

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

**AMANDA FAÉ SARTORI**

**POTENCIAL DE USO DE BIOCARVÃO COMO SUBSTRATO E NA  
DINÂMICA DO CARBONO DO SOLO NA CULTURA DO EUCALIPTO**

ALEGRE-ES  
2021

AMANDA FAÉ SARTORI

**POTENCIAL DE USO DE BIOCÁRVÃO COMO SUBSTRATO E NA  
DINÂMICA DO CARBONO DO SOLO NA CULTURA DO EUCALIPTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Agronomia, na área de Solo e Água e Interação com Plantas.

Orientador: Prof. Dr. Renato Ribeiro Passos

ALEGRE-ES

2021

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

---

S251p Sartori, Amanda Faé, 1995-  
POTENCIAL DE USO DE BIOCÁRVÃO COMO  
SUBSTRATO E NA DINÂMICA DO CARBONO DO SOLO  
NA CULTURA DO EUCALIPTO / Amanda Faé Sartori. -  
2021.  
94 f. : il.

Orientador: Renato Ribeiro Passos.

Coorientador: Otacilio José Passos Rangel.

Tese (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Pirólise. 2. Eucalipto. 3. Solos. 4. Mudanças. 5. Resíduos. I. Passos, Renato Ribeiro. II. Rangel, Otacilio José Passos. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. IV. Título.

CDU: 63

---

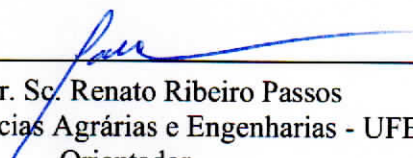
AMANDA FAÉ SARTORI

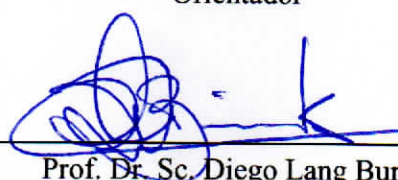
**POTENCIAL DE USO DE BIOCARVÃO COMO SUBSTRATO E NA  
DINÂMICA DO CARBONO DO SOLO NA CULTURA DO EUCALIPTO**

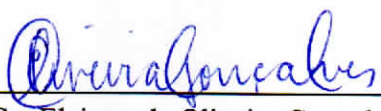
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, para a obtenção do título de Mestre em Agronomia na área de concentração de Solo e Água e Interação com Plantas.

Aprovada em 30 de agosto de 2021

**COMISSÃO EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sc. Renato Ribeiro Passos  
Centro de Ciências Agrárias e Engenharias - UFES  
Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sc. Diego Lang Burak  
Centro de Ciências Agrárias e Engenharias - UFES

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Sc. Elzimar de Oliveira Gonçalves  
Centro de Ciências Agrárias e Engenharias - UFES

A Deus.

Aos meus queridos pais, Sandra e Everaldo.

Aos meus irmãos, Igor e Eloá.

Ao meu namorado, Mateus.

**DEDICO.**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pela força e proteção diária, por guiar meus passos e permitir a realização de mais esta etapa em minha vida.

Aos meus pais, Sandra e Everaldo, por todo ensinamento, por sempre apoiarem minhas escolhas e não medirem esforços para me ajudar a realizá-las.

Aos meus irmãos, Igor e Eloá, por todo apoio e companheirismo.

A minha família e namorado, pelo incentivo e apoio incondicional.

À Universidade Federal do Espírito Santo, em especial, ao programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela oportunidade de realização do mestrado.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão da bolsa de auxílio aos estudos.

À FAPES – Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo, pelo financiamento do projeto de pesquisa.

Ao meu orientador Dr. Renato Ribeiro Passos, pela parceria, sugestões, orientações, por todo apoio e ensinamentos a mim dedicados durante o mestrado.

Aos professores, Elzimar de Oliveira Gonçalves, Diego Lang Burak, Eduardo de Sá Mendonça, e meu coorientador, Otacílio José Passos Rangel, por toda ajuda, ensinamentos e contribuições valiosas para o desenvolvimento da pesquisa.

Em especial, aos companheiros do experimento, Danilo Andrade e Alex Justino, e aos colegas de laboratório, Ronaldo, Fabiano, Yago, Lenita, Camila, Sarah, Sabrina, Iohara e Mateus, pelo companheirismo, aprendizado e momentos de descontração compartilhados, vocês tornaram os trabalhos e o ambiente do laboratório muito mais prazeroso.

Aos amigos Lais e Lázaro, que mesmo de longe, sempre me apoiaram e se fizeram presentes na minha vida e à Joana, pelo companheirismo e por toda ajuda no experimento.

A todos os amigos que de alguma forma, sendo ela presencialmente ou de longe, sempre me incentivaram a lutar pelos meus sonhos.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, de um modo ou de outro, contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigada!

## RESUMO GERAL

SARTORI, Amanda Faé. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo. Agosto de 2021. **Potencial de uso de biocarvão como substrato e na dinâmica do carbono do solo na cultura do eucalipto.** Orientador: Prof. Dr. Renato Ribeiro Passos.

O descascamento das toras de árvores realizado pelas indústrias gera grande quantidade de resíduos. É imprescindível o desenvolvimento de estratégias para a gestão desses resíduos. Portanto, utilizá-los na produção de biocarvão se torna uma alternativa viável, uma vez que o biocarvão é considerado como condicionador do solo, melhorando as propriedades físicas, químicas e biológicas. Assim, objetivou-se com este estudo: (1) avaliar efeitos de doses da adição de biocarvão de casca de eucalipto, produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise, sobre a qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis* e (2) avaliar o efeito da aplicação de doses de biocarvão de casca de eucalipto, produzidos sob duas temperaturas de pirólise, sobre os diferentes compartimentos do carbono orgânico e atributos biológicos do solo sob cultivo de eucalipto. O biocarvão foi produzido a partir de resíduos de casca de eucalipto. No capítulo 1, os substratos foram compostos por fibra de coco, vermiculita e biocarvão sendo quatro temperaturas de pirólise (250, 350, 450 e 600 °C) e cinco concentrações de biocarvão (0; 2,5; 5; 10 e 15% do v/v). Os substratos foram caracterizados físico e quimicamente e análises químicas e morfológicas foram realizadas nas mudas. No capítulo 2, foram utilizadas duas temperaturas de pirólise (350 e 600°C) e cinco doses de biocarvão (0; 0,25; 0,5; 1 e 2% do volume/volume considerando-se o volume de solo do sulco de plantio), distribuídos previamente no sulco de plantio (profundidade de 30 cm). Aos 730 e 913 dias após o plantio do eucalipto, foram realizadas amostragens de solo para avaliar o efeito dos tratamentos sobre os atributos biológicos e relacionados à matéria orgânica. Os resultados experimentais mostraram que a composição do substrato com adição de biocarvão proporcionaram suprimentos nutricionais adequados às mudas e boa qualidade radicular, com desenvolvimento satisfatório para expedição das mudas, no entanto, os tratamentos T16 e T17 foram inferiores aos demais, não sendo recomendados. A adição de biocarvão no solo promoveu aumento do teor de carbono orgânico total e das frações mais estáveis do carbono ao longo do tempo para as duas temperaturas de pirólise, em ambas as camadas de solo. O carbono da biomassa microbiana e quociente microbiano reduziram

com o aumento das doses de biocarvão. As condições climáticas proporcionadas aos 913 dias após plantio (2ª avaliação) reduziram a atividade microbiana no solo.

Palavras-chave: Casca de eucalipto; Resíduo Florestal; Pirólise; Condicionador do solo.



## GENERAL ABSTRACT

SARTORI, Amanda Faé. Center for Agricultural Sciences and Engineering of the Federal University of Espírito Santo. August 2021. **Potential for the use of biochar as substrate and in soil carbon dynamics in the cultivation of eucalyptus**. Advisor: Prof. Dr. Renato Ribeiro Passos.

The debarking of tree logs carried out by industries generates a large amount of waste. It is essential to develop strategies for the management of these wastes. Therefore, using them in the production of biochar becomes a viable alternative, since biochar is considered a soil conditioner, improving physical, chemical and biological properties. Thus, the objective of this study was: (1) to evaluate the effects of doses of the addition of eucalyptus bark biochar, produced under different temperatures, on the quality of *Eucalyptus grandis* seedlings and (2) to evaluate the effect of the application of doses of eucalyptus bark biochar, produced under two pyrolysis temperatures, on different organic carbon compartments and soil biological attributes under eucalyptus cultivation. Biochar was produced from eucalyptus bark residues. In chapter 1, the substrates were composed of coconut fiber, vermiculite and biochar with four pyrolysis temperatures (250, 350, 450 and 600 °C) and five concentrations of biochar (0; 2.5; 5; 10 and 15% of the v/v). The substrates were physically and chemically characterized and chemical and morphological analyzes were performed on the seedlings. In chapter 2, two pyrolysis temperatures (350 and 600°C) and five doses of biochar (0, 0.25, 0.5, 1 and 2% of the volume/volume considering the soil volume of the planting furrow) were used), previously distributed in the planting furrow (30 cm depth). At 730 and 913 days after planting eucalyptus, soil samples were taken to evaluate the effect of treatments on biological attributes and related to organic matter. The experimental results showed that the substrate composition with the addition of biochar provided adequate nutritional supplies to the seedlings and good root quality, with satisfactory development for seedling expedition, however, treatments T16 and T17 were inferior to the others, not being recommended. The addition of biochar to the soil promoted an increase in total organic carbon and more stable carbon fractions over time for the two pyrolysis temperatures, in both soil layers. Microbial biomass carbon and microbial quotient reduced with increasing doses of biochar. Climatic conditions provided 913 days after planting (2nd evaluation) reduced soil microbial activity.

Keywords: Eucalyptus bark; Forest Residue; Pyrolysis; Soil Conditioner.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL .....	11
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	14
CAPÍTULO 1 – BIOCÁRVÃO COMO SUBSTRATO PARA PRODUÇÃO DE MUDAS DE EUCALIPTO .....	17
RESUMO .....	17
ABSTRACT .....	18
1. INTRODUÇÃO.....	19
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
2.1. Produção e caracterização dos biocárvoes.....	20
2.2. Produção dos substratos.....	22
2.3. Delineamento e instalação do experimento .....	23
2.4 Determinações experimentais .....	24
2.4.1 Caracterização dos Substratos.....	24
2.4.2 Análises morfológicas .....	26
2.4.3. Análises Químicas do Tecido Vegetal .....	28
2.5. Análises estatísticas .....	28
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	28
3.1. Caracterização dos substratos .....	28
3.2 Análises morfológicas.....	33
3.3. Análises químicas do tecido vegetal.....	40
4. CONCLUSÕES.....	44
5. REFERÊNCIAS .....	44
CAPÍTULO 2 – DINÂMICA DO CARBONO EM SOLO CULTIVADO COM EUCALIPTO SOB APLICAÇÃO DE BIOCÁRVÕES DE CASCA DE EUCALIPTO COMO CONDICIONADOR DO SOLO .....	54
RESUMO .....	54
ABSTRACT .....	55
1. INTRODUÇÃO.....	56
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	58
2.1. Área de instalação do experimento .....	58
2.2. Produção e caracterização dos biocárvoes.....	60
2.3. Delineamento experimental .....	61

2.5. Atividades de manutenção .....	63
2.6 Caracterização química do solo .....	63
2.7. Determinações experimentais .....	65
2.7.1. Coleta das amostras de solo .....	65
2.7.2. Atributos biológicos e relacionados à matéria orgânica.....	66
2.7.4. Emissão de CO <sub>2</sub> do solo .....	67
2.8. Análises estatísticas .....	67
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	68
3.1. Atributos biológicos e relacionados à matéria orgânica .....	68
3.2. Emissão de CO <sub>2</sub> do solo.....	81
4. CONCLUSÕES .....	82
5. REFERÊNCIAS .....	83

## INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é referência mundial em tecnologia no setor de árvores plantadas, com área total de 9,0 milhões de hectares em 2019, dos quais as espécies do gênero *Eucalyptus* ocupam 6,97 milhões de hectares com produtividade média de 36,0 m<sup>3</sup>/ha/ano (IBA, 2019).

Segundo IBA (2019), o setor gerou cerca de 52,0 milhões de toneladas de resíduos sólidos em 2018, sendo que 70,9% desse total é gerado pelas atividades florestais e 29,1% pelas operações industriais. A maior parte dos resíduos gerados pelas operações industriais são reutilizados como matéria-prima por empresas do setor de árvores plantadas e outros setores industriais, parte é destinado na forma de geração de energia, por meio da queima em caldeiras e o restante segue para a destinação correta. Cerca de 98,0% dos resíduos sólidos da atividade florestal são mantidos no campo, principalmente cascas, galhos e folhas.

O descascamento das toras realizado pelas indústrias acarreta em volume de resíduos alojado nos pátios, podendo tornar-se um problema quando não reutilizado ou descartado corretamente (FOELKEL, 2008). Assim, é importante o desenvolvimento de estratégias para a gestão dos resíduos visando à sustentabilidade, baseado na redução, reutilização e reciclagem desses resíduos.

A transformação dessas biomassas por meio de processos químicos, físicos e biológicos possibilita a geração de materiais com maior eficiência energética como combustíveis sólidos, líquidos e gasosos (HAYKIRI-AÇMA, 2003; PASSOS et al., 2016).

O biocarvão (*biochar*, em inglês) é um material sólido rico em carbono, obtido pelo processo de conversão termoquímica de biomassa, sob condições de baixo oxigênio e elevadas temperaturas, processo conhecido como pirólise (LEHMANN; STEPHEN, 2009; LABEGALINI, 2013). Devido à sua natureza orgânica com potencial condicionador do solo, o biocarvão tem sido utilizado para melhorar a qualidade do solo. Muitos estudos têm se concentrado nos potenciais efeitos benéficos do biocarvão nas propriedades físicas (MUKHERJEE; LAL, 2013), químicas (GUL et al., 2015) e biológicas do solo (LEHMANN et al., 2011).

