

Estoques de biomassa e carbono em povoamentos de
acácia negra em diferentes idades no Rio Grande do SulBiomass and carbon stocks in black wattle
stands of various ages in Rio Grande do SulCarlos Roberto Sanquetta¹, Alexandre Behling², Ana Paula Dalla Corte¹,
Augusto Simon³, Heloisa Pscheidt⁴, Marieli Sabrina Ruza⁴ e Silas Mochiutti⁵

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo avaliar os teores e os estoques de biomassa e de carbono na cultura de *Acacia mearnsii* De Wild com idades variando de 1 a 7 anos, em dois locais de cultivo. Os estoques de biomassa e carbono foram avaliados em diferentes compartimentos da árvore. Foi identificado que os teores de carbono diferem entre os compartimentos da biomassa, sendo maiores na folhagem e menores na madeira. O teor médio de carbono variou de 45,01% a 46,50% ao longo das idades dos povoamentos. A variação do estoque total de biomassa foi de 3,39 t ha⁻¹, 52,81 t ha⁻¹, 99,71 t ha⁻¹ e 135,63 t ha⁻¹, respectivamente, no primeiro, terceiro, quinto e sétimo ano após o plantio. O estoque total de carbono variou de 1,53 t ha⁻¹, 23,77 t ha⁻¹, 45,08 t ha⁻¹ e 60,14 t ha⁻¹, primeiro, terceiro, quinto e sétimo ano após o plantio, respectivamente. A proporção de biomassa entre os compartimentos variou ao longo dos anos - enquanto que folhas, flores e frutos diminuíram a proporção com o avanço da idade dos povoamentos, madeira e casca tenderam a aumentar. Na idade de rotação (aos sete anos) a madeira e a casca representam aproximadamente 80% da biomassa. Os incrementos médios anuais totais de biomassa e carbono, na idade de rotação (7 anos), foram de 19,37 e 8,59 t ha⁻¹, respectivamente.

Palavras-chave: *Acacia mearnsii*, crescimento, modelagem, rotação, sequestro de carbono.

Abstract

This study's objective was to evaluate the carbon content and the stocks of biomass and carbon in the black wattle (*Acacia mearnsii* De Wild.) aged 1-7 years from two cultivation sites. A study was conducted in stands of the species, ageing from 1-7 years on two growing sites. The carbon contents differ among the compartments of biomass, being higher in the leaves and lower in the wood. The average carbon content ranged from 45.01% to 46.50% over the age of stands. Biomass stocks and carbon increased with stand age, being 3.39 t ha⁻¹ in the first year of, 52.81 t ha⁻¹ in the third, 99.71 t ha⁻¹ and the fifth, 135.63 t ha⁻¹ in the seventh year after planting. Carbon stocks were 1.53 t ha⁻¹ in the first year, 23.77 t ha⁻¹ in the third, 45.08 t ha⁻¹ in the fifth and 60.14 t ha⁻¹ in the seventh year after planting. The proportion of biomass among compartments varied over the years, while leaves, flowers and fruits decreased with increasing stand age, wood and bark tended to increase. At the age of rotation (seven years) the wood and bark accounts for approximately 80% of the stand biomass. The mean annual increment in biomass and carbon at the rotation age (7 years) are 19.37 and 8.59 t ha⁻¹, respectively.

Keywords: *Acacia mearnsii*, growth, modeling, rotation, carbon sink.

¹Engenheiro Florestal, Professor(a) Doutor(a) do Departamento de Ciências Florestais. UFPR - Universidade Federal do Paraná, Departamento de Ciências Florestais. Av. Prof. Lothário Meissner, 900 - Jardim Botânico - Campus III 80210-170 - Curitiba - Paraná. E-mail: carlos_sanquetta@hotmail.com; anapaulacorte@gmail.com.

²Engenheiro. Florestal, Doutorando em Engenharia Florestal. UFPR - Universidade Federal do Paraná, Departamento de Ciências Florestais. Av. Prof. Lothário Meissner, 900 - Jardim Botânico - Campus III 80210-170 - Curitiba - Paraná. E-mail: alexandre.behling@yahoo.com.br.

³Engenheiro Florestal, Gerente de Silvicultura. Tanagro S.A. Rua Torbjorn Weibull, 199 - 95780-000 - Montenegro - Rio Grande do Sul. E-mail: aasimon@tanac.com.br

⁴Discente de Engenharia Florestal. UFPR - Universidade Federal do Paraná, Departamento de Ciências Florestais. Av. Prof. Lothário Meissner, 900 - Jardim Botânico - Campus III 80210-170 - Curitiba - Paraná E-mail: heloisaa_p@yahoo.com.br; marielisabrina93@gmail.com

⁵Engenheiro Agrônomo, Pesquisador Doutor. EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro de Pesquisa Agroflorestal do Amapá. Rod. Juscelino Kubitschek, km 05, Zerão 68902-280 - Macapá - Amapá. E-mail: silas.mochiutti@embrapa.br

INTRODUÇÃO

A biomassa florestal tem sido estudada com propósitos variados, dentre eles a ciclagem de nutrientes, para fins energéticos e na avaliação do crescimento das florestas, entre outros. Atualmente as questões climáticas ligadas ao aumento da concentração de gases do efeito estufa, principalmente do dióxido de carbono (CO_2), têm também despertado o interesse devido ao papel que as florestas exercem no tocante ao sequestro biológico de carbono e na remoção de CO_2 da atmosfera.

