

Artigos

Classificação da qualidade da biomassa de árvores de acácia-negra para fins energéticos

Quality classification of black wattle trees biomass for energetic purposes

Sérgio Costa Junior¹ 
Dimas Agostinho da Silva¹ 
Alexandre Behling¹ 
Henrique Soares Koehler¹ 
Jonathan William Trautenmüller¹ 
Athina Costa¹ 

¹Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil

¹Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, PA, Brasil

RESUMO

Uma das principais dificuldades na escolha de uma biomassa florestal para fins energéticos está na avaliação de sua qualidade. Desse modo, o objetivo desta pesquisa foi propor uma classificação da biomassa de povoamentos de acácia negra com base nas variáveis poder calorífico superior, densidade energética, teor de cinzas e estoque de biomassa. Para esse fim, povoamentos comerciais da espécie foram amostrados em três regiões de cultivo (Cristal, Encruzilhada do Sul e Piratini) no Rio Grande do Sul, com 1 a 10 anos classificados em grupos de idade I, II, III e IV. Nesses povoamentos, foram abatidas 670 árvores, as quais tiveram suas variáveis biométricas e energéticas mensuradas. Desses locais, também foram coletadas variáveis meteorológicas e edáficas. A análise de agrupamento (cluster) foi utilizada para separar as variáveis preditoras em três classes de qualidade denominadas baixa, média e alta. A análise discriminante revelou duas funções capazes de classificar novas observações nas classes de qualidade. As funções discriminantes conseguiram classificar corretamente mais de 51% das árvores com base no poder calorífico superior, 65% com base na densidade energética, 89% no teor de cinzas e 85% no estoque energético. As variáveis biométricas, energéticas e meteorológicas contribuíram para a discriminação das classes de qualidade.

Palavras-chave: Bioenergia; Variáveis energéticas; Componentes da biomassa



ABSTRACT

One of the main difficulties in choosing forest biomass for energetic purposes is the evaluation of its quality. Thus, the objective of this research was to propose a classification of the biomass of black wattle stands based on the variables gross calorific value, energy density, ash content and biomass stock. For this purpose, commercial stands of the species were sampled in three growing regions (Cristal, Encruzilhada do Sul and Piratini) in Rio Grande do Sul, with 1 to 10 years old classified into age groups I, II, III and IV. In these stands, 670 trees were felled, their biometric and energetic variables were measured. From these locations, meteorological and edaphic variables were also collected. Cluster analysis was used to separate the predictor variables into three quality classes called low, medium and high. Discriminant analysis revealed two functions capable of classifying new observations into quality classes. The discriminant functions were able to correctly classify more than 51% of the trees based on gross calorific value, 65% based on energy density, 89% on ash content and 85% on energy stock. The biometric, energetic and meteorological variables contributed to the discrimination of the quality classes.

Keywords: Bioenergy; Energy variables; Biomass components

1 INTRODUÇÃO

O crescimento e o desenvolvimento da sociedade demandam cada vez mais tecnologias que estão diretamente ligadas ao consumo de energia, principalmente a elétrica (MIRANDA, MARTINS, LOPES, 2019). Com a necessidade de conciliar o âmbito econômico e socioambiental surgem as energias renováveis, que aos poucos têm conquistado mais espaço (NUNES, 2015). Entre as fontes de energia renováveis se destaca a biomassa, em especial a florestal.

A biomassa florestal é um material heterogêneo, ou seja, suas características variam, resultando em materiais com diferentes qualidades. Nesse contexto, encontram-se os povoamentos de acácia negra, em que parte de sua biomassa já vem sendo destinada ao uso energético. A maior parte dos plantios, no estado do Rio Grande do Sul, é realizada em pequenas propriedades rurais, com cerca de 30 mil famílias envolvidas nessa atividade, que ocupam aproximadamente 90 mil hectares (TANAC, 2021). Devido a isso, a biomassa dos povoamentos pode ser comercializada com diferentes idades, de acordo com a necessidade de cada produtor. Isso implica em biomassas ainda mais heterogêneas, com qualidade distinta.



Para auxiliar os produtores, gestores e compradores de florestas na tomada de decisões e valoração da biomassa para fins energéticos, o objetivo do trabalho foi propor uma classificação da biomassa dos povoamentos de acácia negra. Para isso, variáveis como poder calorífico superior, densidade energética, teor de cinzas e estoque de biomassa foram utilizadas como indicadores de qualidade.

Protásio, Bufalino, Tonoli, Couto, Trugilho e Guimarães Júnior (2011) e Eloy, Caron, Silva, Schmidt, Trevisan, Behling e Elli (2014) destacam o poder calorífico como uma das propriedades energéticas mais importantes. A densidade energética é o produto da densidade básica pelo poder calorífico, resultando em uma variável que representa a quantidade de energia por volume de biomassa. O teor de cinzas corresponde a substâncias que não entram em combustão, ou seja, quanto menor, melhor será a biomassa para o uso energético. De acordo com Chaves, Vale, Melido e Zoch (2013), substâncias compostas de material inorgânico têm relação inversa com o poder calorífico. O estoque de biomassa é uma das variáveis determinantes em decisões a respeito de utilizar ou não a biomassa dos povoamentos para fins energéticos.

Para discriminar as classes de qualidade propostas, foi testada a hipótese que as variáveis biométricas, energéticas, meteorológicas e edáficas são capazes de discriminar os grupos de qualidade para variáveis como poder calorífico superior, densidade energética, teor de cinzas e estoque de biomassa.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Seleção e amostragem dos povoamentos

O objeto de estudo foi composto por árvores de acácia-negra cultivadas em povoamentos comerciais. A amostragem foi realizada em três regiões denominadas: município de Cristal, Encruzilhada do Sul e Piratini, no estado do Rio Grande do Sul. Essas regiões estão caracterizadas em relação ao clima, tipo de relevo e solo em Mochiutti (2007).



