

FIXAÇÃO DE CARBONO ORGÂNICO NA BIOMASSA DE *Pinus taeda* L. EM DIFERENTES ESPAÇOS VITAIS DE CRESCIMENTO¹

ORGANIC CARBON FIXATION IN BIOMASS OF *Pinus taeda* L. IN DIFFERENT VITAL GROWTH SPACES

Rodrigo LIMA^{2,6}; Sebastião do Amaral MACHADO³; João Mauricio PACHECO⁴; Kelly Cristiane IAROSZ²; Mario Takao INOUE⁵

RESUMO - Este trabalho teve como objetivo determinar e analisar o peso de carbono orgânico fixado na biomassa aérea de árvores de *Pinus taeda* L. em diferentes espaçamentos de plantio, aos nove anos de idade, na região de Irati-PR. Em cada tratamento foram selecionadas e marcadas em campo nove árvores, ou seja, uma árvore em cada classe diamétrica, visando determinações de biomassa aérea e carbono, totalizando 81 árvores distribuídas na área do ensaio. Cada árvore foi segmentada em: fuste, galhos verdes, galhos secos, acículas e casca. O efeito do espaço vital nos pesos de carbono fixados na biomassa, bem como os valores de carbono total por árvore foram submetidos a análises de estatística descritiva e experimental (homogeneidade de variâncias, análise de variância e teste de comparação de médias de Tukey), no delineamento inteiramente casualizado. O acúmulo de biomassa e peso de carbono fixado ocorreu prioritariamente no fuste, seguido pelos galhos verdes, casca, acículas e galhos secos. O peso de carbono fixado na biomassa de *Pinus taeda* foi afetado pelo espaço vital de crescimento.

Palavras-chave: Biomassa seca; Sequestro de carbono; Espaçamento de plantio.

ABSTRACT - This work aimed to determine and analyze the weight of organic carbon fixed in the aerial biomass of *Pinus taeda* L. trees in different planting spacings, at nine years of age, in the region of Irati-PR. In each treatment, nine trees were selected and marked in the field, that is, one tree in each diameter class, aiming at determinations of aerial biomass and carbon, totaling 81 trees distributed in the test area. Each tree was segmented into: stem, green branches, dry branches, needles and bark. The effect of the living space on the weights of carbon fixed in the biomass, as well as the values of total carbon per tree were submitted to descriptive and experimental statistical analyzes (homogeneity of variances, analysis of variance and Tukey's mean comparison test), in the completely randomized design. The accumulation of biomass and fixed carbon weight occurred primarily in the stem, followed by green branches, bark, needles and dry branches. The weight of carbon fixed in the *Pinus taeda* biomass was affected by the vital growth space.

Keywords: Dry biomass; Carbon sequestration; Planting spacing.

¹ Recebido para análise em 19.04.2022. Aceito para publicação em 01.06.2022. Publicado em 02.09.2022.

² Universidade de Telêmaco Borba, Av. Mal. Floriano Peixoto, 1181, 84266-010, Telêmaco Borba, Paraná, Brasil.

³ Universidade Federal do Paraná, Av. Lothário Meissner, 632, 80210-170, Curitiba, Paraná, Brasil.

⁴ Universidade de São Paulo, Universidade de Campinas e Universidade Estadual Paulista, Av. Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba, São Paulo, Brasil.

⁵ Academia de Letras, Artes e Ciências do Centro Sul do Paraná, Rua XV de julho, 310, Salas 1 e 2, 84500-076, Irati, Paraná, Brasil.

⁶ Autor para correspondência: rodrigo.eng3@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Souza e Fiorentin (2013) é cada vez maior o interesse pela fixação de carbono em florestas plantadas, principalmente em razão das suas elevadas taxas de crescimento. Pelo processo de fotossíntese as árvores absorvem CO₂ da atmosfera e armazenam carbono em sua biomassa, assim formando grandes reservatórios desse elemento (Silveira et al., 2008). As florestas são importantes para o equilíbrio do estoque global de carbono, pois armazenam na fitomassa e no solo, mais carbono do que existe na atmosfera (Miranda, 2008).

Cientistas relatam que, por ano, a humanidade despeja na atmosfera cerca de 9 milhões de toneladas de carbono (mais de 30 bilhões de toneladas de CO₂). Desse total, 88% vêm da queima de combustíveis fósseis e da fabricação de cimento. O resto é desflorestamento. No entanto, menos da metade dessa produção bruta permanece na atmosfera e contribui para o aquecimento do planeta (Appenzeller, 2011).

Para Sanquetta e Balbinot (2004), um dos aspectos mais relevantes nos estudos de fixação de carbono em florestas, sem sombra de dúvidas, é a variável biomassa, a qual precisa ser determinada e estimada de forma fidedigna, caso contrário não haverá consistência na quantificação do carbono fixado nos ecossistemas florestais. Neste aspecto, existe a necessidade do desenvolvimento de técnicas adequadas para determinação e correta interpretação do peso de biomassa e carbono acumulados. Entretanto, sua determinação pode ser obtida por meio de métodos diretos e indiretos (Sanquetta et al., 2006). O primeiro exige o corte das árvores e a pesagem de seus componentes separadamente e o segundo utiliza-se de dados obtidos pelo primeiro método, para aplicação da modelagem matemática.

A variação na densidade populacional dos reflorestamentos normalmente afeta a quantidade de biomassa produzida e a qualidade do produto final. Espera-se que em menor espaço vital entre árvores, em razão do melhor aproveitamento inicial dos recursos por unidade de área, em um menor intervalo de tempo, a quantidade inicial de biomassa obtida por área seja maior. Entretanto, ao longo do ciclo de cultivo, as diferenças entre populações com diferentes espaçamentos devem ser minimizadas.

Para Silveira (2010), os estudos de biomassa e carbono em formações florestais são feitos com objetivos diversos, dentre os quais destacam-se a quantificação da ciclagem de nutrientes, a quantificação para fins energéticos e como base de informações para estudos de sequestro de carbono. As florestas de *Pinus taeda* são caracterizadas pela

alta taxa de crescimento, que promove uma elevada fixação de CO₂ na biomassa, trazendo como benefícios a qualidade do solo e a mitigação dos gases de efeito estufa.

Assim, torna-se necessária a realização de estudos com a finalidade de analisar o comportamento do carbono orgânico fixado na biomassa aérea de *Pinus taeda*, em função do espaço vital de crescimento. Portanto, os resultados deste trabalho poderão servir de base para o entendimento do desenvolvimento da espécie em questão, gerando subsídios relevantes para a tomada de decisão no planejamento e na gestão desta importante cultura florestal na região Sul do Brasil.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização e caracterização da área de estudo

O experimento foi implantado em 2003, no Campus Universitário de Irati, na região Centro-Sul do Paraná, a 150 km da cidade de Curitiba, capital do estado. O município de Irati está localizado no cruzamento das coordenadas 25°27' 56'' de latitude Sul e 50°37'51'' de longitude Oeste.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen é definido como Cfb Subtropical Úmido Mesotérmico, de verões frescos, geadas severas e frequentes, sem estação seca. A média das temperaturas dos meses mais frios são inferiores a 11°C e dos meses mais quentes inferiores a 24,2°C (Sistema Meteorológico do Paraná - Simepar, 2013).