As plantas, utilizando a luz e a clorofila das folhas, fixam carbono por meio da fotossíntese, retirando o CO_2 (dióxido de carbono) da atmosfera e a água do solo, emitindo o oxigênio e fixando o carbono na sua biomassa. Dentre os seres vivos, as árvores destacam-se pela capacidade em armazenar o carbono, o que é explicado pelo seu porte, longevidade e capacidade de crescerem na forma de maciços. Os reflorestamentos, de tal forma, são eficientes para capturar o gás carbônico da atmosfera (CALDEIRA et al., 2003).

O termo biomassa corresponde à massa de origem biológica, viva ou morta, animal ou vegetal, sendo que biomassa florestal é pertinente a toda massa vegetal existente na floresta ou apenas referindo-se à fração arbórea da mesma (MARTINELLI et al., 1994; SANQUETTA; BALBINOT, 2002). A forma de mensurar a biomassa florestal de maneira confiável e com baixo custo se viabiliza-se por meio do ajuste de modelos empíricos que permitem estimar essa variável a partir de variáveis dendrométricas (MAESTRI et al., 2004). Esse procedimento também é conhecido como método indireto (KOEHLER et al., 2002).

De modo geral, os ajustes de equações de biomassa florestal têm sido realizados de forma independente para cada compartimento da árvore (fuste, casca, galhos, folhas e raízes). Entretanto, Paulo et al. (2002) indicam que o ajustamento simultâneo resulta em melhor estimativa, pois garante a qualidade global da predição da biomassa para os compartimentos e também da árvore.

A falta de determinações em laboratório tem provocado a utilização de percentuais para estimar esses teores, como por exemplo, o fator 0,5, gerando estimativas irreais. Para Watzlawick et al. (2004), o valor de 50% não representa a realidade dos teores de carbono em árvores e é necessário também considerar as variações entre espécies e compartimentos da planta.

No estado do Rio Grande do Sul, o cultivo de acácia negra destaca-se como atividade eco-

nômica, sendo a terceira espécie mais plantada em termos de área, após as espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar os teores e os estoques de biomassa e de carbono na cultura de *Acacia mearnsii* De Wild, considerando o potencial de crescimento e a rotação econômica da espécie. Para tanto foi avaliada a estocagem de carbono por unidade de área em povoamentos de diferentes idades.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados dados de plantios comerciais de acácia negra situados em duas regiões do estado do Rio Grande do Sul que concentram a maior área de plantio da espécie: Encosta do Sudeste e Serra do Sudeste, respectivamente nos municípios de Cristal e Piratini (FORTES, 1956).

No município de Cristal, os povoamentos estão sob coordenadas centrais Sul $30^\circ 55' S$ e $52^\circ 10' W$. No município de Piratini, os povoamentos estão sob coordenadas centrais Sul $31^\circ 24' S$ e Oeste $52^\circ 57' W$ (Figura 1).

Condução dos povoamentos

Os plantios se deram em áreas de primeira e segunda rotação. Para o preparo do solo utilizou-se a prática de cultivo mínimo com uma subsolagem e posteriormente duas gradagens nas linhas de plantio. Os plantios foram implementados com espaçamento de $3,00 \text{ m} \times 1,75 \text{ m}$ (1.904 plantas por hectare) para o ano um e $3,00 \text{ m} \times 1,50 \text{ m}$ para as demais idades (2.222 plantas por hectare) e no momento dessa operação foi adicionado 50 g de NPK (5-30-15) por planta.

Inventário florestal

Em cada povoamento foi selecionada uma encosta de exposição norte em que foram demarcadas três parcelas localizadas no terço superior, médio e inferior da pendente. O tamanho das parcelas foram de $9 \text{ m} \times 16 \text{ m}$ (144 m^2) para os povoamentos com um ano de idade e $9 \text{ m} \times 14 \text{ m}$ (126 m^2) para as demais idades, equivalendo a 4 linhas de plantio e 10 plantas em cada linha.

Nas parcelas todas as plantas foram mensuradas quanto à circunferência à altura do peito utilizando-se fita métrica graduada, e foram selecionadas duas árvores médias quanto a essa variável em cada parcela para avaliação de sua biomassa.



Fonte: Adaptado de Rio Grande do Sul (1994).

Figura 1. Localização das áreas de estudo no Rio Grande do Sul.

Figure 1. Location of the study area in Rio Grande do Sul.

Mensuração da biomassa para validar equações

A mensuração da biomassa foi realizada por compartimento da árvore: madeira do fuste, casca, galhos (vivos e mortos) e folhagem (folhas, flores e frutos), sendo cada um separado e pesado para a determinação da biomassa fresca com balança digital (*Portable Electronic Scale*), com acurácia de 0,5 g e capacidade de 40 kg.

Para a determinação da biomassa seca, foram retiradas amostras de aproximadamente 200 g dos compartimentos galhos e folhagem, as quais foram imediatamente pesadas para determinação da massa fresca. Já para o fuste foram retirados 5 discos de 2 cm de espessura nas posições longitudinais de 0% (base), 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial (considerada como diâmetro de topo de 4 cm). Posteriormente, essas amostras foram secas em estufa de circulação e renovação de ar a 75 °C e, após a constatação de massa constante, novamente o material foi pesado, possibilitando assim, a obtenção do teor seco (em base úmida) e, conseqüentemente, a biomassa seca por meio da equação 1:

$$B_i = \frac{MU_i * MS_{ai}}{MU_{ai}} \quad (1)$$

em que, B_i = biomassa seca de um dado compartimento, em kg; MU_i = massa fresca de um dado compartimento, em kg; MS_{ai} = massa seca da amostra, em kg e; MU_{ai} = massa fresca da amostra, em kg.

A determinação da biomassa total foi realizada pela somatória da biomassa seca de todos os compartimentos (madeira, casca, galhos e folhagem).