Foram selecionados 12 povoamentos comerciais, sendo 4 em cada região e cada um em uma idade diferente (Tabela 1). Em cada povoamento, foram tomadas quatro unidades amostrais aleatoriamente, totalizando 48 unidades amostrais, compostas por uma parcela circular com área de 78,54m². Ao todo 670 árvores vivas foram derrubadas e mensuradas as variáveis descritas na sequência.

Sabendo que a idade influencia significativamente as propriedades energéticas, como já constatado nos trabalhos de Costa Júnior, Silva, Behling, Koehler, Simon e Costa (2021) e Eloy (2015), os dados foram agrupados em classes de idade. O grupo I compreende povoamentos com idade até dois anos, grupo II povoamentos com idade entre dois e quatro anos, o grupo III entre quatro e seis anos e o grupo IV povoamentos com idades acima de seis anos (Tabela 1).

Tabela 1 – Informações dos povoamentos de acácia-negra amostrados no estado do Rio Grande do Sul

Local	Idade (anos)	Grupos	S	W	Altitude (m)	N. de árvores	Falhas Mortas	H dom (m)
Cristal	1,75	I	30°58'23,8"	52°23'46,7"	198	59	12%	8,91
	2,75	II	30°58'26,7"	52°25'14,1"	170	47	8%	12,86
	5	III	30°50'49,1"	52°03'06,8"	91	43	17%	16,11
	10,08	IV	31°07'26,1"	52°05'10,8"	121	57	31%	18,73
Encruzilhada do Sul	1,83	I	30°29'54,6"	52°38'33,5"	304	56	5%	8,49
	3,08	II	30°53'16,1"	52°23'33,7"	101	68	9%	12,20
	5,75	III	31°05'23,7"	53°04'05,7"	207	50	23%	17,44
	10,75	IV	30°27'35,8"	52°36'23,7"	294	62	28%	19,43
Piratini	1	I	32°16'09,6"	53°18'59,3"	101	73	7%	3,84
	2,33	II	31°26'25,1"	52°59'35,9"	288	48	17%	14,65
	5,25	III	31°21'05,4"	52°56'45,3"	442	60	11%	15,41
	9,83	IV	31°24'46,5"	52°57'26,7"	235	51	42%	17,51

Fonte: Autores (2022)

Em que: S é coordenada a Sul; W é a coordenada a Oeste. H dom é a altura dominante.

Todos os povoamentos amostrados foram implantados utilizando-se práticas de cultivo mínimo com uma subsolagem a 40 centímetros de profundidade e duas



gradagens na linha de plantio. As mudas utilizadas foram produzidas a partir de sementes oriundas das áreas de produção de sementes da empresa TANAGRO S.A. Cerca de 75 gramas de adubo organo-mineral 4-12-8 foi fornecido a cada muda. Todos os povoamentos foram implantados com espaçamento de 3 m entre linha e 1,75 entre plantas na linha. As mesmas condições de manejo foram adotadas em todos os povoamentos.

2.2 Variáveis

As 670 árvores derrubadas foram mensuradas quanto à circunferência à altura de 1,3 metros (cap) e a altura total (h). Ao avaliar a biomassa, optou-se por separar as árvores em dois componentes, o fuste (madeira do fuste e casca) e a copa (galhos vivos e mortos, folhas, flores e frutos), conforme definidas por Picard, Saint-André e Henry (2012).

Para a copa, a amostra tomada foi composta por aproximadamente 1.500 g e retirada ao longo do comprimento total da copa nas posições de 0% (base da copa), 25%, 50%, 75% e 95%. Para o fuste foram retirados cinco discos, de aproximadamente 2 cm de espessura, nas posições 0% (nível do solo), 25%, 50%, 75% e 95% em relação à altura total. Foram coletadas ao todo 1340 amostras.

Para a determinação da densidade básica, procedeu-se de acordo com a norma técnica ASTM D2395 (2014). A determinação dos teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas foi realizada por meio de análises químicas de acordo com a norma técnica ASTM D1762-84 (2013). Para a determinação do poder calorífico superior, utilizou-se uma bomba calorimétrica digital modelo C5000 *Cooling System* IKA WORKS, com o princípio de funcionamento adiabático, seguindo os procedimentos estabelecidos na norma técnica ASTM D5865 (2013). A densidade energética (Gcal m⁻³) foi calculada como o produto entre a densidade básica em (kg m⁻³) e o poder calorífico superior (Gcal kg⁻¹).



Em cada parcela, foram coletadas amostras de solo em três profundidades: 0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm. Nas parcelas, amostras foram coletadas em três locais, com o auxílio de um trado, sendo, posteriormente, misturadas para obtenção de uma amostra composta para cada profundidade e para cada parcela. Ao todo foram coletadas 144 amostras, sendo 48 para cada profundidade. Essas amostras compostas foram encaminhadas para análises no laboratório de solos, da Universidade Federal de Santa Maria, para a determinação das propriedades químicas (resultados não apresentados neste trabalho).

Os valores referentes às variáveis meteorológicas: precipitação (PP), temperatura máxima (T_{máx}), temperatura média (T_{méd}), temperatura mínima (T_{min}) e umidade relativa do ar (UR), para o período de crescimento de cada povoamento, foram obtidos das estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de Pelotas e Encruzilhada do Sul. Os dados meteorológicos contemplam os anos de 2003 a 2014.

