia volátil (CMV), contenido de cenizas (CC), contenido de carbono fijo (CCF) y contenido de carbono orgánico (CMO) de cuatro especies de árboles a diferentes distancias: 2 x 1 m, 2 x 1.5 m, 3 x 1 m y 3 x 1.5 m.

TABLE 3. Pearson correlation between the calorific value (GCV) with the volatile matter content (VMC), ash content (AC), fixed carbon content (FCC) and organic carbon content (OMC) of four tree species at different spacings: 2 x 1 m, 2 x 1.5 m, 3 x 1 m and 3 x 1.5 m.

Especies / Species	CMV / VMC	CC / AC	CCF / FCC	CMO / OMC
<i>Acacia mearnsii</i>	-96.99*	-92.36*	97.64*	92.87*
<i>Mimosa scabrella</i>	-86.06*	-98.20*	91.49*	91.82*
<i>Eucalyptus grandis</i>	-85.13*	-96.31*	90.13*	96.24*
<i>Ateleia glazioviana</i>	-80.34*	-93.33*	82.47*	92.92*

*Significativo con $P \leq 0.05$.

*Significant at $P \leq 0.05$.

un error estándar de la estimación de menos de 0.3 %, con la variable independiente CMV presente en todos los pasos. En ambos pasos obtenidos para la especie *M. scabrella*, el error estándar de la estimación fue menos de 0.2 %, produciendo un valor *F* más significativo para la ecuación con variables explicativas que representan las concentraciones del análisis químico. En cuanto a las especies *E. grandis* y *A. glazioviana*, el error estándar de la estimación se mantuvo por debajo de 1.5 % y la variable explicativa CC estuvo presente en todos los pasos. Los valores de X^2 no fueron significativos ($P > 0.05$) en ninguna de las ecuaciones, lo que implica que no existen diferencias significativas entre los valores estimados y los reales (Cuadro 2).

Al comparar la ecuación 4 (con sólo la variable CMV) con las demás, en el caso de la especie *A. mearnsii* se constató que tanto los ajustes y el error estándar de la estimación (en valor absoluto y en porcentaje) fueron similares (Cuadro 2) como se demuestra en la distribución gráfica de residuos (Figura 1). Sin embargo, los valores *F* fueron más significativos en esta ecuación que para las demás. Por lo tanto, desde un punto de vista práctico, el uso de ecuaciones que incluyen sólo CMV puede ser más ventajoso con respecto a los costos, así como el ahorro de tiempo que se ofrece, ya que la obtención de estimaciones de la variable, según lo reportado, requiere sólo 40 % del tiempo que se necesita para un análisis químico completo e inmediato (Vale, Abreu, Gonzalez, & Costa, 2002).

Las dos ecuaciones para la especie *M. scabrella* también se realizaron de manera similar tanto para el ajuste, el error estándar de estimación (Cuadro 2) y la distribución de los residuos (Figura 1). Aunque el CMO puede ser una característica importante, ya que está altamente correlacionado con el PCS, la menor mejora en la estimación de la adición de la variable en las ecuaciones de regresión se ve compensada por el costo y el tiempo para obtener los datos.

Del mismo modo, para *E. grandis* y *A. glazioviana*, la ecuación que implica sólo el CC se realizó de manera similar a

cies *E. grandis* and *A. glazioviana*, the standard error of the estimate remained below 1.5 % and the explanatory variable AC was present in all steps. X^2 values were not significant in any of the equations, implying that there are significant differences between estimated and actual values (Table 2).

When comparing equation 4 (with only the VMC variable) with the others for the species *A. mearnsii*, we found that both the fits and the standard error of estimate (in absolute value and in percentage) performed similarly (Table 2) as demonstrated in the graphic distribution of residuals (Figure 1). However, *F* values were more significant for this equation than for the others. Thus, from a practical standpoint using equations that include only VMC may be more advantageous with respect to costs as well as the time savings afforded, since obtaining estimates for the variable reportedly requires only 40 % of the time required of a full immediate chemical analysis (Vale, Abreu, Gonzalez, & Costa, 2002).

The two equations for the species *M. scabrella* also performed similarly for both the fit and the standard error of estimate (Table 2) and the distribution of residuals (Figure 1). Although the OMC may be an important characteristic, since it is highly correlated with GCV, the minor improvement in the estimate for the addition of the variable in the regression equations is outweighed by the cost and time to obtain the data.

