



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**ROBERT GOMES**

**CARBONO E NUTRIENTES NA BIOMASSA E NO SOLO EM POVOAMENTOS DE  
*Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. var. *peregrina* EM DIFERENTES  
ESPAÇAMENTOS**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2022

**ROBERT GOMES**

**CARBONO E NUTRIENTES NA BIOMASSA E NO SOLO EM POVOAMENTOS DE  
*Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. var. *peregrina* EM DIFERENTES  
ESPAÇAMENTOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na área de concentração Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Vinicius Winckler Caldeira

Coorientador: Prof. Dr. Paulo André Trazzi

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2022

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de  
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

G633c Gomes, Robert, 1997-  
Carbono e nutrientes na biomassa e no solo em  
povoamento de *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. var.  
peregrina em diferentes espaçamentos / Robert Gomes. - 2022.  
100 f. : il.

Orientador: Marcos Vinicius Winckler Caldeira.  
Coorientador: Paulo André Trazzi.  
Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) -  
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências  
Agrárias e Engenharias.

1. Fertilidade do solo. 2. Carbono. 3. Biomassa florestal. I.  
Caldeira, Marcos Vinicius Winckler. II. Trazzi, Paulo André.  
III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências  
Agrárias e Engenharias. IV. Título.

CDU: 630

---

**CARBONO E NUTRIENTES NA BIOMASSA E NO SOLO EM POVOAMENTO  
DE *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. var. *peregrina* EM DIFERENTES  
ESPAÇAMENTOS**

**Robert Gomes**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 22 de fevereiro de 2022.



---

**Prof. Dr. Eduardo Vinicius da Silva** (Examinador externo)  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro



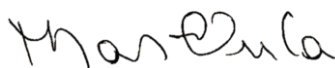
---

**Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta** (Examinador externo)  
Universidade Federal do Paraná



---

**Prof. Dr. Renato Marques** (Examinador externo)  
Universidade Federal do Paraná



---

**Prof. Dr. Marcos Vinicius Winckler Caldeira** (Orientador)  
Universidade Federal do Espírito Santo

## DEDICATÓRIA

A Deus, por infinitas graças recebidas.  
Aos meus pais Romildo e Marlene, e meu irmão  
Gabriel, por todo amor e suporte.  
Dedico.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por cuidar de mim e da minha família em toda a minha trajetória até aqui, principalmente nos momentos difíceis em que Ele nunca nos desamparou. Por toda intercessão de Maria, mãe de Jesus e nossa mãe.

Aos meus pais Romildo e Marlene, por todo apoio, compreensão, orações, suporte e incentivo. Ao meu irmão Gabriel por todo companheirismo.

Aos meus amigos de vida Marcello e Jéssica, por toda convivência e pelo apoio imensurável durante este período. Aos queridos vizinhos e ex-vizinhos Emilly, Patrícia, Aline, Rayane, Antônio Henrique e Fernanda.

A todos os amigos e pessoas importantes que fizeram parte da minha história e que mesmo distantes torcem pelo meu sucesso. Em especial, Ana Paula e Raphael, por todo incentivo e boas conversas.

A colega de pesquisa Francielle, por dividir este período, com todos os aprendizados e dificuldades durante o mestrado.

Ao Prof. Marcos Vinicius Winckler Caldeira e Prof. Paulo André Trazzi pela orientação e transmissão de conhecimentos, por toda colaboração e paciência.

Aos membros da banca avaliadora pela disponibilidade e por suas valiosas contribuições para este trabalho.

A Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes) por possibilitar meu crescimento acadêmico e pessoal, através da ciência. A todos os docentes que de alguma forma contribuíram para este processo. A todos os colegas de instituição e do NUPEMASE, apesar de pouca convivência devido ao distanciamento social.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela pelo apoio a pesquisa e concessão da bolsa de mestrado (processos Nº 150073/2018-6 e 132001/2020-9), e chamada CNPq Nº 09/2018 - Bolsas de produtividade em pesquisa (Processo Nº 305090/2018-6). A Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (Fapes) por meio do Edital Fapes Nº 19/2018 -Taxa de pesquisa (Termo de outorga: 216/2019) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), edital Fapes/Capes Nº 10/2018 (Processo Nº 83508490).

## RESUMO GERAL

GOMES, Robert. **Carbono e Nutrientes na Biomassa e no Solo em Povoamento de *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. var. *peregrina* em Diferentes Espaçamentos**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Prof. Dr. Marcos Vinicius Winckler Caldeira. Coorientador: Prof. Dr. Paulo André Trazzi.

O estudo buscou descrever mudanças nos atributos do solo e avaliar o efeito do espaçamento de plantio nos estoques de carbono e nitrogênio do solo, estoque de biomassa e nutrientes acima do solo e eficiência nutricional, em povoamentos de *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. var. *peregrina*. O experimento foi desenvolvido em área do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), em Alegre, Espírito Santo, Brasil, com uso anterior de pastagem. O povoamento foi implantado em junho de 2011. Foram alocados três blocos e avaliados três espaçamentos de plantio: 3 m x 3 m, 4 m x 4 m e 5 m x 5 m. Para a amostragem de biomassa acima do solo aos 7,5 anos, foram medidas 30 árvores, as quais foram separadas nos compartimentos fuste, casca, folhas, galhos finos e galhos grossos e assim, foram ajustados modelos para predição de biomassa. Realizou-se análise química para determinar os teores de macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg) e carbono na biomassa, calculando também seus estoques. Aos 8,2 anos do povoamento, abriu-se nove trincheiras para a análise química e física do solo até 100 cm de profundidade. Foram calculados os estoques de C e macronutrientes. Foram estimados os coeficientes de utilização biológica e os possíveis cenários de exportação de nutrientes. Os solos dos povoamentos estudados após 8,2 anos do plantio são considerados de fertilidade média, com baixo teor de bases trocáveis e fósforo, teor médio de matéria orgânica e pH baixo. Os espaçamentos de plantio não influenciaram nos estoques de carbono orgânico e nitrogênio total do solo. O espaçamento 5 m x 5 m favoreceu a alocação de maior quantidade de biomassa individual acima do solo, a maior parte nos galhos grossos. Não houve influência no estoque de biomassa e carbono do povoamento florestal, exceto para casca. Árvores no espaçamento 5 m x 5 m estocaram mais nutrientes individualmente e menos nutrientes por hectare. A maior parte foi estocada nas folhas e nos galhos grossos. O plantio foi mais eficiente na utilização dos nutrientes em espaçamentos mais amplos. Houve indícios de limitações nutricionais para os próximos ciclos produtivos em sistemas de colheita com maior exportação de nutrientes, em especial o fósforo. Recomenda-se a utilização do

espaçamento 5 m x 5 m para povoamentos de *A. peregrina* var. *peregrina*, pois os povoamentos neste espaçamento são capazes de produzir a mesma quantidade de biomassa com maior eficiência nutricional. Desta forma, há uma possibilidade de menor dispêndio de recursos na implantação do povoamento e possibilidade de uso múltiplo de sua biomassa. É recomendável a manutenção silvicultural dos níveis de fertilidade do solo bem como considerar a condução de podas e desbastes no desenvolvimento do povoamento. O crescimento e produção de povoamentos sob influência destes tratamentos silviculturais depende de novas investigações científicas.

Palavras-chave: Densidade de plantio; Angico-vermelho; balanço de carbono; eficiência do uso de nutrientes; Silvicultura de espécies nativas.



## GENERAL ABSTRACT

Gomes, Robert. **Carbon and Nutrients in Biomass and Soil in *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. var. *peregrina* Stands Under Different Planting Spacings**. 2022. Dissertation (Master's Degree in Forest Sciences) - Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Prof. Dr. Marcos Vinicius Winckler Caldeira. Co-Advisor: Prof. Dr. Paulo André Trazzi.

The study aimed to describe changes in soil attributes and evaluate the effect of planting spacing on soil carbon and nitrogen stocks, aboveground biomass and nutrients, as well as nutrient use efficiency in *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. var. *peregrina* stands. The study was carried out in an area from the Federal Institute of Espírito Santo (Ifes), in Alegre, Espírito Santo, Brazil, with previous use for grazing pasture. The stands were settled in June 2011. Three blocks were allocated, where three planting spacings were evaluated: 3 m x 3 m, 4 m x 4 m and 5 m x 5 m. For the aboveground biomass sampling at 7.5 years, 30 trees were measured, which were divided into stem, bark, leaves, thin branches and thick branches, and further biomass prediction models were adjusted. Chemical analysis was performed to determine the nutrients (N, P, K, Ca and Mg) and carbon concentrations and calculate stocks in biomass. For soil chemical and physical sampling at 8.2 years, nine trenches of 100 cm depth were used. The stocks of C and nutrients were calculated. The biological utilization coefficients and possible nutrient export scenarios were estimated. The soil from the 8,2 years old stands have medium to low fertility, with low levels of exchangeable bases and P, medium soil organic matter and low pH. Planting spacings do not alter soil carbon and total nitrogen stocks. The 5 m x 5 m spacing promotes greater allocation of individual aboveground biomass, mostly into thick branches. There is no spacing influence on biomass and carbon stocks per hectare, except for bark. Trees within 5 m x 5 m spacing have larger individual nutrient stocks and smaller nutrient stock per hectare. Most of it is stored into leaves and thick branches. Stands in wider spacings are more efficient using nutrients. There are nutritional limitations for upcoming production cycles in non-conservational harvest systems. The use of 5 m x 5 m spacing is recommended for *A. peregrina* var. *peregrina* stands, as it produces the same amount of biomass per hectare at a lower cost of implantation and greater nutritional efficiency. It is recommended to exploit only the stem. In this sense, there is an opportunity for reduction of the initial cost of implantation and multiple use of the biomass. The maintenance of the soil

fertility is strongly recommended, as well as testing pruning and thinning effects on the development of the stand. The growth and production under these practices depend on new scientific investigations.

Keywords: Planting density; Red-Angico; carbon balance; nutrient use efficiency; Native species silviculture.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL .....	12
2. OBJETIVO GERAL .....	13
3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
4. REFERÊNCIAS.....	15
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
5.1. <i>Anadenanthera peregrina</i> (L.) Speg. var. <i>peregrina</i> .....	16
5.2. Espaçamento de plantio e seus efeitos no povoamento florestal .....	17
5.3. Carbono em povoamentos florestais .....	18
5.4. Alocação de biomassa e nutrientes acima do solo e eficiência nutricional .....	19
6. REFERÊNCIAS.....	21
CAPÍTULO I.....	25
ATRIBUTOS QUÍMICOS, CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO EM PLANTIOS DE <i>Anadenanthera peregrina</i> (L.) Speg. var. <i>peregrina</i> COM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS .....	25
1. INTRODUÇÃO .....	28
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	30
2.1. Área de estudo .....	30
2.2. Implantação do povoamento .....	32
2.3. Amostragem do solo.....	33
2.4. Densidade do solo e estoque de C e N .....	34
2.5. Análise estatística.....	35
3. RESULTADOS.....	36
3.1. Atributos químicos do solo.....	36
3.2. Carbono, nitrogênio e relação C/N .....	38
4. DISCUSSÃO .....	42
4.1. Atributos químicos do solo.....	42
4.2. Densidade do solo, carbono e nitrogênio .....	45
5. CONCLUSÕES .....	49
6. REFERÊNCIAS.....	50
CAPÍTULO II.....	56
BIOMASSA ACIMA DO SOLO, CARBONO E NUTRIENTES DE <i>Anadenanthera peregrina</i> (L.) Speg. var. <i>peregrina</i> EM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS .....	56
1. INTRODUÇÃO .....	59
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	61

2.1.	Localização e implantação do experimento .....	61
2.2.	Caracterização dendrométrica.....	61
2.3.	Quantificação de biomassa acima do solo .....	65
2.4.	Estoque de carbono na biomassa .....	68
2.5.	Estoque de nutrientes na biomassa acima do solo.....	69
2.6.	Sustentabilidade nutricional e número potencial de cortes.....	70
3.	RESULTADOS.....	72
3.1.	Biomassa.....	72
3.2.	Estoque de carbono na biomassa .....	75
3.3.	Estoque de nutrientes na biomassa acima do solo.....	76
3.4.	Sustentabilidade nutricional.....	79
3.4.1.	Coeficiente de utilização biológica .....	79
3.4.2.	Número de cortes e balanço nutricional .....	80
4.	DISCUSSÃO .....	83
4.1.	Biomassa.....	83
4.2.	Estoque de carbono na biomassa acima do solo .....	85
4.3.	Estoque de nutrientes na biomassa acima do solo.....	86
4.4.	Sustentabilidade nutricional.....	88
4.4.1.	Coeficiente de utilização biológica .....	88
4.4.2.	Número de cortes e balanço nutricional .....	91
5.	CONCLUSÕES .....	93
6.	REFERÊNCIAS.....	94
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	100

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O setor de florestas plantadas no Brasil tem grande potencial na mitigação das mudanças climáticas globais por meio da estocagem de carbono (SANQUETTA et al., 2018). No Brasil, a grande maioria dos plantios florestais são realizados com espécies exóticas, principalmente dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* (IBÁ, 2020). Estas florestas atendem à demanda por produtos madeireiros, porém, ainda, são preocupantes os níveis de consumo de madeira nativa ilegal. A silvicultura de espécies nativas pode suprir a demanda por madeiras nobres no mercado e contribuir para a sustentabilidade dos sistemas de produção (ROLIM et al., 2019).

Algumas espécies arbóreas, dentre elas a leguminosa fixadora de N<sub>2</sub> *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. var. *peregrina*, têm seu valor econômico reconhecido pela indústria madeireira, por possuírem características tecnológicas desejáveis à produção de móveis ou para uso estrutural (CARVALHO, 2003). O plantio desta e de outras espécies em povoamentos equiâneos ainda não são priorizados pela silvicultura brasileira, pois suas características de crescimento, alocação de biomassa e comportamento silvicultural ainda são pouco estudadas (DA SILVA, CARNEIRO e BARROSO, 2012). Apesar disso, a silvicultura de espécies nativas é promissora e traz um novo olhar para as florestas de produção e a utilização múltipla de seus recursos.

O sucesso de povoamentos florestais, com espécies nativas ou não, depende do manejo silvicultural adequado para seu desenvolvimento e finalidade produtiva. Uma das decisões de maior impacto no manejo silvicultural de florestas diz respeito ao espaçamento de plantio, capaz de alterar as características de crescimento, produção de biomassa e a intensidade de aproveitamento dos recursos oferecidos pelo ecossistema (SCHNEIDER e SCHNEIDER, 2008; TONINI et al., 2018). A competição intraespecífica pode ter a capacidade alterar a dinâmica nutricional no sistema solo-planta.

A biomassa acima do solo em povoamentos florestais constitui um importante compartimento na estocagem de carbono e macronutrientes (ALVES et al., 2017). A identificação da alocação de biomassa e nutrientes em diferentes compartimentos da planta permite compreender a exigência nutricional da espécie. Povoamentos corretamente manejados apresentam maior eficiência nos processos fisiológicos das árvores, favorecendo a distribuição de biomassa acima do solo e potencializando sua produção (NARDINI et al., 2020).

Além da demanda em função da competição entre indivíduos, outros fatores influenciam os solos florestais, como o teor de carbono e nitrogênio dos tecidos vegetais, a facilidade de decomposição e o quanto de material é convertido em matéria orgânica do solo (BALIN et al., 2017). O solo não é somente importante nutricionalmente, mas também é considerado o maior compartimento de carbono da superfície terrestre. Mudanças no sistema de produção e no manejo do solo podem alterar os estoques deste compartimento (CHEN, SMITH e YANG, 2015).

O manejo silvicultural adequado busca atingir alta produtividade de forma eficiente e sustentável, resultando em elevada produção de biomassa e mínimo impacto sobre a qualidade do solo. Tendo atingido estes objetivos, plantações florestais se tornam uma estratégia eficaz na produção sustentável de bens e na contribuição para mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>. O presente estudo busca responder a seguinte hipótese: Espaçamentos de plantio mais adensados intensificariam a contribuição nutricional e de carbono no solo do povoamento, bem como a produção de biomassa acima do solo?

## **2. OBJETIVO GERAL**

O estudo teve por objetivo principal descrever mudanças nos atributos do solo e avaliar o efeito do espaçamento de plantio nos estoques de biomassa e nutrientes acima do solo e na eficiência nutricional de povoamentos de *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. var. *peregrina*, assim como caracterizar os atributos químicos e físicos do solo.

## **3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos foram separados para os diferentes capítulos deste trabalho:

Capítulo I: Atributos químicos, carbono e nitrogênio do solo em plantios de *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. var. *peregrina* com diferentes espaçamentos

- Caracterizar a fertilidade do solo e investigar a influência dos espaçamentos de plantio nos atributos químicos e na densidade do solo;
- Quantificar os estoques de carbono e nitrogênio em diferentes profundidades de coleta e avaliar o efeito dos espaçamentos de plantio nestas variáveis.

Capítulo II: Biomassa acima do solo, carbono e nutrientes de *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. var. *peregrina* sob diferentes espaçamentos

- Quantificar a biomassa acima do solo do povoamento e ajustar equações para os compartimentos fuste, casca, galhos finos, galhos grossos e folhas.
- Avaliar a influência dos espaçamentos de plantio na distribuição de biomassa individual e por unidade de área.
- Calcular os estoques de carbono e nutrientes na biomassa acima do solo em função dos espaçamentos de plantio
- Quantificar o coeficiente de utilização biológica em função dos espaçamentos e compartimentos da biomassa e estimar os cenários de exportação de nutrientes para o povoamento.

#### 4. REFERÊNCIAS

ALVES, A. R. et al. Conteúdo de nutrientes na biomassa e eficiência nutricional em espécies da Caatinga. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 2, p. 377-390, 2017.

BALIN, N. M. et al. Frações da matéria orgânica, índice de manejo do carbono e atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 3, p. 85-94, 2017.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies Arbóreas Brasileiras: Volume 1**. Colombo: Embrapa Florestas, 2003. 1039 p.

CHEN, L.; SMITH, P.; YANG, Y. How has soil carbon stock changed over recent decades? **Global Change Biology**, v. 21, n. 9, p. 3197–3199, 2015.

DA SILVA, M. P. S.; CARNEIRO, J. G. A.; BARROSO, D. G. Desrama florestal. In: CARNEIRO, J. G. A. **Princípios de desramas e desbastes florestais**. Campos dos Goytacazes: O Coordenador, 2012. p. 11-49.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório Anual Ibá 2020**. São Paulo: Café Art, 2020. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba-2020.pdf>. Acesso em: 17 set. 2021.

NARDINI, C. et al. Biomass and radiation use efficiency in *Eucalyptus* plantations as affected by spacing of planting. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, e3413, 2020.

ROLIM, S. G. et al. **Research Gaps and Priorities in Silviculture of Native Species In Brazil**. São Paulo: WRI Brasil, 2019. Disponível em: <https://wribrasil.org.br/pt/publicacoes>. Acesso em: 20 set. 2021.

SANQUETTA, C. R. et al. Dynamics of carbon and CO<sub>2</sub> removals by Brazilian forest plantations during 1990–2016. **Carbon Balance and Management**, v. 13, n. 1, p. 1-12, 2018.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P. **Introdução ao manejo florestal**. 2 ed. Santa Maria: FACOS-UFSM, 2008. 566 p.

TONINI, H. et al. Growth, biomass, and energy quality of *Acacia mangium* timber grown at different spacings. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, p. 791-799, 2018.



## 5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 5.1. *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. var. *peregrina*

*Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. var. *peregrina* é uma árvore nativa do Brasil, pertencente à família Fabaceae (Leguminosae), subfamília Mimosoideae, de principal ocorrência em regiões de Cerrado (lato sensu), Floresta Ciliar ou Galeria (MORIN, 2015). É também encontrada em Florestas Estacionais Semidecíduas, com variações de precipitação entre 850 mm a 1800 mm, temperatura média anual entre 17,6 °C e 25,6 °C, com tolerância a solos arenosos de baixa fertilidade química, porém, com melhor desenvolvimento em solos argilosos férteis e bem drenados (CARVALHO, 2003).

Conhecida vulgarmente como angico-vermelho, angico-cascudo ou angico-curtidor, apresenta característica sucessional de pioneira a secundária inicial (DE SOUZA et al., 2017). A espécie possui polinização cruzada e ocorrência de protandria, favorecendo trocas genéticas entre plantios de angico e fragmentos florestais isolados (FERES et al., 2021). Possui dispersão autocórica, por barocoria. Apresenta forte dominância em plantios maduros, aliada a características alelopáticas que inibem parcialmente o desenvolvimento de espécies arbustivas em seu sub-bosque (SOUZA et al., 2012). Tem característica de fixação biológica de nitrogênio, com potencial para manutenção de N em ecossistemas florestais (MENDES et al., 2021).

Árvores de *A. peregrina* var. *peregrina* podem atingir entre 10 e 25 m de altura, com crescimento simpodial, ramificação irregular, copa frondosa e tronco curto (DE SOUZA et al., 2017). Sua madeira é considerada pesada, com densidade básica média de 0,66 g cm<sup>-3</sup> aos 56 meses de idade (SOUZA et al., 2020). Espécies do gênero *Anadenanthera* tem potencial para a silvicultura, desde que ajustado o manejo silvicultural adequado para conduzir sua alocação de biomassa, por meio de podas, desbastes, adequação do espaçamento de plantio e estudos genéticos (DA SILVA, CARNEIRO e BARROSO, 2012).

Dentre seus principais usos, destacam-se o uso da madeira para construção civil, produção de móveis, esquadilhas e moirões. (LORENZI, 1998). Sua biomassa pode ser utilizada para fins energéticos e produção de carvão (SOUZA et al., 2020). Sua casca possui diversas funcionalidades, como produção de taninos (SARTORI et al., 2014), compostos fenólicos com propriedades antioxidantes e antibactericidas (MOTA et al., 2017; MARINHO et al., 2022).

## 5.2. Espaçamento de plantio e seus efeitos no povoamento florestal

O espaçamento de plantio em povoamentos florestais é uma forma de expressar a densidade do povoamento e a intensidade de aproveitamento dos recursos oferecidos pelo ecossistema, como água, luz solar, CO<sub>2</sub> e nutrientes (SCHNEIDER e SCHNEIDER, 2008). Estes fatores podem ser condicionantes ou limitantes para a produção florestal sustentável, dependendo de sua disponibilidade para os indivíduos e a capacidade ecológica do sítio (FERREIRA e DA SILVA, 2008).

Por muito tempo o espaçamento de plantio foi interpretado como uma característica exclusivamente ligada à produção final de bens, ou seja, quanto um plantio produz de madeira em determinado espaçamento, por exemplo (THERON e BREDENKAMP, 2004). De fato, o espaçamento deve ser manejado conforme os objetivos de produção. Existem, todavia, diversas outras implicações silviculturais, tecnológicas, ecológicas e econômicas que devem ser consideradas na escolha do espaçamento ideal (BALLONI e SIMÕES, 1980).

Os principais efeitos da densidade de plantio podem ser percebidos em características dendrométricas utilizadas no setor florestal. A característica com maior resposta a variações no espaçamento é o diâmetro a altura do peito (DAP). Ao nível de árvore, é comum observar redução no DAP em menores espaçamentos, resultando em menor área basal individual. (INOUE, FILHO e LIMA, 2011; TRUAX et al., 2018) No povoamento florestal como um todo, porém, existe uma relação inversa, com maior área basal por hectare para menores espaçamentos (SCHNEIDER et al., 2000). Estas variáveis tem alta correlação com a volumetria, resultando no mesmo padrão para a produção em volume do povoamento (SOARES, NETO e DE SOUZA, 2012). Já a variável altura nem sempre é afetada pelo espaçamento de plantio (BALLONI e SIMÕES, 1980). A mortalidade de plantios florestais também pode ser afetada, com maiores perdas em espaçamentos adensados (FERRAZ FILHO et al., 2018).

Além de influenciar as características dendrométricas dos indivíduos e sua produção por unidade de área, o espaçamento de plantio pode ser responsável por mudança nos padrões de alocação de biomassa, profundidade de copa e área foliar (LEITE et al, 1997).

Ainda na fase inicial do povoamento, o desenvolvimento de copa pode ser acelerado por plantios mais adensados, desde que com suprimento hidrológico adequado (STAPE et al., 2010). A produção de biomassa do tronco e casca, assim como a variável volume, apresenta maiores valores individuais em espaçamentos amplos e maiores valores por unidade de área em espaçamentos mais densos. A biomassa de galhos e folhas podem ser mais influenciadas a nível individual em comparação com a totalidade do povoamento (CORRÊA et al., 2020).

As mudanças na dinâmica do plantio vão além dos padrões de produção de biomassa, pois com mudanças nos compartimentos, altera-se também o estoque de nutrientes e sustentabilidade nutricional dos povoamentos (LAFETÁ et al., 2021). Alguns estudos buscam compreender o efeito do espaçamento nas características químicas do solo e na estocagem de carbono do solo, porém, ainda não são claras as evidências científicas quanto a ação do espaçamento de plantio nestas variáveis (HERNÁNDEZ et al., 2016; TRUAX et al., 2018).

### **5.3. Carbono em povoamentos florestais**

As florestas tropicais brasileiras foram por muito tempo reconhecidas como um dos principais reservatórios de carbono global. Com o advento das mudanças climáticas globais e as constantes intervenções antrópicas, a maior floresta do mundo (Floresta Amazônica) enfrenta uma diminuição nos estoques de carbono e aumento em suas emissões (GATTI et al., 2021). As florestas secundárias em áreas degradadas por incêndios e desmatamento cumprem papel importante, com grande potencial de estocagem de C (HEINRICH et al., 2021). Outra alternativa para potencializar a captura de C consiste na adoção de plantios florestais de espécies nativas em ambientes degradados, com intensificação do manejo silvicultural (FEREZ et al., 2015).

De modo geral, as florestas plantadas contribuem diretamente para a mitigação das mudanças climáticas através da estocagem de C em seus compartimentos vivos, mortos e incorporados a matéria orgânica no solo (SANQUETTA et al., 2018). Segundo o IPCC (2006), as florestas possuem os seguintes reservatórios de carbono: biomassa acima do solo (tronco, galhos, casca, folhas e estruturas reprodutivas), biomassa subterrânea

(raízes), madeira morta (na superfície, no solo ou raízes mortas acima de 10 cm), serrapilheira (matéria orgânica morta acima de 2 mm e menor que 10 cm) e matéria orgânica do solo (carbono orgânico em solos minerais em determinada profundidade).

A capacidade de estocagem de carbono e a maior estabilidade dos estoques em ecossistemas não alterados, principalmente florestais, são características que tornam o solo como maior compartimento terrestre em estocagem de C (CHEN, SMITH e YANG, 2015). Apesar disso, a partir do momento em que ocorrem mudanças no uso do solo, o comportamento dos estoques de carbono pode variar. O tipo de conversão de uso, fatores climáticos e o tempo de conversão podem ser determinantes para o aumento ou diminuição dos estoques de C em solos florestais (DENG et al., 2016). Em áreas reflorestadas, por exemplo, povoamentos jovens estocam C em sua biomassa com maior velocidade, enquanto a incorporação de C no solo é mais perceptível em fases avançadas do desenvolvimento arbóreo (NABUURS et al., 2007). Neste processo, pode haver diminuição nos estoques de C do solo inicialmente, com aumento gradual até a fase madura do povoamento (PAUL et al., 2001).

A estocagem de carbono na biomassa varia de acordo com diversos fatores relacionados as espécies florestais em questão. O teor de carbono dos tecidos vegetais pode variar de acordo com a espécie, com o compartimento da biomassa e até mesmo com diferentes espaçamentos de plantio (BEHLING et al., 2014). Quanto a idade do povoamento, os teores geralmente não passam por grandes variações (SANQUETTA et al., 2014). Os estoques de carbono são mais amplamente regulados pelos estoques de biomassa do povoamento, com maior quantidade de carbono retido em maiores compartimentos (CALDEIRA et al., 2003).