Geologicamente o solo pertence ao permiano carbonífero, com topografia marcada por encostas suaves intermediárias, encostas íngremes, vertentes retilíneas e topos planos; solos acinzentados/vermelhos ao Norte e castanhos ao Sul, predominando na região solos Silticos Argilosos, Litólicos e Coluviais (Irati, 2013). Na área do experimento o solo foi classificado de acordo com o sistema brasileiro de classificação de solos (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa, 2006) e definido como Neossolo Regolítico Distro úmbrico léptico (RRdh), com textura muito argilosa (Lima et al., 2009).

O experimento foi implementado em delineamento de blocos completos ao acaso (5 blocos e 9 tratamentos), mas não há diferença estatística entre os blocos. Portanto, a área experimental foi considerada delineamento inteiramente casualizado para as análises estatísticas. O número de árvores por tratamento variou conforme o espaçamento de plantio.

Para simular diferentes espaços vitais de crescimento, foram utilizados nove tratamentos de espaçamento entre plantas: 1,0 m x 1,0 m; 2,0 m x 1,0 m; 2,0 m x 2,0 m; 3,0 m x 2,5 m; 3,0 m x 3,0 m; 3,0 m x 3,5 m; 4,0 m x 3,0 m; 4,0 m x 3,5 m e 4,0 m

x 4,0 m, que proporcionaram espaços vitais para cada árvore, respectivamente, de: 1,0; 2,0; 4,0; 7,5; 9,0; 10,5; 12,0; 14,0 e 16,0 m². A Tabela 1 mostra o número de árvores por tratamento e o número de árvores por hectare.

Tabela 1. Tratamentos e respectivas informações de densidade inicial, mortalidade e sobrevivência das árvores de *Pinus taeda* L. aos nove anos de idade.

Table 1. Treatments and respective information on initial density, mortality and survival of *Pinus taeda* L. trees at nine years of age.

Tratamento	Espaçamento (m x m)	Espaço vital (m ²)	Densidade inicial (ár.v.ha ⁻¹)	Mortalidade (ár.v.ha ⁻¹)	Sobrevivência (ár.v.ha ⁻¹)
1	1,0 x 1,0	1,0	10.000	4.800	5.200
2	2,0 x 1,0	2,0	5.000	640	4.360
3	2,0 x 2,0	4,0	2.500	120	2.380
4	3,0 x 2,5	7,5	1.333	0	1.333
5	3,0 x 3,0	9,0	1.111	35	1.076
6	3,0 x 3,5	10,5	952	8	945
7	4,0 x 3,0	12,0	833	7	827
8	4,0 x 3,5	14,0	714	0	714
9	4,0 x 4,0	16,0	625	5	620

2.2 Determinação do carbono orgânico fixado na biomassa

Simultaneamente ao processo de cubagem rigorosa, realizou-se a determinação da biomassa aérea das 81 árvores de *Pinus taeda*, ou seja, 9 árvores em cada tratamento, utilizando-se o método destrutivo. Após a derrubada, cada árvore foi segmentada em: fuste com casca, galhos verdes, galhos secos e acículas verdes. Estes componentes foram pesados separadamente, com auxílio de uma balança digital de gancho com capacidade máxima de 150 kg. Assim, o peso verde de biomassa foi obtido para cada componente, que na sequência foi pesado e separado em porções amostrais. Considera-se que a técnica gravimétrica produz melhor determinação de biomassa, uma vez que a medida da massa verde pode ser realizada com grande precisão e acurácia (Vismara, 2009).

Para amostragem do fuste (madeira do fuste + casca) foram retirados três discos em pontos relativos à altura da árvore, sendo o primeiro a 0% (disco da base), 50% (disco do meio) e 90% (disco do topo). Os discos amostrados do fuste tiveram a casca separada da madeira, para obter-se assim o peso de cada componente separadamente. A quantificação do peso total da casca de cada indivíduo foi realizada por relações de fator de casca.

Para amostragem dos galhos verdes e galhos secos, foram retiradas amostras em todos os diâmetros e em todas as alturas da copa. No caso das acículas, foram retiradas amostras na base, meio e ponta da copa.

As amostras de todos os componentes das árvores foram imediatamente acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados e pesadas com uso de uma balança analítica digital, com precisão de 0,1 g para posterior determinação em laboratório do teor de umidade.

O material amostrado foi conduzido ao Laboratório de Dendrometria e Manejo Florestal da Universidade Estadual do Centro-Oeste, campus de Irati, onde foi colocado em recipiente adequado, identificado e conduzido à estufa de circulação e renovação de ar, a uma temperatura de 80°C, até atingir peso constante. Posteriormente, o material foi retirado da estufa e pesado novamente para obtenção do seu peso seco.

O material foi triturado em um moinho de facas com peneira, colocado em recipientes plásticos identificados e posteriormente enviado ao laboratório para análise. A determinação dos teores de carbono em tecido vegetal foi realizada no Centro de Excelência em Pesquisas sobre Fixação de Carbono na Biomassa: BIOFIX, do Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná.

Para determinação do teor de carbono total das amostras, foi utilizado um equipamento específico para análise de carbono: o analisador de carbono LECO, modelo C-144, o qual possui um software para registro digital dos resultados.

O equipamento analisa o carbono pela combustão total, na qual a amostra é submetida à temperatura de 1.000°C por cerca de 60 segundos. Nesse método, a amostra de material sólido é levada à combustão, sendo que um sensor detecta a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) gerado, relacionando automaticamente com a quantidade de carbono elementar existente na amostra.

2.3 Processamento dos dados

Com os dados de peso seco, foram realizados os cálculos referentes à quantidade de carbono existente em cada componente. Para tanto, os valores de peso seco total de cada componente foram multiplicados pelo teor de carbono, obtido em análise prévia, conforme a expressão (Equação 1):

$$C = \text{PST} \cdot \text{TC} \quad (1)$$

Em que:

C = quantidade de carbono na amostra (kg);

PST = peso seco total (kg), e

TC = teor de carbono na amostra (kg).

2.3.1 Análises estatísticas

2.3.1.1 Avaliação do peso de carbono orgânico fixado em resposta ao espaçamento

Os pesos de carbono dos componentes, bem como os valores de peso de carbono total por árvore, foram submetidos a análises de estatística descritiva e experimental. Considerou-se neste trabalho como peso de carbono total por árvore a soma do peso de carbono de todos os componentes (fuste, galhos verdes, galhos secos, acículas e casca).