Likewise, for the species *E. grandis* and *A. glazioviana* the equation involving only the AC performed similarly to the equations for other species, for the fit, the standard error of estimate (Table 2), and the distribution of residuals (Figure 1). Chemical composition was also important in determining the AC of the wood, since an abundance of this material reduces the organic material available for combustion. Brand (2010) states that higher AC contribute to a reduction in calorific value, since the minerals materials (ash) do not participate in the combustion process but are nonetheless recorded in the mass of fuel subjected to the combustion process. Thus, the AC variable in the equations is valid be-

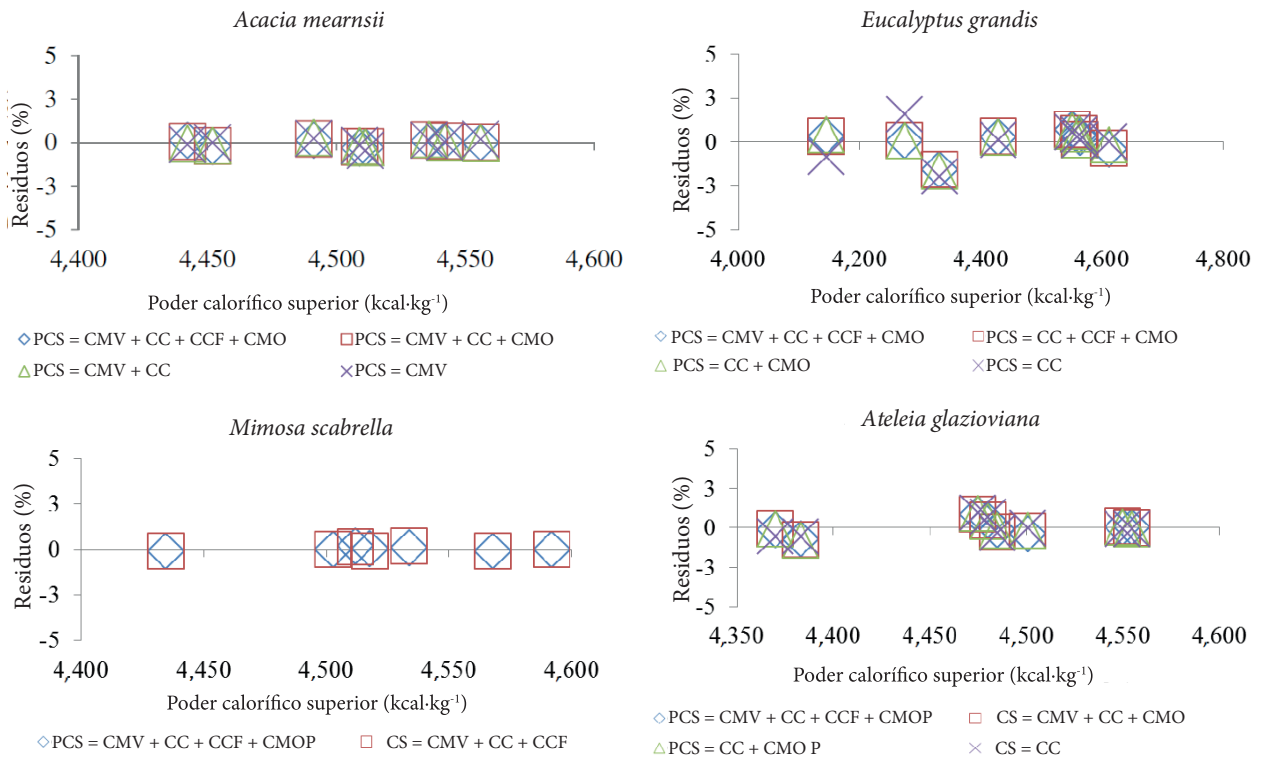


FIGURA 1. Distribución de los residuos de las ecuaciones obtenidas para la estimación del poder calorífico superior (PCS) en función del contenido de materia volátil (CMV), cenizas (CC), carbono fijo (CCF) y contenido orgánico (CMO) de cuatro especies de árboles a diferentes distancias: 2 x 1 m, 2 x 1.5 m, 3 x 1 m and 3 x 1.5 m.