Quando aplicado ao solo, o biocarvão pode proporcionar efeitos na redução da densidade do solo, formação e resistência de agregados, melhorando a estrutura do solo, aumento da porosidade e retenção de água no solo (HERATH et al., 2013; MUNOZ et

al., 2016; BLANCO-CANQUI, 2017; RAZZAGHI et al., 2020); redução da acidez do solo e aumento do pH (DAI et al., 2017); aumento da capacidade de troca catiônica, disponibilidade de nutrientes, bem como aumento da fertilidade e rendimento das culturas (GLASER et al., 2001; CORNELISSEN et al., 2018; ZHANG et al., 2020; YU et al., 2019); redução do efeito salino e alcalino no solo (ZHAO et al., 2020); aumento na adsorção de herbicidas na superfície do biocarvão, diminuindo as perdas por lixiviação (SPOKAS et al., 2009); supressão de patógenos (JAISWAL et al., 2013); alteração na biota do solo pela melhoria dos atributos físicos e químicos; e principalmente a contribuição no sequestro de carbono a longo prazo, aumentando os estoques de carbono do solo, e conseqüentemente, na mitigação dos efeitos climáticos (WANG et al., 2016; YADAV et al., 2017; FIDEL et al., 2019).

No entanto, a melhoria nas condições do solo provenientes do uso do biocarvão depende da do tipo e qualidade da matéria prima (QIN, 2012), das condições de conversão termoquímica (ZHANG et al., 2013) incluindo temperatura, nível de oxigênio e tempo de reação (GUNDALE & DELUCA, 2006).

O uso do biocarvão na composição do substrato tem sido muito estudado, pois além de atender a características importantes necessárias para o substrato, agindo como condicionador (FANG et al., 2018; MUNOZ et al., 2016), melhorando as propriedades físicas e químicas do substrato, tem sido considerado uma alternativa de processamento de biomassas residuárias, agregando valor. No entanto, a dose aplicada, a granulometria, o tipo de material vegetal e a temperatura de carbonização resultam em diferentes características no substrato, podendo gerar efeitos positivos ou negativos nas mudas.

De acordo com Zanetti et al. (2003), o biocarvão aumenta a porosidade, aeração e capacidade de retenção de água em substratos, características desejáveis para o setor produtivo de mudas. Esses autores constataram que a combinação de turfa palhosa com casca de arroz carbonizada ou bagaço de cana carbonizado resultou em substrato eficiente para produção de mudas de eucalipto, promovendo boas características morfológicas. Pesquisas têm mostrado mudanças na comunidade microbiana do solo, causando supressão de doenças em mudas jovens (JAISWAL et al., 2013; 2019) e a relação positiva ou negativado de doses de biochar no desenvolvimento de patógenos em plantas (FRENKEL et al., 2017). Um estudo realizado por Mazette (2017) constatou que não houve vantagens no desenvolvimento de mudas de eucalipto com a adição de biocarvão de resíduos de eucalipto em substrato (20, 40, 60, 80 e 100%) quando comparado ao substrato comercial. A autora relacionou ao fato do aumento do pH e redução da

disponibilidade do fósforo no substrato com biocarvão, sugerindo o estudo com doses mais baixas. Já Petter et al. (2010) relataram que a adição de 7,5% de biocarvão ao substrato Germinar® promoveu melhor qualidade no desenvolvimento das mudas de eucalipto, enquanto as doses acima de 15% promoveram redução da qualidade das mudas. Rezende et al. (2015) observaram que substratos com biocarvão ativado apresentaram os melhores resultados quando comparados com o biocarvão sem ativação e o substrato comercial.

Os substratos para produção de mudas florestais podem ser produzidos pela combinação de diversos materiais de origem orgânica e inorgânica, o ideal é que sejam de baixo custo e fácil aquisição para o viveirista, e que apresentem boas características. Além disso, a melhoria nas condições do solo provenientes do uso do biocarvão está associada à qualidade da matéria prima (QIN, 2012) e às condições de conversão termoquímica (ZHANG et al., 2013), incluindo temperatura, nível de oxigênio e tempo de reação (GUNDALE; DELUCA, 2006).

Sendo assim, o presente trabalho objetivou avaliar efeitos de doses da adição de biocarvão de casca de eucalipto, produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise, sobre a qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis* (capítulo 1) e avaliar o efeito da aplicação de doses de biocarvão de casca de eucalipto, produzidos sob duas temperaturas de pirólise, sobre os diferentes compartimentos do carbono orgânico e atributos biológicos do solo sob cultivo de eucalipto (capítulo 2).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLANCO-CANQUI, H. Biochar and soil physical properties. **Soil Science Society of America**. J. 81, 687–711, 2017.
- CORNELISSEN, G.; NURIDA, N. L.; HALE, S. E.; MARTINSEN, V.; SILVANI, L.; MULDER, J. Fading positive effect of biochar on crop yield and soil acidity during five growth seasons in na Indonesian Ultisol. **Science of The Total Environment**, v. 634, p. 561–568, 2018.
- DAI, Z.; ZHANG, X.; TANG, C.; MUHAMMAD, N.; WU, J.; BROOKES, P. C.; XU, J. Potential role of biochars in decreasing soil acidification-a critical review. **Science of the Total Environment**, v. 581, p. 601-611, 2017.
- FANG, J.; ZHAN, L.; OK, Y. S.; GAO, B. Minireview of potential applications of hydrochar derived from hydrothermal carbonization of biomass. **Journal of Industrial an Engineering Chemistry**. 57, 15 e 21, 2018.
- FIDEL, R.; LAIRD, D.; PARKIN, T. Effect of biochar on soil greenhouse gas emissions at the laboratory and field scales. **Soil Systems** v. 3, p. 8, 2019.
- FOELKEL, C. Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose e Papel de Eucalipto. Parte 02: Fatores de sucesso para seu gerenciamento. *Eucalyptus Online Book & Newsletter*. **Celcius Degree**, 2008.
- FRENKEL, O.; JAISWAL, A.; ELAD, Y.; LEWI, B.; KAMMANN, C.; GRABER, E. The effect of biochar on plant diseases: what should we learn while designing biochar substrates?, **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management** (this issue) 2017.
- GLASER, B.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. The ‘TerraPreta’ phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. **Naturwissenschaften** 88, 37–41, 2001.
- GUL, S. et al. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 206, p. 46-59, 2015.
- GUNDALE, M. J.; DELUCA T. H. **Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal** For. Ecol. Manage., v. 231, p. 86-93, 2006.
- HAYKIRI-AÇMA, H. Combustion characteristics of different biomass materials. **Energy Conversion and Management**, 44, 155–162, 2003.
- HERATH, H. M. S. K.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; HEDLEY, M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an Alfisol and an Andisol. **Geoderma** 209, 188–197, 2013.

IBA – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual**. Ano base 2018. São Paulo, 80p. 2019.

IBA – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual**. Ano base 2019. São Paulo, 66p. 2020.

JAISWAL, A. K.; GRABER, E. R.; ELAD, Y.; FRENKEL, O. **Biochar as a management tool for soilborne diseases affecting early stage nursery seedling production. Crop Protect.**, 120, p. 34-42, 2019.

JAISWAL, K. A.; ELAD, Y.; GRABER, E. R. & FRENKEL, O. Rhizoctonia solani suppression and plant growth promotion in cucumber as affected by biochar pyrolysis temperature, feedstock and concentration. **Soil Biology & Biochemistry**. 69, 110–118, 2013.

LABEGALINI, A. **Obtenção de biochar a partir da pirólise rápida da torta de pinhão manso: uso como adsorvente e suporte**. 116 f. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

LEHMANN, J. et al. Biochar effects on soil biota - A review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 9, p. 1812-1836. 2011.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management: An introduction. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (ed). **Biochar for environmental management: Science and Technology**, Londres, Earthscan, v.1, p.4-18, 2009.

MAZETTE, S. S. **Uso de biocarvão como substrato para produção de mudas de eucalipto**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Sinop, 52f. 2017.

MUKHERJEE, A & LAL, R. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. **Agronomy**.; 3:313-339. 2013.

MUNOZ, C.; GONGORA, S.; ZAGAL, E. Use of biochar as a soil amendment: A brief review. **Chil. J. Agric. Anim. Sci.** 32, 37–47, 2016.

PASSOS, R. R; SILVA, R. W.; BARBOSA, C. F.; MENDONÇA, E. S.; RANGEL, O. J. P. **Tópicos especiais em Produção Vegetal VI** – Alegre, ES: CAUFES, Pg. 532, 2016.

PETTER, F. A. et al. Biochar como condicionador de substrato para a produção de mudas de eucalipto. **Revista Caatinga**, v. 25, n. 4, p. 44–51, 2012.

QIN, H. Z. **Study on Properties of Biochar Made from Household Waste**. Nanjing Agricultural University, (Ph.D Dissertation) Nanjing, JS, 2012.

RAZZAGHI, F.; OBOUR, P.B.; ARTHUR, E. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. **Geoderma**, 361, 114055, 2020.



REZENDE, F. A.; BARROS, D. L.; SANTOS, V. A. H. F.; LANGER, J.; ROSALINO, T. Uso do biochar na composição de substratos para produção de mudas de maracujá. **XI ENCONTRO BRASILEIRO DE SUBSTÂNCIAS HÚMICAS**. p. 431-434, São Carlos – SP, 2015.

SPOKAS, K. A. et al. Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/ degradation of two herbicides in a Minnesota soil. **Chemosphere**, Amsterdam, v. 77, p. 574-6, 2009.

WANG, J.; XIONG, Z.; KUZYAKOV, Y. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. **GCB Bioenergy**, v. 8, p. 512–523, 2016.

YADAV, R.; YADAV, M. R.; KUMAR, R.; PARIHAR, C. M.; YADAV, N.; BAJIA, R.; RAM, H.; MEENA, R. K.; YADAV, D.; YADAV, B. Role of biochar in mitigation of climate change through carbon sequestration. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, V. 6, p. 859–866, 2017.

YU, H. W.; ZOU, W. X.; CHEN, J. J.; CHEN, H.; YU, Z. B.; HUANG, J.; TANG, H. R.; WEI, X. Y. GAO, B. Biochar amendment improves crop production in problem soils: a review. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 8-21, 2019.

ZANETTI, M.; CAZETTA, J. O.; MATTOS JÚNIOR, D.; CARVALHO, S. A. de. Uso de subprodutos de carvão vegetal na formação do porta-enxerto limoeiro ‘Cravo’ em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.25, p.508-512, 2003.

ZHANG, X.; QU, J. S.; LI, H.; LA, S. K.; TIAN, Y. Q.; GAO, L. Biochar addition combined with daily fertigation improves overall soil quality and enhances water-fertilizer productivity of cucumber in alkaline soils of a semi-arid region. **Geoderma**, v. 363, p. 114170, 2020.

ZHANG, X.; WANG, D.; JIANG, C. C.; PENG, S. A. Research progress of amelioration effects of biochars on acid soils. **Hubei Agric. Sci.** 52, 997–1000, 2013.

ZHAO, W.; ZHOU, Q.; TIAN, Z.; CUI, YUTONG.; LIANG, Y.; WANG, H. Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain. **Science of the Total Environment**, v. 722, p. 137428, 2020.

## CAPÍTULO 1

### BIOCARVÃO COMO SUBSTRATO PARA PRODUÇÃO DE MUDAS DE EUCALIPTO

#### RESUMO

O aumento no consumo da madeira e seus derivados evidencia a necessidade da produção de mudas com qualidade. O biocarvão pode atender características importantes necessárias para o substrato, agindo como condicionador e melhorando as propriedades do solo. Sendo assim, objetivou-se avaliar efeitos de doses da adição de biocarvão de casca de eucalipto, produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise, sobre a qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis*. O biocarvão foi produzido a partir de resíduos de casca de eucalipto provenientes do beneficiamento de plantios da região sul do estado do Espírito Santo. Os tratamentos foram distribuídos em um delineamento de blocos casualizados em esquema fatorial  $4 \times 4 + 1$ , sendo: quatro temperaturas de pirólise dos biocarvões (250 °C, 350 °C, 450 °C e 600 °C), quatro concentrações de biocarvões (2,5; 5; 10 e 15% do volume do tubete) e uma testemunha (ausência de biocarvão), adicionadas a um substrato composto por 80% fibra de coco e 20% vermiculita. Foram utilizadas miniestacas obtidas a partir de minicepas de *Eucalyptus grandis* de origem semínifera, adquiridas em viveiro comercial certificado. Os substratos foram caracterizados físico e quimicamente. Realizaram-se análises de altura, diâmetro e clorofila aos 30, 60, 75 e 90 dias após o plantio e, ao final (90 dias), as mudas foram avaliadas quanto à qualidade radicular, volume radicular, fitomassa seca da parte aérea e radicular, relação entre a altura e fitomassa seca da parte aérea, relação do peso da fitomassa seca da parte aérea e radicular, e o índice de qualidade de Dickson. Realizaram-se também análises químicas do tecido vegetal. Os resultados experimentais mostraram que a composição do substrato com adição de biocarvão proporcionaram suprimentos nutricionais adequados às mudas e boa qualidade radicular, com desenvolvimento satisfatório para expedição das mudas. Tomando por base as características de substrato e análises morfológicas, os tratamentos T16 e T17 foram inferiores aos demais, não sendo recomendadas doses de biocarvão maiores ou iguais que 15% produzidos a temperaturas de pirólise de 450°C e 600°C.

**Palavras-chave:** Produção de Mudas; Eucalipto; Biochar.

# **BIOCHAR AS A SUBSTRATE FOR THE PRODUCTION OF EUCALYPTUS SEEDLINGS**

## **ABSTRACT**

The increase in the consumption of wood and its derivatives highlights the need to produce seedlings with quality. Biochar can meet important characteristics necessary for the substrate, acting as a conditioner and improving soil properties. Therefore, the objective was to evaluate the effects of doses of the addition of eucalyptus bark biochar, produced under different pyrolysis temperatures, on the quality of *Eucalyptus grandis* seedlings. Biochar was produced from eucalyptus bark residues from the processing of plantations in the southern region of the state of Espírito Santo. The treatments were distributed in a randomized block design in a 4 x 4 + 1 factorial scheme, as follows: four biochars pyrolysis temperatures (250 °C, 350 °C, 450 °C and 600 °C), four concentrations of biochars (2.5; 5; 10 and 15% of the tube volume) and a control (absence of biochar), added to a substrate composed of 80% coconut fiber and 20% vermiculite. Mini-cuttings obtained from *Eucalyptus grandis* mini-stumps of seminiferous origin, acquired in a certified commercial nursery, were used. The substrates were characterized physically and chemically. Height, diameter and chlorophyll analyzes were carried out at 30, 60, 75 and 90 days after planting and at the end (90 days) the seedlings were evaluated for root quality, root volume, shoot and root dry phytomass, relation between height and shoot dry mass, weight ratio of shoot and root dry biomass, and the Dickson quality index. Chemical analyzes of the plant tissue were also performed. The experimental results showed that the substrate composition with the addition of biochar provided adequate nutritional supplies to the seedlings and good root quality, with satisfactory development for seedling shipment. Based on substrate characteristics and morphological analyses, treatments T16 and T17 were inferior to the others, and biochar doses greater than or equal to 15% produced at pyrolysis temperatures of 450°C and 600°C were not recommended.