O teste de homogeneidade de variâncias de Bartlett, a análise de variância (inteiramente casualizado) e o teste de comparação de médias de Tukey, foram realizados com uso do programa Assistat 7.5 Beta, ao nível de $\alpha = 0,05$.

2.3.1.2 Estimativa da biomassa e do carbono orgânico fixado

Realizou-se a modelagem para estimativa da biomassa total por árvore e do peso de carbono total fixado por árvore, em função do diâmetro

(DAP) e da altura total (HT), com uso do modelo de Schumacher-Hall (Equação 2):

$$y = \beta_0 (\text{DAP}^{\beta_1}) \cdot (\text{HT}^{\beta_2}) + \varepsilon \quad (2)$$

Em que:

y = peso de carbono total fixado por árvore;

β_0 , β_1 e β_2 = parâmetros da equação;

DAP = diâmetro a 1,3 m do solo;

HT = altura total, e

ε = erro aleatório.

Além do modelo de Schumacher-Hall, utilizou-se também do procedimento estatístico de seleção de variáveis stepwise, para estimativa do peso de carbono total fixado por árvore, utilizando como variáveis independentes o DAP e a altura total, bem como combinações destas (DAP², HT², DAPxHT, DAP²xHT, DAPxHT² e DAP²xHT²). O ajuste foi realizado com o programa SAS – *Statistical Analysis System*.

2.3.1.3 Avaliação dos modelos

A avaliação dos modelos ajustados para cada variável dependente, baseou-se nos seguintes critérios (Scolforo, 2005):

a) A equação deve ser representativa para os dados dos quais ela foi obtida. Esta representação foi determinada pelo coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajst}) (Equação 3), erro padrão dos resíduos de estimativa absoluto (S_{yx}) (Equação 4) e relativo ($S_{yx}\%$) (Equação 5), conforme segue:

$$R^2_{ajst} = 1 - \left[\frac{(n-1)}{n-p-1} (1 - R^2) \right] \quad (3)$$

Em que:

R^2_{ajst} = coeficiente de determinação ajustado;

n = número de observações;

p = número de variáveis independentes, e

R^2 = coeficiente de determinação.

$$S_{yx} = \sqrt{QM_{\text{Erro}}} \quad (4)$$

Em que:

S_{yx} = erro padrão dos resíduos absoluto, e

QM_{Erro} = quadrado médio dos erros.

$$S_{yx}\% = \frac{S_{yx}}{\bar{Y}} \cdot 100 \quad (5)$$

Em que:

$S_{yx}\%$ = erro padrão dos resíduos relativo;

\bar{Y} = média do valor observado.

b) A distribuição dos resíduos deve ser razoavelmente uniforme quando plotados sobre os valores observados ou sobre os valores estimados. A análise gráfica dos resíduos tem como objetivo verificar a existência ou não de tendenciosidade nas estimativas fornecidas pelo modelo. Aplicou-se a expressão (Equação 6) para a obtenção dos resíduos em percentagem, conforme segue:

$$\text{Res}\% = \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \cdot 100 \quad (6)$$

Em que:

Y_i = valor dos dados observados, e

i = valor dos dados estimados.

3 RESULTADOS

3.1 Efeito do espaço vital no peso de carbono orgânico fixado nas árvores de *Pinus taeda*

O teste de Bartlett revelou homogeneidade de variâncias, ao nível de 5% de significância, para o peso de carbono fixado em todos os componentes avaliados. Os resultados observados na análise de variância indicam que o espaçamento influencia significativamente no peso de carbono fixado nos compartimentos e no carbono total fixado por árvore ($p < 0,05$). Diferenças estatísticas entre as médias dos tratamentos foram constatadas pelo teste de Tukey, conforme os valores dispostos na Tabela 2.

Tabela 2. Médias do peso de carbono fixado e respectivas estatísticas de *Pinus taeda*, aos nove anos de idade em função dos espaçamentos utilizados.

Table 2. Averages of the weight of fixed carbon and respective statistics of *Pinus taeda*, at nine years of age as a function of the vital space.

Espaçamento (m x m)	Espaço vital (m ²)	Fuste sem casca (kg.árv ⁻¹)	Galho verde (kg.árv ⁻¹)	Galho seco (kg.árv ⁻¹)	Acícula (kg.árv ⁻¹)	Casca do fuste (kg.árv ⁻¹)	Total (kg.árv ⁻¹)
1,0 x 1,0	1,0	18,0 a	1,6 a	1,4 a	1,8 a	2,5 a	25,4 a
2,0 x 1,0	2,0	18,2 a	2,3 a	1,5 a	1,9 a	3,0 a	26,9 a
2,0 x 2,0	4,0	18,6 a	2,9 a	2,1 a	2,0 a	2,8 a	28,4 a
3,0 x 2,5	7,5	33,2 b	7,8 b	3,6 b	4,6 b	5,3 b	54,4 b
3,0 x 3,0	9,0	38,8 bc	14,7 c	5,0 c	6,0 c	5,8 bc	70,3 cd
3,0 x 3,5	10,5	38,8 bc	13,2 c	6,0 cd	5,0 bc	5,6 bc	68,6 c
4,0 x 3,0	12,0	40,8 c	12,6 c	6,6 d	4,9 bc	6,3 c	71,2 cd
4,0 x 3,5	14,0	42,7 c	12,8 c	5,6 cd	5,9 c	6,5 c	73,6 d
4,0 x 4,0	16,0	39,1 bc	15,1 c	5,3 cd	5,7 c	5,4 b	70,7 cd

Legenda: Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de $p < 0,05$ pelo teste de Tukey.

Legend: Means followed by the same letter do not differ statistically from each other at the level of $p < 0,05$ by Tukey's test.

3.1.1 Fuste sem casca

As médias do peso de carbono fixado no fuste sem casca variaram de 18,0 kg.árvore⁻¹ (1,0 m²) a 42,7 kg.árvore⁻¹ (14,0 m²). Médias semelhantes estatisticamente foram verificadas entre os tratamentos com espaços vitais menos amplos (1,0; 2,0 e 4,0 m²). Um grupo homogêneo de médias também foi constatado entre os tratamentos com espaços vitais intermediários (9,0 e 10,5 m²) e destes para com os tratamentos com espaços vitais mais amplos (12,0; 14,0 e 16,0 m²). O espaço vital 7,5 m² também teve média semelhante aos espaçamentos com 9,0; 10,5 e 16,0 m². Os

tratamentos com espaçamentos menos amplos (1,0; 2,0 e 4,0 m²) apresentaram os menores valores médios de peso de carbono fixado no fuste sem casca.