#### **5.4. Alocação de biomassa e nutrientes acima do solo e eficiência nutricional**

A produção de biomassa em povoamentos florestais é uma característica fundamental na tomada de decisão quanto ao melhor aproveitamento do sítio, das árvores e do destino final da produção (TONINI et al., 2018). Conforme se se dão os padrões de crescimento e alocação de biomassa de determinada espécie, pode-se adequar as técnicas de manejo de plantio necessárias para maximizar sua produção e obter condições ótimas

para a produção florestal (CORRÊA et al., 2020). Geralmente, a alocação de biomassa no tronco é priorizada por questão de maior valor comercial da madeira (TONINI et al., 2018). Porém, os demais compartimentos podem ser extremamente valiosos, tanto para o uso múltiplo (MOTA et al., 2017), quanto para a manutenção da fertilidade dos povoamentos em rotações subsequentes (SCHUMACHER et al., 2019).

Para espécies amplamente utilizadas na silvicultura como do gênero *Eucalyptus*, a alocação de biomassa acima do solo geralmente obedece a ordem decrescente de alocação no tronco > casca > galhos > folhas (DICK et al., 2016). Esta ordem pode variar para outras espécies, principalmente entre os três últimos compartimentos. Espécies com menores estoques de biomassa podem até mesmo apresentar maior partição de galhos em relação ao fuste, de acordo com suas características de crescimento (CARON et al., 2015). A forma como a espécie aloca sua biomassa é afetada por características genéticas e pode se alterar conforme o desenvolvimento do povoamento (SCHUMACHER et al., 2019).

Além da estocagem de C em florestas, a biomassa acima do solo estoca outros importantes elementos para o funcionamento do ecossistema, como os macronutrientes essenciais para o desenvolvimento dos indivíduos. Os compartimentos possuem diferentes concentrações de nutrientes, por diferenças metabólicas nos tecidos vegetais e pela capacidade de translocação interna dos nutrientes (CALDEIRA et al., 2017). Os estoques de nutrientes são originados pelo produto entre os teores de nutrientes e o estoque de biomassa; portanto, determinado compartimento com maior teor pode não resultar em maior estocagem (ALVES et al., 2017).

Parte dos nutrientes alocados na biomassa acima do solo são exportados via colheita florestal e a biomassa não exportada passa a contribuir com o balanço de nutrientes no solo florestal para o próximo ciclo produtivo (GATTO et al., 2014). Por isso, é importante que a espécie e os compartimentos de interesse econômico sejam eficientes na utilização dos nutrientes (ANDRÉ, JONARD e PONETTE, 2010). Uma espécie que aloca grandes quantidades de biomassa a um baixo custo nutricional é considerada eficiente, tornando seu cultivo mais sustentável (BARROS et al., 1986).

## 6. REFERÊNCIAS

ALVES, A. R. et al. Conteúdo de nutrientes na biomassa e eficiência nutricional em espécies da Caatinga. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 2, p. 377-390, 2017.

ANDRÉ, F.; JONARD, M.; PONETTE, Q. Biomass and nutrient content of sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) and beech (*Fagus sylvatica* L.) stem and branches in a mixed stand in southern Belgium. **Science of the Total Environment**, v. 408, n. 11, p. 2285-2294, 2010.

BALLONI, E. A; SIMÕES, J. W. O espaçamento de plantio e suas implicações silviculturais. **IPEF – Série Técnica**, v. 1, n. 3, p. 1-16, 1980.

BARROS, N. F. et al. Classificação nutricional de sítios florestais - Descrição de uma metodologia. **Revista Árvore**, v. 10, n. 2, p. 112-120, 1986.

BEHLING, A. et al. Teores de carbono orgânico de três espécies arbóreas em diferentes espaçamentos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 77, p. 13-19, 2014.

CALDEIRA, M. V. W. et al. Determinação de carbono orgânico em povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild. plantados no Rio Grande do Sul. **Revista Acadêmica Ciência Animal**, v. 1, n. 2, p. 47-54, 2003.

CALDEIRA, M. V. W. et al. Teor e redistribuição de nutrientes nas folhas de *Bixa arborea* Huber. e *Joannesia princeps* Vell. em área de restauração Florestal. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 114, p. 305-317, 2017.

CARON, B. O. et al. Quantificação da Biomassa florestal em plantios de curta rotação com diferentes espaçamentos. **Comunicata Scientiae**, v. 6, n. 1, p. 106, 2015.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies Arbóreas Brasileiras: Volume 1**. Colombo: Embrapa Florestas, 2003. 1039 p.

CHEN, L.; SMITH, P.; YANG, Y. How has soil carbon stock changed over recent decades? **Global Change Biology**, v. 21, n. 9, p. 3197–3199, 2015.

CORRÊA, R. S. et al. Espaçamentos de plantio promovem produção distinta em híbrido de eucalipto. **Advances in Forestry Science**, v. 7, n. 3, p. 1073-1079, 2020.

DA SILVA, M. P. S.; CARNEIRO, J. G. A.; BARROSO, D. G. Desrama florestal. In: CARNEIRO, J. G. A. **Princípios de desramas e desbastes florestais**. Campos dos Goytacazes: O Coordenador, 2012. p. 11-49.

DE SOUZA, P. B. et al. **Ecologia, manejo, silvicultura e tecnologia de espécies nativas da Floresta Atlântica**. Viçosa: Gráfica Seculus, 2017.

DENG, L. et al. Global patterns of the effects of land-use changes on soil carbon stocks. **Global Ecology and Conservation**, v. 5, p. 127-138, 2016.

- DICK, G. et al. Quantificação da biomassa e nutrientes em um povoamento de *Eucalyptus dunnii* Maiden estabelecido no Bioma Pampa. **Ecologia e Nutrição Florestal**, v. 4, n. 1, p. 1-9, 2016.
- FERES, J. M. et al. Depicting the mating system and patterns of contemporary pollen flow in trees of the genus *Anadenanthera* (Fabaceae). **PeerJ**, v. 9, p. e10579, 2021.
- FEREZ, A. P. C. et al. Silvicultural opportunities for increasing carbon stock in restoration of Atlantic forests in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 350, p. 40-45, 2015.
- FERRAZ FILHO, A. C. et al. Thinning regimes and initial spacing for *Eucalyptus* plantations in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, p. 255-265, 2018.
- FERREIRA, C. A.; DA SILVA, H. D. **Formação de povoamentos florestais**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 109 p.
- GATTI, L. V. et al. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature**, v. 595, n. 7867, p. 388-393, 2021.
- GATTO, A. et al. Ciclagem e balanço de nutrientes no sistema solo-planta em um plantio de *Eucalyptus* sp., no Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 879-887, 2014.
- HEINRICH, V. H. A. et al. Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 1-11, 2021.
- HERNÁNDEZ, J. et al. *Eucalyptus* and *Pinus* stand density effects on soil carbon sequestration. **Forest Ecology and Management**, v. 368, p. 28-38, 2016.
- INOUE, M. T.; FILHO, A. F.; LIMA, R. Influência do espaço vital de crescimento na altura e diâmetro de *Pinus taeda* L. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 91, p. 377-385, 2011.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Agriculture, Forestry and Other Land Use**. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), v. 4, 2006.
- LAFETÁ, B. O. et al. Biomassa e coeficiente de utilização biológico de nutrientes pelo *Eucalyptus grandis* x *E. camaldulensis* em diferentes espaçamentos de plantio. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 129, e3378, 2021.
- LEITE, F. P. et al. Crescimento de *Eucalyptus grandis* em diferentes densidades populacionais. **Revista Árvore**, v. 21, n. 3, p. 313-321, 1997.
- LORENZI, H. **Arvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 2 ed. Nova Odessa, SP: Editora Plantarum, 1998.
- MARINHO, T. A. et al. Phytochemical characterization, and antioxidant and antibacterial activities of the hydroethanolic extract of *Anadenanthera peregrina* stem bark. **Brazilian Journal of Biology**, v. 82, e234476, 2022.

MENDES, L. J. et al. Nitrogen accumulated and biologically fixed by uninoculated *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg trees under monospecific stands in the Atlantic Forest biome. **Brazilian Journal of Botany**, v. 44, n. 2, p. 503-512, 2021.

MORIN M. P. *Anadenanthera* in: **Lista de espécies da flora do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2015. Disponível em: <http://reflora.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil/FB22782>. Acesso em: 08 Jan 2021.

MOTA, G. S. et al. Bark anatomy, chemical composition and ethanol-water extract composition of *Anadenanthera peregrina* and *Anadenanthera colubrina*. **PLoS One**, v. 12, n. 12, e0189263, 2017.

NABUURS, G. J. et al. Forestry. In: **Climate Change 2007: Mitigation**. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.

PAUL, K. et al. Change in soil carbon following afforestation. **Forest Ecology and Management**, v. 168, n. 1-3, p. 241-257, 2002.

SANQUETTA, C. R. et al. Dynamics of carbon and CO<sub>2</sub> removals by Brazilian forest plantations during 1990–2016. **Carbon Balance and Management**, v. 13, n. 1, p. 1-12, 2018.

SANQUETTA, C. R. et al. Estoques de biomassa e carbono em povoamentos de acácia negra em diferentes idades no Rio Grande do Sul. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 103, p. 361-370, 2014.

SARTORI, C. J. et al. Rendimento gravimétrico em taninos condensados nas cascas de *Anadenanthera peregrina* em diferentes classes diamétricas. **Cerne**, v. 20, n. 2, p. 239-244, 2014.

SCHNEIDER, P. R. et al. Crescimento da Acácia-negra, *Acacia mearnsii* De Wild em diferentes espaçamentos. **Ciência Florestal**, v. 10, n. 2, p. 101-112, 2000.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P. **Introdução ao manejo florestal**. 2 ed. Santa Maria: FACOS-UFSM, 2008. 566 p.

SCHUMACHER, M. V. et al. Manejo da biomassa e sustentabilidade nutricional em povoamentos de *Eucalyptus* spp. em pequenas propriedades rurais. **Ciência Florestal**, v. 29, p. 144-156, 2019.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. 2. ed. Viçosa-MG: UFV, 2011. 272p.

SOUZA, C. O. et al. Pyrolysis of *Anadenanthera peregrina* wood grown in different spacings from a forest plantation in Brazil aiming at the energy production. **Environment, Development and Sustainability**, v. 22, n. 6, p. 5153-5168, 2020.



- SOUZA, P. B. de et al. Florística e diversidade das espécies arbustivo-arbóreas regeneradas no sub-bosque de *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. **Cerne**, v. 18, p. 413-421, 2012.
- STAPE, J. L. et al. The Brazil *Eucalyptus* Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1684-1694, 2010.
- THERON, K; BREDEKAMP, B. V. PLANTATION SILVICULTURE | Stand Density and Stocking in Plantations. In: Burley, J. **Encyclopedia of Forest Sciences**, Elsevier, p. 829-836, 2004.
- TONINI, H. et al. Growth, biomass, and energy quality of *Acacia mangium* timber grown at different spacings. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, p. 791-799, 2018.
- TRUAX, B. et al. Planting density and site effects on stem dimensions, stand productivity, biomass partitioning, carbon stocks and soil nutrient supply in hybrid poplar plantations. **Forests**, v. 9, n. 6, p. 293, 2018.

## CAPÍTULO I

### ATRIBUTOS QUÍMICOS, CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO EM PLANTIOS DE *Anadenanthera peregrina* (L.) SPEG. VAR. *peregrina* COM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS

#### RESUMO

Florestas plantadas tem grande potencial na mitigação de impactos das mudanças climáticas, através da estocagem de carbono em sua biomassa e principalmente no solo. Espécies florestais nativas como *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. var. *peregrina* (angico-vermelho) são promissoras na composição de povoamentos florestais, pois são capazes de acentuar a mitigação de impactos ambientais e a qualidade de sítios florestais. Porém, pouco se sabe sobre seus tratamentos silviculturais e sua influência em solos tropicais. Este capítulo buscou descrever os atributos químicos do solo e avaliar a influência de diferentes espaçamentos de plantio em povoamentos de *A. peregrina* var. *peregrina* nos estoques de carbono e nitrogênio, 8,2 anos após seu estabelecimento. O estudo foi desenvolvido em área cedida pelo Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), em Alegre, Espírito Santo, Brasil. O histórico de uso anterior ao plantio era de pastagens não fertilizadas. O povoamento foi implantado em junho de 2011. Foram alocados três blocos, onde foram avaliados três tratamentos, correspondendo aos espaçamentos de plantio 3 m x 3 m, 4 m x 4 m e 5 m x 5 m, totalizando nove parcelas amostrais de 30 m x 50 m. Em cada parcela amostral, o solo foi amostrado por meio de uma trincheira, subdividida a cada 20 cm de profundidade. Foram retiradas amostras deformadas para análise química e amostras indeformadas para determinação da densidade do solo. Foram calculados os estoques de C e N até 100 cm. O espaçamento de plantio não influenciou os atributos químicos do solo. De forma geral, a camada superficial dos solos avaliados possui teores médios de K e Mg, teores baixos de P e Ca, além de acidez média, baixa saturação de bases e CTC (T) média. Os espaçamentos de plantio não alteraram os estoques de carbono do solo até 100 cm. Os estoques de nitrogênio total não foram afetados pelos espaçamentos, porém, houve maior tendência a ocorrência de maiores estoques de N no espaçamento 3 m x 3 m. A composição química do solo estudado evidencia a ausência de tratamentos silviculturais de manutenção da fertilidade, que a longo prazo podem se tornar fator limitante ao desenvolvimento da cultura.

Palavras-chave: Fertilidade do solo; Carbono florestal; Leguminosa fixadora; Silvicultura tropical.

## ABSTRACT

Planted forests have great potential to mitigate the impacts caused by the increasing emission of greenhouse gases (GHG), through the storage of carbon in their biomass and mainly in the soil. In order to enhance this ecological service and production, native forest species such as *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. var. *peregrina* (angico-vermelho) are promising in the composition of forest stands. However, little is known about its silvicultural management and its influence on tropical soils. This chapter aimed to describe the influence of different planting spacings in *A. peregrina* var. *peregrina* stands in soil chemical attributes, carbon and nitrogen stocks, 8.2 years after its establishment. The study was developed in an area provided by the Federal Institute of Espírito Santo (Ifes), in Alegre, Espírito Santo, Brazil. The history of use prior the establishment was mainly for unfertilized grazing pastures. The stands were planted in June 2011. Three experimental blocks were allocated, to evaluate three treatments corresponding to 3 m x 3 m, 4 m x 4 m and 5 m x 5 m tree spacings, totaling nine sample plots of 30 m x 50 m. In each sample plot, the soil was sampled by means of a trench, subdivided every 20 cm deep. Deformed samples were taken for chemical determinations and undeformed samples for soil bulk density evaluation. The C and N stocks up to 100 cm were calculated. The planting spacing did not influence the chemical attributes of the soil. In general, the surface layer of the evaluated soils has average levels of K and Mg, low levels of P and Ca, in addition to average acidity, low base saturation and average CEC. Planting spacings did not alter carbon stocks. Total nitrogen stocks were not affected by spacing, however, there was a tendency to greater pools in spacing 3 m x 3 m. The chemical composition of the soils indicates the lack of silvicultural treatments on the fertility maintenance of the stands, which further could affect its development.

Keywords: Planting density; Soil fertility; Forest carbon; Tropical forestry.

## 1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais têm se tornado uma das principais preocupações ambientais da atualidade, com a exploração de florestas e a crescente emissão de gases do efeito estufa (GEE), que catalisam este processo (FAWZY et al., 2020). Sabe-se, todavia, que o setor de florestas plantadas exerce uma grande contribuição para o processo de remoção de GEE da atmosfera. No Brasil, as florestas plantadas tem potencial de remover o equivalente as emissões geradas no mesmo período de tempo pelo setor de resíduos sólidos, como verificado por Sanquetta et al. (2018), acessando dados de estocagem de carbono na biomassa e necromassa de plantios florestais.

O solo é um dos maiores compartimentos na estocagem de carbono em ecossistemas florestais e até mesmo a nível global. Mudanças no estoque de carbono do solo (ECS) podem alterar os níveis de CO<sub>2</sub> na atmosfera e impactar as mudanças climáticas globais (CHEN; SMITH; YANG, 2015). O solo não somente estoca carbono, mas também nutrientes essenciais para o desenvolvimento de espécies florestais, como o nitrogênio e outros macronutrientes (MACEDO et al., 2008). Entretanto, solos de plantações florestais são diretamente influenciados por características específicas das espécies que depositam matéria orgânica em sua superfície, como sua composição química, que pode dificultar ou facilitar a ação microbiana na decomposição do material e liberação de nutrientes essenciais, bem como compor os estoques de C no solo (BALIN et al., 2017).

O Brasil dispõe de vasta diversidade de espécies arbóreas, porém, as plantações florestais em mais de 90 % das áreas plantadas são compostas por espécies exóticas (IBÁ, 2020). A inferioridade espacial dos plantios florestais nativos em muitos casos não ocorre por conta de uma inviabilidade silvicultural, mas pela ausência de informações e tecnologias quanto as suas características de crescimento, sobrevivência, fitossanidade e práticas silviculturais (MENDONÇA et al., 2017). O mercado busca alternativas de matéria prima de qualidade atrelado ao conceito de baixo carbono e mitigação das mudanças climáticas, tornando os plantios florestais nativos uma opção rentável (ROLIM et al., 2019).

Espécies como *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. var. *peregrina* (angico-vermelho) são promissoras, pois tem apelo comercial para o setor madeireiro, para uso energético, além de utilidade não madeireira, como a extração de taninos em sua casca (ATHAYDE e MORELLATO, 2014). Para atingir seu potencial máximo, esses plantios

necessitam de tratos silviculturais adequados que impulsionem seu crescimento, produção e sequestro de carbono (FEREZ et al., 2015).

Dentre as mais importantes decisões para a implantação de um povoamento florestal, a escolha do espaçamento de plantio é importante pois afeta o crescimento, produção e alocação de biomassa e dita todo o manejo pós plantio, de acordo com sua finalidade produtiva (PÁSCOA et al., 2019). Para algumas espécies, o espaçamento adequado pode aumentar a estocagem de carbono na biomassa (SCHWERZ et al., 2020), aumentar a mineralização e disponibilização de nitrogênio no solo (YAN et al., 2015) e influenciar a taxa de decomposição de matéria orgânica (PAUL et al., 2002).

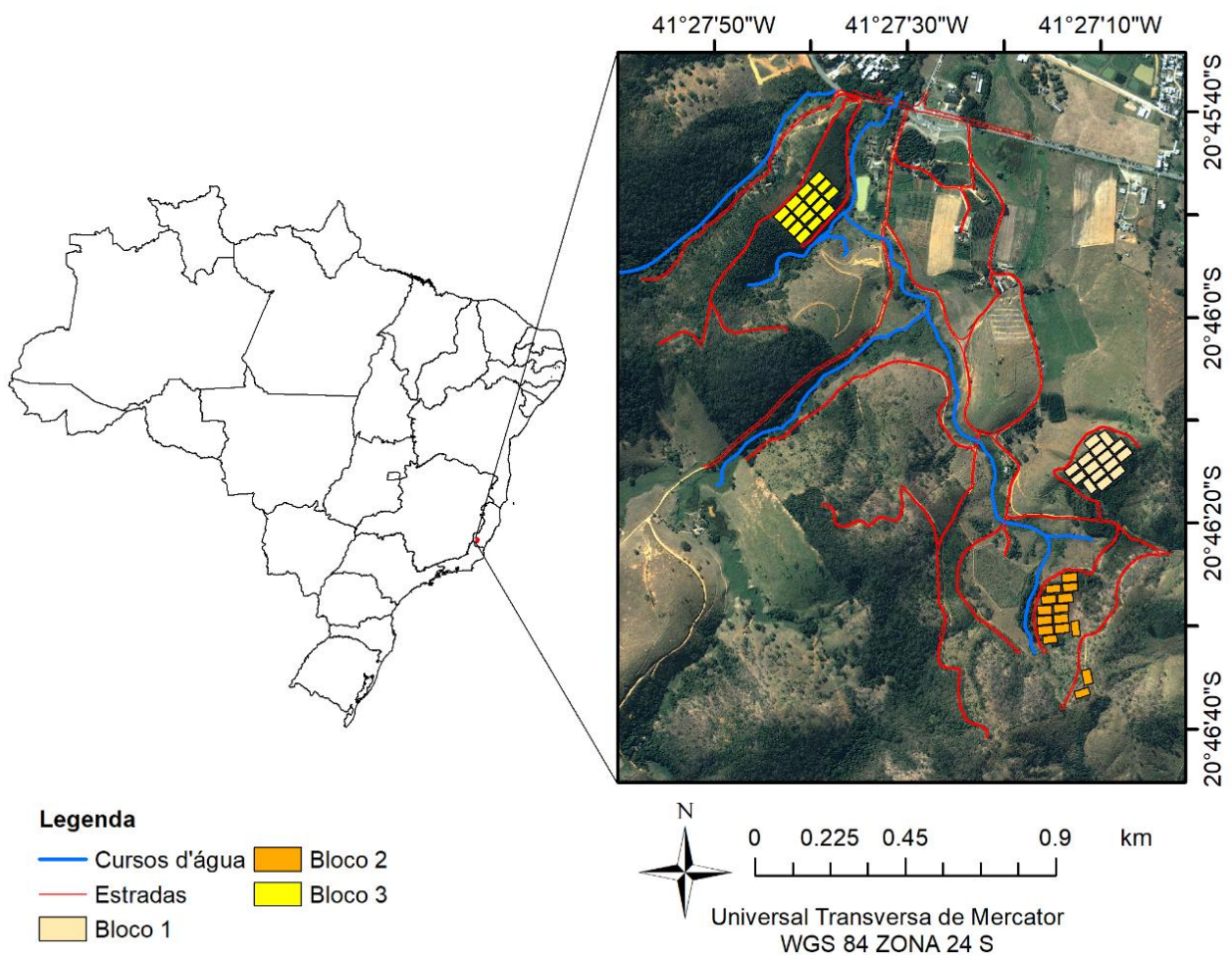
Neste capítulo, buscou-se descrever os atributos químicos do solo e investigar a relação entre diferentes espaçamentos de plantio e os estoques de carbono e nitrogênio do solo em povoamentos de *A. peregrina* var. *peregrina*, após 8,2 de plantio. Testou-se a hipótese de que os espaçamentos mais adensados resultam em maior intensidade na incorporação de carbono e nitrogênio do solo.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Área de estudo

O estudo foi desenvolvido em uma área cedida pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (Ifes), campus de Alegre, localizado em Rive, distrito de Alegre, Espírito Santo, Brasil (Figura 1). As parcelas experimentais estão inseridas em uma área com histórico de uso pecuário e vegetação anterior ao plantio composta por pastagens não fertilizadas, com predominância de gramíneas do gênero *Urochloa sp.*

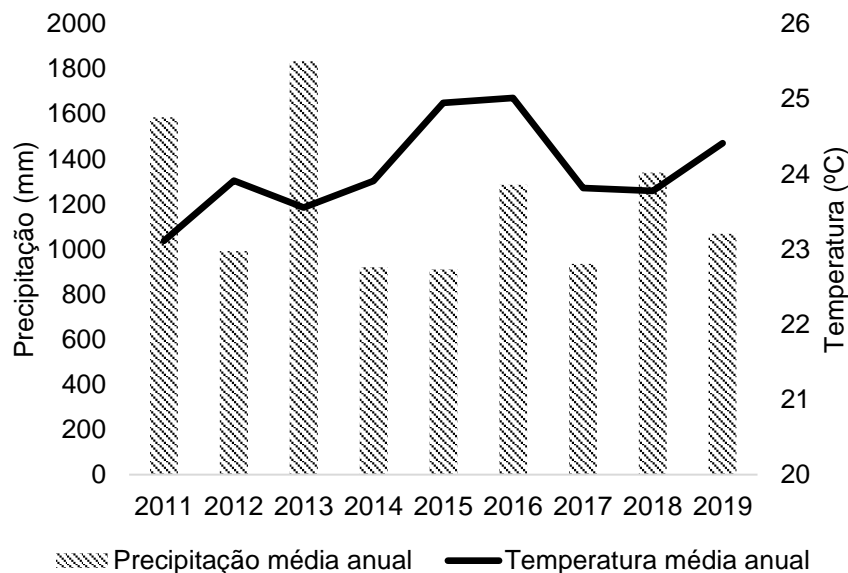
Figura 1 – Localização da área experimental e blocos experimentais, nos povoamentos de *A. peregrina* var. *peregrina* em Alegre, ES, Brasil.



Fonte: O autor.

O clima da região é do tipo Aw na classificação de Köppen, com inverno seco e verão chuvoso (ALVARES et al., 2013). Durante o período de avaliação do experimento a temperatura média anual foi de aproximadamente 24 °C com precipitação média anual de 1200 mm (Figura 2), conforme medições da estação automática A617, com dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia - Inmet. A altitude local do estudo varia entre 90 e 280 metros em relação ao nível do mar e a diferença entre altitudes dos blocos experimentais varia em 51 % (SOUZA, 2018).

Figura 2 – Temperatura média anual e precipitação média anual no período de avaliação do experimento, para o município de Alegre, ES, Brasil.



Fonte: Adaptado de estações automáticas Inmet. Acesso em 02 de setembro de 2021.

O tipo de solo foi classificado por levantamento realizado pelo Ifes (1984, dados não publicados), com nomenclatura revisada de acordo com a Embrapa (DOS SANTOS et al., 2018). Ocorrem diferentes tipos de solo nos blocos alocados na área experimental. No bloco 1, predomina o Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; no bloco 2, o solo é classificado como Cambissolo Háptico eutrófico; e no bloco 3 Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico. A Mata Atlântica é o bioma local e a formação predominante nas formações florestais da região é de Floresta Estacional Semidecidual (IBGE, 2012). A área experimental está inserida na bacia hidrográfica do Rio Itapemirim (EUGÊNIO et al., 2013).

Em setembro de 2010, ano anterior ao plantio, foram coletadas amostras de solo para análise química e física, nas profundidades de 0 – 20 e 20 – 40 cm. Foram amostrados



seis pontos de cada bloco, para cada profundidade. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e enviadas para o laboratório, para análise química e física (Tabela 1 e 2), segundo os procedimentos recomendados pela Embrapa (TEIXEIRA et al., 2017). A classe textural do solo foi definida com base na porcentagem das frações mineralógicas do solo, utilizando o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da Embrapa (DOS SANTOS et al., 2018). Os solos dos blocos experimentais têm textura argilosa e média-argilosa.

Tabela 1 – Principais atributos químicos do solo nas camadas de 0 – 20 cm e 20 – 40 cm, nove meses antes da implantação dos povoamentos de *A. peregrina* var. *peregrina*, em Alegre, ES, Brasil.

Bloco	Camada (cm)	pH	P	K	Ca	Mg	H + Al	CTC(T)	SB	C	MO	V	m
		H <sub>2</sub> O	-- mg dm <sup>-3</sup> --	----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----	----- g kg <sup>-1</sup> -----	----- % -----							
1	0 – 20	6,0	2,0	75,1	3,5	2,0	2,9	8,7	5,7	12,2	21,0	66,2	0,0
	20 – 40	5,9	2,7	39,2	4,2	2,1	1,7	8,1	6,4	5,3	9,1	79,2	0,0
2	0 – 20	6,0	1,9	68,6	4,4	2,3	2,9	9,7	6,8	14,4	24,8	70,3	0,0
	20 – 40	6,1	1,9	41,8	4,7	2,0	2,1	8,9	6,9	6,9	12,0	77,0	0,3
3	0 – 20	5,5	2,3	66,7	1,2	1,0	3,1	5,4	2,4	12,2	21,0	43,6	7,7
	20 – 40	5,3	2,0	42,8	0,9	0,8	2,7	4,6	1,9	8,4	14,5	40,8	14,1

Em que: SB - Soma de bases trocáveis; CTC(T) - Capacidade de troca catiônica a pH 7; V - Índice de saturação em bases; m - Índice de saturação em alumínio. Métodos: pH em água - Relação 1:2,5; P, K - Extrator Mehlich<sup>-1</sup>; Ca, Mg – Extrator KCl, 1 mol L<sup>-1</sup>; H + Al - Correlação pH-SMP; C - Carbono orgânico (Oxidação por via úmida); MO - Matéria orgânica (C x 1,724).