**Keywords:** Seedling Production; Eucalyptus; Biochar.

## 1. INTRODUÇÃO

Os *Eucalyptus* são espécies arbóreas de crescimento rápido e importante fonte de matéria-prima para uma série de produtos, tendo grande expressividade mundial e principalmente no Brasil, estimando-se em torno 7,6 milhões de hectares de eucalipto nos solos brasileiros (IBGE, 2019). A valorização da celulose no mercado internacional e as ótimas condições edafoclimáticas encontradas no Brasil para o cultivo dessas espécies fizeram com que aumentasse a produção florestal nos últimos anos (IBA, 2020).

O aumento no consumo da madeira e seus derivados evidencia a necessidade da produção de mudas com qualidade para o sucesso da formação de plantios florestais produtivos. Tal qualidade é definida a partir de parâmetros de sobrevivência, biométricos e fitossanitários, no qual depende de vários fatores, entre eles a qualidade do substrato. Um substrato de qualidade deve apresentar boas características para o desenvolvimento radicular e sustentação, ser livre de patógenos e plantas invasoras boa aeração, retenção de água, pH e condutividade elétrica adequada, temperatura e liberação de nutrientes adequado para que atenda o desenvolvimento adequado das plantas, além de ser livre de elementos químicos em níveis tóxicos (KAMPF, 2000; GUERRINI; TRIGUEIRO, 2004).

O biocarvão pode atender características importantes necessárias para o substrato, agindo como condicionador do solo (FANG et al., 2018; MUNOZ et al., 2016), podendo melhorar as propriedades do solo, disponibilizar nutrientes e promover o crescimento das plantas. De acordo com Zanetti et al. (2003), o biocarvão aumenta a porosidade, aeração e capacidade de retenção de água em substratos, características desejáveis para o setor produtivo de mudas. Além disso, pesquisas têm mostrado mudanças na comunidade microbiana do solo, causando supressão de doenças em mudas jovens (JAISWAL et al, 2013; 2019). Dadas às suas características físicas e químicas e seus efeitos de interesse para a produção de mudas, o uso de materiais carbonizados em misturas de substratos é objeto de pesquisa e aplicação prática na produção de mudas de eucalipto (PAIVA e GOMES, 1995; PETTER et al, 2012; REZENDE et al. 2015; KRATZ e WENDLING, 2016; REZENDE et al., 2016; WANG et al, 2019). Tais características e efeitos são potencializados em função da reatividade dos biocarvões, que irão oscilar em função do material de origem e temperatura de pirólise.

A conversão da termoquímica da casca de eucalipto, subproduto proveniente do beneficiamento da madeira (descascamento), mostra-se uma alternativa potencial de

aproveitamento dos resíduos, porém, ainda são necessários estudos que relacionem o material vegetal, temperatura de carbonização, composição dos substratos e as doses de biocarvão que evidenciem benefícios para o gênero *Eucalyptus*.

O presente trabalho objetivou avaliar efeitos de doses da adição de biocarvão de casca de eucalipto, produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise, sobre a qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis*.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Produção e caracterização dos biocarvões

O biocarvão foi produzido a partir de resíduos de casca de eucalipto provenientes do beneficiamento de plantios na região sul do estado do Espírito Santo, material fornecido pela usina Bragança, no município de Ibitirama-ES. As cascas foram trituradas e carbonizadas em reator de pirólise lenta, hermeticamente fechado modelo SPPT-V60 (Figura 1), instalado na Área Experimental do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCAUE-UFES). Os biocarvões foram produzidos sob quatro temperaturas finais de pirólise (250 °C, 350 °C, 450 °C e 600 °C) com tempo de residência na temperatura final de 60 min.

Ao fim do processo de pirólise, o biocarvão permaneceu no reator por cerca de 24h, garantindo que o mesmo atingisse a temperatura ambiente. O processo gera três produtos finais, o biocarvão (combustível sólido), bio-óleo (combustível líquido) e o gás combustível (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e outros hidrocarbonetos).



**Figura 1** - Reator de Pirólise Lenta, Modelo SPPT-V60.

Amostras dos biocarvões produzidos foram moídas em moinho tipo Willey e maceradas em almofariz de ágata, para serem passadas em peneira de 60 mesh (0,250 mm) para realização das análises de caracterização dos biocarvões. Teores totais de C, H e N (Tabela 1) foram determinados em analisador elementar (PerkinElmer 2400 Series II CHNS/O) e o teor de O foi estimado por diferença.

O teor de cinzas (Tabela 2) foi determinado pela incineração de amostras (1g) em forno tipo mufla (550 °C por 4h). As cinzas foram solubilizadas em HCl 0,5 mol L<sup>-1</sup>, na proporção 1:20 (AL-WABEL et al., 2013) para determinação dos teores de P, K, Ca e Mg e quantificadas por fotolorimetria (P), fotometria de chama (K) e por espectrofotometria de absorção atômica (Ca e Mg). A CTC foi determinada por saturação do complexo de troca catiônica com acetato de cálcio (CaOAc 0,5 mol L<sup>-1</sup>, pH igual a 7) e posterior titulação com NaOH (0,1mol L<sup>-1</sup>) para extração do Ca adsorvido e determinação da CTC e pH determinado em água na proporção 1:20 (RAJKOVICH et al, 2011). A densidade foi realizada pelo método da proveta conforme o método ASTM D2854 adaptada (ASTM 2009).

**Tabela 1** – Caracterização<sup>1</sup> química elementar, suas relações atômicas e grau de oxidação dos biocarvões de casca de eucalipto, sob diferentes temperaturas de pirólise

Temperatura de pirólise (°C)	C	H	N	O	H/C	O/C	C/N
	----- % -----						
<b>250</b>	49,16	4,36	0,52	39,43	1,06	0,6	109,58
<b>350</b>	54,99	3,12	0,60	41,28	0,68	0,56	107,01
<b>450</b>	63,71	2,73	0,62	33,49	0,51	0,39	119,22
<b>600</b>	65,05	1,44	0,51	34,37	0,26	0,38	149,80

<sup>1</sup>Via analisador elementar: PerkinElmer 2400 Series II CHNS/O.

**Tabela 2** - Teores de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e valores médios de CTC, pH, cinzas e densidade dos biocarvões de casca de eucalipto, sob diferentes temperaturas de pirólise

Temperatura de pirólise (°C)	P	K	Ca	Mg	CTC	pH	Cinzas	Da
	----- g kg <sup>-1</sup> -----				cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>		%	kg dm <sup>-3</sup>
<b>250</b>	0,34	5,17	2,47	0,45	160,00	6,16	12,85	0,25
<b>350</b>	0,37	7,41	2,91	0,62	99,21	7,20	16,84	0,23
<b>450</b>	0,42	8,67	3,63	0,62	46,00	8,13	23,35	0,26

<b>600</b>	0,44	9,45	3,79	0,75	19,76	8,15	26,01	0,23
------------	------	------	------	------	-------	------	-------	------

CTC: capacidade de troca catiônica. Da: Densidade aparente.

## 2.2. Produção dos substratos

O biocarvão produzido foi passado em peneiras de malhas de 2; 1; 0,85; 0,5; 0,25 e 0,106 mm e feita uma mistura com porcentagens das granulometrias iguais para todas as temperaturas de pirólise, incluindo o biocarvão que passou na peneira de 0,106 mm, garantindo assim homogeneidade granulométrica entre temperaturas para produção dos substratos.

Para a produção dos substratos, foi realizado uma mistura inicial de fibra de coco e vermiculita (FC+V) na proporção de 80% de fibra de coco e 20% de vermiculita. Em seguida, foi adicionado os biocarvões às misturas, sendo quatro temperaturas de pirólise (250, 350, 450 e 600 °C) e quatro concentrações de biocarvão (2,5; 5; 10 e 15% do volume/volume) + 1 tratamento sem adição de biocarvão (testemunha), formando 17 tratamentos (Tabela 3).

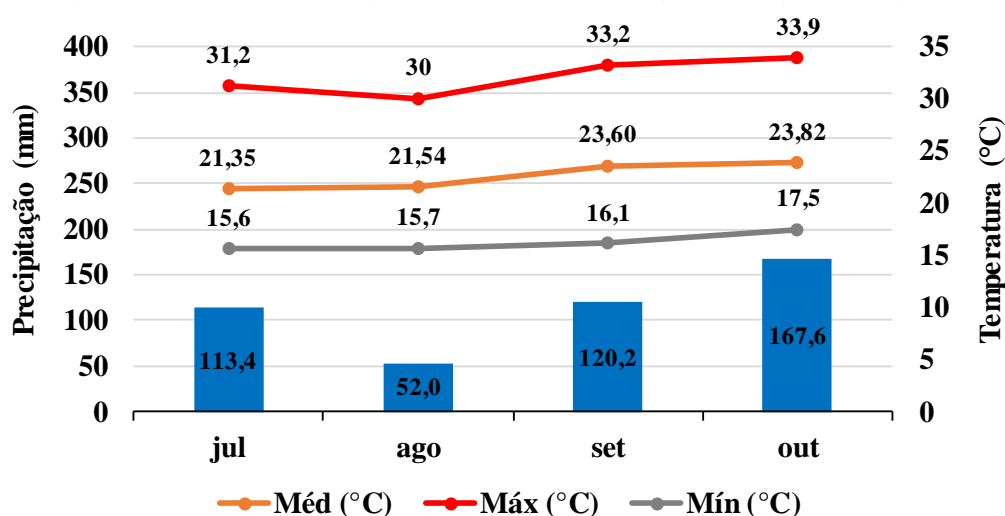
**Tabela 3** – Composição dos substratos em função da mistura de fibra de coco + vermiculita (FC+V) e doses de biocarvões pirolisados sob diferentes temperaturas

TRATAMENTOS	MISTURA	BIOCARVÃO	
	FC+V	DOSE	PIRÓLISE
<b>T1</b>	100%	-	-
<b>T2</b>	97,50%	2,50%	250 °C
<b>T3</b>	97,50%	2,50%	350 °C
<b>T4</b>	97,50%	2,50%	450 °C
<b>T5</b>	97,50%	2,50%	600 °C
<b>T6</b>	95%	5%	250 °C
<b>T7</b>	95%	5%	350 °C
<b>T8</b>	95%	5%	450 °C
<b>T9</b>	95%	5%	600 °C
<b>T10</b>	90%	10%	250 °C
<b>T11</b>	90%	10%	350 °C
<b>T12</b>	90%	10%	450 °C
<b>T13</b>	90%	10%	600 °C
<b>T14</b>	85%	15%	250 °C
<b>T15</b>	85%	15%	350 °C
<b>T16</b>	85%	15%	450 °C
<b>T17</b>	85%	15%	600 °C

Foi adicionado aos substratos, 5 g L<sup>-1</sup> de adubo Basacote® Plus 9M de liberação lenta de 9 meses, com a seguinte constituição: 16,0 % de N total (7,4 % nitrogênio nitrato e 8,6 % nitrogênio amônico); 8,0 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 12,0 % K<sub>2</sub>O; 1,2 % de Mg; 5,0 % de S; 0,02 % de B; 0,05 % de Cu; 0,4 % de Fe; 0,06 % de Mn; 0,015 % de Mo; 0,02 % de Zn.

### 2.3. Delineamento e instalação do experimento

O experimento foi realizado no período de julho a outubro de 2020, no viveiro do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira (DCFM) da Universidade Federal do Espírito Santo, sob coordenadas geográficas de 20° 47' 44.384" S, 41° 24' 21.688" W, a 125 m de altitude, no município de Jerônimo Monteiro - ES. O clima da região é Cwa (clima de inverno seco e verão chuvoso), conforme a classificação de Koppen. A precipitação acumulada e temperatura média, mínima e máxima mensal registradas durante o período experimental foram coletados na estação meteorológica de Rive, no município de Alegre/ES, cerca de 8 km de distância viveiro, localizado no município de Jerônimo Monteiro, no Espírito Santo, Brasil (Figura 2).



**Figura 2** – Precipitação acumulada e temperatura média, máxima e mínima mensal durante o período de condução do experimento no ano de 2020, no distrito de Rive, Alegre/ES.

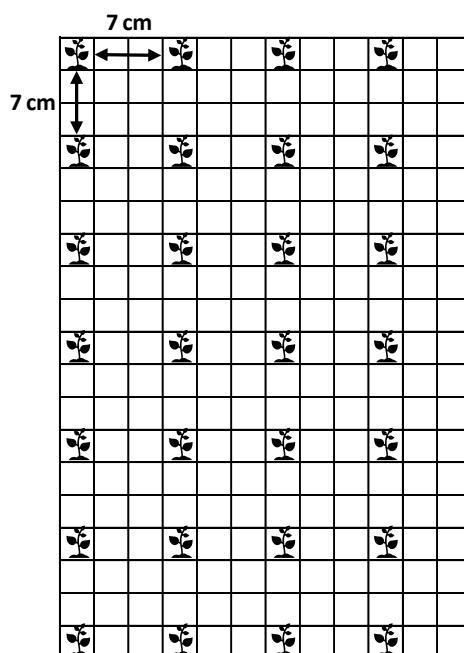
Os tratamentos foram distribuídos em um delineamento de blocos casualizados em esquema fatorial 4 x 4 + 1, sendo: quatro temperaturas de pirólise dos biocarvões (250 °C, 350 °C, 450 °C e 600 °C), quatro concentrações de biocarvões (2,5; 5; 10 e 15% do



volume do tubete) e uma testemunha (ausência de biocarvão), adicionadas a uma mistura composta por 80% fibra de coco e 20% vermiculita, com quatro repetições de 10 plantas cada, totalizando 17 tratamentos e 680 unidades experimentais.