Os tratamentos com espaços vitais intermediários (7,5; 9,0 e 10,5 m²) tiveram valores médios próximos. Os maiores pesos médios de carbono fixado no componente fuste sem casca foram verificados em espaços vitais mais amplos, 12,0; 14,0 e 16,0 m², com valores de 40,8; 42,7 e 39,1 kg.árvore⁻¹, respectivamente. O espaço vital de 14,0 m² acumulou na biomassa da madeira do fuste, em média, 57,0% mais carbono que os tratamentos menos amplos (1,0; 2,0 e 4,0 m²), conforme ilustra a Figura 1.

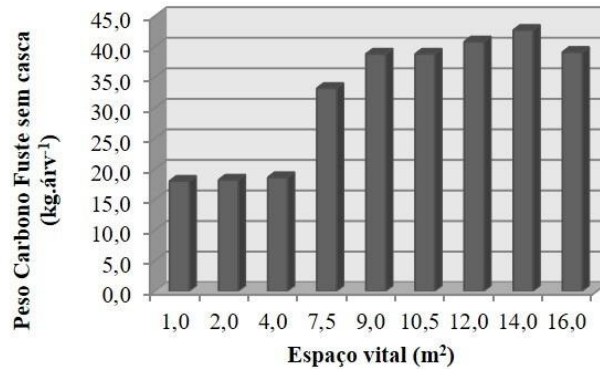


Figura 1. Variações do peso de carbono fixado no componente fuste sem casca de *Pinus taeda* aos nove anos de idade, nos espaçamentos estudados.

Figure 1. Variations in the weight of carbon fixed in the stem component without bark of *Pinus taeda* at nine years of age, in the vital space.

No trabalho realizado por Valério (2009) com *Pinus elliottii* Eng., o autor encontrou um estoque médio de aproximadamente 20 kg de carbono no fuste de árvores individuais aos 9 anos, em espaço vital de 6,0 m². Valor próximo ao verificado neste estudo para o espaço vital com 4,0 m² (18,6 kg.árvore⁻¹), na mesma idade.

3.1.2 Galho verde

Diferença estatística também foi verificada entre as médias do peso de carbono do componente galho verde/vivo. Os tratamentos com 1,0; 2,0 e 4,0 m² foram semelhantes entre si, mas diferiram dos demais. Já os tratamentos com espaços vitais intermediários (9,0 e 10,5 m²) e os tratamentos com

espaçamentos mais amplos (12,0; 14,0 e 16,0 m²) apresentaram médias semelhantes, quando comparados. O tratamento de 7,5 m² diferiu estatisticamente dos demais.

Os menores valores médios do peso de carbono fixado nos galhos verdes foram constatados nos espaços vitais com 1,0; 2,0 e 4,0 m², com 1,6; 2,3 e 2,9 kg.árvore⁻¹, respectivamente. Os maiores valores foram verificados nos espaços vitais intermediários e mais amplos, com destaque para os tratamentos com 9,0 e 16,0 m², com valores de 14,7 e 15,1 kg.árvore⁻¹, respectivamente. O espaço vital de 16,0 m² fixou em média, 85,0% mais carbono na biomassa dos galhos verdes que os espaços vitais com 1,0; 2,0 e 4,0 m², conforme se observa na Figura 2.

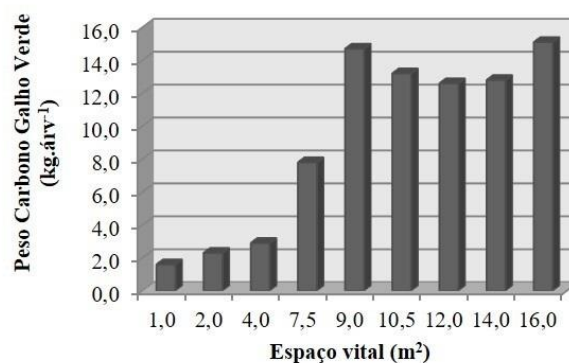


Figura 2. Variações do peso de carbono fixado no componente galho vivo/verde de *Pinus taeda* aos nove anos de idade, nos espaçamentos estudados.

Figure 2. Variations in the weight of carbon fixed in the live/green branch component of *Pinus taeda* at nine years of age, in the vital space.

3.1.3 Galho seco

As médias do peso de carbono fixado no componente galho seco/morto apresentaram diferenças estatísticas pelo teste de Tukey. Os tratamentos com espaços vitais menos amplos (1,0; 2,0 e 4,0 m²) tiveram médias semelhantes entre si, e diferiram dos demais. As médias dos tratamentos com espaçamentos intermediários (9,0 e 10,5 m²) foram semelhantes estatisticamente às médias dos tratamentos com espaços vitais maiores (14,0 e

16,0 m²). O espaço vital com 12,0 m² teve média homogênea quando comparado aos espaços vitais com 10,5; 14,0 e 16,0 m². Os menores valores médios do peso de carbono dos galhos secos foram obtidos nos espaços vitais menos amplos, com 1,0; 2,0 e 4,0 m², com valores de 1,4; 1,5 e 2,1 kg.árvore⁻¹, respectivamente. Em espaços vitais intermediários, os valores variaram entre 3,6 kg.árvore⁻¹ (7,5 m²) e 6,0 kg.árvore⁻¹ (10,5 m²), conforme ilustra a Figura 3.

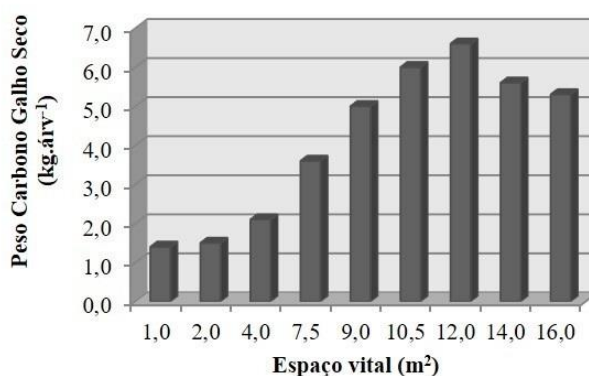


Figura 3. Variações do peso de carbono fixado no componente galho morto/seco de *Pinus taeda* aos nove anos de idade, nos espaçamentos estudados.

Figure 3. Variations in the weight of carbon fixed in the dead/dry branch component of *Pinus taeda* at nine years of age, in the vital space.

O maior valor médio foi 6,6 kg.árvore⁻¹, constatado no espaço vital com 12,0 m². O espaço vital de 12,0 m² acumulou, em média, 75,0% mais carbono na biomassa de galhos secos, que os espaços vitais menos amplos, com 1,0; 2,0 e 4,0 m². Valério (2009) determinando o carbono acumulado nos galhos secos de *Pinus elliottii* Eng., aos 9 anos, em espaço vital com 6,0 m², encontrou em média aproximadamente 1,0 kg de carbono por árvore; valor próximo ao encontrado nesta pesquisa no tratamento com espaço vital de 1,0 m².