2.3 Análises estatísticas

Para realizar uma classificação da biomassa dos povoamentos de acácia-negra, a fim de facilitar a avaliação da qualidade energética, foram selecionadas as variáveis poder calorífico superior, densidade energética, teor de cinzas e estoque de biomassa. As demais variáveis foram divididas em categorias, variáveis biométricas, energéticas, meteorológicas e edáficas, que foram utilizadas como preditoras de uma árvore nos grupos de qualidade sugeridos.

As variáveis poder calorífico superior, densidade energética, teor de cinzas e estoque de biomassa foram submetidas à análise de agrupamento (cluster). Antes da definição dos grupos, foram testadas diferentes distâncias e funções de ligação para a separação do conjunto de dados com expectativa de três grupos. Foi calculada a correlação cofenética entre as respostas geradas pela função de ligação e os dados



originais de distância, sendo que a maior correlação indicou a distância e a ligação a ser utilizada. Foram testadas as distâncias: euclidiana, quadrado da distância euclidiana, City-Block (Manhattan), Mahalanobis e métrica de Minkowski. Quanto aos algoritmos de agrupamento, foram testados métodos hierárquicos, como: vizinho mais próximo, vizinho mais distante, valor médio, centróide e Ward.

Em seguida, procedeu-se uma análise discriminante com o objetivo de gerar funções capazes de discriminar novas árvores em classes de qualidade. Foram testados quatro grupos de variáveis, a fim de melhorar os resultados das classificações. No primeiro grupo, foram incluídas somente as variáveis biométricas, no segundo grupo além das variáveis biométricas foram incluídas as variáveis energéticas, no terceiro grupo acrescentou-se as variáveis meteorológicas e no quarto grupo as variáveis edáficas. A qualidade das funções discriminantes foi avaliada por meio das matrizes de confusão, e as funções que classificaram corretamente um maior número de indivíduos foram selecionadas (Quadro 1).

Quadro 1 – Variáveis que formam as classes de qualidade e variáveis discriminantes ou preditoras

Classes de qualidade	
Poder calorífico superior, densidade energética, teor de cinzas, estoque de biomassa	
Preditoras	
Biométricas	idade, diâmetro à altura do peito, altura total e comprimento de copa
Energéticas	densidade básica, poder calorífico superior, teor de materiais voláteis, teor de carbono fixo, teor de cinzas
Meteorológicas	Precipitação acumulada, precipitação média anual, temperatura máxima, temperatura média, temperatura mínima, umidade relativa e insolação.
Edáficas	pH(água), Cálcio, Magnésio, Alumínio, Hidróxido de Alumínio, Capacidade de troca catiônica efetiva, Saturação Alumínio, Saturação por bases, Índice SMP, % Matéria orgânica, % Argila, Textura, Fósforo (Mehlich), Potássio, Capacidade de troca catiônica em pH7, Ca/Mg, (Ca+Mg)/K, K/(Ca+Mg) ^{1/2}

Fonte: Autores (2022)



3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise exploratória dos dados

As estatísticas descritivas para o poder calorífico superior, densidade energética, teor de cinzas e estoque de biomassa da copa e fuste estão apresentadas na Tabela 2.

O poder calorífico da copa variou de 4364 a 5433 Kcal kg⁻¹ com média de 4884 kcal kg⁻¹. Para o fuste, a variação foi entre 4270 e 4949 Kcal kg⁻¹ com média de 4548 kcal kg⁻¹ (Tabela 2). Os maiores valores de poder calorífico constatados na copa se devem principalmente às folhas. Silva, Behling, Sanquetta, Ruza, Corte, Pschiedt e Costa Junior (2017) observaram, para a acácia-negra, que a biomassa das folhas possui os maiores valores para essa variável.

Isso se deve a variações nas proporções de folhas e galhos que compõem a copa de cada árvore. Proporção que pode ser alterada por inúmeros fatores, como: maior ou menor exposição à luz, disponibilidade de água, nutrientes, pragas, idade, entre outras. Behling (2014) também evidenciou que os atributos químicos do solo e as condições meteorológicas influenciam a dinâmica da biomassa foliar.

O poder calorífico superior da copa apresenta uma tendência de redução com a idade (Tabela 2). A proporção de folhas na biomassa de copa diminui com a idade e a de galhos aumenta. Já o poder calorífico superior do fuste não possui uma tendência de aumento ou redução com a idade (Tabela 2).

Os maiores valores de densidade energética foram constatados na copa com uma média de 2,52 Gcal m⁻³, variando de 1,60 a 4,11 Gcal m⁻³. A média para o fuste é de 2,30 Gcal m⁻³, variando de 1,38 a 3,46 Gcal m⁻³ (Tabela 2). Eloy (2015) encontrou valores de densidade energética entre 2,22 e 2,49 G.m⁻³, para árvores de acácia-negra em povoamentos com 5 anos.

Como a densidade energética é uma variável resultante do produto entre a densidade básica e o poder calorífico superior, os maiores valores na copa podem ser explicados pelos maiores valores de poder calorífico superior nesse componente (Tabela 2).