Foram utilizadas miniestacas obtidas a partir minicepas de *Eucalyptus grandis* de origem seminífera, adquiridas em viveiro comercial certificado. As miniestacas foram cortadas em bisel, padronizado a 10 cm a partir do meristema apical e foram, imediatamente, estaqueadas em tubetes 50 cm<sup>3</sup> contendo substrato.

As mudas foram dispostas em bandejas de 228 células com espaçamento de 7x7 cm entre plantas e entre linhas (Figura 3) e levadas para casa de vegetação onde permaneceram por 30 dias em ambiente controlado com temperatura de 25 a 30 °C e umidade cerca de 80% para enraizamento das estacas. Após 30 dias, foram transferidas para casa de sombra com sombreamento parcial de 50% onde permaneceram até a finalização do experimento aos 90 dias.



**Figura 3** – Esquema da disposição das mudas nas bandejas.

## 2.4 Determinações experimentais

### 2.4.1 Caracterização dos substratos

Os substratos foram caracterizados físico e quimicamente. As análises químicas foram realizadas em triplicatas, a partir do extrato obtido pela adição da amostra de substrato em duas partes de água deionizada (1:2) seguindo a metodologia de Sonneveld

et al. (1990). A suspensão foi agitada por 20 minutos a 220 rpm e realizada as leituras de pH nos extratos. Em seguida, os extratos foram filtrados em papel de filtragem média e procedeu-se as leituras dos nutrientes P, Na, K, Ca e Mg, embasadas em metodologias preconizadas por Teixeira et al. (2017). Os teores de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) foram determinados por espectrofotômetro de absorção atômica; o potássio ( $\text{K}^+$ ) e sódio trocável ( $\text{Na}^+$ ) foram determinados por fotometria de chama e o fósforo disponível (P) por colorimetria.

A densidade foi feita pelo método descrito por Hoffman (1970): Uma proveta plástica com capacidade para 500 mL foi preenchida com 300 cm<sup>3</sup> de substrato seco ao ar, a proveta foi deixada cair sob a ação de seu próprio peso sobre superfície de borracha, com distância de queda de aproximadamente 10 cm de altura, por dez vezes consecutivas. Ao final, determinou-se o volume final e o peso do substrato e posteriormente, seco em estufa a 65°C até massa constante.

A determinação dos atributos: porosidade total, espaço de aeração e água disponível foi obtido a partir de curvas de retenção de água nas tensões de 0, 10, 50, e 100 cm de altura de coluna de água, correspondendo às pressões de 0, 1, 5 e 10 kPa, conforme proposto por De Boodt e Verdonck (1972) e descrito a seguir. Foram utilizados anéis volumétricos de aproximadamente 50 mm de altura, preenchidos com substrato, o fundo foi vedado com tecido de nylon preso por um atilho de borracha. Os anéis com substratos foram colocados em bandejas plásticas de 10 cm de altura, contendo água deionizada por 24 horas para saturação. Decorrido esse período, foi determinada a massa de água contida na amostra de substrato correspondente à tensão de 0 kPa. Posteriormente, foram transferidos para mesa de tensão e ajustada para a tensão de 10 cm de coluna de água, permanecendo assim até atingirem o equilíbrio (cerca de 48 horas). O conjunto foi pesado e a massa de água determinada, correspondendo à tensão de 1 kPa. O mesmo procedimento se repetiu para as tensões de 50 cm (5 kPa) e 100 cm (10 kPa) de coluna de água. Ao final, as amostras de substrato foram secas em estufa a 65°C até massa constante e pesadas para a determinação da massa de matéria seca.

De posse desses dados, foram então calculados os parâmetros relacionados à porosidade:

**Porosidade Total (PT):** que corresponde à umidade volumétrica presente nas amostras saturadas sob tensão 0 kPa.

**Espaço de Aeração (EA):** representado pela diferença entre a porosidade total e o volume de água retida na tensão de 10 cm (1 kPa).

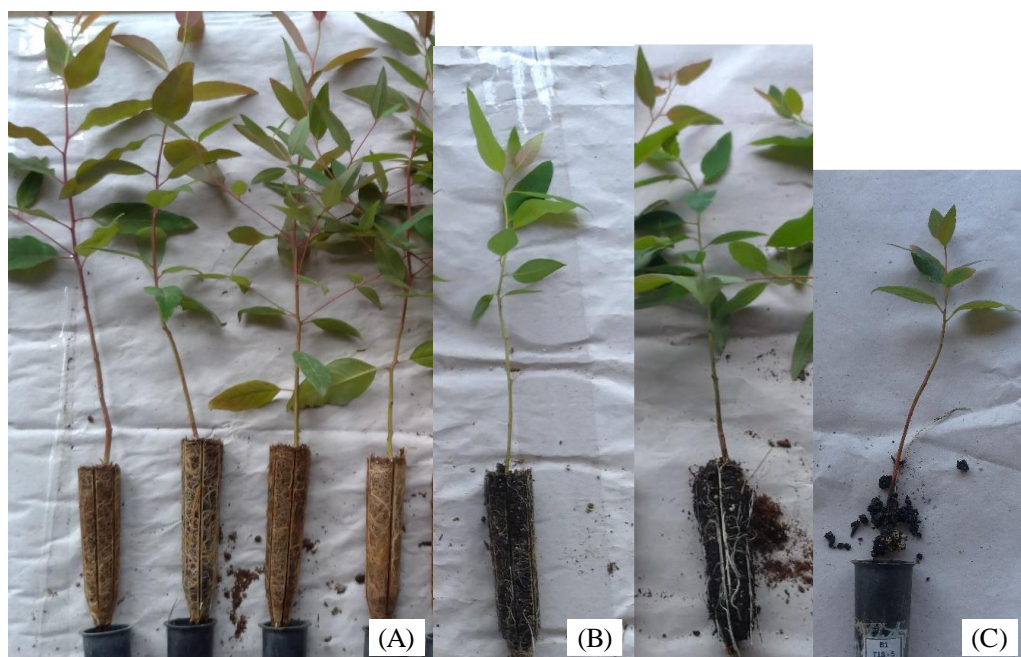
Água facilmente disponível (AFD): correspondente ao volume de água encontrado entre os pontos 10 (1 kPa) e 50 cm (5 kPa) de tensão.

Água Tamponante (AT): representativa do volume de água liberada entre 50 (5 kPa) e 100 cm (10 kPa) de tensão.

#### **2.4.2 Análises morfológicas**

Foram avaliados parâmetros morfológicos das mudas aos 30, 60, 75 e 90 dias após o plantio das estacas, medindo a altura da parte aérea (H), diâmetro do colo (DC) e o teor de clorofila das folhas (Clor). A altura das plantas foi mensurada com uma régua milimetrada de 30 cm, medindo-se da base do colo até o ponto apical da planta; o diâmetro do caule foi mensurado na altura do colo com paquímetro digital de precisão, em mm e a concentração de clorofila (índice SPAD) foi medida pelo clorofilômetro (SPAD-502 Plus).

Ao final do experimento (90 dias), as mudas foram avaliadas quanto à qualidade do sistema radicular seguindo o método proposto por Silva et al. (2012), em que é atribuída uma classificação com base no aspecto físico apresentado pelo sistema radicular após remoção da muda dos tubetes: conceito "ótimo" - sistema radicular bem estruturado, formado por um torrão firme, sem nenhuma flexibilidade e com presença de raízes novas; o conceito "bom" - sistema radicular que apresentava boa estruturação, porém com alguma flexibilidade, o que exige maior cuidado no plantio para não prejudicar o desempenho da muda no campo; conceito "ruim" - atribuído às mudas que não apresentaram agregação do substrato consideradas, portanto, inaptas para plantio no campo. O somatório dos conceitos "ótimo" e "bom" foram considerados como "aptos" para o campo.



**Figura 4** – Classificação da formação do torrão do substrato. (A) – Ótimo. (B) Bom. (C) – Ruim.

Realizou-se a lavagem das raízes para avaliação do volume de raízes totais (VR), pelo deslocamento da água após imersão das mesmas em uma proveta graduada parcialmente preenchida com água. As mudas foram cortadas, separando-se a parte aérea e a raiz, colocadas em sacos de papel devidamente identificadas e secas em estufa de circulação forçada de ar a  $65^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , até peso constante. A fitomassa seca da parte aérea (FSPA) e a fitomassa seca das raízes (FSR) foram pesadas em balança eletrônica de precisão e calculada a relação entre a altura da parte aérea e o peso da matéria seca da parte aérea (H/FSPA), a relação entre o peso da matéria seca da parte aérea e o peso de matéria seca das raízes (RPPAR) e o índice de qualidade de Dickson (IQD).

O índice de qualidade de Dickson foi determinado em função de H, DC, FSPA, FSR, por meio da seguinte equação (DICKSON *et al.*, 1960):

$$\text{IQD} = \frac{\text{FST (g)}}{\frac{\text{H (cm)}}{\text{DC (mm)}} + \frac{\text{FSPA (g)}}{\text{FSR (g)}}}$$

Em que FST = fitomassa seca total (g); FSPA = fitomassa seca da parte aérea (g); FSR = fitomassa seca das raízes (g); H = altura (cm); e D = diâmetro do coleto (mm).

### **2.4.3. Análises Químicas do Tecido Vegetal**

Amostras secas a 65 °C da parte aérea foram trituradas em moinho Wiley, homogeneizadas, pesadas (0,5 g) e submetidas à digestão em sistema fechado com ácido nítrico concentrado (10 mL) (EPA 3051A, 2007). Foram determinados os teores de macronutrientes (P, K, Ca e Mg) e Na e determinado os micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn), utilizando metodologias recomendadas por Silva (2009). O nitrogênio total (NT) foi quantificado por meio de digestão sulfúrica seguida de destilação Kjeldahl, conforme Tedesco et al. (1995); o P foi quantificado por fotolorimetria, K e Na por fotometria de chama; Ca e Mg e os micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn) por espectrofotometria de absorção atômica.

### **2.5. Análises estatísticas**

O conjunto de dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), utilizando-se o Software R 4.0.4 para obtenção da soma dos quadrados e graus de liberdade dos resíduos e as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Foram testados ajustes de análises de regressão a fim de investigar a relação entre as doses dos biocarvões sobre as análises de caracterização dos substratos, análises morfológicas e químicas do tecido vegetal, não obtendo ajustes.

## **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **3.1. Caracterização dos substratos**

As principais propriedades químicas e físicas dos substratos testados foram significativamente influenciadas pelos tratamentos, conforme relatado nas Tabelas 4 e 5.

O pH foi influenciado tanto pela dose quanto pela temperatura de pirólise do biocarvão. O aumento das doses de biocarvão provocou aumento do pH, de 4,41 para o T1, tratamento sem adição de biocarvão, até cerca de pH 6,0 para os tratamentos T16 e T17 com maiores temperaturas de pirólise (450 °C e 600 °C) na maior dose (15%), evidenciando o potencial dos biocarvões como corretivos da acidez, elevando o pH. Quanto maior a temperatura de pirólise e a dose do biocarvão, maiores foram os efeitos na elevação do pH.

**Tabela 4** – Caracterização química<sup>1</sup> dos substratos

TRAT	pH	P	Na	K	Ca	Mg	
		-----	mg dm <sup>-3</sup>	-----	--	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	--
T1	4,41 e	94,18 a	174,53 c	764,87 d	0,64 d	3,10 b	
T2	4,62 e	70,49 b	178,20 c	682,00 d	0,57 d	2,28 c	
T3	4,63 e	48,83 c	191,40 c	706,93 d	0,64 d	2,47 c	
T4	4,60 e	71,59 b	219,27 c	834,53 c	0,84 c	2,86 b	
T5	4,57 e	82,12 a	222,20 c	985,60 b	0,91 c	3,59 a	
T6	4,64 e	84,85 a	206,80 c	924,73 c	0,84 c	3,42 a	
T7	4,51 e	66,14 b	241,27 b	894,67 c	1,03 b	3,80 a	
T8	4,61 e	77,28 b	220,73 c	1.025,20 b	1,13 b	3,79 a	
T9	4,82 d	99,10 a	250,80 b	982,67 b	1,42 a	4,15 a	
T10	4,66 d	89,95 a	213,40 c	854,33 c	1,10 b	3,56 a	
T11	4,79 d	70,13 b	237,60 b	990,00 b	1,18 b	3,55 a	
T12	5,16 c	50,54 c	262,53 b	1.073,60 b	1,35 a	3,12 b	
T13	5,36 b	24,64 d	284,53 b	944,53 b	1,42 a	3,19 b	
T14	4,86 d	100,85 a	245,67 b	959,20 b	1,11 b	2,88 b	
T15	5,07 c	61,53 b	357,13 a	1.236,40 a	1,45 a	3,87 a	
T16	6,10 a	29,69 d	360,07 a	1.179,93 a	1,22 b	3,30 a	
T17	6,00 a	15,37 d	389,40 a	1.190,20 a	1,05 b	2,85 b	

T1 = (dose 0%); T2 = (dose 2,5% a 250°C); T3 = (dose 2,5% a 350°C); T4 = (dose 2,5% a 450°C); T5 = (dose 2,5% a 600°C); T6 = (dose 5% a 250°C); T7 = (dose 5% a 350°C); T8 = (dose 5% a 450°C); T9 = (dose 5% a 600°C); T10 = (dose 10% a 250°C); T11 = (dose 10% a 350°C); T12 = (dose 10% a 450°C); T13 = (dose 10% a 600°C); T14 = (dose 15% a 250°C); T15 = (dose 15% a 350°C); T16 = (dose 15% a 450°C); T17 = (dose 15% a 600°C). <sup>1</sup>P = fósforo por colorimetria; Na e K = sódio e potássio por fotometria de chama; Ca e Mg = cálcio, magnésio por determinação em absorção atômica. Médias seguidas de mesma letra na vertical não diferem, pelo teste Scott-Knott (p<0,05).