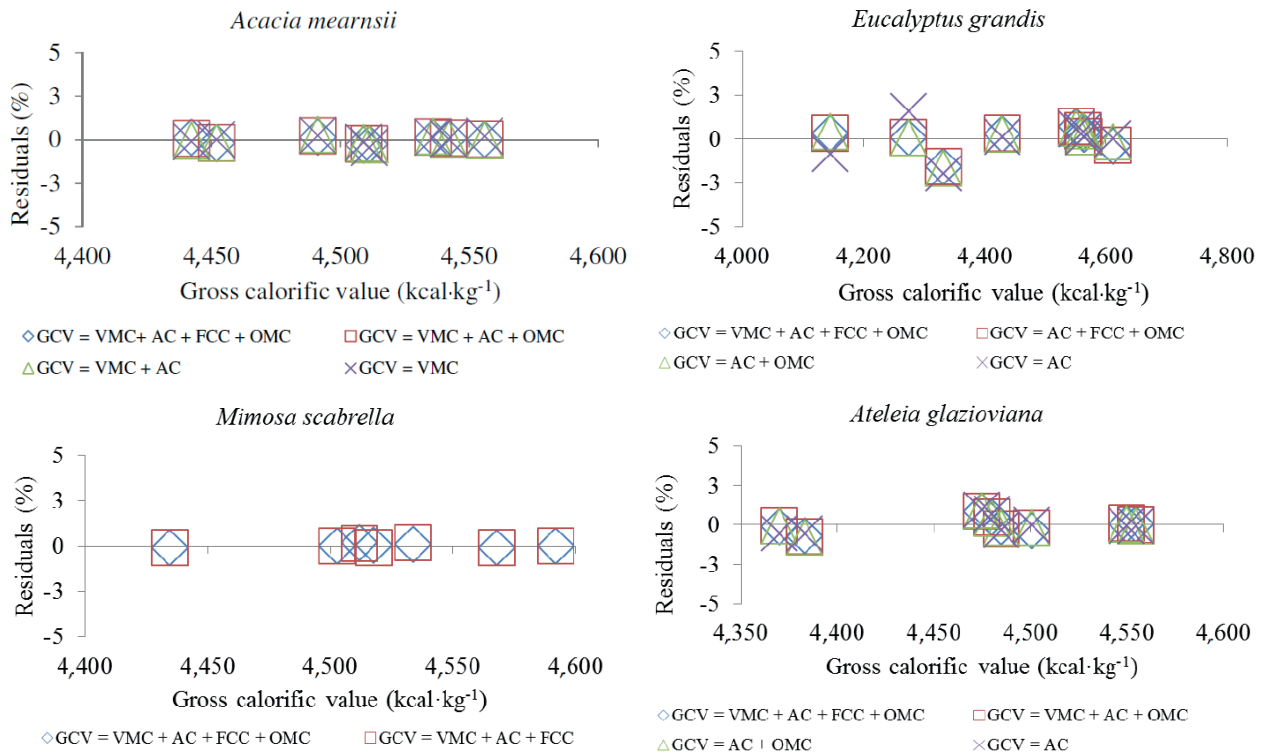


FIGURE 1. Distribution of residuals of equations obtained to estimating gross calorific value (GCV) as a function of volatile material content (VMC), ash (AC), fixed carbon (FCC) and organic content (OMC) of four tree species at different spacings: 2 x 1 m, 2 x 1.5 m, 3 x 1 m and 3 x 1.5 m.

las ecuaciones de las otras especies, tanto para el ajuste, el error estándar de estimación (Cuadro 2) y la distribución de los residuos (Figura 1). La composición química también fue importante en la determinación del CC de la madera, ya que una gran cantidad de este material reduce el material orgánico disponible para la combustión. Brand (2010) afirma que el aumento de CC contribuye a una reducción en el poder calorífico, ya que los materiales minerales (cenizas) no participan en el proceso de combustión, pero son registrados en la masa de combustible sometido al proceso de combustión. Por lo tanto, la variable CC en las ecuaciones es válida, ya que contribuye negativamente al PCS como reportaron Majumder et al. (2008) y Protásio et al. (2011).