Tabela 2 – Estatísticas descritivas para o poder calorífico superior, densidade energética, teor de cinzas e estoque de biomassa da copa, fuste e total por grupos de idade, de árvores de acácia-negra no estado do Rio Grande do Sul

	Componente	Copa					Fuste				
		Grupos	Total	I	II	III	IV	Total	I	II	III
Poder Calorífico Superior (kcal kg ⁻¹)	Média	4884	5045	4854	4800	4815	4548	4565	4539	4559	4529
	Desvio padrão	186	136	185	121	175	68	66	60	45	86
	Coef. Variação	3,8	2,69	3,8	2,53	3,63	1,5	1,46	1,32	0,99	1,9
	Erro padrão	7	9,99	14,46	9,8	13,43	3	4,88	4,71	3,64	6,63
	Mínimo	4364	4544	4364	4541	4442	4270	4270	4382	4429	4315
	Máximo	5433	5433	5329	5179	5412	4949	4926	4691	4689	4949
	Int. Conf. Mín.	4870	5025	4825	4781	4788	4543	4555	4530	4552	4515
	Int. Conf. Máx.	4899	5065	4882	4820	4841	4553	4574	4548	4566	4542
Densidade energética (Gcal m ³)	Média	2,52	2,49	2,33	2,48	2,75	2,3	1,97	2,19	2,47	2,63
	Desvio padrão	0,34	0,38	0,26	0,26	0,31	0,35	0,23	0,24	0,25	0,26
	Coef. Variação	13,55	15,19	10,95	10,35	11,1	15,3	11,45	10,8	10,05	9,77
	Erro padrão	0,01	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
	Mínimo	1,6	1,75	1,63	1,65	1,6	1,38	1,38	1,43	1,83	1,49
	Máximo	4,11	4,11	3,37	3,04	3,51	3,46	2,75	3,4	3,46	3,24
	Int. Conf. Mín.	2,49	2,44	2,29	2,44	2,71	2,28	1,94	2,16	2,43	2,59
	Int. Conf. Máx.	2,54	2,55	2,37	2,52	2,8	2,33	2	2,23	2,51	2,66
Teor de cinzas (%)	Média	2,87	3,25	2,95	2,67	2,56	1,01	1,31	1,04	0,81	0,83
	Desvio padrão	0,73	0,56	0,79	0,59	0,73	0,31	0,27	0,19	0,24	0,23
	Coef. Variação	25,28	17,27	26,68	22,1	28,64	31,06	20,44	18,49	29,85	27,53
	Erro padrão	0,03	0,04	0,06	0,05	0,06	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
	Mínimo	0,72	1,83	0,82	1,6	0,72	0,27	0,72	0,63	0,27	0,39
	Máximo	5,22	5,22	5,1	4,43	4,96	2,68	2,23	1,75	2,68	1,89
	Int. Conf. Mín.	2,81	3,17	2,83	2,57	2,45	0,98	1,27	1,01	0,77	0,79
	Int. Conf. Máx.	2,92	3,33	3,07	2,76	2,67	1,03	1,35	1,07	0,85	0,86
Estoques de biomassa (kg)	Média	8,97	3,19	6,81	11,48	15,13	36,56	5,22	21,86	48,45	74,29
	Desvio padrão	9,64	2,77	5,3	7,73	13,97	39,33	4,63	13,42	29,56	48,15
	Coef. Variação	107,39	86,75	77,85	67,34	92,33	107,57	88,64	61,39	61,01	64,82
	Erro padrão	0,37	0,2	0,42	0,62	1,07	1,52	0,34	1,05	2,39	3,7
	Mínimo	0,16	0,19	0,16	0,29	0,59	0,04	0,1	1,15	0,7	0,04
	Máximo	94,71	11,54	26,33	32,82	94,71	266,36	20,09	71,12	140,43	266,36
	Int. Conf. Mín.	8,24	2,79	5,99	10,24	13,01	33,58	4,55	19,78	43,73	66,98
	Int. Conf. Máx.	9,7	3,59	7,63	12,71	17,25	39,54	5,89	23,93	53,17	81,6
	N. amostras	670	185	163	153	169	670	185	163	153	169

Fonte: Autores (2022)

Em que: Total é o conjunto de todas as idades, I, II, III e IV são os grupos de idade, Int. Conf. Mín. é o intervalo de confiança mínimo ($\alpha=5\%$) e Int. Conf. Máx. é o intervalo de confiança máximo ($\alpha=5\%$).



Há uma tendência de aumento da densidade energética da copa a partir do grupo II até o IV. Para o fuste, a densidade energética tende a aumentar com a idade. Como o poder calorífico superior médio para o fuste varia pouco, é a densidade básica que mais contribui para essa tendência. Eloy (2015) constatou que a densidade energética do fuste foi mais influenciada pela densidade básica do que pelo poder calorífico superior, que variou menos.

Os maiores teores de cinzas foram obtidos na biomassa de copa, uma média de 2,87%, variando de 0,72 a 5,22%. Para o fuste, a média foi de 1,01%, com variações de 0,27 a 2,68 % (Tabela 2). As cinzas correspondem aos minerais presentes nos vegetais.

Em um experimento com a acácia-negra, Eloy (2015) verificou uma maior participação de folhas do que de galhos na biomassa de copa em plantios com um ano, e que essa relação é inversa para plantios em idades superiores. O mesmo autor também constatou que as folhas e a casca de acácia-negra apresentaram os maiores teores de cinza quando comparado aos demais componentes. Assim, os maiores valores dos teores de cinzas no grupo I são ocasionados pela maior participação de folhas na biomassa de copa e da casca na composição da biomassa do fuste. O teor de cinzas da copa e do fuste tende a reduzir em florestas mais velhas.

O fuste é o componente com o maior estoque de biomassa, com média geral de 36,56 kg por indivíduo e com valores que alcançam 266,36 kg. A copa das árvores possui em média 8,97 kg, com valor máximo de 94,71 kg (Tabela 2).

Os estoques de biomassa de copa e fuste tendem a aumentar com a idade. No entanto, o incremento desses componentes ao longo do tempo ocorre de forma diferente. De acordo com Momolli e Schumacher (2019), à medida que o povoamento de acácia-negra envelhece, ocorre incremento em diâmetro e altura, resultando em produção de madeira e casca e diminuição da copa (principalmente folhas e galhos vivos).