Gonçalves e Poggiani (1996) recomendam uma faixa adequada de pH entre 5,5-6,5, apenas o T16 e T17 se apresentaram na faixa adequada sugerida pelos autores. Entretanto, segundo a recomendação de Kämpf (2000) (5,2 e 5,5), apenas o substrato do T13 apresentou pH adequado. No entanto, segundo Bailey et al. (2004), quando se utilizam substratos orgânicos, sem solo, a recomendação é trabalhar em um intervalo de 4,4 a 6,2 para a maioria dos substratos, faixa de pH apresentada por todos os tratamentos.

Segundo Valeri e Corradini (2000), em substratos com pH abaixo de 5,0, pode ocorrer a deficiência de nitrogênio, potássio, cálcio, magnésio e boro, enquanto em pH acima de 6,5 são esperadas deficiências de fósforo, ferro, manganês, zinco e cobre. Semelhante ao comportamento do pH, o aumento das doses correspondeu a um aumento dos teores de Na (174,53 a 389,40 mg/dm<sup>3</sup>) e K (682,00 a 1190,20 mg/dm<sup>3</sup>). Porém, o conteúdo de P aconteceu o contrário, os tratamentos com doses acima de 10% e maiores temperaturas de pirólise (450 °C e 600 °C) reduziram o conteúdo de P. O Ca teve comportamento semelhante ao K, sendo influenciado pela temperatura de pirólise, apresentando aumento do teor de Ca conforme o aumento da temperatura de pirólise e

aumento das concentrações com o aumento da dose, no entanto, os tratamentos com temperaturas maiores (450 e 600 °C) apresentaram redução do teor de Ca na dose de 15%.

O Mg não apresentou nenhuma tendência em função dos tratamentos, as concentrações variaram de 2,28 cmol/dm<sup>3</sup> no T2 até 4,15 cmol/dm<sup>3</sup> para o T9. O teor de Mg é cerca de 4 vezes maior que o teor de Ca, esse valor pode ter ocorrido pelo fato de o adubo aplicado no substrato conter Mg e não conter Ca em sua formulação e devido à utilização da vermiculita na composição do substrato. Segundo Ugarte et al. (2008), a vermiculita é um silicato hidratado de magnésio, alumínio e ferro, contendo em média 20,6 % de MgO.

Conforme se aumenta a temperatura de pirólise, aumenta-se também o pH e a porcentagem de cinzas, e conseqüentemente, maior o teor de nutrientes disponíveis, conforme apresentado na caracterização química dos biocarvões na Tabela 2.

O aumento dos valores de pH, Na e K e redução de P está de acordo com resultados encontrados por Fascella et al. (2020), ao utilizarem turfa e biocarvão de madeira de coníferas. Prasad et al. (2017) também observaram aumento do pH, K e redução do P ao avaliarem substratos composto por turfa e diferentes doses de materiais provenientes de madeira carbonizados em temperatura entre 450 a 600 °C. No entanto, esses autores utilizaram doses de biocarvão mais altas (0, 25, 50 e 75% do volume) do que o presente estudo (0; 2,5; 5; 10; 15%), podendo ter elevado o pH acima de 6,5, causando redução no P disponível. Entretanto, os valores de pH apresentados pelos substratos foram abaixo do limitante pra a disponibilidade de P (<6,5) (Tabela 4).

Os tratamentos influenciaram significativamente a disponibilidade de P no substrato. Os tratamentos T13 (10% a 600°C), T16 (15% a 450°C) e T17 (15% a 600°C) apresentaram menor disponibilidade de P. Pode-se induzir que a disponibilidade de P é influenciada pela temperatura de pirólise e taxa de biocarvão, onde a aplicação de doses acima de 10% de biocarvões produzidos a 600°C e doses acima de 15% para biocarvões produzidos a 450°C causaram limitações na disponibilidade de P. Alguns autores relatam sorção de P no biocarvão, o que pode explicar este fato. Trazzi et al. (2016) e Peng et al. (2012) observaram que o P foi adsorvido eficientemente em biocarvões produzidos a temperaturas mais elevadas, indicando que a adsorção de P aumenta com a temperatura de pirólise. No entanto, pesquisas envolvendo as propriedades de sorção e dessorção de P no biocarvão são recentes. Morales et al. (2013) descobriram que dependendo de como o biocarvão é produzido pode resultar em propriedades muito diferentes para sorção e dessorção de P. A biodisponibilidade de P parece ser afetada pela matéria-prima usada e

pelas condições de pirólise. O aumento da temperatura de pirólise aumenta a superfície específica do biocarvão e diminui a matéria volátil e grupos funcionais (TRAZZI et al., 2016), aumentando também a porosidade do biocarvão conforme o aumento da temperatura de pirólise (BARBOSA, 2016). O aumento da superfície específica e do volume de poros pode ocasionar na maior difusão interna do P no biocarvão, fazendo com que o P fique incluso nos poros, podendo reduzir a extração do elemento, sendo utilizada a extração em água.

Com relação ao Ca e Mg, todos os substratos apresentaram teores acima do nível crítico para produção de mudas de *Eucalyptus*, cujo o nível crítico são 0,20 e 0,05 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, respectivamente, conforme Barros e Novais (1997).

Os teores de K apresentaram valores acima do nível crítico (10 mg dm<sup>-3</sup>) determinado por Barros e Novais (1997). Com relação ao P, os substratos T3, T12, T13, T16 E T17 apresentaram valores abaixo do crítico, considerando tanto valores para solos argilosos (< 60 mg dm<sup>-3</sup>) quanto para solos arenosos (< 80 mg dm<sup>-3</sup>) a serem utilizados como substratos para produção de mudas de *Eucalyptus*, de acordo com Barros e Novais (1997). Os demais tratamentos apresentaram teores acima ao teor crítico. No entanto, deve-se atentar ao volume de substrato utilizado, tempo de desenvolvimento da muda, e ocorrência de perdas por lixiviação provocadas por irrigação das mudas no viveiro.

Os substratos devem apresentar boas características físicas para obtenção de mudas de boa qualidade. A densidade do substrato (DS), porosidade total (PT) e água facilmente disponível (AFD) foram significativamente influenciadas pelos tratamentos (Tabela 5). A densidade expressa a relação entre a massa e o volume do substrato. O valor de densidade é importante para interpretar características como, porosidade, espaço de aeração, disponibilidade de água e teor de nutrientes (KAMPF, 2000).

O substrato deve possuir baixa densidade, possibilitando bom desenvolvimento radicular, ser eficaz em trocas gasosas e no rápido fornecimento oxigênio para as raízes, no entanto, deve ser capaz de reter água e de sustentar as mudas. O peso do substrato influencia no transporte e manejo das mudas no viveiro.

**Tabela 5** – Caracterização física<sup>1</sup> do substrato

TRAT	DS	PT	EA	AFD	AT
	g cm <sup>-3</sup>	----- % -----			
<b>T1</b>	0,177 b	90,8 b	36,9 a	14,7 a	0,5 a
<b>T2</b>	0,185 b	83,0 c	36,0 a	13,2 b	0,6 a
<b>T3</b>	0,191 b	89,8 b	33,4 a	15,6 a	0,5 a
<b>T4</b>	0,189 b	98,2 a	38,1 a	16,3 a	0,3 a



<b>T5</b>	0,197 b	97,8 a	35,3 a	16,5 a	0,5 a
<b>T6</b>	0,189 b	95,2 a	38,4 a	15,9 a	0,3 a
<b>T7</b>	0,194 b	88,5 b	35,1 a	15,4 a	0,1 a
<b>T8</b>	0,194 b	74,8 d	30,9 a	13,0 b	0,2 a
<b>T9</b>	0,212 a	91,7 b	39,0 a	14,9 a	0,3 a
<b>T10</b>	0,194 b	87,2 b	35,4 a	15,5 a	0,2 a
<b>T11</b>	0,191 b	90,7 b	36,4 a	15,4 a	0,3 a
<b>T12</b>	0,191 b	76,1 d	31,9 a	12,4 b	1,2 a
<b>T13</b>	0,208 a	98,9 a	36,1 a	16,6 a	0,6 a
<b>T14</b>	0,203 a	94,8 a	38,3 a	16,5 a	1,3 a
<b>T15</b>	0,198 a	94,6 a	40,9 a	13,5 b	0,4 a
<b>T16</b>	0,201 a	83,3 c	35,0 a	13,3 b	0,4 a
<b>T17</b>	0,207 a	82,9 c	31,6 a	15,6 a	0,3 a

T1 = (dose 0%); T2 = (dose 2,5% a 250°C); T3 = (dose 2,5% a 350°C); T4 = (dose 2,5% a 450°C); T5 = (dose 2,5% a 600°C); T6 = (dose 5% a 250°C); T7 = (dose 5% a 350°C); T8 = (dose 5% a 450°C); T9 = (dose 5% a 600°C); T10 = (dose 10% a 250°C); T11 = (dose 10% a 350°C); T12 = (dose 10% a 450°C); T13 = (dose 10% a 600°C); T14 = (dose 15% a 250°C); T15 = (dose 15% a 350°C); T16 = (dose 15% a 450°C); T17 = (dose 15% a 600°C).<sup>1</sup>DS = densidade do substrato; PT = porosidade total; EA = espaço de aeração; AFD = água facilmente disponível; AT = água tamponante. Médias seguidas de mesma letra na vertical não diferem, pelo teste Scott-Knott (p<0,05).

Os substratos apresentaram baixa densidade, variando de 0,177 g cm<sup>-3</sup> para o T1, tratamento sem biocarvão, até 0,212 g cm<sup>-3</sup> no T9. Segundo a recomendação de Gonçalves e Poggiani (1996), nenhum dos substratos ultrapassou o limite máximo (>0,5 g dm<sup>-3</sup>), porém todos apresentaram densidade abaixo do recomendado (<0,25 g cm<sup>-3</sup>). No entanto, a densidade baixa não foi um fator limitante para o desenvolvimento das mudas neste trabalho. Kämpf (2005) salienta que se deve levar em conta o tamanho do recipiente para adequar valores de densidade do substrato, variando de 0,100 a 0,350 g cm<sup>-3</sup> para bandejas multicelulares. Schafer et al. (2015) ressaltaram que densidades de substratos de 0,2 a 0,3 g cm<sup>-3</sup> podem ser usados tanto para bandejas, quanto vasos de até 15 cm.

A PT tem como valor ótimo 85%, e é composta pelo espaço de aeração e água facilmente disponível, que possuem valor ótimo de 20 a 30%, água tamponante, com valor ideal por volta de 5% e remanescente do substrato (DE BOODT e VERDONCK, 1972; CATTIVELLO, 1991, KÄMPF, 2005). Os tratamentos apresentaram porosidade total próximos do ideal, variando entre 74 a 98%. No entanto, todos os tratamentos apresentaram valores de EA acima da faixa ideal (20-30%) e AFD abaixo do ideal (20-30%). Essas diferenças repercutem diretamente no manejo de irrigação em condições de cultivo, pois as características do material em relação à sua capacidade de retenção de água determinarão a necessidade da irrigação. Os valores de EA acima do ideal resultam em alta capacidade de drenagem, reduzindo os valores de AD para as mudas, nesse caso, recomenda-se aumentar o número de irrigações e reduzir o volume de água aplicado.

Silva et al. (2012) observaram que os substratos com maior porosidade total promovem maior qualidade do sistema radicular e, por consequência, gera mudas com maior massa seca de parte aérea e radicular.

A alta PT e baixa AFD pode estar relacionado às características dos componentes de maior volume do substrato, à fibra de coco e à vermiculita. A fibra de coco apresenta porosidade total média de 95,9%, espaço de aeração de 45,3% e água facilmente disponível de 18,6%, valores parecidos com os substratos analisados neste estudo (NOGUEIRA et al., 2000). A vermiculita é um material leve, inerte, com grande aeração e capacidade de reter água.

A formulação adequada do substrato é um requisito fundamental para o sucesso do desenvolvimento das mudas. O substrato ideal deve ser de fácil aquisição e transporte, deve apresentar pH adequado e disponibilidade de nutrientes (ALMEIDA et al. 2012; KUSDRA et al., 2008), boa textura e estrutura (SILVA et al., 2012). A maioria dos estudos realizados sobre adição de biocarvão como componente de substratos para a produção de mudas avalia aspectos morfológicos das mudas. Informações sobre a caracterização química e física dos substratos ainda é muito limitada. Portanto, considerando a importância da qualidade do substrato para a produção de mudas de eucalipto, estudos dessa natureza apresentam grande relevância.