3.1.4 Acícula

As médias do peso de carbono fixado no componente acícula (folha) ficaram entre 2,5 e 6,5 kg.árvore⁻¹. Semelhança estatística foi verificada entre as acículas dos tratamentos com espaços vitais menos amplos (1,0; 2,0 e 4,0 m²). Os tratamentos com espaços vitais intermediários (9,0 e 10,5 m²) apresentaram médias semelhantes aos tratamentos com espaçamentos mais amplos (12,0; 14,0 e 16,0 m²). O espaço vital de 7,5 m²

apresentou média homogênea estatisticamente aos espaçamentos com 10,5 e 12,0 m², mas diferente dos demais. O espaço vital de 9,0 m² fixou cerca de 70,0% mais carbono orgânico nas acículas que os espaços vitais menos amplos (1,0; 2,0 e 4,0 m²), conforme observa-se na Figura 4.

Os menores valores médios do peso de carbono do componente acícula foram constatados nos espaços vitais com 1,0; 2,0 e 4,0 m², com valores de 1,8; 1,9 e 2,0 kg.árvore⁻¹, respectivamente. Já os tratamentos com espaços vitais intermediários revelaram valores mais elevados, sendo o maior peso de carbono (6,0 kg.árvore⁻¹) encontrado no tratamento com 9,0 m². Os tratamentos com espaços mais amplos, quais sejam 12,0; 14,0 e 16,0 m² tiveram valores de 4,9; 5,9 e 5,7 kg.árvore⁻¹, respectivamente.

Valério (2009) avaliando o estoque de carbono acumulado em árvores de *Pinus elliottii* Eng., aos 9 anos de idade, encontrou em média aproximadamente 4,5 kg de carbono por árvore no componente acícula, em espaço vital de 6,0 m²; valor bastante próximo ao encontrado no presente estudo no tratamento com espaço vital de 7,5 m² (4,6 kg.árvore⁻¹).

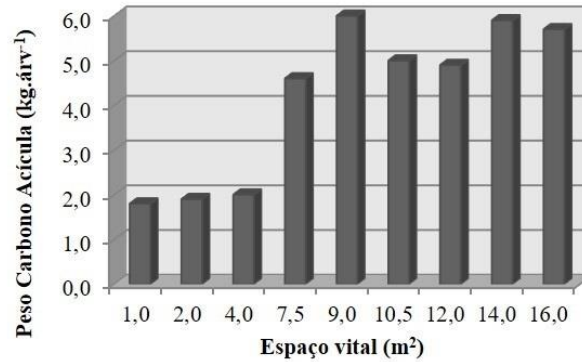


Figura 4. Variações do peso de carbono fixado no componente acícula de *Pinus taeda* aos nove anos de idade, nos espaçamentos estudados.

Figure 4. Variations in the weight of carbon fixed in the leaf component of *Pinus taeda* at nine years of age, in the vital space.

3.1.5 Casca

O peso de carbono orgânico fixado no componente casca variou de 2,5 a 6,5 kg.árvore⁻¹. Médias semelhantes foram verificadas entre os tratamentos com espaços vitais intermediários (7,5; 9,0 e 10,5 m²) e o tratamento com espaço vital mais

amplo (16,0 m²). Estes tratamentos apresentaram diferença estatística quando comparados aos espaçamentos menos amplos (1,0; 2,0 e 4,0 m²). Homogeneidade de médias também foi verificada entre os tratamentos com 9,0; 10,5; 12,0 e 14,0 m², conforme ilustra a Figura 5.

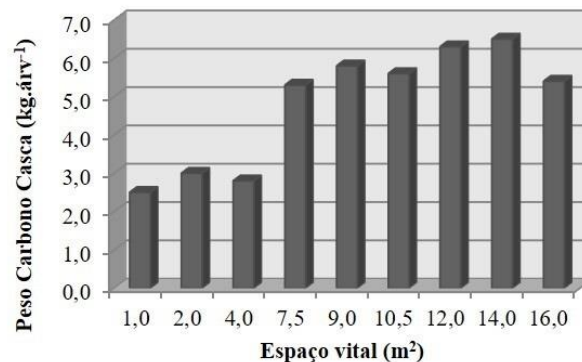


Figura 5. Variações do peso de carbono do componente casca do fuste de *Pinus taeda* aos nove anos de idade, nos espaçamentos estudados.

Figure 5. Variations in the weight of carbon fixed in the bark component of the *Pinus taeda* stem at nine years of age, in the vital space.

Os espaços vitais com 1,0; 2,0 e 4,0 m² foram responsáveis pelos menores valores médios de peso de carbono da casca, com 2,5; 3,0 e 2,8 kg.árvore⁻¹, respectivamente. Os tratamentos com espaçamentos intermediários (7,5; 9,0 e 10,5 m²) tiveram valores superiores aos espaçamentos menos amplos e inferiores comparados aos espaços vitais mais amplos. As maiores médias de peso de carbono do componente casca foram encontradas nos espaços vitais mais amplos (12,0; 14,0 e 16,0 m²) com 6,3; 6,5 e 5,4 kg.árvore⁻¹, respectivamente. O espaço vital com 14,0 m² acumulou em média,

57,0% mais carbono na biomassa da casca que os espaços vitais menos amplos (1,0; 2,0 e 4,0 m²).

Valério (2009) quantificou o peso de carbono médio aproximado do componente casca em 4,0 kg.árvore⁻¹, em espaço vital de 6,0 m² para *Pinus elliottii* Eng. aos 9 anos de idade, no município de Clevelândia, Paraná. Este resultado é superior ao encontrado no presente estudo em tratamentos menos amplos (1,0; 2,0 e 4,0 m²) e inferior aos valores obtidos nos demais espaços vitais.

3.1.6 Carbônico orgânico total fixado por árvore

Com relação ao peso de carbono total fixado na biomassa por árvore (fuste, galhos verdes, galhos secos, acículas e casca) de *Pinus taeda*, os valores variaram de 25,4 a 73,6 kg.árvore⁻¹, conforme a Figura 6. Semelhança estatística foi constatada entre as médias dos tratamentos com espaços vitais menos amplos (1,0; 2,0 e 4,0 m²), entretanto diferiram das demais.

Já os tratamentos com espaços vitais intermediários (9,0 e 10,5 m²) foram semelhantes estatisticamente aos espaçamentos maiores (12,0 e 16,0 m²). O espaço vital com 14,0 m² também apresentou média homogênea aos tratamentos com 9,0; 12,0 e 16,0 m², porém diferiu dos demais.

Balbinot et al. (2003), com o objetivo de estimar a quantidade de carbono orgânico em um plantio de *Pinus taeda* com 5 anos de idade, em Camará do Sul no Rio Grande do Sul, constataram 11,7

kg.árvore⁻¹ de carbono orgânico fixado em espaço vital de 6,0 m² (3,0 m x 2,0 m).