A dinâmica que envolve o crescimento dos estoques de biomassa de copa e fuste é diferente. A biomassa de copa aumenta com o surgimento de novas folhas



e galhos principalmente, no entanto, a biomassa também se reduz com a queda de folhas e galhos. Behling (2014) estudando povoamentos de acácia-negra constatou que a idade do povoamento é um dos fatores que influenciam a massa de folhas. Para a mesma espécie, Costa Junior, Silva, Sanquetta, Behling, Simon, Trautenmuller e Ferraz (2018) constataram que o crescimento em biomassa de copa se mostra mais heterogêneo frente aos efeitos do fator idade, comparado ao fuste.

O fuste, diferente do que ocorre com a copa, somente acumula biomassa ao longo da idade. O fuste (madeira e casca) cresce em altura e em diâmetro, acumulando biomassa no decorrer das idades. Dessa maneira, o maior estoque de biomassa é encontrado no fuste e tende a aumentar com a idade.

Para a mesma base de dados utilizada na presente pesquisa, Costa Junior, Silva, Sanquetta, Behling, Simon, Trautenmuller e Ferraz (2018) observaram que em idades entre 0 e 2 anos a copa e o fuste representam em torno de 40% e 60% da biomassa total respectivamente. Em povoamento com idade superior a 6 anos, a copa responde por aproximadamente 20% e o fuste a 80% da biomassa total acima do solo.

3.2 Classes de qualidade

As classes de qualidade de cada variável energética foram estabelecidas com base na análise de agrupamento (cluster). Várias distâncias e ligações foram testadas. O coeficiente de correlação cofenética revelou que a distância Euclidiana e ligação de Ward foi a de melhor resultado para agrupamento das árvores em função das variáveis poder calorífico superior, teor de cinzas, densidade energética e estoque de biomassa. A análise de cluster agrupou os indivíduos em três classes de qualidade, denominadas de baixa, média e alta.

Os métodos do vizinho mais próximo, vizinho mais distante, valor médio e centróide apresentaram correlação cofenética mais forte quando comparado ao método de Ward, no entanto, a divisão de grupo não foi satisfatória (Tabela 3).



Tabela 3 – Correlação cofenética da análise de agrupamentos (Cluster) com a distância euclidiana para as variáveis* dos componentes copa e fuste de árvore de acácia-negra de povoamentos comerciais no estado do Rio Grande do Sul

Componentes da biomassa	Variáveis	Vizinho mais próximo	Vizinho mais distante	Valor médio	Centróide	Ward
Copa	PCS	0,48	0,68	0,72	0,73	0,67
	DE	0,57	0,68	0,77	0,77	0,59
	CZ	0,56	0,73	0,75	0,75	0,62
	EBIO	0,73	0,84	0,87	0,87	0,60
Fuste	PCS	0,50	0,80	0,78	0,81	0,55
	DE	0,47	0,66	0,72	0,72	0,65
	CZ	0,50	0,61	0,79	0,78	0,63
	BIO	0,64	0,86	0,84	0,84	0,73

Fonte: Autores (2022)

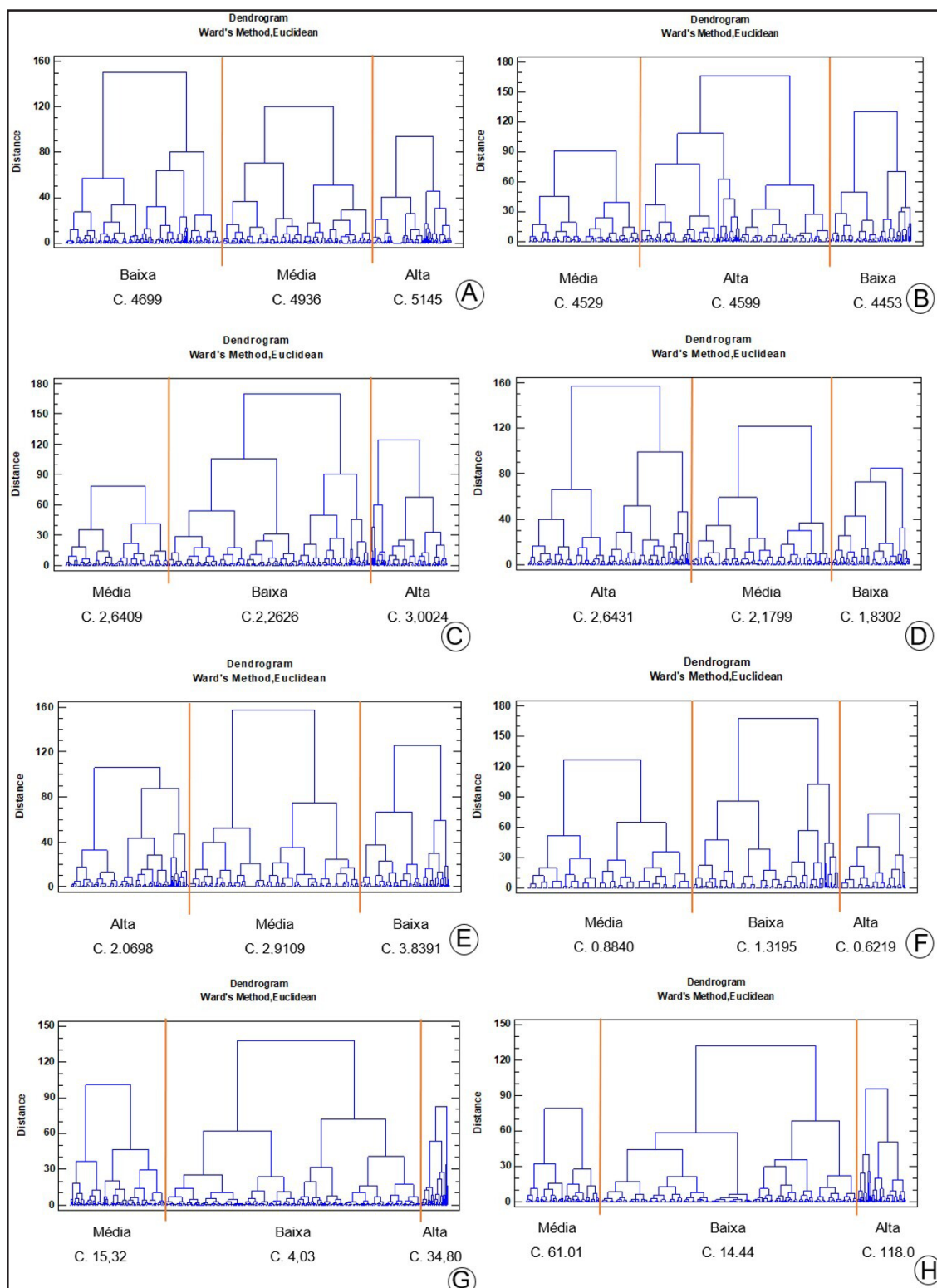
Em que: *estoque de biomassa (EBIO); poder calorífico superior (PCS); densidade energética (DE); teor de cinzas (CZ).