A partir desses dados de biomassa mensurados Dolci et al. (2013) estudaram se as equações de biomassa de acácia negra propostas na literatura poderiam ser utilizadas para estimar a biomassa do presente conjunto de dados. Os autores concluíram que as equações obtidas por Mochiutti (2007) foram as únicas a apresentarem baixo erro padrão da estimativa, valor de Qui-quadrado não significativo e adequada distribuição de resíduos ao longo do ciclo da cultura da acácia negra. Assim, essas equações podem ser utilizadas para a estimativa da biomassa para os povoamentos de acácia negra.

O modelo utilizado por Mochiutti (2007) está apresentado na equação 2.

$$\ln(Y) = b_0 + b_1 \ln(dap) + b_2 \ln(h) \quad (2)$$
em que, Y = massa seca de cada compartimento (madeira, casca, galhos vivos, galhos mortos, folhas e flores + frutos) e total; b_0 , b_1 , b_2 = coeficientes do modelo que foram ajustados e apresentados por Mochiutti (2007); dap = diâmetro à altura do peito, em cm e; h = altura total, em m.

Os coeficientes desse modelo, para cada idade, foram reajustados pela técnica do ajustamento simultâneo, ou seja, foram calculados juntamente (uma única vez) por um sistema de equações, conforme metodologia proposta por Parresol (2001). Essa técnica permitiu compatibilizar as estimativas, ou seja, o resultado do somatório das equações de cada compartimento é o mesmo que o da equação de biomassa total, e para isso foi utilizado o seguinte sistema de equações:

$$Y_{madeira} = f_1(X_1, \beta_1) + \varepsilon_1 \quad (3)$$

$$Y_{casca} = f_2(X_2, \beta_2) + \varepsilon_2 \quad (4)$$

$$Y_{galhos\ vivos} = f_3(X_3, \beta_3) + \varepsilon_3 \quad (5)$$

$$Y_{galhos\ mortos} = f_4(X_4, \beta_4) + \varepsilon_3 \quad (6)$$

$$Y_{flores\ e\ frutos} = f_5(X_5, \beta_5) + \varepsilon_3 \quad (7)$$

$$Y_{total} = f_{total}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5) + \varepsilon_{total} \quad (8)$$

em que, Y_n = biomassa de um dado compartimento (kg), Y_{total} = biomassa total (kg), X_i = variáveis independentes, no caso altura e diâmetro à altura do peito (cm) e, β_i = coeficientes do modelo.

Determinação do teor de carbono

Posteriormente ao procedimento de secagem das amostras, elas foram moídas em moinho Willey (utilizando malha de 10 mesh), secas novamente em estufa de circulação e renovação do ar a 65 °C, e, após a constatação da massa constante, foi determinado o teor de carbono em analisador de carbono (C-144, LECO) no Centro de Excelência em Fixação de Carbono da Universidade Federal do Paraná. A determinação do teor de carbono foi realizada para madeira, casca, galhos (galhos vivos + mortos) e folhagem (folhas, flores e frutos), utilizando uma massa de 0,5 gramas para cada amostra.

Para verificar o efeito dos fatores: idade do povoamento e compartimento da biomassa, no teor de carbono, os dados foram submetidos à análise de variância. Inicialmente foi testada a homogeneidade por meio do teste de Bartlett, e assim foi identificado a necessidade de transformação

do teor de carbono para o seu inverso. Quando algum dos efeitos se mostrou significativo, as médias foram comparadas pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade estatística.

O teor médio de carbono foi obtido por meio da média ponderada (equação 9), uma vez que os compartimentos que possuem maior quantidade de biomassa devem participar com maior peso na média.

$$\overline{TC}_p = \frac{B_M \cdot TC_M + B_C \cdot TC_C + B_G \cdot TC_G + B_F \cdot TC_F}{B_M + B_C + B_G + B_F} \quad (9)$$

em que, \overline{TC}_p = teor médio de carbono (em %), B_M , B_C , B_G e B_F = biomassa de madeira, casca, galhos (galhos vivos + mortos) e folhagem (folhas, flores e frutos) (em Kg), respectivamente, TC_M , TC_C , TC_G e TC_F = teor de carbono da madeira, casca, galhos (galhos vivos + mortos) e folhagem (folhas, flores e frutos) (em %), respectivamente.

Estimativa do estoque de biomassa e carbono nos povoamentos

A partir dos dados de altura e diâmetro à altura do peito, obtidos no inventário florestal, foi estimada a biomassa seca dos compartimentos de cada indivíduo por meio das equações obtidas. A biomassa em t ha⁻¹ foi extrapolada utilizando-se a equação 10.

$$Bi = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{A_i} \quad (10)$$

em que, Bi = biomassa seca de um dado compartimento ou total, em toneladas; $\sum_{i=1}^n b_i$ = somatório da biomassa de todos os indivíduos que compunham uma determinada parcela, em toneladas; A_i = área de uma determinada parcela, em hectares.

O estoque de carbono foi calculado multiplicando-se os valores de biomassa pelos teores de carbono, de modo a serem calculados para cada compartimento e também para o total para a unidade de um hectare.

Todas as estatísticas apresentadas no trabalho foram realizadas utilizando o *software* SAS.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise exploratória das variáveis altura total, diâmetro à altura do peito e sobrevivência

As estatísticas obtidas, para todos os valores mensurados de altura total e diâmetro à altura do peito estão apresentadas na Tabela 1. A média encontrada para altura foi de 5,77 m, 10,50

m, 14,09 m e 16,95 m para os povoamentos com 1, 3, 5 e 7 anos, respectivamente. A média observada para o diâmetro à altura do peito foi de 5,09 cm, 8,15 cm, 10,29 cm e 12,79 cm, respectivamente, para a mesma sequência de idades. A sobrevivência média tendeu a diminuir com o avanço das idades dos povoamentos. Para todas as variáveis, os valores observados são próximos aos encontrados por Mochiutti (2007) em povoamentos de acácia negra para os mesmos locais e idades de cultivo.