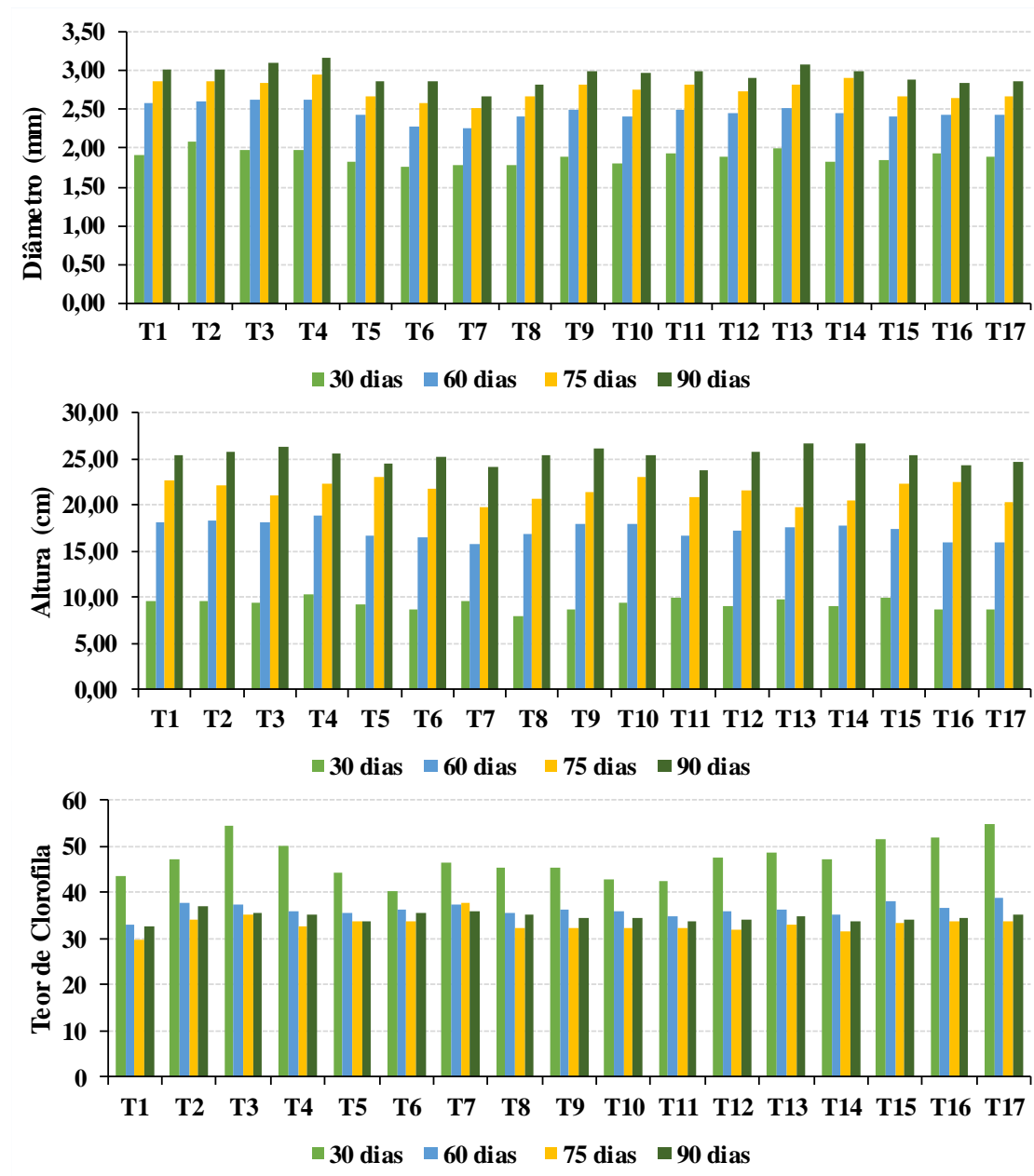
### **3.2 Análises morfológicas**

As médias do diâmetro do colo, altura da parte aérea e teor de clorofila total (SPAD) em função dos tratamentos dos substratos, avaliadas aos 30, 60, 75 e 90 dias estão presentes na Figura 5. O desenvolvimento das mudas foi semelhante para esses fatores, não apresentando diferenças significativas entre tratamentos, ou seja, a adição de doses de biocarvão de casca de eucalipto (0; 2,5; 5; 10 e 15% v/v) sob diferentes temperaturas de pirólise (250, 350, 450 e 600°C) não favoreceu ou prejudicou o desenvolvimento das mudas.

Apesar de não haver diferenças significativas, os tratamentos T1, T2, T3, T4, T9, T11 e T14 apresentaram os maiores diâmetros do colo (>3,0 mm) e os tratamentos T1, T2, T3, T4, T6, T8, T9, T10, T12, T13, T14 e T15 apresentaram altura maior que 25 cm na fase de expedição das mudas (aos 90 dias). O teor de clorofila apresentou a mesma tendência em todos os tratamentos. A medição da altura da parte aérea e diâmetro do coleto são métodos facilmente mensuráveis, não sendo um método destrutivo, e

considerado por muitos pesquisadores como uma das mais importantes características para expressar a qualidade das mudas e estimar a sobrevivência após o plantio das mudas (GOMES, 1978; GOMES et al. 2002; CARNEIRO, 1995; SOUZA et al., 2006).

As mudas apresentaram teores de clorofila elevados na fase inicial das mudas (aos 30 dias), reduzindo sua concentração com o desenvolvimento das mudas até aos 75 dias. Aos 90 dias, as mudas voltaram a apresentar incremento de clorofila nas folhas. As diferentes doses de biocarvão na composição dos substratos não ter influenciado significativamente o teor de clorofila nas folhas contradizem com resultados de outros autores, como Fascella et al. (2018; 2020), que observaram influência do aumento de doses de biocarvão na redução no teor de clorofila e Cavalcante et al. (2012), que relataram aumento do teor de clorofila em mudas de maracujazeiro, em função do aumento de doses de biocarvão até 50% do v/v.



**Figura 5** – Avaliações do diâmetro do colo, altura e teor de clorofila (SPAD) das mudas de *Eucalyptus grandis*, em função dos tratamentos, aos 30, 60, 75 e 90 dias após a estaquia.

Avaliações de altura (H), diâmetro (D), volume radicular (VR), fitomassa seca da parte aérea (FSPA), fitomassa seca radicular (FSR), fitomassa seca total (FST), relação altura e fitomassa seca da parte aérea (H/FSPA), relação da fitomassa seca da parte aérea e radicular (FSPA/FSR) e índice de qualidade de Dickson (IQD) permitem inferir sobre a qualidade das mudas e se estão aptas para serem levadas para o campo (Tabela 6).

Munguambe (2012) determinou valores padrão para avaliação de qualidade das mudas de *Eucalyptus spp.* em função de estudos realizados por diversos autores.

Na avaliação de crescimento em altura e diâmetro do colo, as mudas não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos avaliados (Tabela 6). No entanto, observa-se que os valores de H variaram de 23,74 a 26,71 cm, valores dentro dos padrões para mudas de eucalipto (20-35 cm) (GOMES et al., 2003; WENDLING E DUTRA, 2010). Em relação ao diâmetro do colo, todos os tratamentos apresentaram valores considerados aptos para o plantio no campo (2-3,5 mm) (GOMES et al., 1996; STURION & ANTUNES, 2000). Segundo Moreira e Moreira (1996), o diâmetro é um dos melhores indicadores de qualidade de mudas. Maior espessura do caule permite maior firmeza da parte aérea (GOMES E PAIVA, 2004).

**Tabela 6** – Médias dos parâmetros de avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus urograndis* aos 90 dias após o estaqueamento

TRAT	D (mm)	H (cm)	VR (mL)	FSPA ----- (g)	FSR ----- (g)	FST ----- (g)	H/FSPA	FSPA/FSR	IQD
<b>T1</b>	3,01 a	25,39 a	4,94 a	1,96 a	0,71 a	2,67 a	16,18 a	2,99 b	0,24 a
<b>T2</b>	3,01 a	25,74 a	6,22 a	1,91 a	0,82 a	2,73 a	14,93 a	2,53 b	0,25 a
<b>T3</b>	3,11 a	26,38 a	5,43 a	2,01 a	0,83 a	2,84 a	15,02 a	2,56 b	0,26 a
<b>T4</b>	3,16 a	25,63 a	4,91 a	1,98 a	0,64 b	2,62 a	13,72 a	3,26 b	0,23 a
<b>T5</b>	2,87 a	24,55 a	5,04 a	1,71 a	0,64 b	2,35 a	15,59 a	3,04 b	0,21 a
<b>T6</b>	2,86 a	25,29 a	4,91 a	1,67 a	0,58 b	2,25 a	17,78 a	3,19 b	0,19 a
<b>T7</b>	2,68 a	24,15 a	4,18 b	1,32 a	0,47 b	1,80 a	20,28 a	2,95 b	0,15 a
<b>T8</b>	2,82 a	25,45 a	4,02 b	1,80 a	0,63 b	2,43 a	17,00 a	3,02 b	0,20 a
<b>T9</b>	3,00 a	26,07 a	5,45 a	2,05 a	0,76 a	2,81 a	14,64 a	2,89 b	0,25 a
<b>T10</b>	2,98 a	25,48 a	5,93 a	2,01 a	0,73 a	2,74 a	14,60 a	3,19 b	0,24 a
<b>T11</b>	3,00 a	23,74 a	4,68 a	1,84 a	0,62 b	2,46 a	17,38 a	3,03 b	0,23 a
<b>T12</b>	2,92 a	25,80 a	5,20 a	1,87 a	0,68 a	2,54 a	18,21 a	2,98 b	0,22 a
<b>T13</b>	3,08 a	26,63 a	3,93 b	2,04 a	0,58 b	2,62 a	15,38 a	3,80 a	0,22 a
<b>T14</b>	3,00 a	26,71 a	5,07 a	1,94 a	0,65 b	2,59 a	14,72 a	3,07 b	0,22 a
<b>T15</b>	2,88 a	25,34 a	4,46 b	1,85 a	0,55 b	2,40 a	17,99 a	3,52 a	0,20 a
<b>T16</b>	2,84 a	24,33 a	3,82 b	1,63 a	0,50 b	2,13 a	17,04 a	3,35 b	0,18 a
<b>T17</b>	2,87 a	24,76 a	3,52 b	1,79 a	0,44 b	2,22 a	15,36 a	4,19 a	0,17 a

T1 = (dose 0%); T2 = (dose 2,5% a 250°C); T3 = (dose 2,5% a 350°C); T4 = (dose 2,5% a 450°C); T5 = (dose 2,5% a 600°C); T6 = (dose 5% a 250°C); T7 = (dose 5% a 350°C); T8 = (dose 5% a 450°C); T9 = (dose 5% a 600°C); T10 = (dose 10% a 250°C); T11 = (dose 10% a 350°C); T12 = (dose 10% a 450°C); T13 = (dose 10% a 600°C); T14 = (dose 15% a 250°C); T15 = (dose 15% a 350°C); T16 = (dose 15% a 450°C); T17 = (dose 15% a 600°C). H = altura da parte aérea; D = diâmetro do colo; FSPA = fitomassa seca da parte aérea; FSR = fitomassa seca da raiz; VR = volume radicular; IQD = índice de qualidade de Dickson. Médias seguidas de mesma letra na vertical não diferem, pelo teste Scott-Knott (p<0,05).

A avaliação do volume radicular permite relacionar o desenvolvimento radicular das mudas. Esse parâmetro é obtido pelo deslocamento da água causado pela imersão da raiz. Houve influência significativa dos tratamentos sobre o volume radicular, no qual os tratamentos T7, T8, T13, T15, T16 e T17 apresentaram menor volume de raízes, significativamente iguais.

Avaliações de fitomassa seca das plantas e suas relações são considerados indicadores importantes para avaliação da qualidade das mudas, no entanto, não são muito utilizados por sua determinação envolver a destruição completa das mudas (AZEVEDO, 2003). Dentre esses parâmetros, apenas a massa seca radicular e a relação da massa seca da parte aérea e radicular apresentaram diferenças significativas em função dos tratamentos.

A FST apresentou valores entre 1,8 a 2,74 g; a FSPA ficou em torno de 1,32 a 2,05g e a FSR, entre 0,44 a 0,83 g. Resultados semelhantes foram obtidos por Freitas et al. (2010) e Fanola et al. (2019). Eloy et al. (2013) também obtiveram valores similares de FSPA, no entanto, valores de FSR foram cerca de 2 vezes menores do que encontrado pelo autor. Sistema radicular reduzido pode resultar mal desempenho das mudas em campo (FREITAS et al., 2005).

Em geral, a relação FSPA/FSR variou de 2,54 a 4,19 apresentando valores semelhantes aos encontrados por Munguambe (2013). Os tratamentos T13, T15 e T17 foram os que apresentaram maior relação FSPA/FSR, não apresentando diferenças significativas. A relação da FSPA/FSR permite inferir sobre a qualidade das mudas, pois indica o equilíbrio de desenvolvimento da parte aérea e radicular das mudas, valores muito altos pela tendência de desequilíbrio no crescimento, com possíveis problemas no que de absorção de água que consiga suprir a necessidade da parte aérea (GOMES et al., 2013). A proporção de matéria seca aérea e radicular das mudas foram superiores do ideal (2,0) proposto por alguns autores (BRISSETTE (1984 apud CRUZ; PAIVA; GUERRERO, 2006), porém, corrobora com resultados encontrados por outros autores (MUNGUAMBE, 2013).

Quanto ao IQD, os tratamentos não apresentaram efeito significativo. O IQD é apontado importante indicador de qualidade de mudas, pois são utilizados para seu cálculo a robustez e equilíbrio da distribuição da biomassa (FONSECA, 2000; CALDEIRA et al., 2005), ponderando várias características morfológicas importantes para avaliação da qualidade. Quanto maior o IQD, melhor é a qualidade da muda produzida (CALDEIRA et al., 2012).

Hunt (1990) e Gomes e Paiva (2004) salientam que o IQD deve ter o valor mínimo de 0,20. Dessa forma, quase todos os tratamentos analisados estão dentro do ideal, à exceção dos tratamentos T6, T7, T16 e T17. Porém, esse valor foi baseado na qualidade de mudas de outras espécies florestais (*Pseudotsuga menziessi* e *Picea abies*), podendo não ser o mais indicado para o eucalipto. Eloy et al. (2013) observaram diferenças significativas de IQD em função de dias de avaliação e volumes de tubetes, apresentando valores semelhantes a este trabalho, nos tratamentos com tubetes de 50 cm<sup>3</sup> aos 95 dias após emergência. Binotto (2007) observou IQD de 0,05 em mudas de *Eucalyptus grandis* aos 120 dias, enquanto Oliveira Junior (2009) obteve IQD médio de 0,11 em mudas de *Eucalyptus urophylla* produzidas em substrato comercial aos 100 dias, indicando dessa forma, que o IQD ideal depende da espécie em questão. Silva et al. (2012) observaram valores do IQD de, no máximo, 0,19, em mudas de eucalipto com 90 dias, cultivadas em substrato com fibra de coco + Vermiculita (1:1). Manguambe (2013) desenvolveu um estudo avaliando a fase de expedição de mudas (90 dias) de 4 clones de eucalipto (2 clones de *Eucalyptus urophylla* e dois clones de híbridos de *E. urophylla* x *E. grandis*), produzidos em tubetes de 54 cm<sup>3</sup>, em dois locais de viveiros comerciais. Apesar desse estudo apresentar valores de H, DC e relação FSPA/FSR semelhantes a esta pesquisa, os valores de FSPA, FSR e o IQD foram superiores.