Fonte: Adaptado de Souza (2018).

Tabela 2 – Granulometria e classes texturais do solo nas camadas de 0 – 20 cm e 20 – 40 cm, nove meses antes da implantação dos povoamentos de *A. peregrina* var. *peregrina*, em Alegre, ES, Brasil.

Bloco	Camada (cm)	Ds	Argila	Silte	Areia	Classe textural
		g cm <sup>-3</sup>	%	%	%	
1	0 - 20	1,5	35,4	13,6	51,0	Argilosa
	20 - 40	1,5	44,8	12,3	43,0	Argilosa
2	0 - 20	1,5	31,7	11,9	56,4	Média-argilosa
	20 - 40	1,6	37,2	13,8	49,0	Argilosa
3	0 - 20	1,6	36,4	7,7	55,9	Argilosa
	20 - 40	1,5	48,3	4,9	46,8	Argilosa

Fonte: Adaptado de Souza (2018).

## 2.2. Implantação do povoamento

O povoamento de *A. peregrina* var. *peregrina* foi implantado em junho de 2011. O preparo da área contou com a retirada de bovinos existentes no local, isolamento da área com auxílio de cercas de arame e uso de produto químico a base de glifosato para dessecar as gramíneas e controlar espécies espontâneas. O plantio foi realizado em covas com dimensões de 0,30 m x 0,30 m x 0,30 m e as mudas, com altura média de 0,50 m, foram fornecidas pelo viveiro da Reserva Natural Vale, em Linhares – ES. A adubação inicial foi feita utilizando 220 gramas por planta do formulado NPK 02-30-06, que contém em sua composição os micronutrientes B (0,2 %), Cu (0,2 %) e Zn (0,2 %). A manutenção do plantio foi realizada durante um ano, com operações de replantio, roçada e capina manual.

Foram alocados três blocos, onde foram avaliados três tratamentos que se diferenciam em espaçamentos de plantios, sendo 3 m x 3 m (1111 árvores ha<sup>-1</sup>), 4 m x 4 m (833 árvores ha<sup>-1</sup>) e 5 m x 5 m (400 árvores ha<sup>-1</sup>). Cada bloco possui três repetições, em parcelas amostrais com dimensões de 30 m por 50 m, (área de 1500 m<sup>2</sup>), totalizando 27 unidades amostrais. Para a amostragem de solo, foi utilizada apenas uma parcela por bloco (nove no total), por questões financeiras e dificuldades referentes a amostragem.

### **2.3. Amostragem do solo**

Em agosto de 2019, com 8,2 anos após a implantação, foi realizada a amostragem de solo utilizando trincheiras para caracterização química e quantificação dos teores de carbono orgânico e nitrogênio total em profundidade. Foi alocado um ponto amostral em cada um dos três blocos (repetições) do experimento, para cada espaçamento (tratamento) estudado, totalizando nove pontos amostrais. Em cada ponto amostral foi aberta uma trincheira, com um (01) metro de profundidade, utilizando ferramentas como enxadão e cavadeira, expondo o perfil do solo. A amostragem ocorreu desconsiderando as bordas da parcela experimental, alocando pontos de amostragem no centro de quatro indivíduos com diâmetros à altura do peito (DAP) médios, que melhor representam o povoamento.

As trincheiras foram subdivididas de acordo com as camadas de profundidade 0 – 20, 20 – 40, 40 – 60, 60 – 80 e 80 – 100 cm, de onde amostras deformadas foram extraídas com o auxílio do enxadão. As amostras de cada um dos espaçamentos e profundidades foram acondicionadas em recipientes plásticos e enviadas para o laboratório. Os

procedimentos seguiram as recomendações da Embrapa (TEIXEIRA et al., 2017). Para a análise de fertilidade foi utilizada para Fósforo, Potássio e Sódio o Extrator Mehlich<sup>-1</sup>; Fósforo Remanescente: solução de equilíbrio CaCl<sub>2</sub> 10 mmol L<sup>-1</sup>; pH em água 1:2,5; H+Al - pH SMP; Matéria orgânica: Oxidação com Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>.2H<sub>2</sub>O + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 10 mol L<sup>-1</sup>; Cálcio, Magnésio e Alumínio: Extrator KCl 1 mol L<sup>-1</sup>. As análises de carbono orgânico realizadas pela oxidação da matéria orgânica via úmida com dicromato de potássio (WALKLEY e BLACK, 1934) e a análise de nitrogênio total através da titulação de solução sulfúrica em metodologia conhecida como digestão Kjeldahl.

#### 2.4. Densidade do solo e estoque de C e N

Para a determinação da Densidade do Solo (Ds), foi utilizado o método de determinação pelo anel volumétrico (TEIXEIRA et al., 2017), que consiste no uso de um aro metálico de volume e massa conhecidos. Desta forma, foi possível extrair amostras indeformadas para as camadas de solo estudada, com o auxílio de um amostrador de solo do tipo Uhland e anéis volumétricos com volume de 102,14cm<sup>3</sup>. No laboratório, o material foi levado a estufa com circulação forçada em uma temperatura de 105 ± 3 graus Celsius por 72 horas. Após resfriamento, elas foram pesadas para obtenção do valor de massa seca e a Ds foi calculada.

Foram calculados o estoque de carbono orgânico e nitrogênio total no solo pela associação entre a Ds e o teor de carbono orgânico ou nitrogênio total obtido na análise química, por meio da equação 1, adaptada de Veldkamp (1994), que leva em consideração também a espessura da camada de solo analisada:

$$\text{Est} = T \times Ds \times \frac{e}{10} \quad (1)$$

Em que:

Est = Estoque de carbono orgânico ou nitrogênio total na profundidade específica, em Mg ha<sup>-1</sup>;

T = teor de carbono orgânico ou nitrogênio total da profundidade específica, em g kg<sup>-1</sup>;

Ds = Densidade do solo da profundidade específica, em g cm<sup>-3</sup> e;

e = Espessura da profundidade de solo, em cm.

Após determinar os estoques de C e N no solo, estes foram corrigidos quanto à densidade do solo, pois a área experimental tem histórico prévio de utilização como pastagem, sendo essa uma modalidade de uso do solo que pode ocasionar compactação, resultando em valores elevados de Ds. Conforme descrito por Carvalho et al. (2009), os estoques foram corrigidos utilizando a equação 2, considerando dentre os solos amostrados, aquele que apresenta menor Ds como solo de referência:

$$\text{EstC} = \text{Est} \times \frac{D_{sref}}{D_s} \quad (2)$$

Em que:

EstC = Estoque de carbono orgânico ou nitrogênio total corrigido pela densidade do solo de referência, em Mg ha<sup>-1</sup>;

Est = Estoque de carbono orgânico ou nitrogênio total na profundidade específica, em Mg ha<sup>-1</sup>;

Dsref = Densidade do solo de referência, em g cm<sup>-3</sup>;

Ds = Densidade do solo da profundidade específica, em g cm<sup>-3</sup>.

## 2.5. Análise estatística

O delineamento experimental utilizado foi o Delineamento em Blocos Casualizados (DBC), com três tratamentos e três repetições. Os dados foram testados quanto a homogeneidade de variâncias e normalidade de resíduos, pelos testes de OneilMathews e Shapiro-Wilk, respectivamente, ao nível de 5 % de probabilidade. Quando atendidos os requisitos, procedeu-se a análise de variância (ANOVA). As médias das variáveis analisadas, entre os espaçamentos testados, foram comparadas por meio do teste Tukey, a 5 % de probabilidade. Foi utilizado o software R, pacote Expdes.pt.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Atributos químicos do solo

Os diferentes espaçamentos de plantio testados não diferem estatisticamente quanto aos atributos químicos do solo avaliados neste estudo ( $p > 0,05$ ). Com a ausência de significância estatística, foram dispostas as médias dos tratamentos e a estatística descritiva das variáveis considerando todos os tratamentos e repetições, afim de caracterizar a variação dos dados (Tabela 3).

Alguns dos blocos experimentais expressaram seus efeitos devido ao contraste entre diferentes tipos de solo, principalmente para Ca até a profundidade de 60 cm e saturação por bases (V) nas camadas intermediárias (entre 20 e 60 cm de profundidade). Dentre as áreas de plantio, o Bloco 2 tem valores superiores aos demais em Ca, contribuindo também para maior V (%), possivelmente em decorrência de uma maior disponibilidade natural de bases. Os teores de Ca e Mg antes do plantio podem ser verificados na Tabela 1. Ocorre nos blocos experimentais solos do tipo argissolo (predominantemente no bloco 1), cambissolo (no bloco 2) e latossolo (no bloco 3). Destes, o argissolo e o latossolo são mais profundos e intemperizados, ao contrário do cambissolo, que é uma formação mais jovem.

Na camada até 20 cm foi observado alto coeficiente de variação (CV) para as variáveis P (43 %), K (36 %), Ca (32 %), Mg (49 %) e m (66 %). Comparando as profundidades amostradas, foi observada significância nos teores de K para T2 (4 m x 4 m) e nos teores de Ca e Mg para T3 (5 m x 5 m), com decréscimo para as camadas mais profundas. Todos os espaçamentos possuem variação na CTC a pH 7,0 e MOS entre profundidades.

Com base nos níveis ideais para os atributos do solo recomendados por Prezotti (2007) e Prezotti e Guarçoni (2013) e suas interpretações, pode-se descrever o panorama geral de fertilidade dos solos na área de estudo. A maioria dos solos possuem acidez média, com valor médio de pH em água variando entre 5,1 e 6,0 para a camada superficial do solo. O teor de P se encontra baixo para todos os espaçamentos de plantio. Os níveis de potássio são considerados médios para a camada superficial e variam de médio a baixo nas demais profundidades. Quanto às bases Ca e Mg, os solos possuem teores baixos e médios, respectivamente, tanto para a superfície quanto em profundidade. O solo possui teor médio de matéria orgânica e valores médios para a CTC a pH 7,0 nas camadas superiores. Os

solos apresentam baixa saturação por bases, variando entre 38,33 % e 41,97 % para a camada superficial.

Tabela 3 – Médias e desvio padrão dos atributos químicos do solo até 100 cm de profundidade, para diferentes espaçamentos de plantio, em povoamento de *A. peregrina* var. *peregrina* em Alegre, ES, Brasil.

Espaçamentos	P ---- (mg dm <sup>-3</sup> ) ----	K	Ca	Mg	CTC (T) ----- (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) -----	pH -- (H <sub>2</sub> O) --	MOS -- (g kg <sup>-1</sup> )--	(V) ----- (%) -----	(m)
Profundidade 0 – 0,20 m									
3 m x 3 m	4,0	97,0	1,3	0,7	5,8 a	5,4	28,0 a	38,9	10,5
4 m x 4 m	3,3	81,3 a	1,4	0,9	5,9 a	5,5	22,7 a	42,0	10,9
5 m x 5 m	4,0	69,3	1,3 a	0,6 a	5,6 a	5,4	24,7 a	38,3	10,2
Média	3,8	82,6	1,4	0,7	5,8	5,4	25,1	39,7	10,6
Mínimo	2,0	24,0	0,7	0,5	4,8	5,1	17,0	29,1	0,0
Máximo	7,0	130,0	2,0	1,7	7,1	6,0	32,0	56,4	21,3
DP	1,6	29,7	0,4	0,4	0,9	0,3	5,2	8,5	7,0
CV (%)	43	36	32	49	15	5	21	22	66
Profundidade 0,20 - 0,40 m									
3 m x 3 m	2,0	53,0	1,4	0,6	5,5 ab	5,4	18,3 b	37,6	14,1
4 m x 4 m	1,3	48,0 ab	1,2	0,6	5,1 b	5,3	15,7 b	37,0	14,8
5 m x 5 m	1,7	67,0	1,0 ab	0,5 ab	4,6 ab	5,2	12,7 b	35,1	18,7
Média	1,7	56,0	1,2	0,6	5,1	5,3	15,6	36,5	15,9
Mínimo	1,0	20,0	0,6	0,4	4,4	5,1	11,0	26,4	0,0
Máximo	2,0	120,0	2,7	1,0	6,7	5,7	21,0	53,9	23,1
DP	0,5	28,3	0,7	0,2	0,9	0,2	3,5	9,3	8,8
CV (%)	30	51	61	34	17	4	22	25	56
Profundidade 0,40 - 0,60 m									
3 m x 3 m	1,3	78,3	1,4	0,5	4,7 bc	5,5	11,3 c	44,7	6,3
4 m x 4 m	1,0	29,0 b	1,2	0,5	4,7 b	5,3	10,0 bc	37,0	20,9
5 m x 5 m	1,7	55,7	0,9 ab	0,4 ab	4,3 b	5,2	9,7 b	33,7	23,4
Média	1,3	54,3	1,2	0,5	4,6	5,3	10,3	38,5	16,9
Mínimo	1,0	20,0	0,6	0,2	3,9	4,8	9,0	24,1	0,0
Máximo	3,0	110,0	2,7	0,9	6,1	5,9	13,0	57,7	39,4
DP	0,7	34,8	0,7	0,2	0,8	0,4	1,2	11,1	15,0
CV (%)	53	64	63	41	18	7	12	29	89
Profundidade 0,60 - 0,80 m									
3 m x 3 m	1,3	86,7	1,5	0,6	4,4 c	5,8	9,0 c	50,7	3,4
4 m x 4 m	1,0	32,7 ab	1,0	0,8	4,7 b	5,4	8,7 c	38,4	17,3
5 m x 5 m	2,0	73,7	0,9 ab	0,3 b	4,2 b	5,1	8,3 b	33,8	22,9
Média	1,4	64,3	1,1	0,6	4,4	5,5	8,7	40,9	14,5
Mínimo	1,0	18,0	0,5	0,3	3,7	4,8	8,0	22,9	0,0
Máximo	4,0	160,0	2,7	1,7	5,6	6,2	10,0	66,7	33,0
DP	1,0	53,2	0,7	0,5	0,7	0,4	0,7	14,4	12,7
CV (%)	70	83	60	80	15	8	8	35	88
Profundidade 0,80 - 1,00 m									
3 m x 3 m	1,3	89,0	1,5	0,6	4,6 bc	5,8	8,0 c	49,7	8,5

4 m x 4 m	1,3	40,7 ab	1,1	0,8	4,7 b	5,3	7,7 c	40,9	21,8
5 m x 5 m	2,0	79,3	0,7 b	0,3 b	4,3 b	5,1	8,0 b	30,6	26,2
Média	1,6	69,7	1,1	0,6	4,6	5,4	7,9	40,4	18,9
Mínimo	1,0	19,0	0,5	0,2	3,9	4,8	7,0	17,7	0,0
Máximo	4,0	170,0	2,8	1,9	5,7	6,6	9,0	66,6	47,4
DP	1,0	58,9	0,7	0,5	0,7	0,6	0,6	16,1	15,6
CV (%)	65	85	65	89	15	11	8	40	83

Em que: <sup>ns</sup> – Não significativo. Valores seguidos da mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. DP – Desvio padrão; CV (%) – coeficiente de variação; CTC (T) – Capacidade de troca de cátions a pH 7,0. MOS – Matéria orgânica do solo. (V) – Saturação por bases. Métodos: P e K - Extrator Mehlich<sup>-1</sup>; pH - H<sub>2</sub>O 1:2,5; MO - Oxidação com Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>.2H<sub>2</sub>O + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 10 mol L<sup>-1</sup>; Ca e Mg - Extrator KCl 1mol L<sup>-1</sup>.

### 3.2. Carbono, nitrogênio e relação C/N

Os dados não diferem em função dos espaçamentos de plantio testados ( $p > 0,05$ ) (Tabela 4). Considerando a camada superficial do solo (0-20 cm), a variação da Ds foi de 0,12 g cm<sup>-3</sup> entre os espaçamentos 4 m x 4 m e 5 m x 5 m, respectivamente. Houve variação no teor de carbono em 3,14 g kg<sup>-1</sup> entre os espaçamentos 4 m x 4 m e 3 m x 3 m. O nitrogênio variou 0,60 g kg<sup>-1</sup> entre o espaçamento 3 m x 3 m e os demais espaçamentos de plantio. A relação C/N apresenta pouca variação, de apenas 1,76 % entre os espaçamentos 3 m x 3 m e 4 m x 4 m.

Tabela 4 – Médias e desvio padrão para densidade do solo, teores de carbono, nitrogênio e relação C/N até 100 cm de profundidades, para diferentes espaçamentos de plantio, em povoamento de *A. peregrina* var. *peregrina* em Alegre, ES, Brasil.

Trat <sup>ns</sup>	Profundidade	Ds <sup>ns</sup>	CO	NT	Relação C/N <sup>ns</sup>
	cm	g cm <sup>-3</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	
3 m x 3 m	0 - 20	1,30 (0,09)	16,27 (2,11) a	2,03 (0,47) a	8,18 (1,32)
	20 - 40	1,52 (0,07)	10,67 (1,33) b	1,57 (0,67) ab	7,43 (2,32)
	40 - 60	1,47 (0,06)	6,57 (0,86) c	0,93 (0,06) bc	7,08 (1,27)
	60 - 80	1,50 (0,07)	5,20 (0,60) c	0,77 (0,25) bc	7,22 (2,00)
	80 - 100	1,49 (0,15)	4,63 (0,55) c	0,53 (0,25) c	9,79 (3,62)
4 m x 4 m	0 - 20	1,36 (0,03)	13,13 (2,37) a	1,43 (0,06) a	9,15 (1,53)
	20 - 40	1,48 (0,13)	9,10 (2,33) b	1,00 (0,23) ab	8,56 (1,22)
	40 - 60	1,48 (0,10)	5,80 (0,60) bc	0,83 (0,42) ab	7,87 (2,76)
	60 - 80	1,46 (0,10)	5,00 (0,35) c	0,67 (0,06) b	7,56 (1,05)

	80 - 100	1,48 (0,01)	4,43 (0,29) c	0,73 (0,15) b	6,17 (0,93)
5 m x 5 m	0 - 20	1,24 (0,19)	14,33 (4,35) a	1,43 (0,06) a	9,94 (2,69)
	20 - 40	1,37 (0,16)	7,33 (0,86) b	1,13 (0,06) b	6,46 (0,56)
	40 - 60	1,40 (0,15)	5,60 (0,35) b	0,93 (0,12) bc	6,08 (1,27)
	60 - 80	1,40 (0,16)	4,80 (0,35) b	0,80 (0,17) c	6,19 (1,33)
	80 - 100	1,31 (0,06)	4,60 (0,00) b	0,83 (0,12) c	5,60 (0,84)

Em que: <sup>ns</sup> – Não significativo; Ds – Densidade do solo; CO – Carbono orgânico; NT – Nitrogênio total. Valores seguidos da mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Foi constatada diferença significativa nos teores de carbono e nitrogênio total para as profundidades de coleta ( $p < 0,05$ ). No geral, a camada superficial do solo até 20 cm possui maiores teores tanto para o carbono quanto para o nitrogênio, ocorrendo decréscimo em maiores profundidades. Houve maior variação entre a camada superficial até 100 cm no espaçamento 3 m x 3 m, com diferença de 11,64 g kg<sup>-1</sup> para o carbono orgânico e 1,5 g kg<sup>-1</sup> para o nitrogênio total. A profundidade de coleta não influenciou significativamente as médias de Ds e relação C/N.

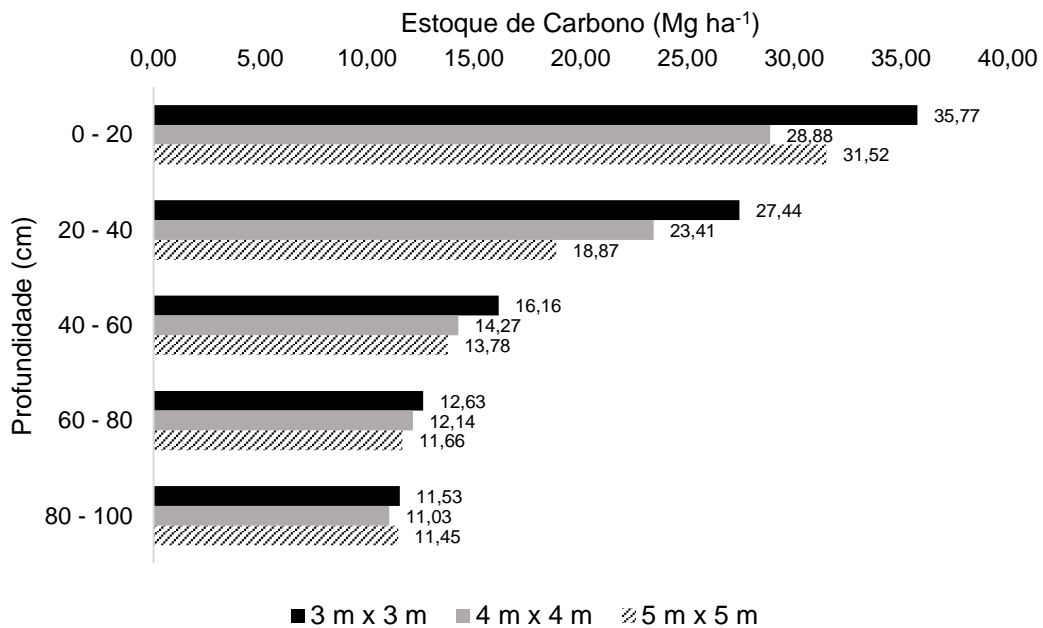
A partir dos teores e a densidade do solo, foram calculados os estoques de carbono e nitrogênio para os diferentes espaçamentos de plantio e profundidades de coleta. Após correção em função da densidade do solo de referência (solo que apresentou menor densidade), houve decréscimo de 13,69 % e 13,64 % nos estoques totais de C e N, respectivamente. Os estoques de C e N corrigidos estão representados nas Figuras 3 e 4.

Assim como nos teores, os estoques de C e N diferem estatisticamente em relação a profundidade de coleta ( $p < 0,05$ ). No geral, os estoques de C e N apresentam médias superiores na profundidade de 0 – 20 cm e valores inferiores na camada de 80 – 100 cm, para todos os espaçamentos avaliados.

Não há diferença estatística entre os estoques de C para os espaçamentos de plantio testados ( $p > 0,05$ ). Os estoques de carbono na camada superficial (0 – 20 cm) tem valores entre 28,88 e 35,77 Mg ha<sup>-1</sup>, para os espaçamentos 4 m x 4 m e 3 m x 3 m, respectivamente. Há tendência para maiores estoques no espaçamento 3 m x 3 m, até a profundidade de 40 cm. Contabilizando o total de C estocado para cada espaçamento (até 100 cm de profundidade), os solos no espaçamento 3 m x 3 m estocam 103,53 Mg ha<sup>-1</sup>. Os solos no espaçamento 4 m x 4 m estocam 89,74 Mg ha<sup>-1</sup> e no 5 m x 5 m, 87,27 Mg ha<sup>-1</sup>.

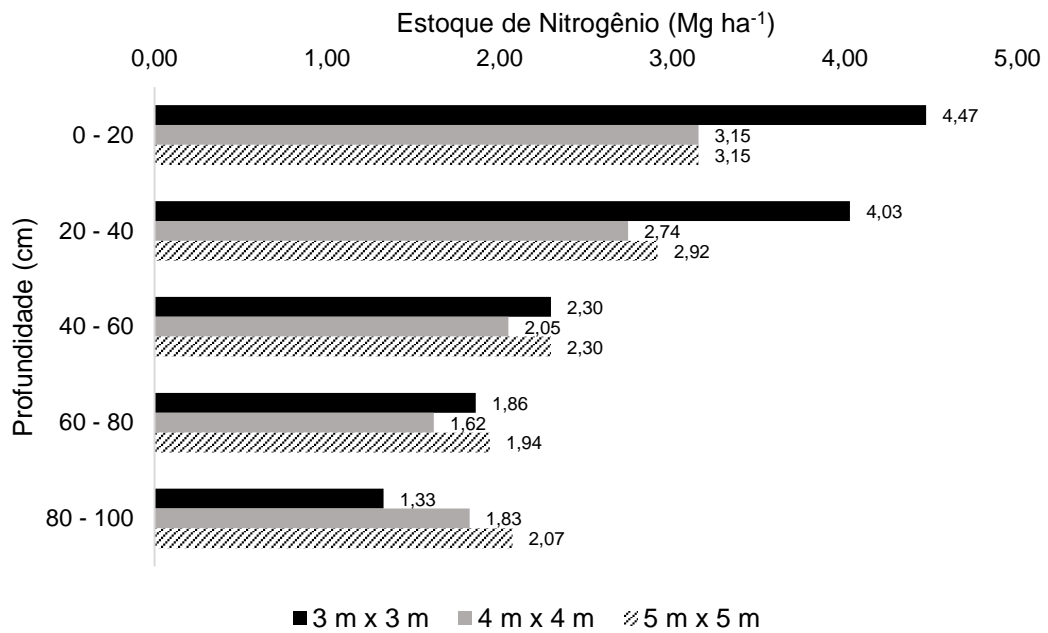


Figura 3 – Estoque de carbono no solo em diferentes profundidades, para três espaçamentos de plantio, em povoamento de *A. peregrina* var. *peregrina* em Alegre, ES.



Não existe diferença estatística entre os espaçamentos de plantio para os estoques de nitrogênio ( $p > 0,05$ ). Os estoques na camada de 0 – 20 cm estão entre 3,15 e 4,47 Mg ha<sup>-1</sup>, sendo o maior valor atribuído ao espaçamento 3 m x 3 m, que apresenta leve tendência a maiores estoques, mesmo que não comprovada estatisticamente ( $p = 0,10$ ). Considerando o somatório dos compartimentos até 100 cm, o espaçamento 3 m x 3 m possui estoque total de 13,99 Mg ha<sup>-1</sup>, o espaçamento 4 m x 4 m possui 11,39 Mg ha<sup>-1</sup> e o espaçamento 5 m x 5 m tem 12,38 Mg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio estocado.

Figura 4 – Estoque de nitrogênio no solo em diferentes profundidades, para três espaçamentos de plantio, em povoamento de *A. peregrina* var. *peregrina* em Alegre, ES.



## 4. DISCUSSÃO

### 4.1. Atributos químicos do solo

Os parâmetros de fertilidade do solo e concentração de nutrientes são extremamente dinâmicos e podem ser influenciados pela presença de plantas no sistema. Seus efeitos são mais expressivos em ambientes pouco manejados e com maior tempo de estabelecimento (WARING et al., 2015). A influência do povoamento florestal vai depender grandemente das particularidades de cada espécie e os efeitos na composição química são significativamente mais pronunciados na superfície do piso florestal, onde há deposição de matéria orgânica advinda dos indivíduos arbóreos (MALLIK, HASSAIN e LAMB, 2008). Para melhor entendimento dos efeitos da vegetação no solo florestal, é recomendável que a camada superficial seja estratificada em camadas com espessura inferior a 20 cm.

Quanto a deposição de material vegetal na superfície do solo, não há um padrão definido em função da densidade de plantio. Em estudo realizado por Villa et al. (2016) em área de restauração florestal, os autores reportam maior aporte de serrapilheira apenas para o espaçamento mais adensado (1 m x 1 m). Em espaçamentos não muito adensados, como os testados no presente estudo, houve pouca variação. Além disso, apesar de maior deposição orgânica, em alguns casos os povoamentos adensados tendem a extrair maiores quantidades de nutrientes do solo, visto a maior quantidade de árvores e a competição entre elas (DUAN et al., 2019).

A conversão de matéria orgânica em nutrientes para o solo depende de variáveis climáticas, qualidade nutricional, composição de carbono da matéria orgânica depositada e características do solo (WARING, 2012; BALIN et al., 2017). Para a área experimental dos plantios estudados, as características climáticas e edáficas desejáveis para o desenvolvimento da espécie são atendidas, uma vez que possui precipitação média de 1200 mm e temperatura média anual de 24 °C (Figura 2), além de solo com textura argilosa. Estas características atendem os parâmetros descritos por Carvalho (2003) para o bom desenvolvimento da espécie. Quanto aos fatores característicos da espécie, *A. peregrina* var. *peregrina* é uma leguminosa, que possuem elevado teor de N e baixa razão C:N, influenciando a rápida decomposição e menor tempo de permanência do material orgânico na superfície do solo (COLETTA, 2015). Ainda assim, as mudanças nas características

químicas do solo são pouco pronunciáveis em um período curto de tempo, como o do presente estudo.