As variáveis poder calorífico superior, densidade energética, teor de cinzas e estoques de biomassa para copa e fuste foram agrupadas em três classes, denominadas classes de qualidade baixa, média e alta (Figura 1).

Considerando os valores de poder calorífico superior da copa, os dados foram distribuídos com frequência equilibrada entre as três classes de qualidade (Figura 1A). Para o fuste, a classe alta reuniu a maior quantidade de indivíduos (Figura 1B). Quando considerada a densidade energética da copa, o maior número de indivíduos ficou agrupado na classe baixa, enquanto que para o fuste a maior quantidade ficou agrupada na classe alta (Figuras 1C e 1D). Para o teor de cinzas da copa e fuste, a maior concentração de indivíduos ficou agrupada na classe média (Figuras 1E e 1F). Os valores dos estoques de biomassa de copa e fuste foram agrupados em três classes, sendo que a classe baixa foi a que reuniu a maior quantidade de indivíduos (Figura 1G e 1H).



Figura 1 – Dendrogramas da análise de agrupamentos (Cluster) para árvores de acácia-negra cultivadas no estado do Rio Grande do Sul



Fonte: Autores (2022)

Em que: Poder calorífico superior de copa (A) e fuste (B); densidade energética de copa (C) e fuste (D); teor de cinzas de copa (E) e fuste (F); estoques de biomassa de copa (G) e fuste (H).



Uma vez formados os grupos, a análise discriminante revelou duas funções para classificá-los (Tabela 4).

Tabela 4 – Funções discriminantes para as variáveis: poder calorífico superior, densidade energética, teor de cinzas e estoque de biomassa, para os componentes copa e fuste de árvores de acácia-negra cultivadas no estado do Rio Grande do Sul

Componente	Nº	Funções discriminantes	CC (%)
Poder calorífico superior			
Copa	1	$0,301732*I + 0,1158*H + 0,922807*MV$	70,15
	2	$-0,0079085*I + 0,959234*H - 0,486533*MV$	
Fuste	1	$-0,975853*I + 1,1336*H + 0,971238*CF$	51,04
	2	$0,954538*I + 0,0451071*H + 0,382739*CF$	
Densidade energética			
Copa	1	$0,61932*BIO + 1,18316*I - 0,776003*H$	58,81
	2	$-1,11132*BIO + 0,0798068*I + 1,17951*H$	
Fuste	1	$0,137157*BIO + 0,569441*I + 0,458884*H$	65,67
	2	$-0,995065*BIO - 0,60692*I + 1,43903*H$	
Teor de cinzas			
Copa	1	$0,00572521*H + 0,205681*DB + 4,97506*MV + 4,5939*CF$	95,22
	2	$0,810616*H + 0,00900632*DB - 1,47951*MV - 1,84575*CF$	
Fuste	1	$0,252977*I + 6,78267*MV + 6,32894*CF$	89,85
	2	$0,686906*I - 4,65734*MV - 5,3457*CF$	
Estoques de biomassa			
Copa	1	$-0,246844*I + 1,58809*DAP - 0,54726*H + 0,211521*PP(AC) + 0,585659*PP(MEDIA) - 0,25425*TMAX$	85,05
	2	$-4,11967*I - 1,04506*DAP + 1,71594*H + 3,56211*PP(AC) + 0,0733975*PP(MEDIA) - 0,252731*TMAX$	
Fuste	1	$1,69523*I + 1,39297*DAP - 0,273077*H - 1,54448*PP(AC) + 0,396285*PP(MEDIA) + 0,94779*UR - 1,13419*IS$	90,15
	2	$-2,51154*I - 1,18862*DAP + 1,69781*H + 2,05874*PP(AC) - 0,424*PP(MEDIA) + 1,0957*UR - 0,825408*IS$	

Fonte: Autores (2022)

Em que: CC (%) é o percentual de casos classificados corretamente; I é a idade em anos; DAP é o diâmetro à altura do peito em cm; H é a altura total em metros; BIO é a biomassa em kg; PP(AC) é a precipitação acumulada em mm; PP(MEDIA) é a precipitação média anual em mm; TMAX é a temperatura máxima em °C; UR é a umidade relativa em %; IS é a insolação em h; MV é o teor de materiais voláteis em %; CF é o teor de carbono fixo em %; DB é a densidade básica em g.cm⁻³; CZ é o teor de cinzas em %.