Tabela 1. Estatística descritiva para as variáveis: altura total e diâmetro à altura do peito, mensuradas em povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild com 1, 3, 5 e 7 anos nos municípios de Cristal e Piratini, Rio Grande do Sul.

Table 1. Descriptive statistics for the variables: total height and diameter at breast height, measured in stands of *Acacia mearnsii* De Wild with 1, 3, 5 and 7 years in the cities of Crystal and Piratini, Rio Grande do Sul

Estatística	Ano 1	Ano 3	Ano 5	Ano 7
Diâmetro à altura do peito (cm)				
Média	5,09	8,15	10,29	12,79
Erro padrão	0,09	0,16	0,24	0,26
Desvio padrão	1,36	2,29	3,37	3,59
Diâmetro Mínimo	1,59	1,27	2,55	3,66
Diâmetro Máximo	8,44	13,05	17,19	21,49
Altura total (m)				
Média	5,77	10,50	14,09	16,95
Erro padrão	0,09	0,19	0,22	0,24
Desvio padrão	1,42	2,68	3,06	3,40
Altura Mínima	2,80	2,40	4,10	5,60
Altura Máxima	9,10	15,20	23,00	23,80

Teores de carbono em função do compartimento da biomassa e da idade do povoamento

A análise de variância revelou existirem diferenças significativas dos teores de carbono entre os compartimentos da biomassa, da idade do povoamento e para sua interação, ou seja, os fatores em estudo são dependentes (Tabela 2). Os efeitos simples da análise de variância indicaram que o único compartimento da biomassa que variaram os teores de carbono foram os galhos.

As médias, conforme teste Tukey (Tabela 3), diferenciaram-se estatisticamente entre compartimentos em todas as idades, ao nível de 5% de probabilidade estatística. No entanto, nos mesmos compartimentos, entre as idades, as médias não foram diferentes entre si, diferenciando-se apenas nos galhos para o povoamento com 5 anos de idade que, por sua vez, apresentaram juntamente com as folhas os teores de carbono mais elevados. Tais resultados estão de acordo ao observado por Marcene et al. (2002), que ao

avaliarem os teores de carbono da espécie *Gmelina arborea* Roxb. entre 4 e 13 anos, não encontraram diferenças expressivas nos teores de carbono entre essas idades.

De um modo geral, a folhagem apresentou o teor de carbono mais elevado, enquanto que a madeira apresentou o menor. Para acácia negra, Caldeira et al. (2003) também encontraram, independentemente da idade do povoamento, os teores de carbono mais elevado nas folhas, sendo de 43,37% para folhas, 39,35% para galhos mortos, 39,2% galho vivos, 37,99% para casca e de 41,71% para madeira. A percentagem de carbono encontrado por Saidelles et al. (2009), também para acácia negra, nos compartimentos folhas, galhos vivos, galhos mortos, casca e madeira, foram, respectivamente, 45,58%, 41,40%, 40,88%, 40,68% e 42,13%. Os valores diferenciaram-se daqueles encontrados neste trabalho, o que pode ter ocorrido, possivelmente, devido à metodologia de determinação de carbono utilizada pelos autores. Para espécies do cerrado e da caatinga, Vieira et al. (2009) também observaram na folhagem teores mais elevados, sendo que no fuste e na casca foram observados os menores. Resultados similares foram observados por Urbano (2007) para a espécie *Mimosa scabrella* e por Hoppe (2003) em plantios de *Platanus acerifolia*. Em contraste, Dallagnol et al. (2011) observaram para a espécie *Pinus taeda* teores de carbono mais elevados na casca e na madeira.

Tabela 2. Análise de variância do teor de carbono da biomassa de madeira, casca, galhos e folhas de *Acacia mearnsii* De Wild com 1, 3, 5 e 7 anos cultivada nos municípios de Cristal e Piratini, Rio Grande do Sul.

Table 2. Analysis of variance of the carbon content of the biomass of wood, bark, twigs and leaves *Acacia mearnsii* De Wild with 1, 3, 5 and 7 years cultivated in the cities of Crystal and Piratini, Rio Grande do Sul

Efeito Principal		
Fator de variação	GL	QM
Idade	3	0,00000162*
Compartimento	3	0,00002946*
Idade x compartimento	9	0,00000254*
Coeficiente de determinação		74,39
Coeficiente de variação		2,18
Efeito Simples		
	1	0,000007361*
Idade	3	0,000008619*
	5	0,000011511*
	7	0,000009603*
Compartimento	Casca	0,000000416 ^{ns}
	Madeira	0,000000202 ^{ns}
	Folhagem	0,000000128 ^{ns}
	Galhos	0,000008505*

Tabela 3. Análise de médias do teor de carbono da biomassa de madeira, casca, galhos e folhas de *Acacia mearnsii* De Wild com 1, 3, 5 e 7 anos cultivada nos municípios de Cristal e Piratini, Rio Grande do Sul.

Table 3. Analysis of medium carbon content of the biomass of wood, bark, twigs and leaves *Acacia mearnsii* De Wild with 1, 3, 5 and 7 years cultivated in the cities of Crystal and Piratini, Rio Grande do Sul.