A área experimental abrange diferentes tipos de solo, com processos de formação e fertilidade natural distintas, dificultando a leitura da real influência do espaçamento como fator isolado para os atributos do solo. As diferenças no tipo de solo afetam principalmente a atividade microbiana, uma característica essencial para a transferência de nutrientes ao solo e a estocagem de carbono (BAUHUS, PARÉ e CÔTÉ, 1998; MARÍN-SPIOTTA e SHARMA, 2013). Porém, de acordo com Bighi et al. (2021), os povoamentos de *A. peregrina* var. *peregrina* apresentam boa tolerância a condições de fertilidade, sem limitações pronunciadas quanto ao seu desenvolvimento. Deve-se considerar também que as parcelas experimentais do presente estudo foram alocadas em áreas de altitude não variável, porém, com variação de declividade (SOUZA, 2018). A posição no relevo pode influenciar os teores de nutrientes em áreas de relevo ondulado na região sul do Espírito Santo, tanto em áreas de pastagem quanto em plantios florestais (EFFGEN et al., 2012). Povoamentos florestais em áreas declivosas tendem a perder quantidades significativas de solo e água em relação a áreas planas, havendo carreamento de nutrientes (SILVA et al., 2011).

Em alguns casos, solos advindos de pastagens podem receber contribuição de material orgânico proveniente de plantas C4, como as gramíneas (TONUCCI et al., 2017). Estas contribuições são capazes de afetar os teores de MOS em função da densidade de plantio, que oferece diferentes condições para o desenvolvimento dessas espécies no sub-bosque (DUAN et al., 2019). No presente estudo, o desenvolvimento de gramíneas nas entrelinhas foi pouco observado. O maior desenvolvimento dessas espécies espontâneas pode ter sido evitado em função da característica de dominância aliada ao possível caráter alelopático de *A. peregrina* var. *peregrina*, como observado por Souza et al., (2012). Além de característica de copa frondosa que impede grandes infiltrações de luz solar. A coexistência de diversos fatores que influenciam os atributos do solo torna o estudo limitado quanto a influência dos espaçamentos na fertilidade do solo. Os atributos testados tem grande variação, comprovada pelo alto coeficiente de variação e desvio padrão, em decorrência do número insuficiente de trincheiras amostradas.

A camada superficial do solo pode ter mantido teores similares de MOS após a implantação do povoamento. Esta camada recebia, quando pastagem, grandes contribuições das espécies gramíneas, que tem alta eficiência fotossintética, convertida em alta produção de material orgânico e raízes finas (SILVA et al., 2013). A variação nos teores

de MOS em profundidade aos 8,2 anos de plantio ocorreu em todos os espaçamentos de plantio estudados, sendo superior na camada superficial do solo (0 – 20 cm). Este resultado corrobora com outros estudos (EFFGEN et al., 2012; GATTO et al., 2014; DUAN et al., 2019), sendo esperado pois grande parte da matéria orgânica do solo é fornecida por resíduos vegetais depositados em sua superfície, que se incorporam no chão florestal e são decompostos, carreando partículas e compostos químicos em menores quantidades para as camadas inferiores (BRADY, 1984). A variação nos teores de MOS podem influenciar os demais atributos como a CTC, a partir de sua mineralização e fornecimento de íons para a solução do solo (MACHADO et al., 2017).

Apesar de apresentar baixo pH, os valores observados no povoamento são considerados razoáveis para o desenvolvimento de espécies florestais (PREZOTTI e GUARÇONI, 2013). Espécies leguminosas são capazes de promover a estabilização do pH via ciclagem de nutrientes, com baixa relação C/N (HONG et al., 2018), espécies leguminosas tendem a retirar maior quantidade de cátions do solo no processo de fixação de nitrogênio, além de promover perdas de nitrato, processos que catalisam a acidificação (TANG, 1998; TANG, UNKOVICH e BOWDEN, 1999). Quanto a saturação de bases, esta é fundamental para o bom desenvolvimento do plantio. Mudanças de *Anadenanthera colubrina*, por exemplo, respondem melhor quanto ao crescimento em saturação por bases em torno de 50 % (VARGAS e MARQUES, 2017).

Com base na classificação de estado nutricional proposta por Prezotti e Guarçoni (2013), os teores de Ca são considerados baixos, assim com Mg. Em condições controladas para mudas de *Anadenanthera macrocarpa*, Gonçalves et al. (2008, 2012) descreve a espécie como pouco exigente nutricionalmente, especialmente para as bases K e Ca, sendo um pouco mais exigente em Mg. Ao acessar dados nutricionais de povoamentos florestais no Brasil, Santana et al., (2008) descrevem regiões onde os teores de K, Ca e Mg não atendem à demanda recomendada para os plantios, mas a produção não é fortemente impactada, devido a eficiência na utilização dos nutrientes e na captação pelo sistema radicular em profundidade. Os teores de K, Ca e Mg variam em profundidade para os espaçamentos mais amplos (4 m x 4 m para K, 5 m x 5 m para Ca e Mg), possivelmente em função da ação do sistema radicular melhor desenvolvido na retirada de nutrientes.

O teor médio de P nos solos do presente estudo ( $3,78 \text{ mg dm}^{-3}$ ) não são influenciados pelos espaçamentos e seus valores são inferiores aos valores críticos recomendados para algumas espécies como *A. colubrina* em Latossolo Vermelho distrófico ( $13,88 \text{ mg dm}^{-3}$ ) e

*Eucalyptus grandis* em Latossolo Vermelho-escuro álico ( $8,0 \text{ mg dm}^{-3}$ ) (ISMAEL et al., 1998; GOMES et al., 2004). Segundo Prezotti e Guarçoni (2013), para atender as necessidades básicas da maioria das culturas perenes, é desejável teores de P acima de  $10 \text{ mg dm}^{-3}$ . O elemento tem disponibilidade natural reduzida, seus teores podem ser afetados por processos erosivos, além de apresentar baixa contribuição na serrapilheira, pois é altamente redistribuído entre os compartimentos da planta (MALAVOLTA, 2006).

#### 4.2. Densidade do solo, carbono e nitrogênio

Os espaçamentos de plantio não causam diferenças perceptíveis nos valores de densidade do solo, que para todos os espaçamentos e profundidades testadas mostraram-se propícios para o desenvolvimento de culturas em solos argilosos (BRADY e WEIL, 2013). As possíveis alterações nas características físicas do solo geralmente estão relacionadas ao sistema radicular das espécies florestais. A densidade de raízes pode se relacionar com atributos físicos como a porosidade do solo, de acordo com as características de crescimento da espécie (YU et al., 2018). O espaçamento de plantio tende influenciar a densidade de raízes, porém, nem sempre resulta em diferentes densidades do solo. Em estudo desenvolvido por Da Rosa et al. (2018), os autores não observam diferenças nesta variável, em povoamentos de *Eucalyptus dunnii* com diferentes espaçamentos de plantio um ano após o estabelecimento do plantio.

No estudo desenvolvido por Souza (2018) aos 56 meses de idade nos povoamentos de *A. peregrina* var. *peregrina*, o autor encontra diferenças não muito atenuadas para a biomassa de raízes em função dos espaçamentos, sendo os espaçamentos 3 m x 3 m e 4 m x 4 m semelhantes. Nesta etapa, a implantação do povoamento já resultava em melhorias nas condições físicas do solo, com significativa redução na densidade. Na literatura, grande parte dos estudos relatam diminuição da  $D_s$  na camada superficial e aumento em profundidade no estabelecimento de povoamentos florestais (MACEDO et al., 2008; KORKANÇ, 2014; BALIN et al., 2017). No presente estudo, a diferença entre os métodos de amostragem não permitiu a comparação entre os valores de densidade anteriores ao estabelecimento do povoamento e os valores atuais.

Os teores e estoques de carbono do solo não foram influenciados pelo espaçamento de plantio para os povoamentos estudados. Como as características químicas do solo não diferem para os espaçamentos, as principais contribuições do espaçamento para o C do solo estão ligadas a fatores ambientais e o teor de C da matéria orgânica. Pode existir forte relação entre a densidade de plantio e o carbono estocado acima do solo em alguns plantios, expressada pela correlação entre área basal e estoque de carbono na biomassa em florestas tropicais (WASSIHUN et al., 2019). Porém, a transferência de matéria orgânica para o solo em plantios florestais se dá por meio da deposição de galhos e folhas. Mesmo que espaçamentos adensados sejam capazes de produzir maior quantidade de serrapilheira, Schwertz et al. (2020) observam que este maior acúmulo pode não resultar em maiores estoques de carbono. Houve, porém, tendência (não significativa) a maiores estoques na camada superficial para o espaçamento 3 m x 3 m.

Os teores de carbono encontrados no estudo estão próximos aos valores comumente encontrados em diversas florestas plantadas, como em plantios de reflorestamento com espécies leguminosas arbóreas inoculadas com rhizobia em Argissolo Vermelho Amarelo (MACEDO et al., 2008) e em povoamentos de eucalipto e erva-mate em Cambissolo Háplico/Neossolo Litólico (DENARDIN et al., 2014). Em ambos os estudos, os teores de C são inferiores as áreas de referência de vegetação nativa utilizadas. Em estudo desenvolvido por Neves et al. (2022) em área de floresta tropical sazonalmente seca próxima aos povoamentos de *A. peregrina* var. *peregrina*, os autores reportam estoque de carbono no solo superior ao do presente estudo, com média de 57 Mg ha<sup>-1</sup>, na profundidade de 0 – 20 cm. Segundo Zhou et al. (2019), composições de espécies que possuem alta concentração de nitrogênio e consequente baixa relação C/N apresentem maior eficiência na decomposição da matéria orgânica e acúmulo de C.

Diversos fatores são responsáveis por variações nos teores e estoques de carbono em plantios florestais a nível global. O tipo de plantio e uso do solo, a espécie ou mix de espécies utilizadas, variáveis climáticas e conteúdo de argila no solo são alguns dos mais relevantes (PAULA et al., 2021). Em estudo desenvolvido por Gatto et al. (2010), os autores avaliaram os estoques de carbono em povoamentos de eucalipto, com diferentes características edafoclimáticas. Apesar de observar maiores estoques em Latossolos, com predominância de maior teor de argila, os autores ressaltam que parte desse resultado se deve a condição climática das áreas estudadas, com maiores altitudes, clima ameno e pouco déficit hídrico, tornando a mineralização da MOS mais lenta. A mineralização da

MOS pode acarretar em perdas de carbono via oxidação e ocasionar liberação de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (BARRETO et al., 2010).

Em estudo realizado por Moore et al. (2018) com espécies nativas em solos tropicais anteriormente ocupados por pastagens, são observadas mudanças nos estoques de carbono em função do tempo. Com base em análises de  $\delta^{13}\text{C}$ , os autores evidenciam que em processos de mudança na cobertura do solo, a conversão de carbono proveniente de pastagens antecessoras ao plantio pode levar décadas. Em fases mais jovens de plantio, Souza (2018) relatou mudanças na relação isotópica de carbono com a introdução do povoamento, com adição de  $\delta^{13}\text{C}$  mais negativo, advindo do povoamento florestal. Estas contribuições foram mais perceptíveis na camada superficial do solo. A idade do povoamento, porém, torna inconclusiva as comparações dos estoques em relação a época de implantação.

Com toda a complexidade dos processos de conversão de carbono, o solo é considerado um dos maiores compartimentos de estocagem de C em ecossistemas florestais, mesmo que susceptível a variações causadas por mudanças nos sistemas de manejo do solo, que afetam os teores de carbono (LÓPEZ-DÍAZ, BENÍTEZ e MORENO, 2017). Estudos indicam que reflorestamentos ou plantios florestais estabelecidos em áreas com diferentes usos prévios provocam uma diminuição inicial no carbono do solo, até que o plantio passe a incrementar quantidades significativas de carbono no sistema, geralmente após 30 anos (PAUL et al., 2001). Posteriormente, o plantio de árvores pode ou não resultar em aumento dos estoques de carbono, com risco de perdas e impacto nas mudanças climáticas globais (FRIGGENS et al., 2020).

Considerando as condições de temperaturas elevada, bom volume de precipitação (apesar de inverno seco) e baixa altitude, além do período de avaliação relativamente curto, o povoamento de *A. peregrina* var. *peregrina* não apresentou grande diminuição nos estoques de C do solo, além de ser compatível com o padrão de demais culturas florestais. Os resultados reportados por Souza (2018) caracterizam uma diminuição dos estoques em relação ao tempo 0, principalmente por conta da diminuição da Ds aos 58 meses. Esta diminuição não é mais perceptível para o período de avaliação do presente estudo, em que o povoamento apresenta maior fechamento de copa, característica com potencial para aumento nos teores de C no solo (MARASENI e PANDEY, 2014).

É possível que a baixa relação C/N (abaixo de 10), que torna a matéria orgânica do solo lábil, tenha favorecido a ligação entre matéria orgânica e componentes minerais tanto



na superfície quanto em profundidade, resultando em estabilidade dos estoques de C (HADDIX, PAUL e COTRUFO, 2016). A incorporação de carbono em profundidade é crucial para a permanência dos estoques de C no solo, pois a maior parte da atividade microbiana responsável pela mineralização da MOS se encontra na região superficial (FAHEY et al., 2011).

Os teores de N total não sofreram influência dos espaçamentos de plantio estudados, assim como observado por Duan et al. (2019), tanto para o N total quanto para o disponível para as plantas. Os teores, porém, são mais elevados para a camada superficial do espaçamento 3 m x 3 m, sem evidência estatística. De modo geral, os valores se assemelham aos encontrados por Macedo et al. (2008), entre florestas nativas e plantios de recuperação com espécies leguminosas inoculadas. Segundo Scheffer et al. (2015), ecossistemas tropicais tem menor déficit de N, pois apresentam características climáticas favoráveis a decomposição da MOS, que combinado com baixa relação C/N ocasiona a liberação de N para as plantas, à custa de maiores perdas de C.

Quanto aos estoques de N, a não significância dos espaçamentos corrobora com os resultados encontrados por Bigli et al. (2021), analisando os estoques de nitrogênio no solo e na biomassa do povoamento abordado no presente estudo, aos 67 meses após o plantio. Na ocasião, os estoques para os espaçamentos 3 m x 3 m e 4 m x 4 m contabilizavam cerca de  $4,9 \text{ Mg ha}^{-1}$  na profundidade de 0 – 20 cm. Os estoques de N se mantiveram para o espaçamento 3 m x 3 m aos 6 anos após o plantio (MENDES et al., 2021). Considerando os estoques do presente estudo, é possível perceber que os valores para a camada superficial se assemelham no espaçamento 3 m x 3 m. Há tendência não significativa para maiores estoques neste espaçamento.

Apesar da tendência encontrada por Bigli et al. (2021) para menores estoques de N no solo e menor eficiência na fixação biológica de N para espaçamentos mais adensados, é importante destacar que estes efeitos foram mais pronunciados no espaçamento 3 m x 2 m, não avaliado no presente estudo. Há, porém, indícios de que em espaçamentos mais adensados, as árvores foram mais dependentes dos estoques de N do solo via ciclagem de nutrientes, com maior deposição foliar e biomassa radicular nos anos iniciais, com um menor custo metabólico de fixação para as plantas. Desta forma, as maiores contribuições via ciclagem de nutrientes e as condições microclimáticas favoráveis para a mineralização de N oferecidas pelo espaçamento 3 m x 3 m resultaram em uma tendência a maiores estoques no presente estudo. Ademais, os estoques de N se mostraram não limitantes para o desenvolvimento do povoamento.

## 5. CONCLUSÕES

Sob as condições estudadas, os espaçamentos de plantio testados não exercem influência sob os atributos químicos do solo do povoamento. Recomenda-se uma amostragem mais ampla e representativa para o estudo de tais atributos.

Os espaçamentos de plantio não alteram os estoques de carbono do solo até 100 cm. Os estoques de nitrogênio total não foram afetados pelos espaçamentos de plantio, porém, tende a se acumular em maior quantidade no espaçamento 3 m x 3 m, até 40 cm de profundidade.

Os atributos do solo necessitam de manutenção para obter níveis adequados de fertilidade e sustentar o melhor desenvolvimento da espécie, para continuar contribuindo com os estoques de nitrogênio e demais nutrientes no solo sem perdas expressivas de carbono.

## 6. REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ATHAYDE, E. A.; MORELLATO, L. P. C. Anthropogenic edges, isolation and the flowering time and fruit set of *Anadenanthera peregrina*, a cerrado savanna tree. **International Journal of Biometeorology**, v. 58, n. 4, p. 443-454, 2014.
- BALIN, N. M. et al. Frações da matéria orgânica, índice de manejo do carbono e atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 3, p. 85-94, 2017.
- BARRETO, P. A. B. et al. Mineralização de nitrogênio e carbono em solos sob plantações de eucalipto, em uma sequência de idades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 735-745, 2010.
- BAUHUS, J.; PARÉ, D.; CÔTÉ, L. et al. Effects of tree species, stand age and soil type on soil microbial biomass and its activity in a southern boreal forest. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 30, n. 8-9, p. 1077-1089, 1998.
- BIGHI, K. N. et al. Nitrogen Pools in tropical plantations of N<sub>2</sub>-fixing and non-N<sub>2</sub>-fixing legume trees under different tree stand densities. **Nitrogen**, v. 2, n. 1, p. 86-98, 2021.
- BRADY, N. C. **The nature and properties of soils**. New York: Macmillan Publishing Company, 1984, 750 p.
- BRADY, NYLE C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3 ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2009, 716 p.
- CARVALHO, J. L. N. et al. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 2, p. 342-349, 2009.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies Arbóreas Brasileiras: Volume 1**. Colombo: Embrapa Florestas, 2003. 1039 p.
- CHEN, L.; SMITH, P.; YANG, Y. How has soil carbon stock changed over recent decades? **Global Change Biology**, v. 21, n. 9, p. 3197–3199, 2015.
- COLETTA, L. D. **Decomposição foliar na Floresta Ombrófila Densa em diferentes altitudes e condições climáticas**. 2015. 93 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.
- DA ROSA, S. F. et al. Propriedades físicas e químicas de um Argissolo sob cultivo de *Eucalyptus dunnii* Maiden no Pampa Gaúcho. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 580-590, 2018.
- DENARDIN, R. B. N. et al. Estoque de carbono no solo sob diferentes formações florestais, Chapecó-SC. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 1, p. 59-69, 2014.

DOS SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Brasília: Embrapa, 2018. 356p.

DUAN, A. et al. Effects of planting density on soil bulk density, pH and nutrients of unthinned Chinese fir mature stands in south subtropical region of China. **Forests**, v. 10, n. 4, p. 351, 2019.

EFFGEN, E. M. et al. Atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob cultivo de eucalipto e pastagem no sul do Espírito Santo. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 95, p. 375-381, 2012.

EUGÊNIO, F. C. et al. Influência do Desmatamento na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica de Rive, Alegre, ES, Brasil. **Silva Lusitana**, v. 21, n. 2, p. 205-218, 2013.

FAHEY, T. J. et al. Transport of carbon and nitrogen between litter and soil organic matter in a northern hardwood forest. **Ecosystems**, v. 14, n. 2, p. 326-340, 2011.

FAWZY, S. et al. Strategies for mitigation of climate change: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 18, p. 1-26, 2020.

FEREZ, A. P. C. et al. Silvicultural opportunities for increasing carbon stock in restoration of Atlantic forests in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 350, p. 40-45, 2015.

FRIGGENS, N. L. et al. Tree planting in organic soils does not result in net carbon sequestration on decadal timescales. **Global Change Biology**, v. 26, n. 9, p. 5178-5188, 2020.

GATTO, A. et al. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1069-1079, 2010.

GATTO, A. et al. Ciclagem e balanço de nutrientes no sistema solo-planta em um plantio de *Eucalyptus* sp., no Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 879-887, 2014.

GOMES, K. C. de O. et al. Influência da saturação por bases e do fósforo no crescimento de mudas de angico-branco. **Revista Árvore**, v. 28, p. 785-792, 2004.

GONÇALVES, E. O. et al. Crescimento de mudas de angico-vermelho (*Anadenanthera macrocarpa* (Benth.) Brenan) sob diferentes doses de macronutrientes. **Revista Árvore**, v. 32, n. 6, p. 1029-1040, 2008.

GONÇALVES, E. O. et al. Nutrição de mudas de angico-vermelho (*Anadenanthera macrocarpa* (Benth.) Brenan) submetidas a doses de N, P, K, Ca e Mg. **Revista Árvore**, v. 36, p. 219-228, 2012.

HADDIX, M. L.; PAUL, E. A.; COTRUFO, M. F. Dual, differential isotope labeling shows the preferential movement of labile plant constituents into mineral-bonded soil organic matter. **Global Change Biology**, v. 22, n. 6, p. 2301-2312, 2016.

HONG, S. et al. Afforestation neutralizes soil pH. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 1-7, 2018.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - Ibá. **Relatório Anual Ibá 2020**. São Paulo: Café Art, 2020. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba-2020.pdf>. Acesso em: 17 set. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 272p.

ISMAEL, J. J. et al. Níveis críticos de fósforo no solo e nas folhas para a implantação de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, em quatro tipos de solos. **Scientia Forestalis**, p. 29-40, 1998.

KORKANÇ, S. Y. Effects of afforestation on soil organic carbon and other soil properties. **Catena**, v. 123, p. 62-69, 2014.

LÓPEZ-DÍAZ, M. L.; BENÍTEZ, R.; MORENO, G. How do management techniques affect carbon stock in intensive hardwood plantations? **Forest Ecology and Management**, v. 389, p. 228-239, 2017.

MACEDO, M. O. et al. Changes in soil C and N stocks and nutrient dynamics 13 years after recovery of degraded land using leguminous nitrogen-fixing trees. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n. 5-6, p. 1516-1524, 2008.

MACHADO, M. R. et al. Land cover changes affect soil chemical attributes in the Brazilian Amazon. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 39, p. 385-391, 2017.

MALAVOLTA, Eurípedes. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 630 p.

MALLIK, A. U.; HOSSAIN, M. K; LAMB, E. G. Species and spacing effects of northern conifers on forest productivity and soil chemistry in a 50-year-old common garden experiment. **Journal of Forestry**, v. 106, n. 2, p. 83-90, 2008.

MARASENI, T. N.; PANDEY, S. S. Can vegetation types work as an indicator of soil organic carbon? An insight from native vegetations in Nepal. **Ecological Indicators**, v. 46, p. 315-322, 2014.

MARÍN-SPIOTTA, E.; SHARMA, S. Carbon storage in successional and plantation forest soils: a tropical analysis. **Global Ecology and Biogeography**, v. 22, n. 1, p. 105-117, 2013.

MENDES, L. J. et al. Nitrogen accumulated and biologically fixed by uninoculated *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg trees under monospecific stands in the Atlantic Forest biome. **Brazilian Journal of Botany**, v. 44, n. 2, p. 503-512, 2021.

MENDONÇA, G. C. et al. Avaliação silvicultural de dez espécies nativas da Mata Atlântica. **Ciência Florestal**, v. 27, p. 277-290, 2017.

- MOORE, T. R. et al. Changes from pasture to a native tree plantation affect soil organic matter in a tropical soil, Panamá. **Plant and Soil**, v. 425, p. 133-143, 2018.
- NEVES, N. M. et al. Contribution of legume and non-legume trees to litter dynamics and CNP inputs in a secondary seasonally dry tropical forest. **iForest Biogeosciences and Forestry**, v. 15, n. 1, p. 8-15, 2022.
- PÁSCOA, K. J. V. et al. Growth of *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish in different planting spacings. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 2, e20170834, 2019.
- PAUL, K. et al. Change in soil carbon following afforestation. **Forest Ecology and Management**, v. 168, n. 1-3, p. 241-257, 2002.
- PAULA, R.R., CALMON, M., LOPES-ASSAD, M.L. et al. Soil organic carbon storage in forest restoration models and environmental conditions. **Journal of Forestry Research**. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01426-5>
- PREZOTTI, L. C. et al. **Manual de recomendação de calagem e adubação para o Estado do Espírito Santo: 5ª aproximação**. Vitória: SEEA/CEDAGRO/INCAPER, 2007. 305 p.
- PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI, A. M. **Guia de interpretações de análise de solo e foliar**. Vitória: Incaper, 2013. 104 p.
- ROLIM, S. G. et al. **Research gaps and priorities in silviculture of native species in Brazil**. São Paulo: WRI Brasil, 2019. Disponível em: <https://wribrasil.org.br/pt/publicacoes>. Acesso em: 20 set. 2021.
- SANQUETTA, C. R. et al. Dynamics of carbon and CO<sub>2</sub> removals by Brazilian forest plantations during 1990-2016. **Carbon Balance and Management**, v. 13, p. 1-12, 2018.
- SANTANA, R. C. et al. Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2723-2733, 2008.
- SCHWERZ, F. et al. Carbon stocks, partitioning, and wood composition in short-rotation forestry system under reduced planting spacing. **Annals of Forest Science**, v. 77, n. 3, p. 1-18, 2020.
- SHEFFER, E. et al. Biome-scale nitrogen fixation strategies selected by climatic constraints on nitrogen cycle. **Nature Plants**, v. 1, n. 12, p. 1-6, 2015.
- SILVA, A. B. et al. Estoque de serapilheira e fertilidade do solo em pastagem degradada de *Brachiaria decumbens* após implantação de leguminosas arbustivas e arbóreas forrageiras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 502-511, 2013.
- SILVA, M. A. et al. Sistemas de manejo em plantios florestais de eucalipto e perdas de solo e água na região do Vale do Rio Doce, MG. **Ciência Florestal**, v. 21, p. 765-776, 2011.

- SOUZA, P. B. de et al. Florística e diversidade das espécies arbustivo-arbóreas regeneradas no sub-bosque de *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. **Cerne**, v. 18, p. 413-421, 2012.
- SOUZA, P. H. **Biomassa e estoque de carbono em povoamento de *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg sob diferentes espaçamentos**. 2018. 113 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2018.
- TANG, C. Factors affecting soil acidification under legumes I. Effect of potassium supply. **Plant and Soil**, v. 199, n. 2, p. 275-282, 1998.
- TANG, C.; UNKOVICH, M. J.; BOWDEN, J. W. Factors affecting soil acidification under legumes. III. Acid production by N<sub>2</sub>-fixing legumes as influenced by nitrate supply. **The New Phytologist**, v. 143, n. 3, p. 513-521, 1999.
- TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 574 p.
- TONUCCI, R. G. et al. Grass vs. tree origin of soil organic carbon under different land-use systems in the Brazilian Cerrado. **Plant and Soil**, v. 419, p. 281-292, 2017.
- VARGAS, G. de; MARQUES, R. Crescimento e nutrição de angico e canafístula sob calagem e gessagem. **Floresta e Ambiente**, v. 24, e20160102, 2017.
- VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 1, p. 175-180, 1994.
- VILLA, E. B. et al. Aporte de serapilheira e nutrientes em área de restauração florestal com diferentes espaçamentos de plantio. **Floresta e Ambiente**, v. 23, p. 90-99, 2016.
- WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 37, n. 1, p. 29-38, 1934
- WARING, B. G. A meta-analysis of climatic and chemical controls on leaf litter decay rates in tropical forests. **Ecosystems**, v. 15, n. 6, p. 999-1009, 2012.
- WARING, B. G. et al. Pervasive and strong effects of plants on soil chemistry: a meta-analysis of individual plant 'Zinke' effects. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 282, n. 1812, e20151001, 2015.
- WASSIHUN, A. N. et al. Effect of forest stand density on the estimation of above ground biomass/carbon stock using airborne and terrestrial LIDAR derived tree parameters in tropical rain forest, Malaysia. **Environmental Systems Research**, v. 8, n. 1, p. 1-15, 2019.
- YAN, Y. et al. Influence of tree spacing on soil nitrogen mineralization and availability in hybrid poplar plantations. **Forests**, v. 6, n. 3, p. 636-649, 2015.