Sin embargo, Sheng y Azevedo (2005) recalcan que las correlaciones basadas en el análisis elemental son más precisas que las que se basan en el análisis inmediato (combustión), ya que un análisis posterior sólo muestra una composición de la biomasa empírica. Sin embargo, la adición de CC en las ecuaciones contribuyó a la capacidad de predecir el PCS.

La modelación mediante el uso de regresiones lineales simples o múltiples fue esencial en el análisis de la relación entre las variables y para hacer predicciones de PCS basándose en el análisis químico (CMV, CC y CCF) y en el análisis elemental (CMO). La alta correlación entre PCS y CMV, CC, CCF y CMO, así como el excelente ajuste que producen, refuerzan la posibilidad de utilizar ecuaciones simples o múltiples para la predicción del PCS. De esta forma, las ecuaciones pueden ser muy útiles en la reducción de los costos, el tiempo asociado con el análisis y las evaluaciones preliminares de la biomasa forestal.

Majumder et al. (2008) y Protásio et al. (2011) también refuerzan la idea de que las regresiones lineales simples y múltiples que involucran componentes químicos elementales (tal como el CMO), análisis químico y PCS son de gran valor, ya que la determinación de este último es un proceso costoso que requiere de instrumentos especiales y analistas altamente capacitados. Aunque las ecuaciones sólo afectan el PCS de *A. mearnsii* y *E. grandis*, la ceniza de *A. glazioviana* y los elementos de análisis inmediato de *M. scabrella* presentan algunas ventajas sobre las alternativas. Como se ha mencionado, todas las ecuaciones fueron sometidas a una fase de validación porque de una u otra manera, pueden llegar a ser importantes en la obtención de todas las variables explicativas.

Los resultados de R^2 no fueron significativos ($P > 0.05$) para ninguna de las ecuaciones (Cuadro 2), lo que implica que no hubo diferencias significativas entre los valores estimados y los valores reales (derivados de un conjunto de cuatro observaciones complementarias para cada especie). Por consiguiente, todas las ecuaciones se validaron con éxito, debido a la no significación de la prueba X^2 y a la distribución adecuada de los residuos (Figura 1), con valores de dispersión mínimos y máximos de entre -43 y 82 kcal·kg⁻¹ en valores absolutos y entre -0.93 % y 1.94 % en valores relativos.

cause it contributes negatively to GCV as observed by Majumder et al. (2008) and Protásio et al., (2011).

However, Sheng and Azevedo (2005) emphasize that correlations based on elemental analysis are more accurate than those based in immediate (combustion) analysis because the latter analysis yields only an empirical biomass composition. Nevertheless, the addition of AC in the equations contributed to the ability to predict GCV.

Modeling using single or multiple linear regressions was shown to be essential in analyzing the relationship between variables and to making predictions of GCV on the basis of chemical analysis (the content of volatiles, fixed carbon and ash) and also on the basis of elemental analysis, such as the OMC. The high correlation between the GCV and VMC, AC, FCC and OMC and also the excellent fit they produce, reinforces the possibility of using single or multiple equations for predicting GCV. Thus they can be very helpful in reducing the costs and time associated with analysis and preliminary assessments of forest biomass.

Majumder et al. (2008) and Protásio et al. (2011) also reinforce the idea that simple and multiple linear regressions involving elementary chemical components (such as organic carbon content), the chemical analysis and the GCV are of great value, since the determination of the GCV is a costly process requiring special instruments and highly trained analysts. Although the equations involving only the VMC for *A. mearnsii* and *E. grandis*, ash for *A. glazioviana*, and elements of proximate analysis for *M. scabrella* present some advantages over the alternatives. As seen, all of the equations were subjected to a validation phase because one way or another, they may become important in obtaining all the explanatory variables.

R^2 results were not significant ($P > 0.05$) for any of the equations (Table 2), implying that there were no significant differences between estimated and actual values (derived from a set of four complementary observations for each species). All equations were therefore successfully validated, due to the non-significance of the X^2 test and the adequate distribution of residuals (Figure 1), with minimum and maximum values of dispersion falling between -43 and 82 kcal·kg⁻¹ in absolute values and between -0.93 % and 1.94 % in relative values.