Idade	Compartimento			
	Casca	Madeira	Folhagem	Galhos
1	46,06 b A	44,27 c A	47,79 a A	44,40 c B
3	45,62 b A	44,34 c A	48,22 a A	44,42 c B
5	45,28 b A	44,10 c A	48,34 a A	48,28 a A
7	46,09 b A	43,77 d A	48,14 a A	44,74 c B

Letras distintas minúsculas nas linhas e maiúsculas nas colunas diferem entre si conforme o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Ao longo das idades dos povoamentos, o teor médio de carbono, obtido pela ponderação dos compartimentos, não apresentou uma tendência de aumento ou de diminuição definida. Os teores menos e mais elevados foram observados nos povoamentos com 1 e 5 anos, respectivamente. O teor de carbono médio foi de 45,01%, 45,65%, 46,50% e 45,68%, respectivamente, para os povoamentos com 1, 3, 5 e 7 anos.

Sistema de equações

Na Tabela 4, apresentam-se os coeficientes ajustados do modelo $Ln(Y_i) = b_{ij} + b_{ij}Ln(dap) + b_{ij}Ln(h) + \varepsilon_i$ obtidos pelo ajustamento simultâneo são apresentados na Tabela 4. As estatísticas do ajuste, representadas pelo coeficiente de determinação e pelo coeficiente de determinação ajustado, são destacadas na Tabela 5. Essa técnica permitiu garantir a qualidade global da estimativa de biomassa para cada árvore, ou seja, o resultado do somatório das equações de cada compartimento é o mesmo que da equação aplicada para o total. Assim, a biomassa total (y_{total}) de cada árvore pode ser obtida pela soma das funções de cada compartimento (y_i). Portanto:

$$Ln(madeira) = b_{11} + b_{12}Ln(dap) + b_{13}Ln(h) + Ln\epsilon_{madeira} \quad (11)$$

$$Ln(casca) = b_{21} + b_{22}Ln(dap) + b_{23}Ln(h) + Ln\epsilon_{casca} \quad (12)$$

$$Ln(galhos vivos) = b_{31} + b_{32}Ln(dap) + b_{33}Ln(h) + Ln\epsilon_{galhos vivos} \quad (13)$$

$$Ln(folhas) = b_{41} + b_{42}Ln(dap) + b_{43}Ln(h) + Ln\epsilon_{folhas} \quad (14)$$

$$Ln(flores e frutos) = b_{51} + b_{52}Ln(dap) + b_{53}Ln(h) + Ln\epsilon_{flores e frutos} \quad (15)$$

$$Ln(galhos mortos) = b_{61} + b_{62}Ln(dap) + b_{63}Ln(h) + Ln\epsilon_{galhos mortos} \quad (16)$$

$$Ln(total) = b_{11} + b_{12}Ln(dap) + b_{13}Ln(h) + b_{31} + b_{32}Ln(dap) + b_{33}Ln(h) + b_{41} + b_{42}Ln(dap) + b_{43}Ln(h) + b_{51} + b_{52}Ln(dap) + b_{53}Ln(h) + b_{61} + b_{62}Ln(dap) + b_{63}Ln(h) + Ln\epsilon_{total} \quad (17)$$

A partir dessas equações, foi estimada a biomassa de cada indivíduo, e a partir da soma dessas estimativas obteve-se a biomassa de uma determinada parcela e, por fim, essa foi extrapolada para a unidade de área hectare (ha).

Estoque de biomassa e carbono total e por compartimento da biomassa

O estoque de biomassa foi de 3,39 t ha⁻¹ no primeiro ano, de 52,81 t ha⁻¹ no terceiro, 99,71 t ha⁻¹ no quinto e 135,63 t ha⁻¹ no sétimo ano após o plantio. Esses valores são próximos àqueles observados para a acácia negra e para os mesmos locais de cultivo por Mochiutti (2007). O estoque de carbono também demonstrou-se dependente da idade, tendo sido de 1,53 t ha⁻¹ no primeiro ano, de 23,77 t ha⁻¹ no terceiro, 45,08 t ha⁻¹ no quinto e 60,14 t ha⁻¹ no sétimo ano após o plantio (Tabela 6).

A madeira e a casca são os compartimentos de maior interesse para os silvicultores de acácia negra. Na idade de rotação, aos sete anos de idade, a biomassa desses compartimentos representou 80% em relação à massa total. O estoque de biomassa foi de 93,64 t ha⁻¹ de madeira e a de casca de 14,75 t ha⁻¹, sendo o de carbono de 40,99 e 6,80 t ha⁻¹, respectivamente. Esse estoque foi superior àquele observado por Barri-chello et al. (2005), em povoamentos de acácia negra, de 82,35 t ha⁻¹ de madeira e de 10,93 t ha⁻¹ de casca para povoamentos com 8 anos de idade, porém semelhante ao observado por Mochiutti (2007). O estoque de madeira também foi inferior àquele ao observado em povoamentos de acácia negra com 9 anos por Pereira et al. (1997), de 125 t ha⁻¹.

O estoque de biomassa na copa tendeu a aumentar ao longo das idades dos povoamentos, sendo de 3,39 t ha⁻¹ no primeiro ano e de 27,24 t ha⁻¹ no sétimo. Do mesmo modo estimou-se o estoque de carbono em 1,53 e 12,35 t ha⁻¹ para os povoamentos com 1 e 7 anos, respectivamente. A maior proporção de biomassa da copa foi constituída por galhos vivos, os quais, apresentaram maior crescimento até os 3 anos de idade.

Tabela 4. Coeficientes ajustados do modelo $\ln(Y_i) = b_{ij} + b_{ij}\ln(\text{dap}) + b_{ij}\ln(h) + \varepsilon_i$ obtidos pelo ajustamento simultâneo para estimativa da biomassa por compartimento em povoamentos de acácia negra cultivados nos municípios de Cristal e Piratini, Rio Grande do Sul.