Maiores valores do peso de carbono total fixado por árvore foram obtidos em espaços vitais intermediários e nos espaços vitais mais amplos. O maior valor médio encontrado foi de 73,6 kg.árvore⁻¹, no tratamento com espaço vital com 14,0 m². Os menores pesos de carbono total foram verificados nos espaçamentos menos amplos, sejam 1,0; 2,0 e 4,0 m², com valores médios bastante próximos, 25,4; 26,9 e 28,4 kg.árvore⁻¹, respectivamente. O espaço vital com 14,0 m² fixou, em média, 63,0% mais carbono orgânico na biomassa aérea de *Pinus taeda*, que os espaços vitais menos amplos (1,0; 2,0 e 4,0 m²). Os percentuais de carbono fixados na biomassa das 81 árvores de *Pinus taeda*, aos nove anos de idade, em diferentes espaçamentos estão ilustrados na Figura 7, onde se nota que, a proporção referente ao fuste sem casca variou entre 55,0% (9,0 e 16,0 m²) e 71,0% (1,0 m²).

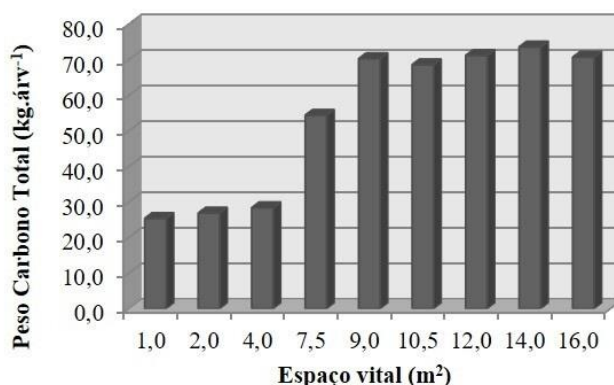


Figura 6. Variações do peso de carbono total fixado por árvore de *Pinus taeda* aos nove anos de idade, nos espaçamentos estudados.

Figure 6. Variations in the total carbon weight fixed per tree of *Pinus taeda* at 9 years of age, in the vital space.

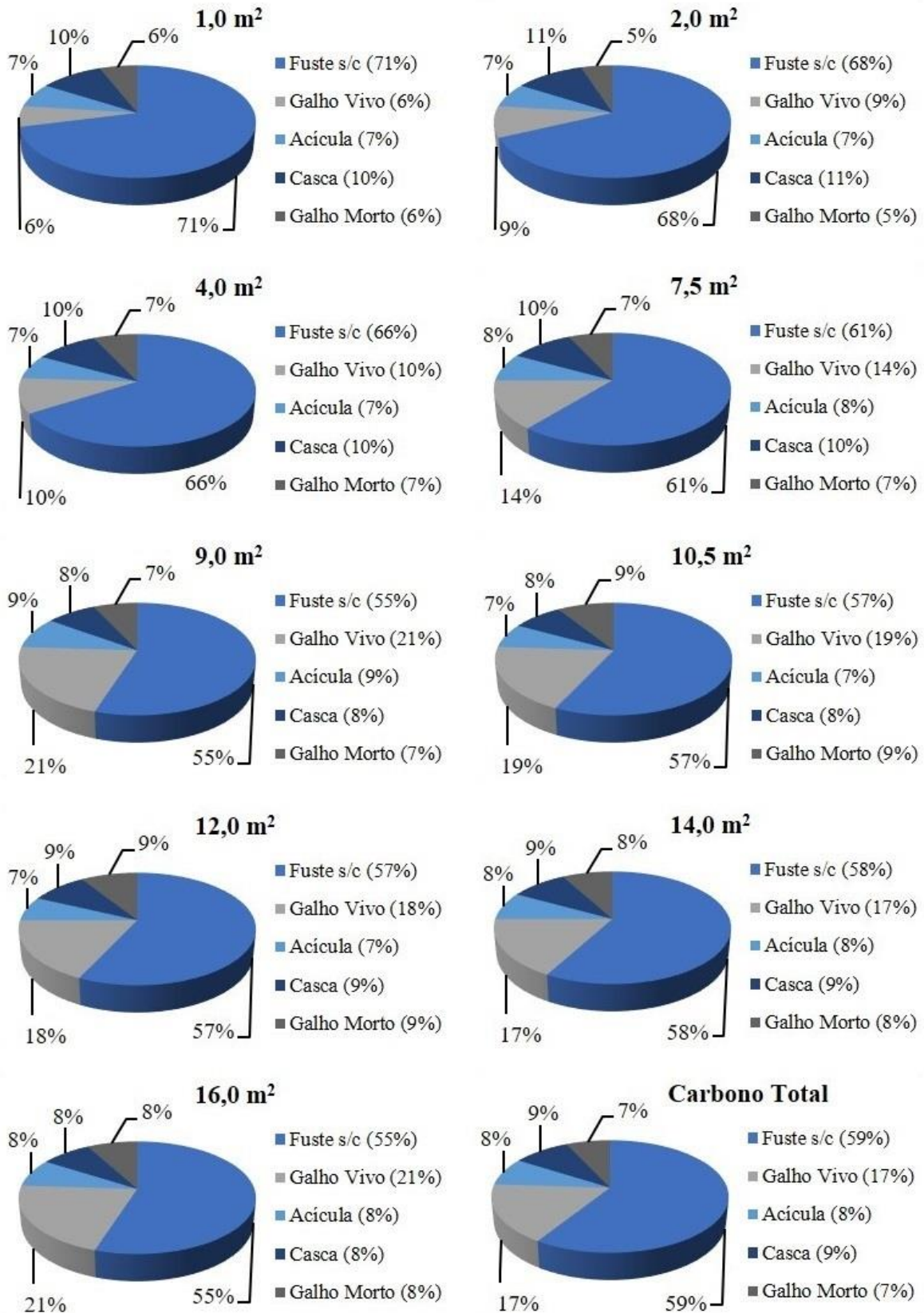


Figura 7. Proporção de carbono fixado para cada espaçamento e carbono total geral considerando todos os tratamentos estudados.

Figure 7. Proportion of fixed carbon for each spacing and overall total carbon considering all treatments studied.

O componente galho verde/vivo apresentou percentual de carbono na biomassa entre 6% (1,0 m²) e 21% (9,0 e 16,0 m²). Para as acículas, os valores tiveram uma leve oscilação, com 7% (1,0; 2,0; 4,0; 10,5 e 12,0 m²) e 9% (9,0 m²).

Com relação ao percentual de carbono do componente casca, verificou-se valores de 8% (9,0; 10,5 e 16,0 m²) e 11% (2,0 m²). Já para o componente galho seco/morto, a proporção de carbono ficou entre 5% (2,0 m²) e 9% (10,5 e 12,0 m²).