The selection of the best equation suggests including the maximum number of variables to find reliable estimates. However, convenience and cost constraints associated with obtaining data suggests keeping the number of variables to a minimum, which according to Draper and Smith (1966) is achieved by selecting the best linear regression equation. In this respect, it is noteworthy that the equations involving only the VMC for *A. mearnsii*, AC for *E. grandis* and *A. glazioviana* (Equation 4 in Table 2), and the elements of the immediate (combustion) analysis for *M. scabrella* (Equation 2 in Table 2), were as effective in estimating GCV as the other equations that including more independent variables.

La selección de la mejor ecuación sugiere incluir el número máximo de variables para encontrar estimaciones fiables. Sin embargo, la conveniencia y las restricciones de costo asociadas con la obtención de los datos sugiere mantener el número de variables a un mínimo, que de acuerdo con Draper y Smith (1966) se logra mediante la selección de la mejor ecuación de regresión lineal. En este sentido, cabe destacar que las ecuaciones que sólo afectan el PCS de *A. mearnsii*, el CC de *E. grandis* y *A. glazioviana* (ecuación 4 en el Cuadro 2), y los elementos del análisis inmediato (combustión) de *M. scabrella* (ecuación 2 en el Cuadro 2), fueron tan eficaces en la estimación del PCS como las ecuaciones que incluyeron más variables independientes.

CONCLUSIONES

El poder calorífico superior puede calcularse fácilmente mediante ecuaciones lineales cuya variable de entrada sea el contenido de material volátil para *A. mearnsii*, contenido de cenizas para *E. grandis* y *A. glazioviana*, y los elementos de análisis químico para *M. scabrella*. De esta forma, la funcionalidad, el buen ajuste y la precisión pueden mantenerse.

REFERENCIAS

- NBR 8112 (1986). *Carvão vegetal-análise imediata: Documentos impressos*. Rio de Janeiro, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- NBR 8633 (1984). *Charcoal-determination of calorific value: Documentos impressos*. Rio de Janeiro, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Brand, M. A. (2010). *Energia de biomassa florestal*. Rio de Janeiro, Brasil: Interciência.
- Draper, N. R., & Smith, R. (1966). *Applied regression analysis*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- Friedl, E., Padouvas, H., & Rotter, K. (2005). Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. *Analytica Chimica Acta*, 544(2), 191–198. doi: 10.1016/j.aca.2005.01.041
- Majumder, A. K., Jain, R., Banerjee, P., & Barnwal, J. P. (2008). Development of a new proximate analysis based correlation to predict calorific value of coal. *Fuel*, 87(13-14), 3077–3081. doi: 10.1016/j.fuel.2008.04.008

CONCLUSIONS

The gross calorific value can be easily estimated using linear equations whose input variable are volatile materials for *A. mearnsii*, ash for *E. grandis* and *A. glazioviana*, and the elements of chemical analysis for *M. scabrella*, while maintaining practicality, good fit and precision.

End of English Version

- Maluf, J. R. T. (2000). Nova classificação climática do Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 8(1), 141–150. Obtenido de <http://pt.scribd.com/doc/57706483/Nova-classificacao-climatica-do-Estado-do-Rio-Grande-do-Sul>
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., & Real, P. (1997). *Mensura florestal*. San José: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)-Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Protásio, T. P., Bufalino, L., Tonoli, G. H. D., Couto, A. M., Trugilho, P. F., & Júnior, M. G. (2011). Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 31(66), 113–122. doi: 10.4336/2011.pfb.31.66.113
- SAS Learning Edition (2002). *Getting started with the SAS learning edition*. North Carolina, USA: SAS Institute.
- Sheng, C., & Azevedo, J. L. T. (2005). Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. *Biomass and Bioenergy*, 28(5), 499–507. doi: 10.1016/j.biombioe.2004.11.008
- Schneider, P. R. (1998). *Análise de regressão aplicada à Engenharia Florestal*. Santa Maria, RS, Brasil: UFSM.
- Vale, A. T., Abreu, V. L. S., Goncalves, J. C., & Costa, A. F. (2002). Estimativa do poder calorífico superior do carvão vegetal de madeiras de *Eucalyptus grandis* em função do teor de carbono fixo e do teor de materiais voláteis. *Brasil Florestal*, 73, 47–52.