Table 4. Adjusted Coefficients Model $\ln(Y_i) = b_{ij} + b_{ij}\ln(\text{dap}) + b_{ij}\ln(h) + \varepsilon_i$ obtained by simultaneous adjustment for estimation of biomass per compartment in stands of black wattle grown in the cities of Crystal and Piratini, Rio Grande South.

Compartimento	Coefficiente	Ano 1	Ano 3	Ano 5	Ano 7
Madeira	b_{11}	0	-3,5635	-4,41959	-2,29951
	b_{12}	0	2,2920	1,790904	1,811719
	b_{13}	0	0,5361	1,37284	0,64451
Casca	b_{21}	0	-4,6877	-3,67684	-2,37324
	b_{22}	0	2,1633	2,525731	1,999644
	b_{23}	0	0,3865	-0,26433	-0,14525
Galhos vivos	b_{31}	-3,7900	-0,1800	-3,8679	-3,97139
	b_{32}	3,0869	2,2339	2,308719	2,686246
	b_{33}	0	-1,1909	0,109508	-0,16443
Folhas	b_{41}	-3,7373	-3,2646	-4,96035	-6,0186
	b_{42}	2,3427	2,1115	2,758037	2,602711
	b_{43}	0	-0,0845	-0,28753	0,116655
Flores e frutos	b_{51}	0	8,4688	-16,6806	-8,15597
	b_{52}	0	3,4019	1,170397	1,436436
	b_{53}	0	-7,0810	4,891307	1,375646
Galhos mortos	b_{61}	0	-11,1935	-381694	-0,86692
	b_{62}	0	0,3521	2,433267	3,626214
	b_{63}	0	3,9245	-0,37795	-2,59852

Em que: b_{ij} é o coeficiente do modelo.

Tabela 5. Estatísticas do ajuste do modelo $\ln(Y_i) = b_{ij} + b_{ij}\ln(\text{dap}) + b_{ij}\ln(h) + \varepsilon_i$ obtidos pelo ajustamento simultâneo para estimativa da biomassa por compartimento e total em povoamentos de acácia negra cultivados nos municípios de Cristal e Piratini, Rio Grande do Sul.

Table 5. Statistics of model fit $\ln(Y_i) = b_{ij} + b_{ij}\ln(\text{dap}) + b_{ij}\ln(h) + \varepsilon_i$ obtained by simultaneous adjustment for estimation of biomass per compartment and total cultivated stands of black wattle in the cities of Crystal and Piratini, Rio Grande do Sul

Compartimento	Estatística	Ano 1	Ano 3	Ano 5	Ano 7
Madeira	R^2	---	95,45%	99,25%	97,73%
	R^2_{aj}	---	95,18%	99,22%	97,63%
Casca	R^2	---	91,79%	98,09%	95,53%
	R^2_{aj}	---	91,30%	98,02%	95,33%
Galhos vivos	R^2	96,82%	90,45%	84,33%	95,53%
	R^2_{aj}	96,71%	89,89%	83,75%	95,33%
Folhas	R^2	94,55%	87,60%	92,93%	84,81%
	R^2_{aj}	94,36%	86,87%	92,67%	84,15%
Flores e frutos	R^2	---	76,97%	85,26%	46,44%
	R^2_{aj}	---	75,61%	84,72%	44,11%
Galhos mortos	R^2	---	59,34%	79,00%	65,50%
	R^2_{aj}	---	56,95%	78,22%	64,00%
Total	R^2	96,47%	99,40%	99,44%	99,05%
	R^2_{aj}	96,20%	99,23%	99,34%	98,86%

Em que: R^2 = coeficiente de determinação e R^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado.

Tabela 6. Estoque de biomassa e carbono de madeira, casca, galhos e folhas de *Acacia mearnsii* De Wild com 1, 3, 5 e 7 anos cultivada nos municípios de Cristal e Piratini, Rio Grande do Sul.

Table 6. Biomass and carbon stock of wood, bark, twigs and leaves *Acacia mearnsii* De Wild with 1, 3, 5 and 7 years cultivated in the cities of Crystal and Piratini, Rio Grande do Sul.

Idade do povoamento (anos)	Madeira	Casca	Galhos vivos	Folhas	Flores e frutos	Galhos mortos	Total
Biomassa (t ha⁻¹)							
1	0,00	0,00	2,69	0,70	0,00	0,00	3,39
3	28,36	4,79	11,39	5,64	1,81	0,82	52,81
5	66,26	9,75	13,04	4,54	1,18	4,94	99,71
7	93,64	14,75	17,65	4,10	0,82	4,67	135,63
Carbono (t ha⁻¹)							
1	0,00	0,00	1,19	0,34	0,00	0,00	1,53
3	12,57	2,19	5,06	2,72	0,87	0,36	23,77
5	29,22	4,42	6,30	2,19	0,57	2,38	45,08
7	40,99	6,80	7,90	1,97	0,39	2,09	60,14

O estoque mais elevado de biomassa e de carbono nas folhas foi observado nos povoamentos com 3 anos de idade, quando atingiram 5,64 e 2,72 t ha⁻¹, decrescendo, então, para 4,10 e 1,97 t ha⁻¹ ao sétimo ano, respectivamente. O maior estoque de biomassa e de carbono nas flores e nos frutos foi observado nos povoamentos com 3 e 5 anos de idade, quando atingiram 1,81, 1,18, 0,87 e 0,39 t ha⁻¹, respectivamente. Já os maiores estoques para galhos mortos foram observados nos povoamentos com 5 e 7 anos, de 4,94 e 4,67 t ha⁻¹ de biomassa e de 2,38 e 2,09 t ha⁻¹ de carbono, respectivamente.