Estudos na literatura mostram que o índice de qualidade de Dickson é uma característica variável (CALDEIRA et al., 2000a, 2000b; CALDEIRA et al., 2007; CALDEIRA et al., 2008a, 2008b; TRAZZI et al., 2010; KRATZ, 2011; TRAZZI, 2011). No entanto, pode-se inferir que esse índice pode variar em função da espécie, do manejo das mudas no viveiro, do substrato, do volume do recipiente e, principalmente, com a idade da muda (GOMES et al., 2013).

A maioria dos tratamentos apresentou mais de 85% das mudas com estrutura radicular aptos para serem levados a campo (Tabela 7), apenas o T16 apresentou valores menores (78,95%). A agregação do sistema radicular é um fator imprescindível para a sobrevivência e bom desenvolvimento das mudas no campo (MAEDA et al., 2006), pois irá influenciar na qualidade do desenvolvimento radicular no solo após o transplante e consequentemente absorção de água e nutrientes. Substratos que promovem boa agregação das raízes permitem que a retirada do torrão do tubete seja de forma eficiente, sem prejudicar o sistema radicular, favorecendo a sobrevivência e o crescimento inicial em campo (GOMES et al., 2003).

**Tabela 7** – Qualidade do sistema radicular das mudas de *Eucalyptus urograndis*, aos 90 dias após o estaqueamento

TRATAMENTOS	Qualidade do sistema radicular (%)			
	Ruim (C)	Bom (B)	Ótimo (A)	Aptos (A+B)
<b>T1</b>	8,82	0,00	91,18	91,18
<b>T2</b>	3,33	3,33	93,33	96,67
<b>T3</b>	3,33	0,00	96,67	96,67
<b>T4</b>	0,00	0,00	100,00	100,00
<b>T5</b>	12,50	3,13	84,38	87,50
<b>T6</b>	0,00	10,71	89,29	100,00
<b>T7</b>	9,52	14,29	76,19	90,48
<b>T8</b>	12,50	16,67	70,83	87,50
<b>T9</b>	0,00	3,13	96,88	100,00
<b>T10</b>	5,41	2,70	91,89	94,59
<b>T11</b>	5,88	5,88	88,24	94,12
<b>T12</b>	11,43	8,57	80,00	88,57
<b>T13</b>	11,43	5,71	82,86	88,57
<b>T14</b>	0,00	0,00	100,00	100,00
<b>T15</b>	4,00	4,00	92,00	96,00
<b>T16</b>	21,05	0,00	78,95	78,95
<b>T17</b>	3,85	3,85	92,31	96,15

T1 = (dose 0%); T2 = (dose 2,5% a 250°C); T3 = (dose 2,5% a 350°C); T4 = (dose 2,5% a 450°C); T5 = (dose 2,5% a 600°C); T6 = (dose 5% a 250°C); T7 = (dose 5% a 350°C); T8 = (dose 5% a 450°C); T9 = (dose 5% a 600°C); T10 = (dose 10% a 250°C); T11 = (dose 10% a 350°C); T12 = (dose 10% a 450°C); T13 = (dose 10% a 600°C); T14 = (dose 15% a 250°C); T15 = (dose 15% a 350°C); T16 = (dose 15% a 450°C); T17 = (dose 15% a 600°C).

Wendling et al. (2007) notaram correlação positiva entre a boa agregação radicular das mudas ao substrato com a facilidade de retirada das mudas do tubete, denotando que um substrato que promove uma boa agregação das raízes resulta em melhorias no processo de embalagem e expedição das mudas produzidas para o local de plantio definitivo. A estrutura do substrato depende das características dos materiais utilizados, como densidade, textura, diâmetro das partículas, retenção de água e proporção dos materiais na composição dos substratos (SIMON et al., 2016).

Silva et al. (2012) enfatizaram a forte correlação da avaliação da qualidade radicular com o desenvolvimento morfológico das mudas, sugerindo que seja considerado nas avaliações de qualidade de mudas. Substratos de maior porosidade total proporcionaram ótima qualidade radicular para mudas clonais de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* (SILVA et al., 2012).



Segundo Carrijo et al. (2002), a adição de fibra de coco ao substrato, em composição com outros materiais permitiu melhor estruturação física do substrato, favorecendo a agregação das raízes, além de elevar a quantidade de água disponível (NOGUEIRA et al., 2000), e o desenvolvimento das mudas em condições com menor umidade. Silva et al. (2012) relacionaram o bom desempenho dos substratos às características da fibra de coco e casca de arroz carbonizada. Rezende et al. (2016) definiram que substratos com fibra de coco e 25% de casca de arroz carbonizada foi suficiente para o bom desenvolvimento de mudas de teca.

Silva et.al. (2019) avaliaram o desenvolvimento de mudas de alface utilizando substrato com biocarvão de serragem de eucalipto com doses de 0, 10, 15, 25, 50 e 75% misturado a um substrato comercial Bioplant<sup>®</sup> e concluíram que a concentração de 5% do biocarvão apresentou viabilidade, e concentrações acima desse valor não contribuíram para o desenvolvimento das mudas de alface. Petter (2012) avaliou o desenvolvimento de duas espécies de eucalipto, em função de doses de biocarvão no substrato (0; 7,5; 15; 30 e 60% do v/v) adicionadas ao substrato Germinar<sup>®</sup>, e verificou que a adição de 7,5% de biocarvão promoveu melhor desenvolvimento da altura e diâmetro do coleto para o *Eucalyptus citriodora*, no entanto, para o *Eucalyptus urophylla* a adição de biocarvão ocasionou redução da altura e diâmetro das mudas. Zanetti et al. (2003) concluíram que a adição de 10% de finos de carvão não influenciou o desenvolvimento de porta-enxertos de limoeiro “Cravo”, porém, a adição de 20% prejudicou o desenvolvimento.

### **3.3. Análises químicas do tecido vegetal**

A diagnose do estado nutricional das plantas por meio da análise do tecido foliar permite inferir se o manejo utilizado está proporcionando bom desenvolvimento das plantas com suprimento de nutrientes adequado. A folha é o órgão que melhor representa o estado nutricional das plantas, pois é onde ocorre os principais processos metabólicos (FAQUIN, 2002).

A análise química de macronutrientes do tecido vegetal da parte aérea das mudas de *Eucalyptus urograndis* está presente na Tabela 8. Foram encontradas diferenças significativas apenas para os teores de Ca, em função dos tratamentos. Os teores de N, P, Na, K e Mg foram considerados iguais pelo teste de médias.

**Tabela 8** – Teores médios de macronutrientes da parte aérea das mudas de *Eucalyptus grandis* em função dos tratamentos

TRAT	N	P	Na	K	Ca	Mg
	----- g kg <sup>-1</sup> -----					
T1	14,08 a	1,19 a	7,21 a	34,87 a	1,05 b	2,59 a
T2	16,92 a	1,24 a	7,11 a	38,48 a	1,12 b	2,71 a
T3	15,70 a	1,14 a	6,56 a	35,37 a	1,16 b	2,80 a
T4	15,80 a	1,21 a	7,06 a	37,36 a	1,23 b	2,88 a
T5	16,16 a	1,26 a	7,13 a	37,10 a	1,23 b	2,87 a
T6	16,24 a	1,37 a	7,78 a	36,93 a	1,26 b	2,68 a
T7	16,74 a	1,26 a	7,83 a	34,88 a	1,20 b	2,75 a
T8	15,14 a	1,53 a	8,36 a	34,29 a	1,45 a	3,05 a
T9	15,72 a	1,30 a	6,98 a	33,44 a	1,45 a	2,88 a
T10	15,74 a	1,26 a	6,84 a	33,53 a	1,37 b	2,95 a
T11	15,24 a	1,30 a	7,26 a	34,86 a	1,48 a	2,84 a
T12	15,64 a	1,34 a	6,96 a	33,56 a	1,59 a	2,93 a
T13	16,62 a	1,38 a	7,58 a	35,93 a	1,65 a	2,72 a
T14	14,78 a	1,22 a	7,04 a	34,68 a	1,55 a	2,81 a
T15	16,50 a	1,32 a	7,56 a	36,94 a	1,48 a	2,72 a
T16	15,84 a	1,42 a	7,20 a	35,12 a	1,65 a	2,56 a
T17	16,48 a	1,31 a	7,24 a	35,05 a	1,75 a	2,71 a

T1 = (dose 0%); T2 = (dose 2,5% a 250°C); T3 = (dose 2,5% a 350°C); T4 = (dose 2,5% a 450°C); T5 = (dose 2,5% a 600°C); T6 = (dose 5% a 250°C); T7 = (dose 5% a 350°C); T8 = (dose 5% a 450°C); T9 = (dose 5% a 600°C); T10 = (dose 10% a 250°C); T11 = (dose 10% a 350°C); T12 = (dose 10% a 450°C); T13 = (dose 10% a 600°C); T14 = (dose 15% a 250°C); T15 = (dose 15% a 350°C); T16 = (dose 15% a 450°C); T17 = (dose 15% a 600°C). Médias seguidas de mesma letra na vertical não diferem, pelo teste Scott-Knott (p<0,05). N por destilação Kjeldahl (Tedesco et al. 1995) = P = fósforo por colorimetria; Na e K = potássio por fotometria de chama; Ca e Mg = cálcio, magnésio por determinação em absorção atômica.

Os teores de Ca nas mudas variaram de 1,05 g kg<sup>-1</sup> (T1) a 1,75 g kg<sup>-1</sup> (T17) entre os tratamentos, teores um pouco abaixo da faixa encontrada por alguns autores em *Eucalyptus grandis* (SILVEIRA et al., 2001; CAMARGO, 1997). O Ca apresentou uma tendência em função das doses e temperatura de pirólise dos tratamentos, em que o aumento das doses proporcionou aumento dos teores de Ca no tecido vegetal, sendo maiores para os tratamentos com temperaturas de pirólise mais elevadas (450 e 600°C) em comparação às temperaturas menores (250 e 350°C). O aumento dos teores de Ca foliar pode estar correlacionado com o aumento das doses no substrato influenciada pela adição dos biocarvões (Tabela 4). Prasad et al. (2017) observaram um aumento no teor de Ca em mudas de tomate, em função do aumento de doses de biocarvão provenientes de diferentes resíduos de madeira, corroborando com os resultados. No entanto, as doses de biocarvão também influenciaram nos teores de N, K, P e Mg, o que difere dos resultados encontrados neste trabalho (PRASAD et al., 2017).

Silveira et al. (2001) apresentaram teores de macro e micronutrientes de 6 materiais genéticos de *Eucalyptus grandis* apresentados por alguns autores na fase de viveiro (SILVEIRA, 2000; SILVEIRA et al., 2000c; HIGASHI et al., 1998; CAMARGO, 1997). Os teores de N, P e Mg são semelhantes aos encontrados pelos autores em fase de expedição das mudas.

O teor de magnésio nas folhas ficou próximo a 2,7 mg kg<sup>-1</sup> para os tratamentos, resultado semelhante ao apresentado por Silveira et al. (2001). O teor de nitrogênio variou de 14,08 a 16,92 g kg<sup>-1</sup>, faixa considerada adequada para o crescimento de mudas de eucalipto (13,5-18 g kg<sup>-1</sup>) por Gonçalves (1995) e condizentes com resultados de Munguambe (2012).

Apesar de os tratamentos com adição dos biocarvões de 450°C com dose de 15% (T16) e 600°C com doses de 10% (T13) e 15% (T17) terem apresentado valores reduzidos de P no substrato (Tabela 4), as mudas não apresentaram deficiências nutricionais, apresentando teores dentro da faixa adequada para crescimento de *Eucalyptus* (0,9-1,3 g kg<sup>-1</sup>) para todos os tratamentos (GONÇALVES, 1995).

O fornecimento adequado de potássio para as mudas ao final do ciclo permite que tenham uma boa rustificação, visto que o K atua no controle osmótico das células, tornam-se capazes de regular suas perdas de umidade, além de facilitar o engrossamento do caule, fator essencial para a adaptação das mudas às condições adversas de plantio (GONÇALVES, 1995; SILVEIRA et al., 2000; FREITAS et al., 2010). As concentrações foliares de K em todos os tratamentos ficaram acima de 20 g kg<sup>-1</sup>, valor sugerido como adequado para Silveira et al., (2001) e maiores do que encontrados por diversos autores (MUNGUAMBE, 2012; DELL, et al., 1995; GONÇALVES, 1995; JUDD et al., 1996; LEITE, 2003; SILVEIRA et al., 2001).

Davila et al. (2011) observaram que a aplicação de doses crescentes de K promoveram aumento das concentrações foliares desse elemento. A aplicação de 249, 747 e 1494 mg L<sup>-1</sup> promoveu concentrações de K nas folhas de aproximadamente de 28 a 36 g kg<sup>-1</sup>, concentrações semelhantes fornecida pelos substratos (Tabela 4) e no tecido vegetal das mudas (Tabela 8). Altas doses de K podem reduzir a absorção de cátions de menor mobilidade, como Ca e Mg (MARSCHNER, 1995). Schonau (1981), ao estudar o efeito da aplicação de fertilizantes sobre os teores foliares dos nutrientes em *E. grandis*, verificou que a aplicação de K reduziu os teores de Ca, Zn e Fe e não afetou os de Mg.

As análises de micronutrientes da parte aérea do tecido vegetal das mudas de *Eucalyptus grandis* mostraram que não houve efeito dos tratamentos nos teores dos

micronutrientes, ferro (Fe), zinco (Zn) e cobre (Cu). No entanto, apresentaram significância para os teores de manganês (Mn) (Tabela 9).