A proporção de carbono total fixado por árvore, em média, ou seja, considerando as médias de todos os espaços vitais, foi a seguinte: fuste sem casca (59%), galho verde/vivo (17%), casca (9%), acícula (8%) e galho seco/morto (7%).

Santos et al. (2019) estudando a produção de biomassa e o acúmulo de carbono em povoamento de *Pinus elliottii* Eng., aos 19 anos de idade em

espaçamento de 3,0 m x 2,0 m, em Santa Maria no Rio Grande do Sul relataram a seguinte sequência de distribuição do percentual de carbono nos componentes: fuste sem casca, casca do fuste, galhos e acículas.

3.1.7 Carbônico orgânico total fixado por hectare

Maiores quantidades de carbono por hectare foram armazenadas em tratamentos com espaços vitais menos amplos (1,0 e 2,0 m²). Em termos percentuais, estes tratamentos fixaram, em média, 66,8% mais carbono na biomassa por unidade de área, quando comparados ao espaço vital mais amplo (16,0 m²). Este fato é justificado pelo maior número de árvores por hectare pertencente a estes espaçamentos, com 5.200 e 4.360 árvores por hectare, respectivamente, conforme ilustra a Figura 8.

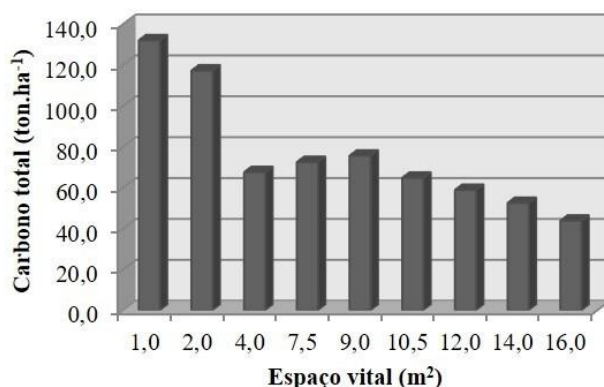


Figura 8. Variações do peso total de carbono fixado por hectare de *Pinus taeda* L. aos nove anos de idade, nos espaçamentos estudados.

Figure 8. Variations in the total weight of fixed carbon per hectare of *Pinus taeda* L. at nine years of age, in the vital space.

Sabe-se que a fixação de carbono na biomassa é variável de acordo com as características da espécie, com a idade da planta e com as técnicas silviculturais. Schumacher et al. (2002) avaliando o estoque de carbono em povoamentos de *Pinus taeda* L., no Estado do Rio Grande do Sul, encontraram 18,7 ton.ha⁻¹ de carbono orgânico no povoamento com 5 anos de idade, 48,5 ton.ha⁻¹ de carbono orgânico no povoamento com 10 anos e 114,8 ton.ha⁻¹ de carbono orgânico no povoamento com 15 anos. O valor encontrado pelo referido autor na idade de 10 anos, aproxima-se do verificado no presente estudo em espaço vital mais amplo (16,0 m²), com 43,8 ton.ha⁻¹.

Sette Junior et al. (2006) realizaram um estudo com a finalidade de quantificar a captura de carbono orgânico em povoamentos de *Pinus taeda*

com diferentes idades (05 a 12 anos), na região de Rio Negrinho em Santa Catarina, coletando dados de tronco de 157 árvores. Os autores observaram que, o total de carbono orgânico capturado, considerando o volume total de madeira por hectare de cada idade avaliada, variou de 6,5 ton.ha⁻¹ aos 5 anos e 82,2 ton.ha⁻¹ aos 12 anos de idade.

Apesar dos resultados obtidos por Schumacher et al. (2002) e Sette Junior et al. (2006) serem compatíveis com os valores encontrados no presente estudo, torna-se importante ressaltar que a metodologia utilizada pelos autores citados não foi a mesma aplicada neste trabalho. Como são escassos os trabalhos referentes ao crescimento, biomassa e carbono orgânico em diferentes espaços vitais disponíveis na literatura, optou-se

por citar tais trabalhos pois tratam do mesmo gênero florestal e em alguns casos, da mesma espécie avaliada.

3.2 Modelagem do peso de carbono orgânico total fixado por árvores de *Pinus taeda* L.

A variável dependente nos modelos ajustados foi o peso de carbono total fixado por árvore. Na Tabela 3 constam os coeficientes obtidos no ajuste para cada equação e as respectivas estatísticas de

ajuste e precisão. No desenvolvimento do modelo aritmético pelo processo *stepwise*, a variável $DAP^2 \times HT$ foi a selecionada, pois nenhuma das outras variáveis testadas foi significativa para a entrada no modelo.

Analisando os valores contidos na Tabela 3, nota-se que o modelo de Schumacher-Hall apresentou estatísticas de ajuste levemente superiores, para o peso de carbono total fixado por árvore ($S_{yx} = 14,0\%$ e $R^2_{ajst} = 0,9610$).

Tabela 3. Coeficientes e estatísticas das equações ajustadas para o peso de carbono total fixado por árvore para 81 árvores de *Pinus taeda* L., aos nove anos de idade em função dos espaçamentos utilizados.

Table 3. Coefficients and statistics of the adjusted equations for the fixed total carbon weight per tree for 81 *Pinus taeda* L. trees, at nine years of age, as a function of the vital space.

Variável	Estatísticas		
	Modelo	S_{yx} %	R^2_{ajst}
Peso de Carbono Total (PCT)	$PCT = 0,0225 * (DAP^{1,8759}) \times (HT^{0,7800})$	14,0	0,9610
	$PCT = 1,1727 + 0,0082 \times (DAP^2 * HT)$	14,6	0,9584

Em plantios de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda*, Sanquetta et al. (2003) também utilizaram a combinação das variáveis altura e diâmetro, para estimar o carbono, encontrando coeficiente de determinação acima de 0,90 e erro padrão da estimativa abaixo de 10%.

Na Figura 9 podem ser observadas as distribuições de resíduos para as equações ajustadas, onde visualiza-se uma distribuição muito semelhante ao longo da linha de regressão, com uma leve tendência de superestimativa para valores inferiores a 50,0 kg.árvore⁻¹.