A proporção de biomassa variou entre os compartimentos ao longo dos anos (Figura 2). Enquanto que folhas, flores e frutos diminuíram com o avanço da idade dos povoamentos, a madeira e a casca tenderam a aumentar. Os galhos mortos tenderam a aumentar a participação até o quinto ano, diminuindo novamente aos 7 anos. Assim, foi observado que a partição da biomassa tendeu a ser maior para a copa, nos povoamentos mais jovens, enquanto que, para os povoamentos nas idades próxima

da rotação, a madeira e casca tiveram a maior participação na biomassa. Tais resultados também se aplicam para a distribuição do carbono nos compartimentos.

Kozłowski et al. (1991) relataram que a proporção entre a biomassa dos compartimentos da árvore varia com a idade das árvores e que isso ocorre devido a mudanças na partição dos fotoassimilados com o crescimento das plantas, de modo que para árvores jovens a distribuição seja priorizada para a formação da copa, e com o aumento da idade para o tronco, o que também foi observado em relação à partição da biomassa da acácia negra.

As proporções destacadas na Figura 2 foram próximas àquelas observadas em povoamentos de acácia negra com 2,4 anos por Caldeira (1998), e 8 anos por Barrichello (2005). As proporções obtidas no presente trabalho foram muito próximas àquelas mostradas por Mochiutti (2007) ao longo de todas as idades do povoamento, sendo esse fato associado ao uso do conjunto de dados utilizados para o ajuste das equações oriundas de seu trabalho.

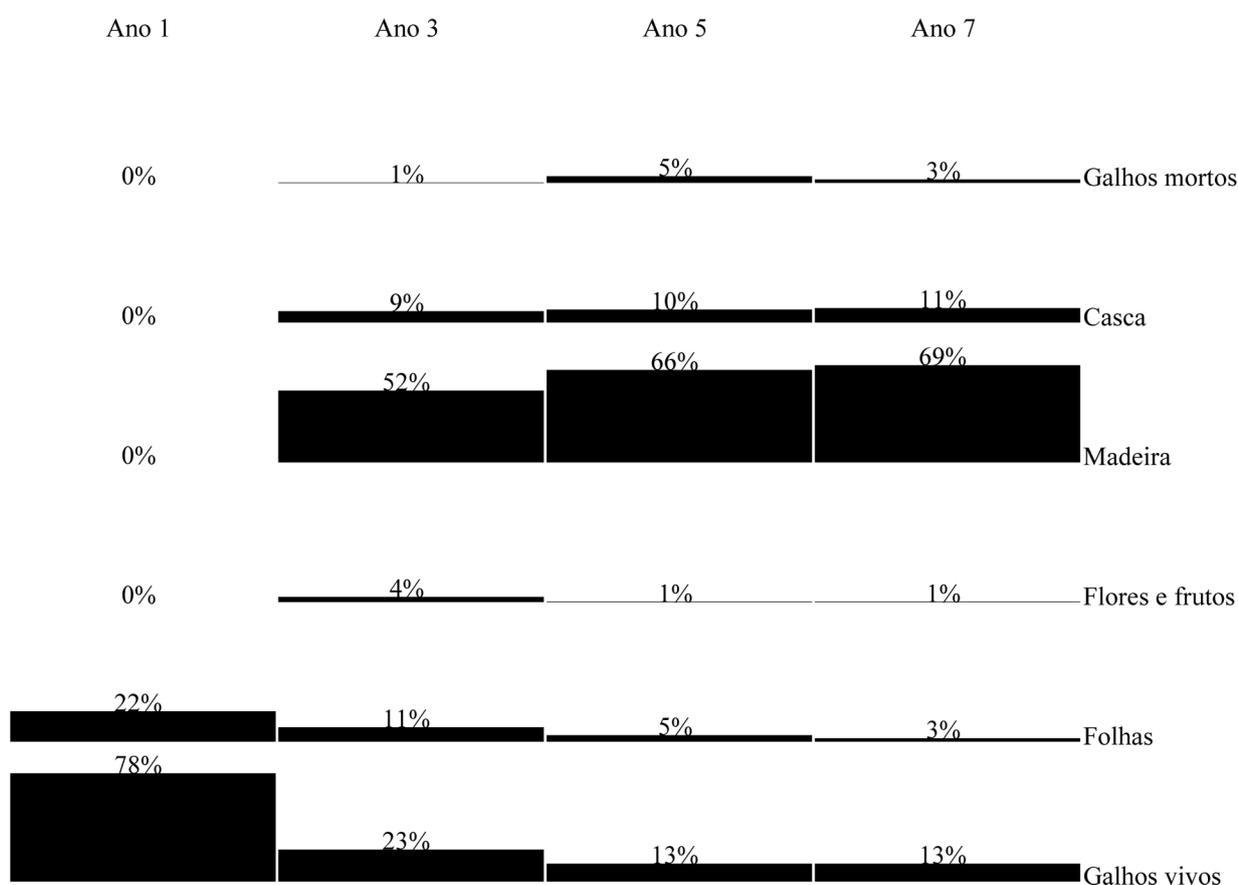


Figura 2. Partição da biomassa de casca, galhos e folhas de *Acacia mearnsii* De Wild com 1, 3, 5 e 7 anos cultivada nos municípios de Cristal e Piratini, Rio Grande do Sul.

Figure 2. Biomass partition of bark, twigs and leaves *Acacia mearnsii* De Wild with 1, 3, 5 and 7 years cultivated in the cities of Crystal and Piratini, Rio Grande do Sul.