YU, B. et al. Effects of tree root density on soil total porosity and non-capillary porosity using a ground-penetrating tree radar Unit in Shanghai, China. **Sustainability**, v. 10, n. 12, p. 4640, 2018.

ZHOU, G. et al. Climate and litter C/N ratio constrain soil organic carbon accumulation. **National Science Review**, v. 6, n. 4, p. 746-757, 2019.



## CAPÍTULO II

### BIOMASSA ACIMA DO SOLO, CARBONO E NUTRIENTES DE *Anadenanthera peregrina* (L.) SPEG. VAR. *peregrina* EM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS

#### RESUMO

Para conciliar a produção de bens aos parâmetros de sustentabilidade exigidos pelo mercado, a tendência é que florestas plantadas com espécies nativas sejam uma alternativa a exploração de ecossistemas naturais. Para tal, é cada vez mais necessário adequar e intensificar o manejo silvicultural. Estas espécies demandam estudos genéticos e silviculturais, pois pouco se sabe sobre seu manejo, sua forma de crescimento e alocação de biomassa, nutrientes e carbono. Este capítulo tem por objetivo descrever a distribuição de biomassa acima do solo e avaliar a influência dos espaçamentos de plantio nos estoques de biomassa, carbono e nutrientes, em povoamentos de *A. peregrina* (L.) Speg. var. *peregrina*, aos 7,5 anos de idade. Para a amostragem de biomassa acima do solo, foram utilizadas 30 árvores, com base nas classes de diâmetro provenientes do inventário florestal. Após as medições as árvores foram segmentadas nos compartimentos fuste, casca, folhas, galhos finos (GF) e galhos grossos (GG) e sua biomassa determinada. Foram ajustados modelos de regressão para predição de biomassa nos povoamentos, para cada compartimento e tratamento avaliado. Foi realizada análise química dos compartimentos para determinar os estoques de nutrientes e carbono na biomassa acima do solo. Com base nos estoques de biomassa e nutrientes, calculou-se o coeficiente de utilização biológica dos compartimentos e os possíveis cenários de exportação de nutrientes via colheita. O espaçamento influencia a alocação de biomassa individual, com maior produção no espaçamento 5 m x 5 m. A espécie alocou a maior parte da biomassa nos galhos grossos. Não há influência no estoque de biomassa e carbono por hectare, exceto para casca. Árvores no espaçamento 5 m x 5 m estocam mais nutrientes individualmente e menos nutrientes por hectare. A maior parte dos nutrientes são estocados nas folhas e nos galhos grossos. Plantios de *A. peregrina* var. *peregrina* são mais eficientes na utilização dos nutrientes em espaçamentos mais amplos. A intensidade de colheita afeta os estoques de nutrientes no sistema, com limitações para os próximos ciclos produtivos em sistemas não conservacionistas. Recomenda-se a utilização do espaçamento 5 m x 5 m para

povoamentos de *A. peregrina* var. *peregrina*, pois produz quantidades semelhantes de biomassa a menor custo de implantação e maior eficiência nutricional.

Palavras-chave: Eficiência nutricional; Sustentabilidade florestal; Manejo silvicultural; Leguminosa arbórea.

## ABSTRACT

In order to match the production of goods with the sustainability parameters required by the forestry sector, native species planted stands tends to be an alternative to the massive exploitation of natural ecosystems. Therefore, it is necessary to adapt and intensify silvicultural management. These species require genetic and silvicultural studies, because little is known about its growth, management, nutrition, carbon and biomass allocation characteristics. This chapter aims to describe the aboveground biomass allocation and evaluate the influence of planting spacings on aboveground biomass, carbon and nutrient stocks in *A. peregrina* (L.) Speg var. *peregrina* stands, at 7.5 years after planting. For the aboveground biomass sampling, 30 trees were used, based on their diametric classes from the forest inventory. After the measurements, the trees were segmented into stem, bark, leaves, thin and thick branches compartments and their biomass were evaluated. Regression models were adjusted for biomass prediction in each compartment and treatment evaluated. Chemical analysis of the compartments was performed to determine the nutrient and carbon stocks in the aboveground biomass. Based on the biomass and nutrient stocks, the biological utilization coefficients of the compartments and the possible scenarios of nutrient exportation through harvesting were calculated. The spacing influences the allocation of biomass, with highest individual biomass production for 5 m x 5 m spacing. The species allocates most of their biomass into thick branches. There is no influence on the biomass and carbon stocks per hectare, except for bark. Trees within 5 m x 5 m spacing have larger individual nutrient stocks and smaller nutrient stock per hectare. Most nutrients are stored in the leaves and thick branches. Plantations of *A. peregrina* var. *peregrina* in wider spacings are more efficient using nutrients. Harvest intensity affects nutrient stocks in the system, with limitations for upcoming production cycles in non-conservational harvest systems. The use of the 5 m x 5 m spacing is recommended for *A. peregrina* var. *peregrina* stands, as it produces similar amounts of biomass at lower implantation cost and greater nutritional efficiency.

Keywords: Nutritional efficiency; Forest sustainability; Silvicultural management; Legume tree.

## 1. INTRODUÇÃO

Com a crescente expansão do setor florestal brasileiro, os tomadores de decisão são desafiados a conciliar o alto nível de produção de bens aos parâmetros de sustentabilidade exigidos pelo mercado (IBÁ, 2021). A tendência é de que as florestas plantadas ocupem boa parte do mercado de produtos madeireiros. Para tal, é cada vez mais necessário intensificar o manejo silvicultural, para promover aumento na produção por unidade de área, evitando mudanças no uso da terra com exploração de novas áreas e contribuindo para a mitigação de impactos ambientais (PAYN et al., 2015).

Para impulsionar a sustentabilidade no contexto florestal, novas alternativas devem ser criadas, para diversificar e abranger novos horizontes. O plantio de espécies nativas em povoamentos monoespecíficos ou em consórcio se destaca como uma alternativa promissora e sustentável, de alto valor agregado e aplicação no mercado brasileiro (BATISTA et al., 2021). É necessário investimento em pesquisa e melhoramento genético, para que espécies nativas possam atingir seu potencial produtivo.

Espécies nativas de alto potencial para a produção madeireira e diversos outros usos são elencadas por Da Silva, Carneiro e Barroso (2012) como espécies que carecem de estudos quanto ao comportamento de crescimento e melhoramento genético. Estas espécies são relativamente pouco utilizadas pois possuem crescimento simpodial, bifurcações e ramos persistentes. Muitas delas, porém, são leguminosas arbóreas de alto valor madeireiro e grande potencial para usos múltiplos e serviços ecossistêmicos (CASTRO et al., 2017).

Alguns dos principais fatores relevantes para a produção florestal e os padrões de crescimento dos indivíduos são os genéticos, edafoclimáticos e fatores relacionados a conformação do povoamento. Dentre eles, o espaçamento de plantio pode ser facilmente manipulado pelo produtor, tornando-se uma ferramenta dinâmica e funcional no manejo silvicultural (Zhang e Lei, 2005). Para algumas espécies, o espaçamento adequado pode melhorar a eficiência de processos fisiológicos das árvores e maximizar a produção de biomassa (NARDINI et al., 2020).

O estudo do comportamento de espécies nativas em povoamentos florestais com diferentes espaçamentos pode resultar em informações valiosas para o manejo silvicultural da espécie. A forma como os indivíduos estocam sua biomassa, reservas nutricionais e carbono podem esclarecer informações sobre a produção, o estado nutricional do

povoamento, a sustentabilidade do plantio e as condições para as rotações subsequentes (RESQUIN et al., 2020).

Buscando compreender estes processos, este capítulo tem por objetivo descrever a biomassa acima do solo e avaliar a influência dos espaçamentos de plantio nos estoques de biomassa, carbono e nutrientes, bem como a eficiência do uso de nutrientes em povoamentos de *A. peregrina* var. *peregrina*, aos 7,5 anos de idade.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Localização e implantação do experimento**

As informações referentes a localização da área de estudo e a implantação do experimento estão disponíveis nos itens 2.1 e 2.2 do Capítulo I deste documento. Para as análises realizadas no Capítulo II, todas as 27 parcelas experimentais foram utilizadas.

### **2.2. Caracterização dendrométrica**

Foi realizado o inventário florestal aos 7,5 anos após o plantio, afim de caracterizar o povoamento quanto a diâmetro a altura do peito (DAP) e altura (Ht) e altura comercial (Hc), além da verificação de porcentagem de sobrevivência. As medidas de diâmetro foram tomadas com trena graduada e as alturas com o auxílio do clinômetro digital (Ht) e vara graduada (Hc). As medições foram realizadas em todas as parcelas experimentais e os diâmetros tomados para todos os indivíduos, exceto aqueles localizados nas bordas da parcela. A área basal do povoamento foi calculada a partir da área seccional individual e estimas por hectare foram realizadas, levando em consideração a sobrevivência e o espaçamento de plantio.

As alturas totais foram medidas nas cinco primeiras árvores de cada parcela amostral, totalizando 15 árvores por tratamento (espaçamento) e um total geral de 45 árvores. Os dados foram utilizados para o ajuste de modelos de relação hipsométrica para predição das demais alturas do povoamento, utilizando o método da altura relativa. A utilização de apenas cinco árvores por parcela é suficiente, pois não prejudica a qualidade da estimativa pelo método utilizado, além de ocasionar maior agilidade de execução e redução de custo na execução de inventários florestais (LEITE e ANDRADE, 2002). De posse dos dados de DAP e Ht foram testados o ajuste de 10 modelos hipsométricos para cada espaçamento de plantio (Tabela 1).

Tabela 1 – Modelos de relação hipsométrica ajustados para os povoamentos de *A. peregrina* var. *peregrina* aos 7,5 anos de idade, em Alegre, ES, Brasil.

Ajustes	Autores	Modelos hipsométricos
1	Linear simples	$h = \beta_0 + \beta_1 DAP + \varepsilon$
2	Trorey	$h = \beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 DAP^2 + \varepsilon$
3	Assmann	$h = \beta_0 + \beta_1 / DAP + \varepsilon$
4	Henricksen	$h = \beta_0 + \beta_1 \ln(DAP) + \varepsilon$
5	Stoffels	$\ln(h) = \beta_0 + \beta_1 \ln(DAP) + \varepsilon$
6	Curtis	$\ln(h) = \beta_0 + \beta_1 / DAP + \varepsilon$
7	Petterson	$h = [1/(\beta_0 + \beta_1 / DAP)]^3 + 1,3 + \varepsilon$
8	Naslund (Prodan)	$h = \frac{DAP^2}{\beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 DAP^2} + \varepsilon$
9	Naslund	$h = \left( \frac{DAP^2}{\beta_0 + \beta_1 DAP^2} + 1,30 \right) + \varepsilon$
10	Naslund (Prodan)	$h = \left( \frac{DAP^2}{\beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 DAP^2} + 1,30 \right) + \varepsilon$

Em que:  $DAP$  = diâmetro a 1,30 m de altura do solo (cm);  $h$  = altura total (m);  $\ln$  = logaritmo neperiano;  $\beta_i$  = parâmetros do modelo ajustado ( $i=0, 1, 2\dots n$ ) e;  $\varepsilon$  = erro de estimativa.

Os modelos que apresentaram os melhores ajustes foram selecionados com base no coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajustado}$ ) e no erro padrão residual ( $S_{yx}$ ) (Tabela 2).

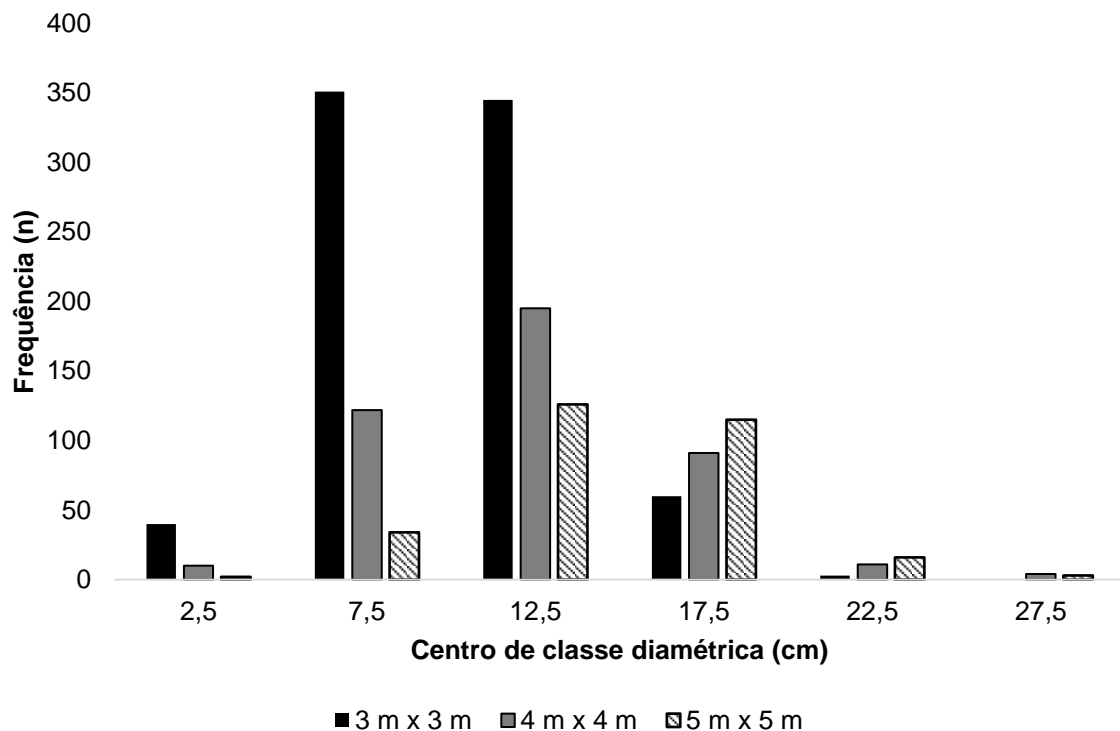
Tabela 2 – Equações ajustadas e suas respectivas estatísticas para a estimativa da Ht das árvores de *A. peregrina* var. *peregrina*, aos 7,5 anos de idade, em Alegre, ES, Brasil.

Espaçamento	Equação	$R^2_{ajustado}$	$S_{yx}\%$
3 m x 3 m	$h = -5,844 + 2,798.DAP - 0,1158.DAP^2$	0,974	2,3
4 m x 4 m	$h = 5,535 + 0,4277.DAP$	0,929	2,4
5 m x 5 m	$h = 9,945 - 0,0918.DAP + 0,0095.DAP^2$	0,906	3,1

Coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajustado}$ ), Erro padrão da estimativa em porcentagem ( $S_{yx}\%$ ).

Com base no inventário florestal, foram selecionadas 30 árvores, sendo 10 por espaçamento, para a estimativa de volume por meio da cubagem. A seleção das árvores foi feita de acordo com a distribuição dos diâmetros do povoamento e as classes diamétricas (Figura 1), considerando apenas indivíduos dentro da média aritmética acrescida ou reduzida de um desvio padrão (PICARD, SAINT-ANDRE e HENRY, 2012).

Figura 1 – Distribuição de frequências das árvores do povoamento de *A. peregrina* por espaçamento e por classes de diâmetro, aos 7,5 anos após o plantio



A cubagem foi realizada aos 7,5 anos após o plantio, com medições do comprimento total da árvore da base ao topo, além do comprimento do fuste até o ponto de inversão morfológica caracterizado pela primeira bifurcação. O fuste foi subdividido em base, 0,7 m, DAP, 2,0 m e posteriormente em seções com comprimento de 1,0 m. O diâmetro do fuste com casca foi mensurado no início e final de cada seção utilizando uma suta mecânica. O diâmetro da casca foi mensurado com o auxílio de um paquímetro digital. O volume individual com casca (comercial pela morfologia da espécie) foi calculado por meio do método de Smalian.

Foram ajustados modelos de regressão para a predição dos demais volumes individuais e o volume total do povoamento, utilizando os dados de DAP, Ht e volume das árvores cubadas (Tabela 3).

Tabela 3 – Modelos para ajustes de equações de volume comercial nos povoamentos de *A. peregrina* var. *peregrina*.

Autores	Modelos volumétricos
Kopezky-Gehrhardt	$v = \beta_0 + \beta_1 \cdot d + \varepsilon$
Hohenadl e Krenn	$v = \beta_0 + \beta_1 \cdot d + \beta_2 d^2 + \varepsilon$
Husch	$\ln(v) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(d) + \varepsilon$



Brenac	$\ln(v) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(d) + \beta_2 \cdot (1/d) + \varepsilon$
Spurr sem $\beta_0$	$v = \beta_1 \cdot (d^2 h) + \varepsilon$
Spurr-Variável combinada	$v = \beta_0 + \beta_1 \cdot (d^2 h) + \varepsilon$
Stoate	$v = \beta_0 + \beta_1 \cdot h + \beta_2 \cdot d^2 + \beta_3 \cdot (d^2 h) + \varepsilon$
Naslund	$v = \beta_0 + \beta_1 \cdot d^2 + \beta_2 \cdot (d^2 h) + \beta_3 \cdot (dh^2) + \beta_4 h^2 + \varepsilon$
Meyer	$v = \beta_0 + \beta_1 \cdot d + \beta_2 \cdot h + \beta_3 \cdot d^2 + \beta_4 (d^2 h) + \beta_5 (dh) + \varepsilon$
Schumacher e Hall	$\ln(v) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(d) + \beta_2 \cdot \ln(h) + \varepsilon$
Spurr	$\ln(v) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(d^2 h) + \varepsilon$

Em que: Y = Volume comercial estimado (kg árvore<sup>-1</sup>); d = diâmetro a 1,30 m de altura do solo (cm); h = altura comercial (m); ln = logaritmo neperiano;  $\beta_i$  = parâmetros do modelo ajustado (i=0, 1, 2...n); e  $\varepsilon$  = erro de estimativa. FONTE: Schneider e Schneider (2008).

O modelo de regressão descrito por Schumacher e Hall foi o que apresentou os melhores ajustes para os três espaçamentos, com base no coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajustado}$ ) e no erro padrão residual ( $S_{yx}$ ) (Tabela 4).

Tabela 4 – Equações ajustadas e suas respectivas estatísticas para a estimativa do volume comercial das árvores (m<sup>3</sup> árvore<sup>-1</sup>) de *A. peregrina*, aos 7,5 anos de idade, em Rive, Alegre, ES.

Espaçamento	Equação	$R^2_{ajustado}$	$S_{yx}$ %
3 m x 3 m	$\ln(V) = -9,032 + 1,884 \cdot \ln(d) + 0,8479 \cdot \ln(h)$	0,99	0,01
4 m x 4 m	$\ln(V) = -9,596 + 2,174 \cdot \ln(d) + 0,7341 \cdot \ln(h)$	0,99	0,02
5 m x 5 m	$\ln(V) = -9,007 + 1,922 \cdot \ln(d) + 0,7832 \cdot \ln(h)$	0,99	0,01

Coefficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajustado}$ ), Erro padrão da estimativa em porcentagem ( $S_{yx}$  %). d = diâmetro a 1,30 m de altura do solo (cm); h = altura comercial (m)

As variáveis dendrométricas descritas neste estudo foram: sobrevivência (SOB); DAP (cm), Ht (m), área basal (G, m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>), volume individual do fuste com casca (m<sup>3</sup>) e volume total (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) conforme a Tabela 5. A estimativa dessas variáveis foi feita conforme sugerido por Soares, Paula Neto e Souza (2011).

Tabela 5 – Valores médios das variáveis dendrométricas avaliadas no povoamento de *A. peregrina*, aos 7,5 anos após o plantio, em Rive, Alegre, ES

Espaçamento	SOB	DAP	HC	G	Vi	VT
	(%)	(cm)	(m)	(m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )
3 m x 3 m	90,4	10,4	3,7	8,5	0,030	29,8
4 m x 4 m	90	12,2	3,9	6,6	0,043	24,0
5 m x 5 m	93,2	14,4	4,2	6,1	0,064	23,8

Em que: SOB – Sobrevivência; DAP – Diâmetro a altura do peito (1,30 m); HC – Altura comercial; G – Área basal; Vi – Volume individual; VT – Volume total.

### 2.3. Quantificação da biomassa acima do solo

Para a amostragem da biomassa acima do solo, foram utilizadas as mesmas 30 árvores abatidas para as determinações de volume, com base nas classes diamétricas e na média aritmética acrescida ou reduzida do desvio padrão. Após as medições as árvores foram segmentadas nos compartimentos fuste, casca, folhas, galhos finos (GF) e galhos grossos (GG). Os procedimentos de amostragem foram realizados de acordo com metodologias adotadas por Dallagnol et al. (2011) e por Rondon (2002).

Para amostragem de madeira foram retirados discos com casca, com aproximadamente 5,0 cm de espessura nas posições 0,10 m, DAP,  $\frac{1}{2}$  do comprimento do fuste e topo. As amostras de casca foram extraídas dos discos de madeira coletados na amostragem, constituindo uma amostra composta dos diversos diâmetros amostrados. As amostras de folhas foram retiradas nas posições inferior, média e superior da copa. Os galhos finos (até 1,0 cm de diâmetro) e galhos grossos (acima de 1,0 cm de diâmetro) foram retirados em porções no terço inferior, médio e superior da copa da árvore, considerando galhos vivos e galhos secos ou mortos ainda presos a copa.

Todos os compartimentos foram pesados integralmente em campo com o auxílio de uma balança digital, para a obtenção da biomassa individual fresca. As amostras foram acomodadas em embalagens de papel identificadas, e transferidas para o laboratório da Universidade Federal do Espírito Santo, em Jerônimo Monteiro, ES. O teor de umidade e o peso seco de biomassa foi obtido a partir da pesagem das amostras frescas e secagem em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 65 °C, até atingir o peso constante. Após secas, as amostras de fuste com casca foram pesadas e os compartimentos fuste e casca individualizados, afim de se obter o peso seco de casca e o percentual de biomassa de casca.

A determinação da biomassa de casca foi calculada pela porcentagem média de casca do fuste. A biomassa seca dos compartimentos fuste com casca, folhas, GF e GG foram calculadas por meio da equação 1 (SOARES, PAULA NETO e SOUZA, 2011).

$$PS(c) = \frac{PU(c) \cdot PS(a)}{PU(a)} \quad (1)$$

Em que:

PS(c) = biomassa de fuste, folhas, GF ou GG, em kg;

PU(c) = peso de matéria úmida de fuste, folhas, GF ou GG, em kg;

PU(a) = peso de matéria úmida da amostra, em kg;

PS(a) = peso de matéria seca da amostra, em kg.

Com a biomassa individual das 30 árvores abatidas (10 por tratamento) e dos valores de DAP e Ht, foram ajustados modelos de regressão para predição de biomassa nos povoamentos, para cada compartimento e tratamento avaliado (Tabela 6).

Tabela 6 – Modelos para ajustes de equações de biomassa nos povoamentos de angico

Autores	Modelos para biomassa
Kopezky-Gehrhardt	$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot d + \varepsilon$
Hohenadl e Krenn	$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot d + \beta_2 d^2 + \varepsilon$
Husch	$\ln(Y) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(d) + \varepsilon$
Brenac	$\ln(Y) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(d) + \beta_2 \cdot (1/d) + \varepsilon$
Spurr sem $\beta_0$	$Y = \beta_1 \cdot (d^2 h) + \varepsilon$
Spurr-Variável combinada	$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot (d^2 h) + \varepsilon$
Stoate	$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot h + \beta_2 \cdot d^2 + \beta_3 \cdot (d^2 h) + \varepsilon$
Naslund	$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot d^2 + \beta_2 \cdot (d^2 h) + \beta_3 \cdot (dh^2) + \beta_4 h^2 + \varepsilon$
Meyer	$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot d + \beta_2 \cdot h + \beta_3 \cdot d^2 + \beta_4 (d^2 h) + \beta_5 (dh) + \varepsilon$
Schumacher e Hall	$\ln(Y) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(d) + \beta_2 \cdot \ln(h) + \varepsilon$
Spurr	$\ln(Y) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(d^2 h) + \varepsilon$
Modelos alométricos considerando altura e diâmetro	$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot d^2 + \beta_2 h^2 + \beta_3 \cdot (d^2 h) + \varepsilon$
	$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot d + \beta_2 h + \varepsilon$
	$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot d + \beta_2 d^2 h + \varepsilon$
	$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot d + \beta_2 d^2 + \beta_3 \cdot (d^2 h) + \varepsilon$
$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot d^2 + \beta_2 \cdot (d^2 h) + \varepsilon$	

Em que: Y = biomassa estimada (kg árvore<sup>-1</sup>); d = diâmetro a 1,30 m de altura do solo (cm); h = altura total (m); ln = logaritmo neperiano;  $\beta_i$  = parâmetros do modelo ajustado (i=0, 1, 2...n); e  $\varepsilon$  = erro de estimativa. FONTE: Schneider e Schneider (2008); Picard, Saint-Andre e Henry et al. (2012).

A partir dos valores de DAP, Ht e volume do fuste das 10 árvores abatidas por espaçamento, os modelos de regressão descritos abaixo foram os que apresentaram os melhores ajustes para fuste, casca, folhas, galhos finos, galhos grossos e biomassa total, nos três espaçamentos, com base no coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajustado}$ ) e no erro padrão residual ( $S_{yx}$ ) (Tabela 7).

Tabela 7 – Equações ajustadas e suas respectivas estatísticas para a estimativa de biomassa dos compartimentos das árvores de *A. peregrina*, aos 7,5 anos de idade, em Rive, Alegre, ES.

Espaçamento	Equação	$R^2_{ajustado}$	$S_{yx}$ %
<b>FUSTE</b>			
3 m x 3 m	$Y = 103,6 - 21,81 \cdot d + 0,7698 \cdot d^2 + 0,0477 \cdot (d^2 h)$	0,954	13,6
4 m x 4 m	$Y = -124,4 + 19,89 \cdot d - 0,585 \cdot d^2$	0,773	17,6
5 m x 5 m	$Y = -180,9 + 22,55 \cdot d - 0,485 \cdot d^2$	0,826	14,0
<b>CASCA</b>			
3 m x 3 m	$Y = 18,41 - 1,834 \cdot h - 0,2822 \cdot d^2 + 0,0303 \cdot (d^2 h)$	0,717	36,4
4 m x 4 m	$Y = -4,317 + 0,7022 \cdot d$	0,644	23,6
5 m x 5 m	$Y = -26,17 + 3,157 \cdot d - 0,0061 \cdot d^2 h$	0,740	16,5
<b>FOLHAS</b>			
3 m x 3 m	$Y = 44,301 - 10,39 \cdot d + 0,641 \cdot d^2$	0,992	6,3
4 m x 4 m	$Y = -12,012 + 1,811 \cdot d$	0,672	23,9
5 m x 5 m	$Y = 17,0 - 0,510 \cdot h - 0,1084 \cdot d^2 + 0,0109 \cdot (d^2 h)$	0,863	9,9
<b>GALHOS FINOS</b>			
3 m x 3 m	$Y = 19,02 - 4,330 \cdot d + 0,298 \cdot d^2 - 0,003 \cdot (d^2 h)$	0,849	18,1
4 m x 4 m	$Y = -12,22 + 1,461 \cdot d$	0,739	28,1
5 m x 5 m	$Y = -15,13 + 1,588 \cdot d$	0,900	17,8
<b>GALHOS GROSSOS</b>			
3 m x 3 m	$Y = 205,3 - 49,43 \cdot d + 3,048 \cdot d^2$	0,932	25,0
4 m x 4 m	$Y = -56,13 + 8,188 \cdot d$	0,597	28,9
5 m x 5 m	$Y = -329,7 + 38,51 \cdot d + -0,78 \cdot d^2$	0,808	19,5
<b>BIOMASSA TOTAL</b>			
3 m x 3 m	$Y = 396,9 - 93,24 \cdot d + 5,715 \cdot d^2$	0,931	20,4
4 m x 4 m	$Y = -108,1 + 16,47 \cdot d$	0,782	18,0
5 m x 5 m	$Y = -541,7 + 65,84 \cdot d - 1,318 \cdot d^2$	0,866	13,9

Coefficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajustado}$ ), Erro padrão da estimativa em porcentagem ( $S_{yx}$  %). Em que: Y = biomassa estimada (kg árvore<sup>-1</sup>); d = diâmetro a 1,30 m de altura do solo (cm); h = altura total (m); ln = logaritmo neperiano;  $\beta_i$  = parâmetros do modelo ajustado (i=0, 1, 2...n).