Para o poder calorífico superior da copa, as funções discriminantes classificaram corretamente cerca de 70% das árvores. As variáveis idade, altura total e teor de



materiais voláteis foram as mais importantes nas funções discriminantes. Na função 1, a idade e o teor de materiais voláteis foram os mais importantes, enquanto que a altura total contribuiu mais para a função 2 (Tabela 4). A classe de qualidade alta para o poder calorífico superior da copa compreende 20% das árvores, enquanto que as classes média e baixa compreendem 40% cada.

As funções discriminantes para o poder calorífico do fuste classificaram corretamente 51% dos casos. As variáveis altura total e o teor de carbono fixo foram as mais importantes para a função 1, enquanto que a idade teve maior contribuição na função 2 (Tabela 4). Para o poder calorífico superior do fuste, a classe com maior percentual foi a classe de qualidade alta, com 50% das árvores. A classe média abrange 29% e a classe baixa 21%.

As funções discriminantes classificaram corretamente 58,8% dos casos quando considerada a densidade energética de copa. As variáveis que contribuíram para as funções foram o estoque de biomassa, a idade e a altura total. Na função 1, a idade foi a variável que mais contribuiu, enquanto que na função 2 foram os estoques de biomassa e a altura total (Tabela 4). Aproximadamente 20% das árvores estão reunidas na classe de qualidade alta para a densidade energética, 27% na média e 53% na baixa.

Cerca de 65,57% dos indivíduos foram classificados corretamente quando considerada a densidade energética do fuste. As variáveis estoque de biomassa, idade e altura novamente foram as que mais contribuíram. A idade contribuiu mais para a função 1, enquanto que as demais variáveis para a função 2 (Tabela 4). Para a densidade energética do fuste, 42% das árvores estão na classe de qualidade alta, 37% na média e 21% na baixa.

O teor de cinza da copa foi a variável melhor classificada pelas funções, com acerto de 95,22% dos casos. As variáveis mais importantes foram altura total, densidade básica, teor de materiais voláteis e carbono fixo. A altura contribuiu mais para a função 2, enquanto que as demais variáveis contribuíram com a função 1.



Quanto maior o teor de cinzas da biomassa, pior a qualidade para fins energéticos. Dessa forma, ao contrário das demais variáveis, a classe de qualidade alta reúne indivíduos com os menores teores de cinzas e conseqüentemente a classe baixa os indivíduos com os maiores teores de cinzas. Devido a isso, 31% das árvores estão reunidas na classe de qualidade alta, 45% na média e 24% na baixa.

Para o teor de cinzas do fuste, 89,85% dos casos foram classificados corretamente. A idade junto com os teores de materiais voláteis e carbono fixo discriminaram os grupos de qualidade. A idade foi a variável que mais contribuiu na função 2, enquanto que o teor de materiais voláteis e carbono fixo contribuem mais na função 1. Quando considerado o teor de cinzas do fuste, a classe de qualidade alta reúne 18% dos indivíduos, a média 43% e a baixa 39%.

As funções discriminantes para o estoque de biomassa da copa classificaram corretamente 85% dos casos. As variáveis que mostraram mais importância na classificação foram idade, diâmetro à altura do peito, altura total, precipitação acumulada, precipitação média e temperatura máxima. As variáveis diâmetro à altura do peito e precipitação média foram as que mais contribuíram na função 1, enquanto que idade, altura e precipitação acumulada contribuíram mais na equação 2 (Tabela 4). Cerca de 7% das árvores foram classificadas como classe alta, 25% como classe média e 68% como classe baixa em relação ao estoque de biomassa de copa.

Para os estoques de biomassa do fuste, as funções conseguiram classificar corretamente 90% dos casos. As mesmas variáveis que se mostraram mais importantes para classificar o estoque de biomassa de copa também foram para o fuste, entretanto, excluindo a temperatura e adicionando-se a umidade relativa e insolação. O diâmetro à altura do peito contribuiu mais para a função 1, enquanto que a idade, altura total e precipitação acumulada contribuíram para a função 2. A precipitação média, umidade relativa e insolação contribuíram para ambas as funções (Tabela 4). Aproximadamente 13% das árvores estão alocadas na classe alta em relação ao estoque de biomassa do fuste, cerca de 19% na classe média e 68% na classe baixa.



As variáveis biométricas foram as que mais contribuíram para discriminar as classes de qualidade quando considerada a variável densidade energética. As variáveis biométricas e meteorológicas discriminam melhor o estoque de biomassa. Para as variáveis poder calorífico superior e teor de cinzas, as variáveis biométricas e energéticas foram as que mais contribuíram. As variáveis edáficas não contribuíram para a melhora das funções discriminantes.

4 CONCLUSÕES

A copa possui as maiores médias do poder calorífico superior, densidade energética e teores de cinzas. O fuste as maiores médias para estoques de biomassa.

À medida que os povoamentos envelhecem, os valores de densidade energética e estoque de biomassa de ambos os componentes tendem a aumentar. Os teores de cinzas de copa e fuste e o poder calorífico superior da copa tendem a diminuir com o aumento da idade.

As variáveis biométricas contribuem para discriminar as classes de qualidade com base na densidade energética. As variáveis biométricas e meteorológicas, para o estoque de biomassa. Para o poder calorífico superior e teor de cinzas, as variáveis biométricas e energéticas foram as que mais contribuíram.

As funções discriminantes consistem em uma ferramenta que pode ser utilizada para classificar, comparar e selecionar a biomassa de diferentes componentes e povoamentos de acácia-negra, quanto à sua qualidade energética.