CONCLUSÕES

Os estoques de biomassa e carbono crescem com a idade e a proporção de biomassa entre os compartimentos variou ao longo do tempo. Enquanto que folhas, flores e frutos diminuíram a proporção com o avanço da idade dos povoamentos, a madeira e a casca tenderam a aumentar. Na idade de rotação (aos 7 anos) a madeira e casca representam aproximadamente 80% da biomassa.

Os teores de carbono diferem entre os compartimentos da biomassa, sendo mais elevado na folhagem e menos elevados na madeira. Os teores variam também ao longo das idades dos povoamentos.

Os incrementos médios anuais em biomassa e em carbono na idade de rotação (7 anos) são de 19,37 e 8,59 t ha⁻¹, respectivamente.

AGRADECIMENTOS

TANAGRO S.A, pela concessão dos dados.
CNPQ, pelo incentivo a pesquisa.
BIOFIX, pela análise dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARRICHELLO, L. R.; SCHUMACHER, M. V.; VOGEL, H. L. M. Quantificação da biomassa de um povoamento de *Acacia mearnsii* De Wild. na região sul do Brasil. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 15, n. 2, p. 129-135, 2005.
- CALDEIRA, M. V. W. **Quantificação da biomassa e do conteúdo de nutrientes em diferentes procedências de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.)**. 1998. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1998.
- CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; BARRICHELLO, L. R.; VOGEL, H. L. M. Determinação de carbono orgânico em povoamentos de *Acacia mearnsii* de Wild plantados no Rio Grande do Sul. *Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais*, Curitiba, v. 1, n. 2, p. 47-54, 2003.
- DALLAGNOL, F. S.; MOGNON, F.; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D. Teores de carbono de cinco espécies florestais e seus compartimentos. *Floresta e Ambiente*, Seropédica, v. 18, n. 4, p. 410-416, 2011.
- DOLCI, M.; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; BEHLING, A.; RODRIGUES, A. L.; SIMON, A. A. **Euações para estimativa de biomassa total ao longo da rotação de povoamentos de acácia-negra**. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE IUFRO, 3., 2013, San José. *Anais...* San José: IUFRO, 2013.
- FORTES, A. B. **Aspectos fisiográficos, demográficos e econômicos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Livraria do Globo, 1956.
- HOPPE, J. M. **Biomassa e nutrientes em *Platanus x acerifolia* (Aiton) Wild. estabelecido no município de Dom Feliciano – RS**. 2003. 143 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.
- KOEHLER, E. S.; WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F. Fontes e níveis de erros nas estimativas do potencial de fixação de carbono. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILLOTTO, M. A. B.; GOMES, F. S. (Ed.). **As Florestas e o carbono**. Curitiba, 2002. p. 251-264.
- KOZLOWSKI, T. T.; KRAMER, P. J.; PALLARDY, S. G. **The physiological ecology of woody plants**. New York: Academic Press. 1991. 657 p.
- MAESTRI, R.; SANQUETTA, C. R.; MACHADO, S. A.; SCOLFORO, J. R. S.; CORTE, A. P. D. Viabilidade de um projeto florestal de *Eucalyptus grandis* considerando o sequestro de carbono. *Floresta*, Curitiba, v. 34, n. 3, p. 347-360, dez. 2004.
- MARCENE, E. A.; CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, C. R.; SCHNEIDER, C. R. Variação nos teores e estoques individuais de carbono fixado com o crescimento de *Gmelina arborea* Roxb. na região litorânea do Paraná, Brasil. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n. 71, p. 55-63, 2002.
- MARTINELLI, L. A.; MOREIRA, M. Z.; BROWN, I. F. Incertezas associadas às estimativas de biomassa em florestas tropicais: o exemplo de uma floresta situada no estado de Rondônia. In: SEMINÁRIO EMISSÃO X SEQÜESTRO DE CO₂: uma oportunidade de negócios para o Brasil, 1994, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, 1994. p. 197-221.

- 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.
- PARRESOL, B. R. Additivity of nonlinear biomass equations. *Canadian Journal of Forest Research*, Ottawa, v. 31, n. 1, p. 865-878, 2001.
- PAULO, J. A.; TOMÉ, J.; TOMÉ, M. Ajustamento simultâneo de equações de biomassa de azinheira. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE PORTUGUESA DE ESTATÍSTICA, 10., 2002, Porto. *Actas...* Porto: Edições SPE, 2003. p. 501-510.
- PEREIRA, J. C.; SCHUMACHER, M. V.; HOPPE, J. M.; CALDEIRA, M. V. W.; SANTOS, E. M. Produção de biomassa em um povoamento de *Acacia mearnsii* De Wild. no Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 21, n. 4, p. 521-526, 1997.
- SAIDELLES, F. L. F.; CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; BALBINOT, R. Uso de equações para estimar carbono orgânico em plantações de *Acacia mearnsii* de Wild. no Rio Grande do Sul – Brasil. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 907-915, 2009.
- SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R. Metodologias para determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B.; GOMES, F. S. (Ed.). *As Florestas e o carbono*. Curitiba, 2002. p. 77-92.
- URBANO, E. **Quantificação e estimativa aérea da biomassa e do carbono fixado em árvores de bracatingais nativos da região metropolitana de Curitiba.** 2007, 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- VIEIRA, G.; SANQUETTA, C. R.; KLÜPPEL, M. L. W.; BARBEIRO, L. S. S. Teores de carbono em espécies vegetais da caatinga e do cerrado. *Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais*, Curitiba, v. 7, n. 2, p. 145-155, 2009.
- WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; SANQUETTA, C. R.; CALDEIRA, M. V. W. Teores de carbono em espécies da Floresta Ombrófila Mista. In: SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B. (Ed.) *Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas*. Curitiba: AM Impressos; 2004. p. 95-109.

Recebido em 22/08/2013
Aceito para publicação em 29/04/2014