Os valores de biomassa gerados foram submetidos à análise de homogeneidade de variância (Oneill e Mathews,  $p < 0,05$ ), e de normalidade dos erros (Shapiro-Wilk,  $p < 0,05$ ). Atendidas as pressuposições, foi realizada a análise de variância ( $F \leq 0,05$ ) com base no delineamento em blocos casualizados (DBC), e, havendo diferença significativa, foi aplicado o teste de médias (Tukey,  $p < 0,05$ ) para comparação entre espaçamentos. Os testes de homogeneidade de variância e de normalidade dos erros, e as análises de variância e os testes de médias foram realizados no programa Rstudio, utilizando o pacote ExpDes.pt.

#### 2.4. Estoque de carbono na biomassa acima do solo

Os estoques de carbono na biomassa acima do solo foram quantificados conforme os teores de carbono por compartimento (Tabela 8) reportados por Souza (2018), para o mesmo povoamento aos 56 meses de idade. Os teores de carbono em idade jovem foram utilizados para estimação dos estoques compreendendo que os mesmos não apresentam variações significativas em função da idade do povoamento (SANQUETTA et al., 2014; MARTINS et al., 2020).

Tabela 8 – Teores de carbono (%) nos compartimentos da biomassa de *A. peregrina* var. *peregrina* aos 56 meses de idade

Compartimento	Teor de carbono (%)			
	Fuste	Casca	Folhas	Galhos
Teor	44,22	44,31	43,97	44,25

Fonte: Adaptado de Souza (2018).

Considerando a porcentagem de carbono no compartimento de cada árvore e a taxa de sobrevivência do povoamento, os estoques foram calculados por meio da Equação 2, em unidade de área ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ). Para os compartimentos GF e GG, foram utilizadas as mesmas porcentagens de carbono, visto que o autor não fez distinção da espessura dos galhos em sua determinação.

$$\text{Estoque de C (Mg ha}^{-1}\text{)} = \text{Biomassa do compartimento (Mg ha}^{-1}\text{)} \times \text{Teor de C (\%)} \quad (2)$$

## 2.5. Estoque de nutrientes na biomassa acima do solo

Logo após a obtenção do peso seco de biomassa, as amostras foram trituradas em um moinho de facas, peneiradas e armazenadas em recipientes plásticos devidamente identificados. O material foi submetido a análise química no laboratório de Recursos Hídricos do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, determinado os teores de macronutrientes (Tabela 9), de acordo com o procedimento padrão do laboratório (TEDESCO et al., 1995; MIYAZAWA et al., 1999; DOS SANTOS et al., 2018).

Tabela 9 – Teor de nutrientes nos compartimentos das árvores: fuste, casca, folhas, galhos finos (GF), galhos grossos (GG) nos diferentes espaçamentos de plantio.

ESPAÇAMENTO	g kg <sup>-1</sup>				
	N	P	K	Ca	Mg
	TRONCO				
3 m x 3 m	2,07	0,52	1,02	12,10	0,14
4 m x 4 m	2,17	0,37	0,81	7,57	0,12
5 m x 5 m	2,05	0,34	1,03	2,62	0,14
	CASCA				
3 m x 3 m	13,51	1,95	3,21	37,25	0,79
4 m x 4 m	13,05	1,84	3,09	34,67	0,83
5 m x 5 m	12,66	1,17	2,46	32,02	0,86
	FOLHAS				
3 m x 3 m	30,55	3,50	9,46	21,91	3,00
4 m x 4 m	31,58	2,61	7,38	17,92	3,23
5 m x 5 m	30,09	2,17	5,72	14,30	3,46
	GF				
3 m x 3 m	12,29	2,61	4,87	26,94	1,18
4 m x 4 m	11,42	2,37	5,40	24,76	1,15
5 m x 5 m	11,31	2,03	4,59	23,83	0,86
	GG				
3 m x 3 m	5,41	1,25	2,34	15,46	0,53
4 m x 4 m	5,38	1,09	2,46	12,84	0,51
5 m x 5 m	4,79	0,95	2,23	10,53	0,39

Após determinar o teor dos nutrientes na biomassa para seus diferentes compartimentos, os estoques de nutrientes na biomassa foram calculados pelo produto do teor de cada macronutriente e o peso em biomassa do compartimento considerado.

Utilizando os estoques individuais ( $\text{g árvore}^{-1}$ ), foram calculados os estoques por unidade de área ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para cada nutriente, em cada compartimento e na biomassa total.

## 2.6. Sustentabilidade nutricional e número potencial de cortes

Para determinar a eficiência de utilização dos macronutrientes, foi utilizado o coeficiente de utilização biológico (CUB), proposto por Barros et al. (1986), dividindo o peso de massa seca produzida ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) pelo estoque de nutrientes ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) nos compartimentos avaliados (Equação 3).

$$\text{CUB} = \frac{\text{Biomassa}}{\text{Estoque de nutriente}} \quad (3)$$

Para avaliar a sustentabilidade nutricional dos povoamentos estimou-se o número potencial de cortes (NC) para cada cenário de intensidade de colheita, dividindo o estoque de nutrientes que permanecerá na área (considerando também os estoques de nutrientes disponíveis no solo) pelo estoque de nutrientes retirados pela colheita (DICK e SCHUMACHER, 2020). Para a determinação do estoque de nutrientes no solo, em  $\text{Mg ha}^{-1}$ , foi utilizada a Equação 4, a partir de metodologias descritas por Veldkamp (1994) e Ellert e Bettany (1995) e dados disponibilizados no capítulo I deste trabalho. Posteriormente os valores foram convertidos em  $\text{kg ha}^{-1}$ .

$$\text{Estoque de nutrientes} = \text{Teor} \times \text{Ds} \times e \times 10 \quad (4)$$

Em que:

Teor = Teor de macronutriente (N, P, K, Ca, Mg) para a camada avaliada, em  $\text{g kg}^{-1}$ ;

Ds = Densidade do solo determinada, em  $\text{g cm}^{-3}$ ;

E = Espessura da camada avaliada, em metros.

Os estoques foram corrigidos quanto densidade do solo da área experimental, devido a seu uso anterior como pastagem, atividade que pode ocasionar a compactação do solo e a superestimação dos estoques. Utilizou-se a Equação 5, a partir da metodologia utilizada por Carvalho et al. (2009).

$$\text{Estoque corrigido} = \text{Est} \times \frac{D_{\text{sref}}}{D_s} \quad (5)$$

Em que:

Est = Estoque de macronutriente calculado, em Mg ha<sup>-1</sup>;

D<sub>sref</sub> = Densidade do solo de referência, em g cm<sup>-3</sup>;

D<sub>s</sub> = Densidade do solo determinada, em g cm<sup>-3</sup>.

Foram determinados diferentes cenários de uma possível exportação de nutrientes via colheita florestal. Os cenários de intensidade de colheita florestal e as equações para a estimação do número potencial de cortes estão relacionados na Tabela 10.

Tabela 10 – Possíveis cenários de colheita florestal considerando a retirada de diferentes compartimentos da biomassa e cálculo do número de cortes (NC).

Cenário	Descrição	Potencial uso	Equação
C1	Remoção total da biomassa acima do solo	Corte raso / limpeza de área	$NC (C1) = \frac{\text{Nutriente no solo}}{\text{Nutriente na copa + fuste com casca}}$
C2	Remoção da biomassa do fuste com casca e galhos grossos	Uso múltiplo	$NC (C2) = \frac{\text{Nutriente no solo + GF + folhas}}{\text{Nutrientes no tronco com casca + GG}}$
C3	Remoção da biomassa do fuste com casca	Uso madeireiro não conservacionista	$NC (C3) = \frac{\text{Nutriente no solo + copa}}{\text{Nutriente no fuste com casca}}$
C4	Remoção da biomassa do fuste	Uso madeireiro conservacionista	$NC (C4) = \frac{\text{Nutriente no solo + copa + casca}}{\text{Nutriente no fuste}}$



### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Biomassa

Os espaçamentos de plantio testados resultam em diferentes pesos de biomassa seca em  $\text{kg árvore}^{-1}$ , para a biomassa total e os demais compartimentos estudados (Tabela 11). A biomassa total individual do povoamento é superior sob o espaçamento 5 m x 5 m, com média de  $132,1 \text{ kg árvore}^{-1}$ . A menor biomassa total individual pertence aos indivíduos sob o espaçamento 3 m x 3 m, com média de  $44,6 \text{ kg árvore}^{-1}$ . Todos os compartimentos individuais foram afetados pelo espaçamento de plantio, obtendo valores superiores para os espaçamentos menos adensados, assim como na biomassa total individual.

Tabela 11 – Biomassa estimada ( $\text{kg árvore}^{-1}$ ) no fuste, casca, folhas, galhos finos (GF), galhos grossos (GG) e total nos diferentes espaçamentos de plantio.

Espaçamento	COMPARTIMENTOS					TOTAL
	FUSTE	CASCA	FOLHAS	GF	GG	
3 m x 3 m	13,7 b	2,9 b	5,5 c	2,8 c	20,5 b	44,6 b
4 m x 4 m	30,6 a	4,2 ab	10,1 b	5,6 b	43,6 a	92,6 a
5 m x 5 m	42,9 a	5,6 a	13,5 a	10,7 a	62,5 a	132,1 a

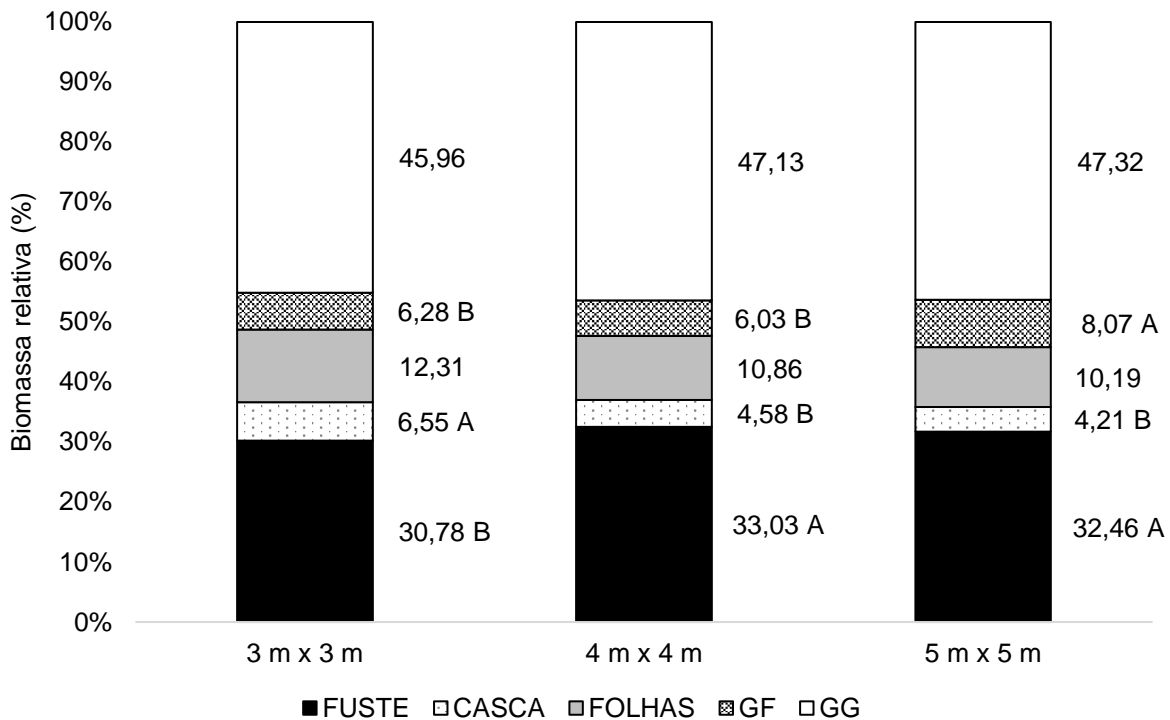
Médias seguidas por letras minúsculas diferentes nas colunas diferem estatisticamente quanto ao espaçamento de plantio e letras maiúsculas nas linhas diferem quanto aos compartimentos de biomassa pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Para a biomassa individual do fuste, os espaçamentos 4 m x 4 m e 5 m x 5 m foram superiores, atingindo  $30,6$  e  $42,9 \text{ kg árvore}^{-1}$ , respectivamente. O compartimento casca produziu  $5,6 \text{ kg árvore}^{-1}$  no espaçamento 5 m x 5 m, superior aos  $2,9 \text{ kg árvore}^{-1}$  produzidos no espaçamento 3 m x 3 m. A produção de folhas por árvore foi significativamente maior no espaçamento mais amplo, com produção de  $13,5 \text{ kg árvore}^{-1}$ . Os galhos finos e grossos também obtiveram crescimento expressivo no espaçamento 5 m x 5 m, com  $10,7$  e  $62,5 \text{ kg árvore}^{-1}$ , respectivamente. A biomassa de galhos grossos superou os valores de biomassa atribuída ao fuste em todos os espaçamentos.

Os valores relativos de biomassa (%) para os componentes fuste, casca, folhas, GF e GG estão expostos na Figura 2. Os valores diferem estatisticamente quanto ao espaçamento de plantio ( $p < 0,05$ ) para os compartimentos fuste, casca e GF. O espaçamento 5 m x 5 m tem maior porcentagem de biomassa de fuste. Já o espaçamento

3 m x 3 m possui menor porcentagem de fuste e maior porcentagem de casca. Há maior porcentagem de GF para o espaçamento 5 m x 5 m. Os compartimentos GG e galhos grossos não variam em função do espaçamento.

Figura 2 – Partição dos componentes da biomassa (%): fuste, casca, folhas, galhos finos (GF) e galhos grossos (GG) nos diferentes espaçamentos de plantio.

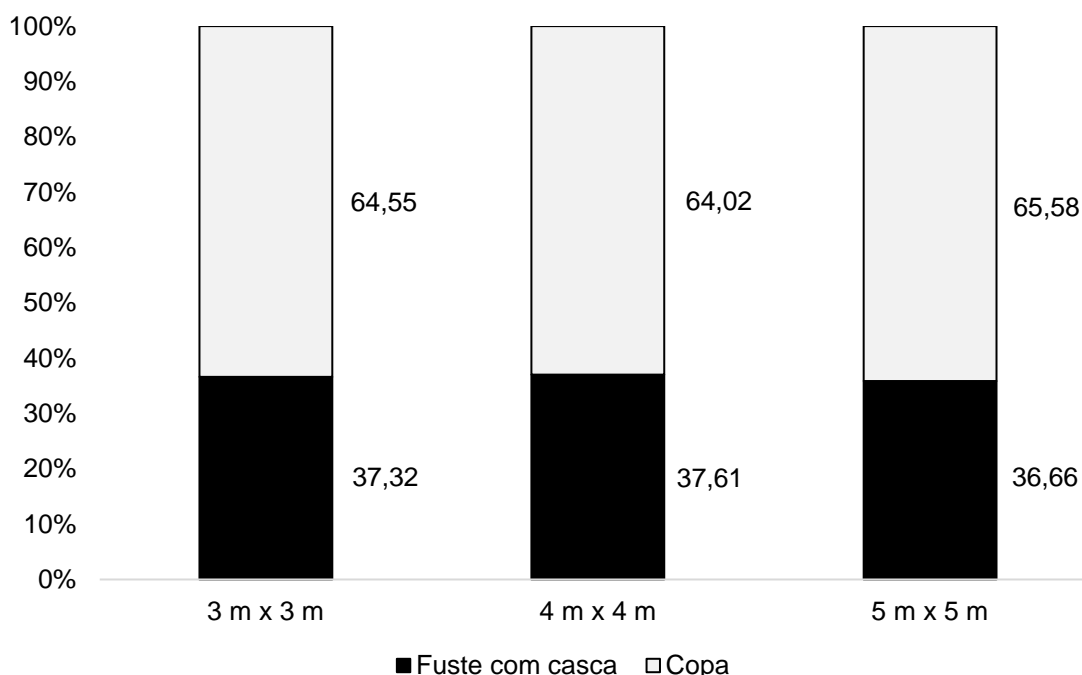


Médias seguidas de letras maiúsculas diferem quanto ao espaçamento de plantio.

As proporções relativas evidenciam, para todos os espaçamentos de plantio, o seguinte padrão de alocação de biomassa: GG > Fuste > Folhas > GF > Casca. A biomassa individual de galhos grossos corresponde a mais de 45 % da biomassa total dos indivíduos e a biomassa do fuste, pouco mais que 30 %. As folhas ocupam pouco mais de 10 % do total, seguido dos galhos finos (6,03 a 8,07 %) e casca (4,21 a 6,55 %).

As proporções entre fuste com casca e copa (somatório de Folhas, GF e GG) estão representadas na Figura 3. Fica evidente o padrão de crescimento simpodial e a característica de copa frondosa da espécie, que apresentou uma proporção média de 64,71 % de copa em relação a biomassa total. A influência do espaçamento na proporção de copa não foi observada.

Figura 3 – Partição dos componentes da biomassa (%): fuste com casca e copa (Folhas, GF e GG) nos diferentes espaçamentos de plantio.



A biomassa produzida pelo povoamento por unidade de área ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) se encontra na Tabela 12. Apenas a biomassa de casca difere entre os tratamentos avaliados ( $p < 0,05$ ), com maior produção de casca por hectare para o espaçamento 3 m x 3 m. O padrão de distribuição dos compartimentos a nível espacial se assemelha com a distribuição relativa descrita anteriormente, com predominância de GG > Fuste > Folhas > GF > Casca. O compartimento GG ocupa a maior produção de biomassa por hectare, sendo sua produção superior à de fuste nos espaçamentos mais adensados e relativamente similar a produção de fuste no espaçamento mais amplo, apesar de tendência a maiores médias.

Tabela 12. Biomassa ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em fuste, casca, folhas, galhos finos (GF), galhos grossos (GG) e total nos diferentes espaçamentos de plantio.

Espaçamento	COMPARTIMENTOS					TOTAL	
	FUSTE	CASCA	FOLHAS	GF	GG		
3 m x 3 m	13,8	2,93	a	5,52	2,81	20,6	44,8
4 m x 4 m	17,2	2,38	ab	5,65	3,14	24,5	52,1
5 m x 5 m	16,0	2,07	b	5,02	3,97	23,3	49,3

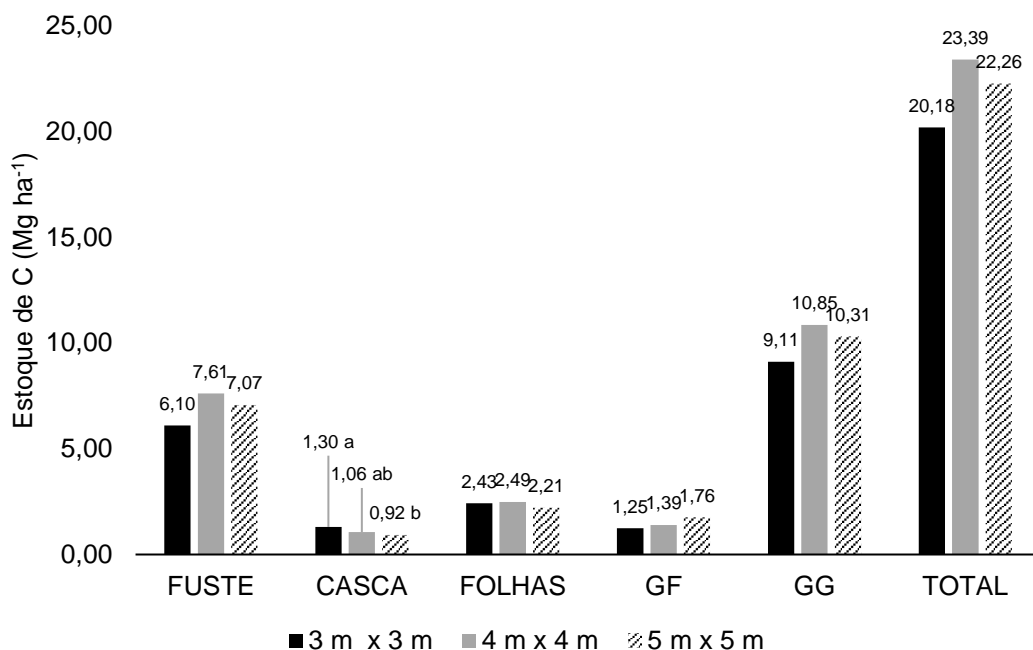
Médias seguidas por letras minúsculas diferentes nas colunas diferem estatisticamente quanto ao espaçamento de plantio pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Não foi observada diferença significativa na produção de biomassa total para os espaçamentos de plantio estudados, a qual variou entre 44,8 e 52,1 Mg ha<sup>-1</sup>, para os espaçamentos 3 m x 3 m e 4 m x 4 m, respectivamente.

### 3.2. Estoque de carbono na biomassa

Os estoques de carbono calculados a partir dos teores de carbono encontrados por Souza (2018) e os dados de biomassa do presente estudo estão representados na Figura 4. Apenas o compartimento casca apresenta significância estatística para os espaçamentos de plantio testados. O carbono estocado na casca dos indivíduos resultou em maiores valores no espaçamento 3 m x 3 m, o qual apresentou estoque de biomassa de casca superior aos demais espaçamentos de plantio (Tabela 12).

Figura 4 – Estoque de carbono na biomassa acima do solo total e compartimentalizada, para diferentes espaçamentos.

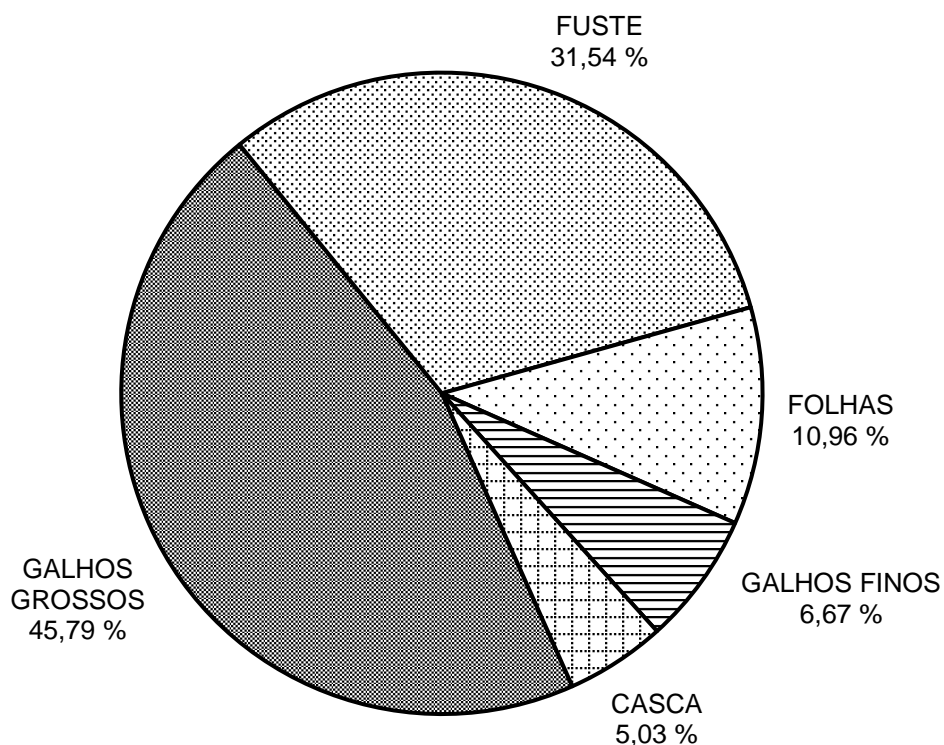


Os estoques encontrados nos fustes do povoamento têm valor médio de 6,93 Mg ha<sup>-1</sup>. O estoque de carbono na casca do povoamento 3 m x 3 m tem o valor superior de 1,30 Mg ha<sup>-1</sup>, sendo o espaçamento 5 m x 5 m responsável pelo menor estoque neste

compartimento, com  $0,92 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Nas folhas, os povoamentos estocam uma média de  $2,37 \text{ Mg ha}^{-1}$  de carbono, bem como  $1,62 \text{ Mg ha}^{-1}$  nos galhos finos (GF). Os galhos grossos são responsáveis por uma média de  $10,09 \text{ Mg ha}^{-1}$  de carbono.

Como o único compartimento com diferença estatística entre os espaçamentos é responsável pela menor parte do carbono estocado, estes não influenciaram os estoques de carbono totais na biomassa acima do solo. O povoamento estoca uma média total de  $21,94 \text{ Mg ha}^{-1}$  em sua biomassa acima do solo. Deste total, cerca de 45,79 % é estocado nos galhos grossos, 31,54 % no fuste, 10,96 % nas folhas, 6,67 % nos galhos finos e 5,03 % na casca (Figura 5).

Figura 5 – Partição do estoque de carbono por compartimento da biomassa acima do solo.



### 3.3. Estoque de nutrientes na biomassa acima do solo

Os estoques de macronutrientes na biomassa individual dos indivíduos estão dispostos na Tabela 13, para os espaçamentos testados e os compartimentos utilizados, bem como os estoques totais de cada nutriente por árvore inteira (todos os compartimentos). O compartimento casca apresentou menor variação nos estoques em

função dos espaçamentos, apenas com diferenças para N, Ca e Mg, em maior quantidade para o espaçamento 5 m x 5 m e menor quantidade no espaçamento 3 m x 3 m.

Os compartimentos tronco, folhas, GF e GG apresentam padrão com maiores estoques de nutrientes em indivíduos no espaçamento 5 m x 5 m e menores estoques no espaçamento 3 m x 3 m. Apenas o cálcio no compartimento tronco é exceção, com maior estoque no espaçamento 4 m x 4 m e menor estoque no espaçamento 5 m x 5 m. De modo geral, os estoques individuais de nutrientes foram grandemente influenciados pela biomassa individual (Tabela 13).

Tabela 13 – Estoque de macronutrientes (g por árvore) nos diferentes compartimentos da biomassa e espaçamentos de plantio.

ESPAÇAMENTO	g árvore <sup>-1</sup>									
	N		P		K		Ca		Mg	
TRONCO										
3 m x 3 m	28,51	b	7,11	b	13,98	b	166,38	b	1,97	b
4 m x 4 m	66,13	a	11,40	a	24,81	b	231,12	a	3,75	ab
5 m x 5 m	88,42	a	14,64	a	44,21	a	112,85	c	6,00	a
CASCA										
3 m x 3 m	39,45	b	5,70		9,36		108,79	b	2,31	b
4 m x 4 m	55,26	ab	7,79		13,08		146,82	ab	3,50	ab
5 m x 5 m	70,33	a	6,50		13,67		177,90	a	4,80	a
FOLHAS										
3 m x 3 m	167,92	b	19,24	b	51,98	b	120,43	b	16,49	c
4 m x 4 m	317,13	a	26,25	ab	74,07	a	179,98	a	32,44	b
5 m x 5 m	405,19	a	29,26	a	77,02	a	192,58	a	46,63	a
GALHOS FINOS										
3 m x 3 m	34,43	b	7,32	c	13,63	c	75,45	b	3,30	b
4 m x 4 m	63,84	b	13,23	b	30,19	b	138,47	b	6,45	a
5 m x 5 m	120,55	a	21,64	a	48,95	a	254,03	a	9,17	a
GALHOS GROSSOS										
3 m x 3 m	110,92	b	25,56	b	47,98	b	316,96	b	10,86	b
4 m x 4 m	235,17	a	47,52	a	107,44	a	561,75	a	22,17	a
5 m x 5 m	299,40	a	59,13	a	139,52	a	657,75	a	24,56	a
TOTAL										
3 m x 3 m	381,20	c	64,93	b	136,93	b	788,03	b	34,93	c
4 m x 4 m	737,53	b	106,17	a	249,60	a	1258,13	a	68,33	b
5 m x 5 m	983,84	a	131,20	a	323,37	a	1395,13	a	91,12	a

Médias seguidas por letras minúsculas diferentes nas colunas diferem estatisticamente quanto ao espaçamento de plantio pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

A partir dos estoques individuais, são estimados os estoques de nutrientes por hectare para cada compartimento e o somatório do estoque total de cada nutrientes considerando todos os compartimentos (Tabela 14). Os espaçamentos não alteram os estoques de nutrientes por hectare, na biomassa de GF e GG ( $p > 0,05$ ). No compartimento fuste, apenas os teores de P e Ca se alteram quanto ao espaçamento de plantio. Para os compartimentos casca e folhas, há influência dos espaçamentos, o qual expressa maiores

estoques de N, P, K e Ca no espaçamento 3 m x 3 m e menores estoques para o espaçamento 5 m x 5m.