A classificação da qualidade energética pode implicar em: i) precisa valoração da biomassa destinada à energia; ii) otimização do uso das florestas; iii) modificações das técnicas de manejo utilizadas; e iv) escolha da biomassa como matéria prima para a geração de energia.



REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2395-14**: standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials. Conshohocken: ASTM International, 2014. 13 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D1762-84**: standard test method for chemical analysis of wood charcoal. West Conshohocken: ASTM International, 2013. 2p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D5865-13**: standard test method for gross calorific value of coal and coke. West Conshohocken: ASTM International, 2013. 19 p.
- BEHLING, A. **A produção de biomassa e o acúmulo de carbono em povoamentos de acácia negra em função de variáveis bioclimáticas**. 2014.158p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- CHAVES, A. M. B. VALE, A. T.; MELIDO, R. C. N.; ZOCH, V. P. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.9, n.17, p.533-542, 2013.
- COSTA JUNIOR, S.; SILVA, D. A.; BEHLING, A.; KOEHLER, H. S.; SIMON, A. A.; COSTA, A. Propriedades energéticas da biomassa de *Acacia mearnsii* De Wild. em diferentes idades e locais de cultivo. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 131, e3406. 2021. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n131.04>.
- COSTA JUNIOR, S.; SILVA, D. A.; SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; SIMON, A. A.; TRAUTENMULLER, J. W.; FERRAZ, F. A. Quantificação dos estoques de biomassa de *Acacia mearnsii* de Wild. em diferentes idades e locais de cultivo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.46, n.120, p.614-625, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v46n120.10>.
- ELOY, E. **Produção e qualidade da biomassa de florestas energéticas no norte do Rio Grande do Sul, Brasil**. 2015. 157p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- ELOY, E.; CARON, B. O.; SILVA, D. A.; SCHMIDT, D.; TREVISAN, R.; BEHLING, A.; ELLI, E. F. Influência do espaçamento nas características energéticas de espécies arbóreas em plantios de curta rotação. **Revista Árvore**, Viçosa, v.38, n.3, p.551-559, 2014.
- MIRANDA, R. L.; MARTINS, E. M.; LOPES, K. A Potencialidade Energética da Biomassa no Brasil. **Revista Desenvolvimento Socioeconômico em Debate**. v.5, n.1, p.94-106, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.18616/rdsd.v5i1.4829>.
- MOCHIUTTI, S. **Produtividade e sustentabilidade de plantações de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) no Rio Grande do Sul**. 2007. 270 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.
- MOMOLLI, D.R.; SCHUMACHER, M.V. Sustentabilidade de povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild. em diferentes idades: uma revisão da ciclagem de nutrientes. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**. v.6, n.12, p.263-272, 2019. DOI: <https://doi.org/10.21438/rbgas.061220>.



NUNES, L. J. R. **Autilização de biomassa como alternativa energética para a sustentabilidade e competitividade da indústria portuguesa.** 2015. 240 p. Tese (Doutorado Engenharia e Gestão industrial) - Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2015.

PICARD, N.; SAINT-ANDRÉ, L.; HENRY, M. **Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction.** Rome e Montpellier: Food and Agricultural Organization of the Unites Nations and Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, 2012. 215p.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JUNIOR, M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.31, n.66, p.113-122, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.4336/2011.pfb.31.66.113>.

SILVA, D. A.; BEHLING, A.; SANQUETTA, C. R.; RUZA, M. S.; CORTE, A. P. D.; PSCHIEDT, H.; COSTA JUNIOR, S. Potencial dendroenergético dos diferentes compartimentos de *Acacia mearnsii* cultivada no estado do Rio Grande do Sul. **Biofix scientific journal**, Curitiba, v.2, n.2, p.71-75, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/biofix.v2i2.55777>.

TANAC, Matéria prima. **Manejo responsável, focado no bem do planeta.** Disponível em: <https://www.tanac.com.br/materia-prima/>. Acesso em 04 ago. 2021.

Contribuição de Autoria

1 Sérgio Costa Junior

Engenheiro Florestal, Dr.

<https://orcid.org/0000-0002-2501-3284> • o.sergio.costa@gmail.com

Contribuição: Pesquisa; Desenvolvimento, implementação e teste de software; Redação do manuscrito original

2 Dimas Agostinho da Silva

Engenheiro Florestal, Dr., Professor

<https://orcid.org/0000-0002-5433-1927> • dimas.agostinho.silva@gmail.com

Contribuição: Administração do projeto; Disponibilização de ferramentas; Supervisão

3 Alexandre Behling

Engenheiro Florestal, Dr., Professor

<https://orcid.org/0000-0002-7032-2721> • alexandre.behling@yahoo.com.br

Contribuição: Conceitualização; Curadoria dos dados



4 Henrique Soares Koehler

Engenheiro Florestal, Dr., Professor

<https://orcid.org/0000-0001-7727-7049> • koehler@ufpr.br

Contribuição: Metodologia; Validação de dados e experimentos

5 Jonathan William Trautenmüller

Engenheiro Florestal, Dr., Professor

<https://orcid.org/0000-0003-3507-2146> • jwtraute@hotmail.com

Contribuição: Análise de dados; Design de apresentação de dados

6 Athina Costa

Graduanda em Engenharia Ambiental

<https://orcid.org/0000-0002-2235-1165> • athinacosta2@gmail.com

Contribuição: Escrita – revisão e edição

Como citar este artigo

Costa Junior, S.; Silva, D. A.; Behling, A.; Koehler, H. S.; Trautenmüller, J. W.; Costa, A. Classificação da qualidade da biomassa de árvores de acácia-negra para fins energéticos. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 33, n. 2, e71436, p. 1-20, 2023. DOI 10.5902/1980509871436. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509871436>.