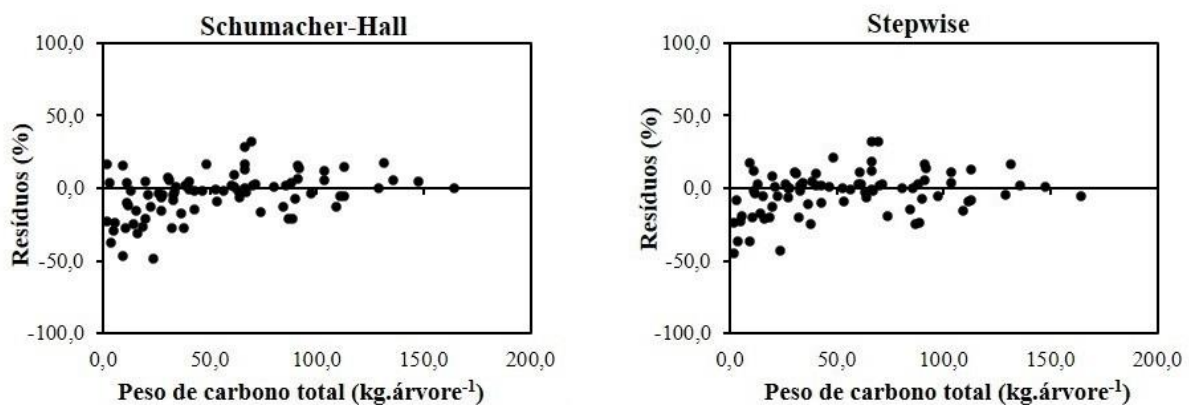


Figura 9. Distribuição dos resíduos dos modelos ajustados para o peso de carbono total por árvore.

Figure 9. Distribution of residuals from models adjusted for total carbon weight per tree.

De acordo com as estatísticas de ajuste e a distribuição gráfica de resíduos torna-se possível afirmar que os modelos ajustados podem ser utilizados na estimativa do peso de carbono orgânico fixado na biomassa de *Pinus taeda*. O

modelo de Schumacher-Hall apresentou melhores resultados, confirmando assim os relatos encontrados na literatura (Sanquetta et al., 2001; Soares e Oliveira, 2002 e Rezende, 2002), referentes ao seu desempenho.

4 CONCLUSÕES

Com base nas condições de estudo e nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- O peso da massa de carbono orgânico fixado na biomassa foi afetado pelo espaço vital de crescimento;
- O acúmulo do peso de carbono orgânico fixado na biomassa ocorreu prioritariamente na madeira do fuste, seguida pelos galhos verdes, casca, acículas e galhos secos;
- Redução na proporção do peso de carbono orgânico fixado na biomassa do componente fuste sem casca conforme a ampliação do espaço vital foi constatada, e
- As equações para a estimativa do peso de carbono orgânico fixado na biomassa, ajustadas com os dados experimentais (DAP e altura total), podem ser uma boa alternativa para aplicação em plantações de mesma espécie e idade.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UNIFATEB, UFPR, UNICENTRO e CAPES pelo suporte, estrutura e viabilização do projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APPENZELLER, T. Ciclo natural: como o carbono circula na atmosfera. **National Geographic Brasil**, edição especial, ano 12, n. 139, out. 2011, p. 42-47.

BALBINOT, R. et al. Inventário de carbono orgânico em um plantio de *Pinus taeda* aos 5 anos de idade no Rio Grande do Sul. **Ciências Exatas e Naturais**, v. 5, n. 1, p. 59-68, 2003.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA Produção da Informação, 2006. 412 p.

IRATI (Prefeitura Municipal). **Geografia**. Disponível em: <http://www.irati.pr.gov.br/internas.php?url=mun_geografia> Acesso em: jan. 2013.

LIMA, R. et al. Carbono orgânico no solo em função do espaço vital de crescimento de *Pinus taeda* L. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32., 2009, Fortaleza. **Resumos...** Fortaleza: SBCS, 2009, v. 1, p. 463-583.

MIRANDA, D.C.L. **Modelos matemáticos de estoque de biomassa e carbono em áreas de restauração florestal no sudoeste paulista**. 2008. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

REZENDE, A.V. **Diversidade, estrutura, dinâmica e prognose do crescimento de um cerrado sensu stricto submetido a diferentes distúrbios por desmatamento**. 2002. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SANQUETA, C.R.; BALBINOT, R. Metodologias para determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C.R.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M.A.B. (Ed.). **Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas**. Curitiba: UFPR/Ecoplan, 2004. p. 77-93.

_____. et al. Ecuaciones de biomassa aérea y subterránea en plantaciones de *Pinus taeda* en el sur del estado del Paraná, Brasil. In: SIMPOSIO INTERNACIONAL MEDICIÓN Y MONITOREO DE LA CAPTURA DE CARBONO EM ECOSISTEMAS FORESTALES, 1., 2001. **Anais...** Valdivia: CD documentos, 2001. p. 1-11.

_____. et al. **Inventários florestais: planejamento e execução**. Curitiba: [s.e.], 2006. 270 p.

_____. et al. Relações individuais de biomassa e conteúdo de carbono em plantações de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda* no sul do estado do Paraná, Brasil. **Acadêmica**, v. 1, n. 3, p. 33-40, 2003.

SANTOS, K.F. et al. Biomassa em *Pinus elliottii* Engelm.: um dreno para o carbono. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 11, n. 1, p. 50-56, 2019.

SCHUMACHER, M.V. et al. Estoque de carbono em florestas de *Pinus taeda* L. e *Acacia mearnsii* De Wild. plantadas no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. In: SANQUETTA, C.R. et al. (Ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, 2002. p. 141-152.

LIMA, R. et al. Carbono orgânico na biomassa de *Pinus taeda*

SCOLFORO, J.R.S. **Biometria Florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. 352 p.

SETTE JUNIOR, C.R.; NAKAJIMA, N.Y.; GEROMINI, M.P. Captura de carbono orgânico em povoamentos de *Pinus taeda* L. na região de Rio Negrinho, SC. **Floresta**, v. 36, n. 1, p. 33-44, 2006.

SILVEIRA, P. Estimativa da biomassa acima do solo em um fragmento de floresta ombrófila densa utilizando o método da derivação do volume comercial. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 790-800. 2010.

_____. et al. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, v. 38, n. 1, p. 185-206, 2008.

SISTEMA METEOROLÓGICO DO PARANÁ - SIMEPAR. **Clima**. 2013. Disponível em: <<http://www.simepar.br/site/internas/conteudo/meteorologia/tempo.jsp?id=4110706>> Acesso em: jan. 2013.

SOARES C.P.B.; OLIVEIRA, M.L.R. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. **Árvore**, v. 26, n. 5, p. 533-539, 2002.

SOUZA, J.T.; FIORENTIN, L.D. Quantificação da biomassa e do carbono em povoamento de *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex Maiden, em Santa Maria, RS. **Unoesc e Ciência – ACET**, v. 4, n. 2, p. 253-262, 2013.

VALÉRIO, A.F. **Quantificação e modelagem da biomassa e carbono em plantações de *Pinus elliotti* Eng. com diferentes idades**. 2009. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, Paraná.

VISMARA, E.S. **Mensuração da biomassa e construção de modelos para construção de equações de biomassa**. 2009. 102 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.