Tabela 14. Estoque de macronutrientes por hectare e porcentagem do estoque total de nutrientes (entre parênteses) nos diferentes espaçamentos de plantio.

ESP	kg ha <sup>-1</sup>								
	N	P		K	Ca	Mg			
FUSTE									
3 m x 3 m	28,63 (7,48)	7,14 (10,95)	a	14,04 (10,21)	167,10 (21,11)	a	1,98 (5,65)		
4 m x 4 m	37,20 (8,97)	6,41 (10,73)	ab	13,96 (9,94)	130,00 (18,37)	b	2,11 (5,49)		
5 m x 5 m	32,96 (8,99)	5,46 (11,17)	b	16,48 (13,67)	42,07 (8,09)	c	2,24 (6,59)		
CASCA									
3 m x 3 m	39,62 (10,35)	a	5,73 (8,78)	a	9,41 (6,84)	a	109,26 (13,80)	a	2,32 (6,62)
4 m x 4 m	31,08 (7,49)	b	4,38 (7,33)	b	7,36 (5,24)	b	82,58 (11,67)	b	1,97 (5,13)
5 m x 5 m	26,22 (7,15)	b	2,42 (4,95)	c	5,10 (4,23)	c	66,32 (12,75)	b	1,79 (5,27)
FOLHAS									
3 m x 3 m	168,65 (44,05)	19,32 (29,62)	a	52,21 (37,96)	a	120,96 (15,28)	a	16,56 (47,22)	
4 m x 4 m	178,39 (43,00)	14,76 (24,71)	ab	41,67 (29,68)	a	101,24 (14,31)	ab	18,25 (47,49)	
5 m x 5 m	151,05 (41,18)	10,91 (22,31)	b	28,71 (23,82)	b	71,80 (13,81)	b	17,38 (51,16)	
GF									
3 m x 3 m	34,58 (9,03)	7,35 (11,27)		13,69 (9,95)	75,78 (9,57)		3,32 (9,47)		
4 m x 4 m	35,91 (8,66)	7,44 (12,46)		16,98 (12,09)	77,89 (11,01)		3,63 (9,45)		
5 m x 5 m	44,94 (12,25)	8,07 (16,50)		18,25 (15,14)	94,70 (18,21)		3,42 (10,07)		
GG									
3 m x 3 m	111,40 (29,09)	25,67 (39,35)		48,19 (35,04)	318,34 (40,22)		10,91 (31,11)		
4 m x 4 m	132,28 (31,89)	26,73 (44,07)		60,43 (43,04)	315,98 (44,65)		12,47 (32,45)		
5 m x 5 m	111,62 (30,43)	22,04 (45,07)		52,01 (43,15)	245,21 (47,15)		9,16 (26,96)		
TOTAL									
3 m x 3 m	382,90 (100)	65,23 (100)	a	137,53 (100)	791,47 (100)	a	35,07 (100)		
4 m x 4 m	414,83 (100)	59,73 (100)	ab	140,40 (100)	707,70 (100)	a	38,43 (100)		
5 m x 5 m	366,80 (100)	48,90 (100)	b	120,53 (100)	520,10 (100)	b	33,97 (100)		

Médias seguidas por letras minúsculas diferentes nas colunas diferem estatisticamente quanto ao espaçamento de plantio pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Os maiores estoques de N por hectare foram encontrados para o compartimento folhas, com média de 166,03 kg ha<sup>-1</sup> e ausência de diferença estatística. Apenas o compartimento casca tem diferentes estoques por espaçamento, sendo o espaçamento 3 m x 3 m superior. Grandes estoques de P se encontram na biomassa de GG, sem diferença estatística entre espaçamentos, com média de 118,43 kg ha<sup>-1</sup>. Nos demais compartimentos com diferença estatística (fuste, casca e folhas), os maiores estoques de P são encontrados no espaçamento 3 m x 3 m.

Os valores de Ca se destacam para o compartimento GG, com média de 293,17 kg ha<sup>-1</sup>, sem diferença estatística para os espaçamentos. No compartimento fuste, os valores de Ca diferem estatisticamente, com estoque de 167,1 kg ha<sup>-1</sup> no espaçamento 3 m x 3 m. Para o mesmo nutriente, o espaçamento 3 m x 3 m também foi superior no compartimento

casca e folhas, com 109,26 e 120,96 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Não houve variação nos teores de Mg quanto ao espaçamento de plantio, independente do compartimento avaliado.

### 3.4. Sustentabilidade nutricional

#### 3.4.1. Coeficiente de utilização biológica

O coeficiente de utilização biológica calculado para cada macronutriente, de acordo com os espaçamentos de plantio e compartimentos testados podem ser verificados na Tabela 15. De forma geral, o compartimento que apresenta melhor eficiência na utilização dos nutrientes presentes em sua biomassa é o fuste, com valores superiores para todos os macronutrientes. A ordem decrescente estimada para as grandezas obedece ao padrão fuste > GG > casca > GF > folhas.

Tabela 15. Coeficiente de utilização biológica (CUB) dos macronutrientes na biomassa de *A. peregrina* var. *peregrina*, nos diferentes espaçamentos de plantio.

ESPAÇAMENTO	Coeficiente de Utilização Biológica				
	N	P	K	Ca	Mg
FUSTE					
3 m x 3 m	482	1936 c	984 b	83 c	6984 b
4 m x 4 m	462	2679 b	1230 a	132 b	8120 a
5 m x 5 m	487	2942 a	975 b	382 a	7143 b
CASCA					
3 m x 3 m	74 b	512 c	312 c	27 c	1266 a
4 m x 4 m	77 a	544 b	324 b	29 b	1210 b
5 m x 5 m	79 a	855 a	407 a	31 a	1159 c
FOLHAS					
3 m x 3 m	33 ab	286 c	106 c	46 c	333 a
4 m x 4 m	32 b	383 b	136 b	56 b	310 b
5 m x 5 m	33 a	460 a	175 a	70 a	289 c
GALHOS FINOS					
3 m x 3 m	81 b	383 c	206 b	37 b	848 b
4 m x 4 m	88 a	423 b	185 c	40 a	867 b
5 m x 5 m	88 a	493 a	218 a	42 a	1163 a
GALHOS GROSSOS					
3 m x 3 m	185 b	802 c	427 ab	65 c	1887 b
4 m x 4 m	186 b	920 b	407 b	78 b	1974 b
5 m x 5 m	209 a	1056 a	448 a	95 a	2543 a

Médias seguidas por letras minúsculas diferentes nas colunas diferem estatisticamente quanto ao espaçamento de plantio pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.



Observando os macronutrientes avaliados, todos compartimentos contam com maior eficiência na utilização do Mg. A ordem decrescente para eficiência do uso dos nutrientes em geral segue a conformação Mg > P > K > N > Ca, para todos os compartimentos avaliados.

Os espaçamentos de plantio testados influenciam os CUB dos macronutrientes ( $p < 0,05$ ). É possível constatar a partir dos resultados na Tabela 15, que o espaçamento de plantio 5 m x 5 m é mais eficiente na conversão de nutrientes em biomassa, principalmente para N, P, K e Ca. A eficiência de utilização do Mg em função dos espaçamentos de plantio varia de acordo com o compartimento da biomassa estudado, sendo superior no espaçamento 5 m x 5 m apenas para a produção de GF e GG.

### 3.4.2. Número de cortes e balanço nutricional

Estão dispostos na Tabela 16 os valores referentes ao número potencial de cortes (NC) estimados, com base no balanço de nutrientes para cada cenário de colheita testado. Os resultados reafirmam o padrão de intensidade de colheita testado, sendo C1 mais agressivo e C4 mais conservador, em termos nutricionais.

Tabela 16. Número potencial de cortes (NC) de acordo com os cenários de colheita propostos, em povoamentos de *A. peregrina* var. *peregrina*, nos diferentes espaçamentos.

CENÁRIO	TRATAMENTO	NC				
		N	P	K	Ca	Mg
C1	3 m x 3 m	3,7	0,4	7,1	4,6	26,4
	4 m x 4 m	2,8	0,3	4,0	4,2	29,6
	5 m x 5 m	3,4	0,6	7,4	4,5	19,3
C2	3 m x 3 m	9,0	1,3	14,4	6,5	62,5
	4 m x 4 m	6,8	1,1	7,5	5,9	70,5
	5 m x 5 m	8,7	1,6	13,1	7,1	53,0
C3	3 m x 3 m	25,3	5,9 b	46,3	14,9 b	222,0
	4 m x 4 m	21,9	6,3 ab	31,5	16,0 b	285,4
	5 m x 5 m	26,9	8,8 a	46,7	25,4 a	174,2
C4	3 m x 3 m	61,9 a	11,5	78,1	25,4 b	486,2
	4 m x 4 m	41,0 b	11,2	48,6	26,8 b	554,3
	5 m x 5 m	49,1 ab	13,1	61,4	67,1 a	313,3

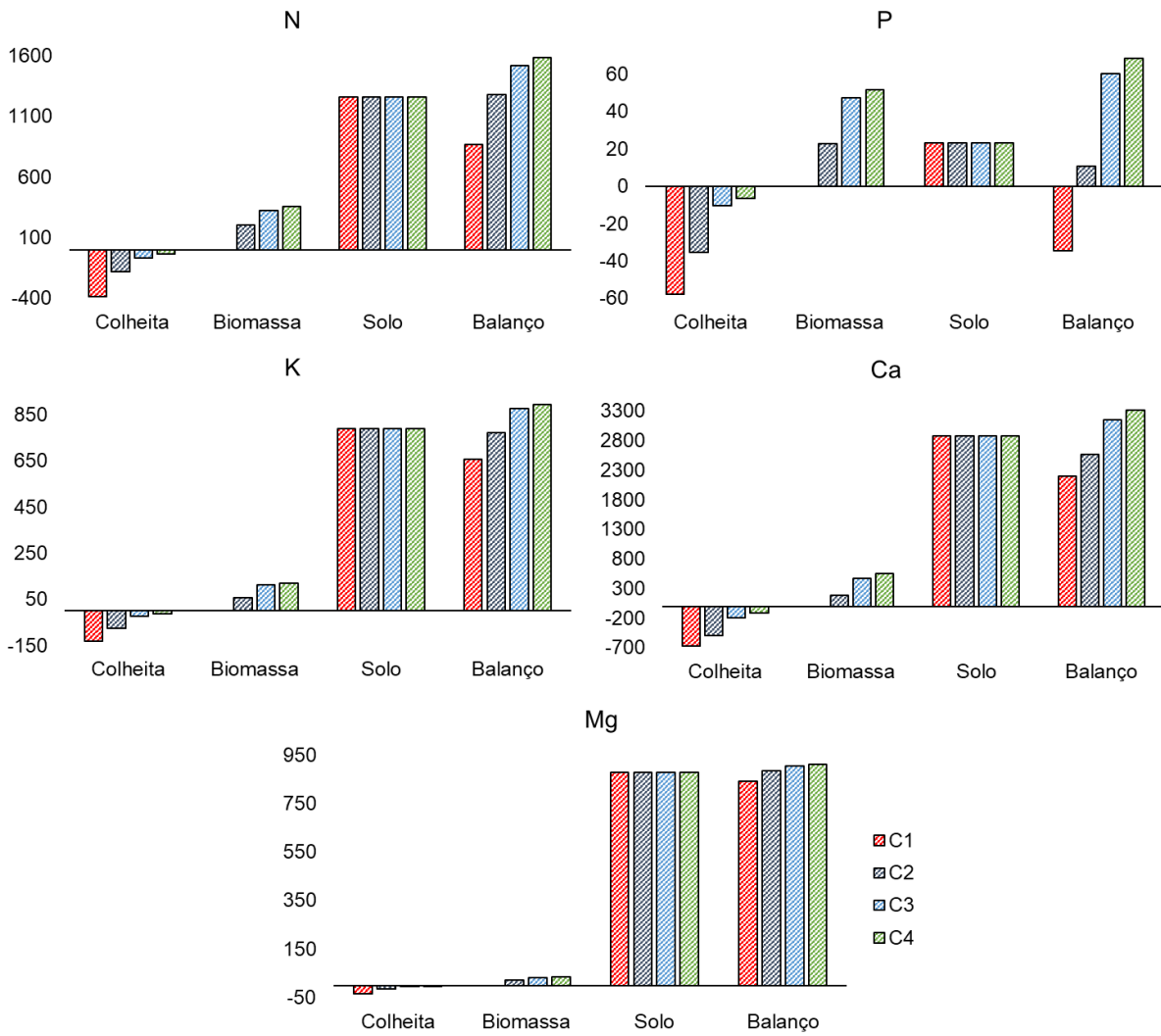
Médias seguidas por letras minúsculas diferentes nas colunas diferem estatisticamente quanto ao espaçamento de plantio pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Quanto aos espaçamentos de plantio, estes não causam diferenciação nos potenciais ciclos em cenários de colheita com C1 e C2, com maior retirada de nutrientes. No cenário C3, o espaçamento 5 m x 5 m confere maior longevidade no ciclo de P e Ca. No cenário C4, o ciclo de Ca é favorecido pelo espaçamento 5 m x 5 m, porém, o espaçamento 3 m x 3 m proporciona maior longevidade de N.

Os números de corte potenciais por macronutrientes para a espécie seguiram o padrão decrescente de  $Mg > K > N > Ca > P$ . Apesar da espécie apresentar boa eficiência de utilização de P (Tabela 15), seus estoques são escassos e insuficientes para suprir a necessidade do povoamento em uma nova rotação, em um cenário com retirada total da biomassa acima do solo (C1). Para o mesmo cenário, apenas o Mg possui um suprimento de nutrientes elevado, devido a menor exigência do nutriente pela espécie. Para C2, os valores de P ainda são estritos, sendo suficientes para a próxima rotação apenas.

Os cenários C3 e C4 proporcionam maior longevidade para as rotações subsequentes, com maior quantidade de nutrientes permanecendo no sistema. O balanço entre os nutrientes da biomassa retirados e os que permanecem no sistema são ilustrados na Figura 6. Manter parte da biomassa no sistema após a colheita (C2, C3 e C4) pode resultar na conservação de valores entre 204,51 e 355,25 kg ha<sup>-1</sup> de N; 22,62 e 51,61 kg ha<sup>-1</sup> de P; 57,17 e 118,00 kg ha<sup>-1</sup> de K; 180,79 e 560,02 kg ha<sup>-1</sup> de Ca; e entre 20,85 e 33,72 kg ha<sup>-1</sup> de Mg. Já no sistema C1, estes valores seriam exportados do povoamento.

Figura 6 – Nutrientes da biomassa e balanço após os sistemas de colheita, em povoamento de *A. peregrina* var. *peregrina* aos 7,5 anos.



## 4. DISCUSSÃO

### 4.1. Biomassa

Os plantios produzem maior biomassa individual em todos os compartimentos para espaçamentos mais amplos, como comumente observado em diversos povoamentos florestais (ELOY et al., 2018; CORRÊA et al., 2020). Isto ocorre pois há menor competição intraespecífica e os indivíduos são capazes de obter mais recursos, além de maior desenvolvimento radicular e área disponível para seu crescimento (LIMA et al., 2013). A biomassa de fuste e de galhos no espaçamento 5 m x 5 m foi superior em cerca de três vezes a biomassa do espaçamento 3 m x 3 m. Sendo estes os compartimentos responsáveis pela maior parte da biomassa dos indivíduos, como consequência, a biomassa total individual é cerca de três vezes maior no espaçamento mais amplo.

Um dos grandes desafios na silvicultura de espécies nativas está relacionado a forma de fuste irregular dos indivíduos arbóreos, que em sua maioria crescem de forma simpodial (ROLIM et al., 2019). Os dados de biomassa individual confirmam este padrão para a espécie estudada, havendo maior produção de galhos grossos (GG) em relação ao fuste, independente do espaçamento de plantio. Em estudo desenvolvido por Moura et al. (2006), comparando dois plantios da espécie *Mimosa caesalpiniaefolia* (pertencente a mesma família de *A. peregrina* var. *peregrina*), os autores observaram diferença na alocação de biomassa, com maior predominância de fuste para o povoamento de 8 anos no espaçamento 3 m x 3 m e maior predominância de galhos no espaçamento 4,5 m x 4,5 m, aos 11 anos de idade. De qualquer forma, o povoamento com maior alocação no fuste tem valores similares de alocação para os galhos. O mesmo acontece em povoamentos de *Mimosa tenuiflora*, estudados por Drumond et al. (2008), no qual a espécie apresenta elevado desenvolvimento de galhos, comparada com outras espécies. Esta característica traz atenção as práticas de manejo para condução do crescimento do fuste destas espécies.

Durante os estudos desenvolvidos por Souza (2018) foi constatado o padrão de crescimento descrito pelo presente estudo, porém, em idade mais jovem. Na ocasião, o compartimento galhos (amostrados independentemente da espessura) ocupavam 44,99 % da biomassa total dos indivíduos. No presente estudo, a biomassa relativa de galhos ocupa 53,59 % da biomassa dos indivíduos (sendo 46,8 % ocupada por galhos grossos).

Esperava-se que com o fechamento da copa a porcentagem ocupada pelos compartimentos pudesse ser alterada, devido a competição entre os indivíduos. Nesta fase, algumas espécies podem apresentar um comportamento denominado desrama natural, o qual não é observado para a espécie em questão (DA SILVA, CARNEIRO e BARROSO, 2012).

Segundo Schumacher, Witschoreck e Calil (2011), mudanças na alocação de biomassa em povoamentos florestais ocorrem principalmente devido as fases nutricionais, havendo diferenciação na alocação de nutrientes após o fechamento de copa. Os autores apontam outros fatores influenciadores deste processo, como características da espécie, fertilidade do solo e a densidade do povoamento. Uma característica desfavorável a estes processos é que a espécie possui desrama natural deficiente, sendo necessárias práticas silviculturais de poda e condução dos galhos (CARVALHO, 2003), as quais não foram realizadas. Além disso, grande parte da composição de galhos é ocupada por galhos grossos, pouco susceptíveis a desrama natural (DA SILVA, CARNEIRO e BARROSO, 2012).

Quanto aos galhos finos, estes ocupam ligeira maior porcentagem no espaçamento 5 m x 5 m, onde há menor adensamento e menor competição entre indivíduos. No espaçamento 3 m x 3 m, porém, há menor porcentagem de fuste e maior porcentagem de casca em relação aos demais espaçamentos. Segundo Foelkel (2013), pode existir uma correlação inversa entre o crescimento da árvore e a porcentagem ocupada pelo compartimento casca. A variação entre espaçamentos na biomassa de casca não influencia na proporção de fuste com casca e relação a copa (Folhas, GF e GG), que não diferem estatisticamente. Em povoamentos de *Acacia mangium*, Tonini et al. (2018b) observa variação entre a proporção de copa e tronco, influenciada pela maior alocação de biomassa de galhos grossos em espaçamentos mais amplos. Neste caso, porém, a biomassa de tronco foi superior à de copa. No presente estudo, a alta proporção de galhos grossos ocorreu em todos espaçamentos, ocasionando ocupação da biomassa de copa em cerca de 2/3 da biomassa total.

Os valores absolutos de biomassa por hectare não foram afetados pelos espaçamentos, exceto para o compartimento casca, que tem maiores estoques no espaçamento 3 m x 3 m. Esta diferença se dá pela ocorrência de árvores menores, que produzem maior quantidade de casca, como supracitado acima e confirmado por Caldeira et al. (2011) em povoamentos de *Acacia mearnsii* com diferentes classes diamétricas. Os

demais compartimentos apresentam valores similares entre os espaçamentos, porém, numericamente um pouco menores para o espaçamento 3 m x 3 m.

Quanto a biomassa total, é comum e esperado que espaçamentos mais adensados produzam maior quantidade de biomassa por unidade de área, por conta de considerado aumento no número de indivíduos por talhão, como Eloy et al. (2018) reporta em seus resultados, em que diferentes espécies desempenham maior produção de biomassa por hectare em espaçamentos adensados, incluindo espécies dos gêneros *Eucalyptus*, *Acacia* e *Mimosa*. Já para a leguminosa *Tachigali vulgaris* aos 70 meses, Tonini et al. (2018a) reporta resultados não significativos quanto a biomassa total por hectare em diferentes espaçamentos. O autor argumenta quanto as condições de sítio e clima não favoráveis ao plantio estudado.

Tratando-se do presente estudo, acredita-se que as condições ambientais vão de encontro com as necessidades essenciais da espécie estudada, apesar da ausência de práticas silviculturais de manutenção do povoamento (correções de fertilidade, desramas, etc.). A espécie possui características específicas de crescimento que dificultam uma alocação de biomassa voltada para a produção de fuste. Por produzir quantidades altamente superiores de biomassa individual ( $\text{kg árvore}^{-1}$ ), os espaçamentos mais amplos são capazes de proporcionar maior produção de biomassa acima do solo até mesmo por hectare.

#### **4.2. Estoque de carbono na biomassa acima do solo**

Os teores de carbono encontrados por Souza (2018) indicam que a espécie é capaz de estocar quantidades significativas de carbono, sendo os valores similares aos reportados por Dallagnol et al. (2011) para a Fabaceae *Mimosa scabrella*, que obtiveram os maiores teores dentre cinco espécies avaliadas pelos autores. O povoamento acumula, porém, baixos estoques de carbono por unidade de área aos 7,5 anos, se comparado com outras espécies florestais utilizadas na silvicultura. Em povoamentos do gênero *Eucalyptus* spp. aos 7 anos, por exemplo, Gatto et al. (2010) descrevem estocagem de carbono de  $64,15 \text{ Mg ha}^{-1}$ , apenas para o compartimento lenho. Por outro lado, os estoques são superiores

aos de plantios de reflorestamento em estágio inicial de sucessão, aos 11 anos de idade, em área de Mata Atlântica (MEIRA et al., 2020).

Os baixos valores estão atrelados ao padrão de alocação de biomassa de *A. peregrina* var. *peregrina*, anteriormente discutidos. Este comportamento de estocagem de carbono em função da biomassa também foi verificado por Magnago et al. (2016) em povoamentos jovens de eucalipto. Porém, no presente estudo, não houve influência dos espaçamentos de plantio, exceto para o compartimento casca, que estoca mais carbono no espaçamento 3 m x 3 m, também em função da maior estocagem de biomassa. Contudo, houve maior incremento nos estoques de carbono totais em espaçamentos mais amplos, desde o estudo de Souza (2018), com 4,17 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> para o espaçamento 3 m x 3 m; 6,54 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> para o espaçamento 4 m x 4 m; e 5,68 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> para o espaçamento 5 m x 5 m. Vale destacar que no presente estudo, não foram amostrados compartimentos importantes para a estocagem de carbono em florestas, como raízes, serrapilheira e necromassa (SILVEIRA et al., 2008).

Assim como na alocação de biomassa do povoamento, a maior porção de carbono está estocada no compartimento galhos grossos (45,79 %). Com a colheita florestal, tradicionalmente grande parte do carbono e dos nutrientes na biomassa é exportado pela retirada do tronco (CALDEIRA et al., 2014). Nos povoamentos estudados, este compartimento exportaria cerca de 31,54 % do carbono estocado na biomassa acima do solo. Os galhos grossos permanecerão ou não no solo florestal, de acordo com o sistema de exploração florestal adotado. Caso o produtor opte pela colheita do compartimento, será exportado uma porcentagem de 77,33 % do carbono. Se optar pela permanência dos galhos grossos na área, é possível que esta prática favoreça a estabilidade dos estoques no sistema (CARNEIRO et al., 2019), visto que a espécie tem elevada densidade da madeira (SOUZA et al., 2020).

#### **4.3. Estoque de nutrientes na biomassa acima do solo**

Os estoques de nutrientes, assim como ocorre na biomassa individual, diferenciam-se estatisticamente quanto ao espaçamento de plantio. A diferença na alocação de nutrientes entre os compartimentos, é influenciada também pelo teor dos nutrientes (Tabela 9). Os teores de nutrientes descritos seguem padrão de grandeza semelhante aos

encontrados por Moura et al. (2006) em povoamentos de *M. caesalpiniaefolia*, com distribuição na ordem folhas > casca > galhos grossos > galhos finos > fuste. Os maiores teores de nutrientes nos compartimentos mais novos das árvores são em decorrência de processos metabólicos mais intensos, conferindo grande importância ao compartimento folhas na ciclagem de nutrientes (VIERA et al., 2013; SALVADOR et al., 2016). No presente estudo, por exemplo, estoques de N e Mg são encontrados em maiores quantidades nas folhas, compartimento com menor biomassa e grande atividade metabólica.

De modo geral, os estoques de nutrientes individuais foram mais elevados para os espaçamentos mais amplos, em decorrência de maior produção de biomassa individual. Curiosamente, grande parte dos nutrientes foram alocados no compartimento GG. Assim como no fuste, os galhos mais grossos tendem a menores teores de nutrientes, por sua biomassa ser ocupada predominantemente por material lenhoso, pobre em nutrientes e com menor proporção de casca (compartimento rico em nutrientes) (ANDRÉ, JONARD e PONETTE, 2010). Nos povoamentos de *A. peregrina* var. *peregrina* estudados, como os galhos grossos ocupam uma porção maior que a do tronco, possuem maiores diâmetros e maior contribuição de casca, compondo estoques maiores que o fuste sem casca.

Em povoamentos florestais com espécies exóticas comerciais, geralmente o compartimento fuste se destaca, por seu volume de biomassa superior. (SCHUMACHER et al., 2013; GATTO et al., 2014). O espaçamento de plantio em dadas ocasiões é responsável por variações na produção de biomassa de fuste, por unidade de área (RESQUIN et al., 2020). Porém, para o presente estudo, houve apenas variação no estoque de biomassa de casca, resultando em maiores estoques de nutrientes por hectare para N, P, K e Ca, no espaçamento 3 m x 3 m. Os demais compartimentos têm biomassa semelhante em todos os espaçamentos, bem como a biomassa total.

Quando a espécie tem predominância de fuste na biomassa total, ocorre grande exportação de nutrientes durante a colheita, principalmente se a casca é exportada juntamente com o fuste (DICK et al., 2016). No presente estudo, apesar da não dominância de fuste por conta da ocorrência de elevada biomassa de galhos grossos, o compartimento é responsável por quantidades expressivas de Ca, assim como no compartimento casca. Outro compartimento que armazena boas quantidades de Ca e se torna importante para a ciclagem de nutrientes são as folhas, pois Ca não é retranslocado na ciclagem bioquímica, retornando ao solo por meio da serrapilheira (SCHUMACHER et al., 2003; CALDEIRA et al., 2017). Além do Ca, grande parte do Mg está estocado nas folhas, seguido de galhos



grossos. Este padrão de alocação de Mg também foi observado por Caldeira, Schumacher e Spathelf (2002) em povoamentos de *Acacia mearnsii*.

Em algumas ocasiões, o aumento no espaçamento de plantio provoca aumentos na concentração de nutrientes na biomassa (HARRISON et al., 2000; MEDEIROS, 2018). Considerando que a maioria dos compartimentos da biomassa não sofrem influência dos espaçamentos e o estoque de nutrientes como P, K e Ca no fuste e nas folhas são superiores em espaçamentos adensados, tem-se um padrão inverso ao relatado pela literatura. Segundo Craine e Dybzinski (2013), a diminuição na área vital das plantas aumenta a competição entre elas e pode resultar em diminuição nas reservas do solo, pois os indivíduos expandem seu sistema radicular para maximizar a retirada de nutrientes. O menor espaçamento de plantio também contribui para o maior desenvolvimento de raízes finas, eficientes na captação de nutrientes.

Os estoques de nutrientes nos compartimentos mais numericamente expressivos da biomassa são influenciados pelas demandas nutricionais da espécie e pela disponibilidade de nutrientes no solo (Viera et al., 2017). Se comparados com povoamentos de *Eucalyptus* spp. apresentados por Schumacher et al. (2019), com respectivos estoques totais de N, P, K, Ca e Mg em 258,9; 28,7; 225,8; 426,8 e 58,4 kg ha<sup>-1</sup>, os estoques totais do presente estudo são superiores para N, P e Ca, enquanto inferiores para K e Mg. A espécie possui altos teores de nitrogênio pois é uma leguminosa fixadora (MENDES et al., 2021). Quanto ao P, diversas outras espécies leguminosas respondem positivamente a este nutriente (QUEIROZ et al., 2007). Os elevados teores de Ca são em decorrência de uma baixa eficiência na conversão deste nutriente e sua lenta mobilidade na planta (DICK e SCHUMACHER, 2020). Já os nutrientes K e Mg são pouco requisitados pela espécie (GONÇALVES et al., 2008).

#### **4.4. Sustentabilidade nutricional**

##### **4.4.1. Coeficiente de utilização biológica**

O coeficiente de utilização biológica (CUB) representa a sustentabilidade nutricional na produção de biomassa dos indivíduos, sendo uma proporção de quanto o indivíduo pode

produzir em biomassa por unidade de nutriente utilizado ( $\text{g biomassa g nutriente}^{-1}$ ) (BARROS et al., 1986). É esperado que compartimentos maiores, com função estrutural, produzam maior quantidade de biomassa por nutriente utilizado. Estes compartimentos, em especial o fuste, são os mais visados pela produção florestal e sua eficiência nutricional é importante pois dependendo da espécie em questão, mais da metade dos nutrientes podem ser exportados (KUMAR et al., 1998).

Observa-se no presente estudo que os CUBs do compartimento fuste são de duas a três vezes maiores que os dos galhos grossos, salvo Ca em espaçamentos menores. De acordo com o desenvolvimento dos indivíduos, maior eficiência de uso dos nutrientes é observada no fuste em razão da conversão de alburno em cerne (WITSCHORECK E SCHUMACHER, 2019). Conforme a idade do povoamento, a relação cerne e alburno aumenta, havendo menor proporção de tecido metabolicamente ativo no fuste (PEREIRA et al., 2013). Há uma preocupação, porém, com os galhos grossos, que ocupam a maior parte da biomassa acima do solo e tem baixa CUB em relação ao fuste. Com maiores proporções de tecidos metabolicamente ativos e presença de casca (ANDRÉ, JONARD e PONETTE, 2010), o compartimento se torna menos eficiente que o fuste, apesar de apresentar maior eficiência que os demais. Este efeito é atenuado por espaçamentos menores, que possuem menor eficiência para todos os macronutrientes.

De modo geral, o comportamento da eficiência nutricional por compartimento ocorreu como outras espécies utilizadas na silvicultura, com maior eficiência para o fuste e menor eficiência para as folhas (SCHUMACHER et al., 2019; ARAUJO et al., 2020). Como as folhas tem menor eficiência, elas acumulam grandes quantidades de nutrientes em sua biomassa. Para Schumacher et al. (2013) isto deve ser observado com atenção, pois através deste compartimento é possível exportar grande parte do estoque de nutrientes do povoamento. No presente estudo, por exemplo, os estoques de N e Mg no compartimento folhas correspondem a pouco menos da metade deste nutriente em todo o estoque de biomassa do plantio.

Os nutrientes mais eficientemente utilizados pela biomassa dos plantios foram Mg e P, para todos os compartimentos. Estudando espécies tradicionais do bioma Caatinga, Alves et al. (2017) constatou que estes nutrientes, além de S (não avaliado neste trabalho), também obtiveram maior CUB no fuste com casca e nos galhos. O mesmo foi também constatado por Bündchen et al. (2013) em florestas subtropicais na região sul do Brasil. A alta eficiência em Mg presente estudo está relacionada a espécie não apresentar exigência para este nutriente (GONÇALVES et al., 2008). Este nutriente, porém, participa de

processos relacionados a fotossíntese, que é afetada pelo espaçamento de plantio, resultando em variação na CUB, com maior eficiência em espaçamentos onde a competição por luz ocorre de forma mais acentuada (ARAUJO et al., 2020). Este padrão não foi observado apenas para os galhos e fuste, que tem caráter mais estrutural. Já para o P, os teores encontrados nos solos estudados são considerados baixos, o que pode induzir o aumento da eficiência em alguns casos (ROBERTS, 2008). Características específicas, espécie e eficiência fotossintética e disponibilidade hídrica são outros fatores que atuam na assimilação de P (FERREIRA et al., 2016; ARAUJO et al., 2020). Estes fatores também contribuíram para a significância do espaçamento de plantio na eficiência de P, maior em espaçamentos mais amplos. A utilização de K tem eficiência média em relação aos demais nutrientes, se aproximando a valores encontrados por Alves et al. (2017) para *A. colubrina*.

Dentre os nutrientes com eficiência de utilização mais baixa estão Ca e N. O Ca, diferente de outros nutrientes, não foi utilizado de forma eficiente pelo povoamento em condição de déficit do nutriente no solo. Em plantio de *Eucalyptus dunnii*, Dick e Schumacher (2020) encontram baixa eficiência para o nutriente, que na ocasião era disponibilizado em grandes quantidades no solo. Diversos outros estudos relatam baixa eficiência no uso de Ca (ALVES et al., 2017; SCHUMACHER et al., 2019). Mesmo com boa disponibilidade, a baixa eficiência se dá pois o Ca se concentra em tecidos de sustentação como fuste, casca e galhos, com baixa mobilidade no floema (CALDEIRA, RONDON NETO e SCHUMACHER, 2002). Neste mesmo estudo com diferentes espécies de Acácia, a eficiência de Ca é menor em relação aos demais nutrientes, porém, maior em relação a eficiência de Ca do presente estudo, mostrando que as características da espécie colaboram com diferentes resultados. Com baixa disponibilidade no solo e grande acúmulo no fuste e nos galhos grossos, deve-se atentar para a exportação desses compartimentos, com consequências para a fertilidade do solo (ANDRÉ, JONARD e PONETTE, 2010).

Para o nitrogênio, nutriente essencial para as atividades metabólicas dos indivíduos, a eficiência foi menor nos compartimentos com essa finalidade (casca, folhas e galhos finos). Os valores de CUB para N encontrados neste estudo são similares aos de *Anadenanthera colubrina* na caatinga para folhas e galhos (ALVES et al., 2017). Diversas espécies leguminosas são susceptíveis a fixação biológica de nitrogênio, sendo nelas comum, maior acúmulo do nutriente. A eficiência de uso de N é mais baixa quando a espécie é fixadora (LIMA et al., 2006). À medida que se aumenta a disponibilidade de N, a tendência é diminuir a eficiência em seu uso em leguminosas. Portanto, compreender a

eficiência com que a espécie utiliza este nutriente resulta em benefícios econômicos e ambientais, através do manejo de adubação correto (RAMOS et al., 2019).

#### 4.4.2. Número de cortes e balanço nutricional

Cenários de remoção total da biomassa como C1 são considerados prejudiciais a sustentabilidade nutricional do povoamento, pois grande parte dos nutrientes essenciais aos povoamentos são fornecidos pela própria biomassa florestal (ROSIM et al., 2016). A permanência destes compartimentos no solo florestal após a colheita garante o fornecimento de nutrientes para as próximas rotações, resultando em práticas mais ecológicas e economia para o produtor (SCHUMACHER et al., 2019). Com a retirada total da biomassa acima do solo dos plantios (C1), a rotação subsequente começaria em déficit de P, nutriente pouco disponível nos solos do povoamento. Os valores de NC não ultrapassam 0,56 ciclos. A espécie é eficiente na utilização de P, porém, é necessário atender o nível crítico do nutriente no solo (ESPIG et al., 2008). O déficit para a próxima rotação do povoamento está ilustrado na Figura 6, na qual o balanço de nutrientes em C1 é negativo para P ( $-34,7 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Em estudo realizado por Santana, Barros e Neves (2002) em povoamentos de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* de diferentes procedências, os autores constataam maior remoção proporcional de P em solos com pouca disponibilidade do nutriente, assim como no presente estudo. Desta forma, o nutriente pode se tornar limitante para as próximas rotações. Percebe-se também que para todos os outros macronutrientes, C1 acarreta em balanço inferior aos estoques presentes no solo, indicando possível depleção de nutrientes ao longo das rotações.

Com a proposta de colheita em C2, mantendo folhas e galhos finos no talhão, há uma melhora nos potenciais ciclos de rotação. Para o nutriente limitante P, os valores superam um ciclo, indicando a possibilidade do sistema atender as necessidades de um próximo plantio. Os ciclos para N, K e Mg dobram e os de Ca também são prolongados. Neste sistema de colheita, *A. peregrina* var *peregrina* espécie pode ser explorada de diversas maneiras, com uso na produção de tanino pela casca (ANDRADE et al., 2013), a extensa biomassa dos galhos grossos explorada para usos energéticos (SOUZA et al., 2020) e o fuste, de grande valor comercial, para beneficiamento madeireiro (CARVALHO, 2003). Apesar do compartimento casca exportar grandes quantidades de nutrientes, sua comercialização pode resultar em receita para o produtor. Mesmo com a retirada do

compartimento casca, o balanço nutricional para o sistema C2 é positivo para todos os nutrientes.

Os sistemas C3 e C4 são alternativas voltadas para a exploração de madeira, deixando toda a copa no sistema para as próximas rotações. Os galhos grossos constituem grande reserva de nutrientes, colaborando para um balanço positivo e superior ao estoque inicial do solo. Estes sistemas, quando bem manejados, são capazes de resultar em economia para o produtor, principalmente na fertilização mineral (GUIMARÃES, 2016) e provar a sustentabilidade de povoamentos florestais (GATTO et al., 2014). Para o nutriente P no povoamento estudado, são estimados entre 6 a 13 ciclos, dependendo do sistema e do espaçamento de plantio. Foi observada a influência dos espaçamentos para alguns nutrientes como P e Ca em C3 e N e Ca em C4, em decorrência da melhor eficiência em utilização destes nutrientes pelos indivíduos do povoamento. Tanto P quanto Ca são críticos para o desenvolvimento de *A. peregrina* var *peregrina* nos solos estudados, pois possuem teores limitantes de P e a espécie demanda maior quantidade de Ca. A não extração do compartimento casca colabora para a manutenção dos estoques de Ca nas rotações subsequentes (DICK e SCHUMACHER, 2020).

## 5. CONCLUSÕES

O espaçamento de plantio influencia a alocação individual de biomassa do povoamento, com maior produção em árvores do espaçamento 5 m x 5 m. A espécie aloca grande parte de sua biomassa nos galhos grossos e não no fuste. Apesar disto, não há influência no estoque total de biomassa acima do solo do povoamento, exceto a casca, que se acumula em maior quantidade no espaçamento 3 m x 3 m.

O espaçamento de plantio não altera o estoque total de carbono acima do solo nos principais compartimentos. No espaçamento 3 m x 3 m, houve maior estocagem de carbono na casca em função da maior biomassa, porém, menor incremento anual de carbono. Árvores no espaçamento 5 m x 5 m estocam maior quantidade de nutrientes individualmente, porém, menor quantidade por hectare. A maior parte dos nutrientes são estocados nas folhas e nos galhos grossos.

Plantios de *A. peregrina* var. *peregrina* são mais eficientes na utilização dos nutrientes em espaçamentos mais amplos. A maior eficiência no espaçamento 5 m x 5 m auxilia a sustentabilidade do plantio quanto a nutrientes pouco disponíveis no solo. A intensidade de colheita afeta o estoque de nutrientes no sistema, com limitações para os próximos ciclos produtivos em sistemas não conservacionistas. A colheita do fuste sem casca proporciona maior quantidade de ciclos potenciais. Alternativas para uso múltiplo da espécie também são viáveis, desde que silviculturalmente manejadas.

## 6. REFERÊNCIAS

- ALVES, A. R. et al. Conteúdo de nutrientes na biomassa e eficiência nutricional em espécies da Caatinga. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 2, p. 377-390, 2017.
- ANDRADE, B. G. et al. Determinação do potencial tanífero em povoamentos de angico. **Revista Ciência da Madeira**, v. 4, n. 2, p. 139-151, 2013.
- ANDRÉ, F; JONARD, M; PONETTE, Q. Biomass and nutrient content of sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) and beech (*Fagus sylvatica* L.) stem and branches in a mixed stand in southern Belgium. **Science of the Total Environment**, v. 408, n. 11, p. 2285-2294, 2010.
- ARAUJO, K. Z. et al. Eficiência de utilização de nutrientes pelo eucalipto em sistema agrossilvipastoril. **Nativa**, v. 8, n. 2, p. 260-268, 2020.
- BARROS, N. F. et al. Classificação nutricional de sítios florestais - Descrição de uma metodologia. **Revista Árvore**, v. 10, n. 2, p. 112-120, 1986.
- BATISTA et al. **Investimento em reflorestamento com espécies nativas e sistemas agroflorestais no Brasil: uma avaliação econômica**. WRI Brasil, São Paulo, 90 p., 2021.
- BÜNDCHEN, M. et al. Status nutricional e eficiência no uso de nutrientes em espécies arbóreas da floresta subtropical no sul do Brasil. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 98, p. 227-236, 2013.
- CALDEIRA, M. V. W. et al. Biomassa de povoamento de *Acacia mearnsii* De Wild., Rio Grande do Sul, Brasil. **Scientia Forestalis** v. 39, n. 90, p. 133-141, 2011.
- CALDEIRA, M. V. W. et al. Exportação de carbono e nutrientes pela colheita de *Acacia mearnsii* De Wild. aos quatro anos de idade na Depressão Central, RS. **Comunicata Scientiae**, v. 5, n. 1, p. 68-74, 2014.
- CALDEIRA, M. V. W. et al. Teor e redistribuição de nutrientes nas folhas de *Bixa arborea* Huber. e *Joannesia princeps* Vell. em área de restauração florestal. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 114, p. 305-317, 2017.
- CALDEIRA, M. V. W.; RONDON NETO, R. M.; SCHUMACHER, M. V. Avaliação da eficiência nutricional de três procedências australianas de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). **Revista Árvore**, v. 26, p. 615-620, 2002.
- CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V; SPATHELF, P. Quantification of nutrient content in above-ground biomass of young *Acacia mearnsii* De Wild., provenance Bodalla. **Annals of forest science**, v. 59, n. 8, p. 833-838, 2002.
- CARNEIRO, K. M. S. et al. Estoque e perda de necromassa da vegetação lenhosa em um gradiente fitofisionômico na transição Amazônia-Cerrado. **Rodriguésia**, v. 70, 2019.
- CARVALHO, J. L. N. et al. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 2, p. 342-349, 2009.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies Arbóreas Brasileiras: Volume 1**. Colombo: Embrapa Florestas, 2003. 1039 p.

CASTRO, D. et al. Woody leguminous trees: New uses for sustainable development of drylands. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 36, n. 8, p. 764-786, 2017.

CORRÊA, R. S. et al. Espaçamentos de plantio promovem produção distinta em híbrido de eucalipto. **Advances in Forestry Science**, v. 7, n. 3, p. 1073-1079, 2020.

CRAINE, J. M.; DYBZINSKI, R. Mechanisms of plant competition for nutrients, water and light. **Functional Ecology**, v. 27, n. 4, p. 833-840, 2013.

DA SILVA, M. P. S.; CARNEIRO, J. G. A.; BARROSO, D. G. Desrama florestal. In: CARNEIRO, J. G. A. **Princípios de desramas e desbastes florestais**. Campos dos Goytacazes: O Coordenador, 2012. p. 11-49.

DALLAGNOL, F. S. et al. Teores de carbono de cinco espécies florestais e seus compartimentos. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 410-416, 2011.

DICK, G. et al. Quantificação da biomassa e nutrientes em um povoamento de *Eucalyptus dunnii* Maiden estabelecido no Bioma Pampa. **Ecologia e Nutrição Florestal**, v. 4, n. 1, p. 1-9, 2016.

DICK, G.; SCHUMACHER, M. V. Sustentabilidade nutricional em povoamento de *Eucalyptus dunnii* Maiden no bioma Pampa, RS. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 127, e3277, 2020.

DOS SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Brasília: Embrapa, 2018. 356p.

DRUMOND, M. A. et al. Produção e distribuição de biomassa de espécies arbóreas no semi-árido brasileiro. **Revista Árvore**, v. 32, p. 665-669, 2008.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, n. 4, p. 529-538, 1995.

ELOY, E. et al. Effect of age and spacing on biomass production in forest plantations. **Revista Árvore**, v. 42, e420214, 2018.

ESPIG, S. A. et al. Composição e eficiência da utilização biológica de nutrientes em fragmento de Mata Atlântica em Pernambuco. **Ciência Florestal**, v. 18, p. 307-314, 2008.

FERREIRA, M. J. et al. Clonal variation in photosynthesis, foliar nutrient concentrations, and photosynthetic nutrient use efficiency in a Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) plantation. **Forest Science**, v. 62, n. 3, p. 323-332, 2016.

FOELKEL, C. **Casca da árvore do eucalipto: aspectos morfológicos, fisiológicos, florestais, ecológicos e industriais, visando a produção de celulose e papel**.



- Eucalyptus Book & Newsletter, 2006. 109p. Disponível em:  
<[http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/capitulo\\_casca.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/capitulo_casca.pdf)> Acesso em: 10 de dezembro de 2021.
- GATTO, A. et al. Ciclagem e balanço de nutrientes no sistema solo-planta em um plantio de *Eucalyptus* sp., no Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 879-887, 2014.
- GATTO, A. et al. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1069-1079, 2010.
- GONÇALVES, E. O. et al. Crescimento de mudas de angico-vermelho (*Anadenanthera macrocarpa* (Benth.) Brenan) sob diferentes doses de macronutrientes. **Revista Árvore**, v. 32, n. 6, p. 1029-1040, 2008.
- GUIMARÃES, C. C. et al. **Ecoeficiência e sustentabilidade nutricional em povoamentos de eucaliptos no Bioma Pampa**. 2016. 100p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- HARRISON, R. B. et al. Effect of spacing and age on nitrogen and phosphorus distribution in biomass of *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus pellita* and *Eucalyptus urophylla* plantations in southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 133, n. 3, p. 167-177, 2000.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - Ibá. **Relatório anual Ibá 2021**. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2022.
- KUMAR, B. M. et al. Comparison of biomass production, tree allometry and nutrient use efficiency of multipurpose trees grown in woodlot and silvopastoral experiments in Kerala, India. **Forest Ecology and Management**, v. 112, n. 1-2, p. 145-163, 1998.
- LEITE, H. G; ANDRADE, V. C. L. Um método para condução de inventários florestais sem o uso de equações volumétricas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 321-328, 2002.
- LIMA, A. L. S. et al. N availability and mechanisms of N conservation in deciduous and semideciduous tropical forest legume trees. **Acta Botanica Brasilica**, v. 20, n. 3, p. 625-632, 2006.
- LIMA, R. et al. Efeito do espaçamento no desenvolvimento volumétrico de *Pinus taeda* L. **Floresta e Ambiente**, v. 20, p. 223-230, 2013.
- MAGNAGO, L. M. et al. Energy estimate and carbon stock in short-rotation *Eucalyptus* stands. **Cerne**, v. 22, p. 527-534, 2016.
- MARTINS, J. F. C. et al. Carbono nos componentes da biomassa de *Acacia mearnsii* De Wild. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5, n. 1, p. 32-38, 2020.
- MEDEIROS, P. L. **Produção, alocação de biomassa e aspectos nutricionais de um clone de eucalipto em função da densidade de plantio, na região litorânea do RN**.

2018. 47 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Rio Grande do Norte, Macaíba, 2018.
- MEIRA, A. C. S. et al. Estimativas de biomassa e carbono em área de mata atlântica, implantada por meio de reflorestamento misto. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5, n. 1, p. 130-134, 2020.
- MENDES, L. J. et al. Nitrogen accumulated and biologically fixed by uninoculated *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg trees under monospecific stands in the Atlantic Forest biome. **Brazilian Journal of Botany**, v. 44, n. 2, p. 503-512, 2021.
- MIYAZAWA, M. et al. Análises químicas de tecido vegetal. In: SILVA, F.C. (Ed). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Solos, p. 171-223, 1999.
- MOURA, O. N. et al. Distribuição de biomassa e nutrientes na parte aérea de *Mimosa caesalpiniaefolia* Benth. **Revista Árvore**, v. 30, n. 6, p. 887-884, 2006.
- NARDINI, C. et al. Biomass and radiation use efficiency in *Eucalyptus* plantations as affected by spacing of planting. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, e3413, 2020.
- PAYN, T. et al. Changes in planted forests and future global implications. **Forest Ecology and Management**, v. 352, p. 57-67, 2015.
- PEREIRA, B. L. C. et al. Correlações entre a relação Cerne/Alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 98, p. 217-225, 2013.
- PICARD, N; SAINT-ANDRÉ, L; HENRY, M. **Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction**. FAO: Food and Agricultural Organization of the United Nations. 2012. 215p.
- QUEIROZ, L. R. et al. Avaliação da produtividade de fitomassa e acúmulo de N, P e K em leguminosas arbóreas no sistema de aléias, em Campos dos Goytacazes, RJ. **Revista Árvore**, v. 31, n. 3, p. 383-390, 2007.
- RAMOS, S. J. et al. Plant growth and nutrient use efficiency of two native Fabaceae species for mineland revegetation in the eastern Amazon. **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 6, p. 2287-2293, 2020.
- RESQUIN, F. et al. Evaluation of the nutrient content in biomass of *Eucalyptus* species from short rotation plantations in Uruguay. **Biomass and Bioenergy**, v. 134, p. 105502, 2020.
- ROBERTS, T. L. Improving nutrient use efficiency. **Turkish journal of agriculture and forestry**, v. 32, n. 3, p. 177-182, 2008.
- ROLIM, S.G. et al. **Research gaps and priorities in silviculture of native species in Brazil**. Working Paper. São Paulo: WRI Brasil. 2019. Disponível em: <https://wribrasil.org.br/pt/publicacoes>

RONDON, E. V. Produção de biomassa e crescimento de árvores de *Schizolobium amazonicum* (Huber) Ducke sob diferentes espaçamentos na região de Mata. **Revista Árvore**, v. 26 n. 5, p. 573–576, 2002.

ROSIM, C. C.; HSING, T. Y.; PAULA, R. C. Nutrient use efficiency in interspecific hybrids of eucalypt. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, p. 540-547, 2016.

SALVADOR, S. M. et al. Biomassa e estoque de nutrientes em plantios clonais de *Eucalyptus saligna* Smith. em diferentes idades. **Scientia Forestalis**, v. 44, p. 311-321, 2016.

SANQUETTA, C. R. et al. Estoques de biomassa e carbono em povoamentos de acácia negra em diferentes idades no Rio Grande do Sul. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 103, p. 361-370, 2014.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em sítios florestais do estado de São Paulo. **Revista Árvore**, v. 26, n. 4, p. 447-457, 2002.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P. **Introdução ao manejo florestal**. 2ª ed. Santa Maria: FACOS-UFSM, 2008. 566 p.

SCHUMACHER, M. V. et al. Biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de *Pinus taeda* L. de 27 anos de idade em Cambará do Sul-RS. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 2, p. 321-332, 2013.

SCHUMACHER, M. V. et al. Manejo da biomassa e sustentabilidade nutricional em povoamentos de *Eucalyptus* spp. em pequenas propriedades rurais. **Ciência Florestal**, v. 29, p. 144-156, 2019.

SCHUMACHER, M. V. et al. Retorno de nutrientes via deposição de serapilheira em um povoamento de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Árvore**, v. 27, n. 6, p. 791-798, 2003.

SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, R.; CALIL, F. N. Biomassa em povoamentos de *Eucalyptus* spp. de pequenas propriedades rurais em Vera Cruz, RS. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 1, p. 17-22, 2011.

SILVEIRA, P. et al. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, v. 38, n. 1, 2008.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. 2. ed. Viçosa-MG: UFV, 2011. 272p.

SOUZA, C. O. et al. Pyrolysis of *Anadenanthera peregrina* wood grown in different spacings from a forest plantation in Brazil aiming at the energy production. **Environment, Development and Sustainability**, v. 22, n. 6, p. 5153-5168, 2020.

- SOUZA, P. H. **Biomassa e estoque de carbono em povoamento de *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg sob diferentes espaçamentos**. 2018. 113 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2018.
- TEDESCO, M. J. et al. **Análises de solos, plantas e outros materiais**. 2.ed., Porto Alegre: UFRGS, 1995.
- TONINI, H. et al. Crescimento e qualidade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* sob diferentes espaçamentos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, 2018a.
- TONINI, H. et al. Growth, biomass, and energy quality of *Acacia mangium* timber grown at different spacings. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, p. 791-799, 2018b.
- VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 1, p. 175-180, 1994.
- VIERA, M. et al. Biomass and nutrient allocation to aboveground components in fertilized *Eucalyptus saligna* and *E. urograndis* plantations. **New Forests**, v. 48, n. 3, p. 445-462, 2017.
- VIERA, M. et al. Biomassa e nutrientes em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus*, em Eldorado do Sul-RS. **Ecologia e Nutrição Florestal**, v. 1, n. 1, p. 1-13, 2013.
- WITSCHORECK, R; SCHUMACHER, M. V. Alocação de nutrientes ao longo do tronco em *Pinus taeda* L. aos 17 anos de idade. **Ciência Florestal**, v. 29, p. 50-62, 2019.
- ZHANG, S. Y.; LEI, Y. C.; BOWLING, C. Quantifying stem quality characteristics in relation to initial spacing and modeling their relationship with tree characteristics in black spruce (*Picea mariana*). **Northern Journal of Applied Forestry**, v. 22, n. 2, p. 85-93, 2005.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, o espaçamento de plantio não provoca alterações definidas nos atributos químicos e físicos do solo em povoamentos de *A. peregrina* var. *peregrina*. Os solos estudados apresentam variabilidade de características edáficas e topográficas que dificultaram um parecer mais conclusivo quanto a estas características.

A espécie concentra grande parte de suas reservas na sustentação da biomassa de galhos grossos, independente do espaçamento avaliado. Esta característica indica a necessidade de estudos genéticos e a adoção de regimes de podas e desbastes. A produção elevada de galhos grossos sugere a exploração florestal para uso múltiplo, mesmo que a remoção apenas do fuste seja uma alternativa mais sustentável. Pode-se agregar valor empregando os galhos grossos no mercado de energia da biomassa e a casca no mercado de extrativos, por exemplo.

Os plantios em espaçamentos mais amplos são capazes de produzir quantidades semelhantes de biomassa por hectare, com menor porcentagem de casca. Indivíduos no espaçamento 5 m x 5 m acumulam menores quantidades de nutrientes na biomassa, com biomassa individual e eficiência nutricional muito superior aos demais espaçamentos. Menor estoque de nutrientes na biomassa significa menor exportação de nutrientes via colheita. Outra vantagem desse espaçamento de plantio é a possibilidade de produção de outras culturas consorciadas nas entrelinhas da espécie, principalmente nos anos iniciais de plantio, antes do fechamento da copa e atuação de compostos alelopáticos.

Com base no estudo realizado, é possível recomendar a utilização do espaçamento 5 m x 5 m para povoamentos de *A. peregrina* var. *peregrina*, pois é capaz de produzir quantidades semelhantes de biomassa a menor custo de implantação e maior eficiência nutricional.