**Tabela 9** – Teores médios de micronutrientes da parte aérea das mudas de *Eucalyptus urograndis* em função dos tratamentos

TRAT	Fe	Mn	Zn	Cu
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----			
<b>T1</b>	97,64 a	121,31 d	10,24 a	3,39 a
<b>T2</b>	86,92 a	182,56 d	10,57 a	4,04 a
<b>T3</b>	78,02 a	200,97 c	10,62 a	3,14 a
<b>T4</b>	87,55 a	160,17 d	13,23 a	3,63 a
<b>T5</b>	89,88 a	161,82 d	11,72 a	4,03 a
<b>T6</b>	87,92 a	277,42 b	13,06 a	4,81 a
<b>T7</b>	86,82 a	253,47 c	15,61 a	4,24 a
<b>T8</b>	89,75 a	233,35 c	17,99 a	3,59 a
<b>T9</b>	94,94 a	220,87 c	16,10 a	4,16 a
<b>T10</b>	111,66 a	403,92 a	31,18 a	4,87 a
<b>T11</b>	79,20 a	319,15 b	19,40 a	3,93 a
<b>T12</b>	88,24 a	239,27 c	19,72 a	5,21 a
<b>T13</b>	81,18 a	199,53 c	20,95 a	6,16 a
<b>T14</b>	83,24 a	391,33 a	17,80 a	5,13 a
<b>T15</b>	75,11 a	288,18 b	16,93 a	4,52 a
<b>T16</b>	100,36 a	227,31 c	20,54 a	3,40 a
<b>T17</b>	77,04 a	156,28 d	17,51 a	4,83 a

T1 = (dose 0%); T2 = (dose 2,5% a 250°C); T3 = (dose 2,5% a 350°C); T4 = (dose 2,5% a 450°C); T5 = (dose 2,5% a 600°C); T6 = (dose 5% a 250°C); T7 = (dose 5% a 350°C); T8 = (dose 5% a 450°C); T9 = (dose 5% a 600°C); T10 = (dose 10% a 250°C); T11 = (dose 10% a 350°C); T12 = (dose 10% a 450°C); T13 = (dose 10% a 600°C); T14 = (dose 15% a 250°C); T15 = (dose 15% a 350°C); T16 = (dose 15% a 450°C); T17 = (dose 15% a 600°C). Médias seguidas de mesma letra na vertical não diferem, pelo teste Scott-Knott (p<0,05). Fe, Mn, Zn e Cu = determinação por absorção atômica.

Os teores de Fe, Zn e Cu da parte aérea de mudas foram semelhantes aos apresentados como adequados por alguns autores (SILVEIRA, 2000; SILVEIRA et al., 2000c; HIGASHI et al., 1998). Os tratamentos T10 e T14 apresentaram os maiores teores de manganês, podendo estar relacionados às maiores doses (10 e 15% v/v) de biocarvão produzido à 250°C, podendo indicar a maior presença de Mn em biocarvões produzidos a 250°C.

Em geral, os tratamentos proporcionaram às mudas bom estado nutricional, condizentes com os teores encontrados por diversos autores.

#### 4. CONCLUSÕES

O uso do biocarvão de casca de eucalipto, como componente de substratos é uma alternativa viável para a produção de mudas de *Eucalyptus grandis*.

Os substratos proporcionaram bom desenvolvimento radicular das mudas, apresentando-se aptos para plantio em campo.

Tomando por base as características de substrato e análises morfológicas, os tratamentos T16 e T17 foram inferiores aos demais, não sendo recomendadas doses de biocarvão maiores ou iguais que 15% produzidos a temperaturas de pirólise de 450°C e 600°C.

As mudas avaliadas apresentaram um bom estado nutricional, com concentrações de macro e micronutrientes dentro da faixa considerada adequada para produção de mudas de *Eucalyptus*.

#### 5. REFERÊNCIAS

- AGUIAR, I. B.; VALERI, S. V.; BANZATTO, D. A. B. Seleção de componentes de substrato para produção de mudas de eucalipto em tubetes. **IPEF** n. c, p. 36–43, 1989.
- ARRUDA, M. R. DE et al. Enraizamento de estacas herbáceas de guaranazeiro em diferentes substratos. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 1, p. 236–241, 2007.
- AZEVEDO, M. I. R. **Qualidade de mudas de cedro-rosa (*Cedrela Fissilis* vell) e de Ipê marelo (*Tabebuia serratifolia*(vahl) wich) produzida em diferentes substratos e tubetes**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 90 f. 2003.
- BAILEY, D. A. et al. **Greenhouse substrates and fertilization**. Raleigh: North Caroline State University Available, 2004.
- BARBOSA, C. F. **Caracterização de biocarvões de palha de café e casca de eucalipto produzidos a 350 e 600 °C**. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo. Alegre-ES, 76 fls. 2016.
- BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F. Nutrição e adubação de eucalipto. **Inf. Agropec.**, 18:70-75, 1997.
- BINOTTO, A. F. **Relação entre variáveis de crescimento e o Índice de Qualidade de Dickson em mudas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maid e *Pinus elliottii* var. elliottii - Engelm**. 2007. 53 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

- CALDEIRA, M. V. W.; BLUM, H.; BALBINOT, R.; LOMBARDI, K. C. Uso do resíduo do algodão no substrato para produção de mudas florestais. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 6, p. 191 - 202. 2008a.
- CALDEIRA, M. V. W.; MARCOLIN, M.; MORAES, E.; SCHAADT, S. S. Influência do resíduo da indústria do algodão na formulação de substrato para produção de mudas de *Schinus terebinthifolius* Raddi, *Archontophoenix alexandrae* Wendl. et Drude e *Archontophoenix cunninghamiana* Wendl. Et Drude. **Ambiência**, Guarapuava, v. 3, p. 1 - 8, 2007.
- CALDEIRA, M. V. W.; ROSA, G. N.; FENILLI, T. A. B.; HARBS, R. M. P. Composto orgânico na produção de mudas de aroeira-vermelha. **Scientia Agraria**, v. 9, p. 27 - 33. 2008b.
- CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; BARICHELLO, L. R.; VOGET, H. L. M.; OLIVEIRA, L. S. Crescimento de mudas de *Eucalyptus saligna* Smith em função de diferentes doses de vermicomposto. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 28, n. 1/2, p. 19 - 30, 2000a.
- CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; TEDESCO, N. Crescimento de mudas de *Acacia mearnsii* em função de diferentes doses de vermicomposto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 57, p. 161 - 170, 2000b.
- CALDEIRA, M. V. W.; SPATHELF, P.; BARICHELLO, L. R.; VOGEL, H. L. M.; SCHUMACHER, M. V. Effect of different doses of vermicompost on the growth of *Apuleia leiocarpa* (Vog) Macbr. seedlings. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 3, p. 11 - 17, 2005.
- CAMARGO, M. A. F. **Matéria seca, concentração e conteúdo de macronutrientes em mudas de clones de eucalipto, em função da idade**. Piracicaba, Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 94 p., 1997.
- CARNEIRO, J. G. A. **Produção e controle de qualidade de mudas florestais**. Curitiba: UFPR/FUPEF; Campos: UENF, 451 p. 1995.
- CARRIJO, O. A.; LIZ, R. S. de; MAKISHIMA, N. Fibra da casca do coco verde como substrato agrícola. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 20, n. 4, p. 533-535, 2002.
- CATTIVELLO, C. Physical properties in commercial substrates and their relationships. **Acta Horticulturae**, Wageningen, v.294, p.207-214, 1991.
- CAVALCANTE, Í. H. L.; PETTER, F. A.; ALBANO, F. G.; SILVA, R. R. S.; SILVA Jr, G. B. Biochar no substrato para produção de mudas de maracujazeiro amarelo. **Revista de la Facultad de Agronomía**, 111 (1), 41-47, 2012.
- CORDEIRO, M. J. M. Crescimento e qualidade de mudas de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, produzidas em diferentes formulações de substrato à base de casca de eucalipto. **Journal of Chemical Information and Modeling**, p. 33, 2020.

CRUZ, C. A. F.; PAIVA, H. N.; GUERRERO, C. R. A. Efeito da adubação nitrogenada na produção de mudas de sete-casas (*Samanea inopinata* (Harms) Ducke). **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 4, p. 537-546, jul./ago. 2006.

DAVILA, F. S.; PAIVA, H. N.; LEITE, H. G.; BARROS, N. F.; LEITE, F. P. Efeito do potássio na fase de rustificação de mudas clonais de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, p. 13-19, 2011.

DE BOODT, M.; VERDONCK, O. The physical properties of the substrates in: Floriculture. **Acta Horticulturae**, Wageningen, v. 26, p. 37-44, 1972.

DELL, B.; MALAJACZUK, N.; GROVE, T.S. Nutrient disorders in plantation eucalypts. Canberra: **Australian Centre for International Agricultural Research**, 104p. 1995.

DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **Forest Chronicle**, Canada, v. 36, n. 1, p. 10-13, 1960.

EPSTEIN, E. **Nutrição Mineral de Plantas; princípios e perspectivas**: São Paulo: EDUSP, 341p. 1975.

ELOY, E.; CARON, B. O.; SCHIMIDT, D.; BEHLING, A.; SCHEWERS, L.; ELLI, E. F. Avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis* utilizando parâmetros morfológicos. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 43, n. 3, p. 373 - 384, 2013.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análises de solo**, 2a ed. Ministério da Agricultura e do Abastecimento, Rio de Janeiro, 2011.

EPA Method 3051A. Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, solids and oils (pp. 1–30). **Revison** 1, Feb, 2007, Washington, DC, 2007.

FANG, J.; ZHAN, L.; OK, Y. S.; GAO, B.. Minireview of potential applications of hydrochar derived from hydrothermal carbonization of biomass. **J. Ind. Eng. Chem.** 57, 15 e 21, 2018.

FANOLA, H. C. B. L.; ANTUNES, M. N.; OLIVEIRA, A. M.; NOVAES, A. B.; RODRIGUES, V. A. Qualidade e épocas de expedição de mudas de eucalipto produzidas em recipientes biodegradáveis. **IV Congresso Brasileiro de Eucalipto**. Salvador-BA, 2019.

FAQUIN, V. **Diagnose do estado nutricional das plantas**. Monografia (Especialização em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas no Agronegócio) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 77 f. 2002.

FASCELLA, G.; MAMMANO, M. M.; D'ANGIOLILLO, F.; ROUPHAEL, Y. Effects of conifers wood biochar as substrate component on ornamental performance,

photosynthetic activity and mineral composition of potted *Rosa rugosa*. **J. Hortic. Sci. Biotechnol.** 93(5), 519–528, 2018.

FASCELLA, G.; MAMMANO, M.M.; D'ANGIOLILLO, F.; PANNICO, A.; ROUPHAEL, Y. Coniferous wood biochar as substrate component of two containerized Lavender species: Effects on morpho-physiological traits and nutrients partitioning. **Sci. Hortic.** 267, 109356, 2020.

FONSECA, É. DE P. et al. Padrão de qualidade de mudas de *Trema micrantha* (L.) Blume, produzidas sob diferentes períodos de sombreamento. **Revista Árvore**, v. 26, n. 4, p. 515–523, 2002.

FREITAS, T. A. S. et al. Desempenho radicular de mudas de eucalipto produzidas em diferentes recipientes e substratos. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 6, p. 853-861, nov./dez. 2005.

FREITAS, T. A. S.; BARROSO, D. G.; SOUZA, L. S.; CARNEIRO, J. G. A.; PAULINO, G. M. Produção de mudas de eucalipto com substratos para sistema de blocos. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 34, n.5, p. 761-770, 2010.

FRENKEL, O.; JAISWAL, A.; ELAD, Y.; LEWI, B.; KAMMANN, C.; GRABER, E. The effect of biochar on plant diseases: what should we learn while designing biochar substrates? **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management** v. 25, n. 2, p. 153–162, 2017.

GOMES, D. R.; CALDEIRA, M. V. W.; DELARMELINA, W. M.; GONÇALVES, E. O.; TRAZZI, P. A. Lodo de esgoto como substrato para a produção de mudas de *Tectona grandis* L. **Revista Cerne**, v. 19, n. 1, p. 123 - 131, 2013.

GOMES, J. M. **Parâmetros morfológicos na avaliação de qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis*, produzidas em diferentes tamanhos de tubetes e de dosagens de N-P-K.** Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 166f. 2001.

GOMES, J. M.; COUTO, L.; LEITE, H. G.; COUTO, L.; BORGES, R. C. G.; FONSECA, E. Efeito de diferentes substratos na produção de mudas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, em “Win-Strip”. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 15, n. 1, p. 35-42, jan./fev. 1991.

GOMES, J. M.; COUTO, L.; LEITE, H. G.; XAVIER, A.; GARCIA, S. L. R. Crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis* em diferentes tamanhos de tubetes e fertilização N-P-K. **Revista Árvore**, Viçosa. v. 27. n. 2. p. 113-127, abr. 2003.

GOMES, J. M.; COUTO, L.; LEITE, H. G.; XAVIER, A.; GARCIA, S. L. R. Parâmetros morfológicos na avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 26, n. 6, p. 655-664, nov./dez. 2002.



- GOMES, J. M.; PAIVA, H. N. **Viveiros florestais**: propagação sexuada. 3ª edição. Viçosa-MG: UFV, 116p. 2004.
- GOMES, J. M.; PAIVA, H. N.; COUTO, L. Produção de mudas de eucalipto. **Informe Agropecuário**. Belo Horizonte, v. 18, n. 185, p. 15, 1996.
- GONÇALVES, J. L. M. **Recomendações de adubação para *Eucalyptus*, *Pinus* e espécies típicas da Mata Atlântica**. Piracicaba: FEALQ, 15 p. 1995. (Documentos Florestais, 23).
- GONÇALVES, J. L. M., SANTARELLI, E. G., NETO, S. P. M., & MANARA, M. P. Produção de mudas de espécies nativas: Substrato, nutrição, sombreamento e fertilização. In J. L. M. Gonçalves, & V. Benedetti (Eds.), *Nutrição e fertilização florestal* (Cap.11, pp.80-102). Piracicaba: IPEF, 2000.
- GONÇALVES, L. M.; POGGIANI, F. Substratos para produção de mudas florestais. In: **Congresso Latino Americano de Ciência do Solo**, 13., 1996, Águas de Lindóia. Resumos. Piracicaba, Sociedade Latino Americana de Ciência do Solo, 1996. 1 CD-ROM.
- GONZAGA, M. I. S.; MACKOWIAK, C. ALMEIDA, A. Q.; CARVALHO JÚNIOR, J. I. T. C. Biocarvão de lodo de esgoto e seu efeito no crescimento e nas características morfológicas de mudas de eucalipto (*Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden). **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 687, 2018.
- GUERRINI, I. A.; TRIGUEIRO, R. M. Physical and chemical attributes of substrates composed of biosolids and carbonized rice chaff. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 6, p. 1069–1076, 2004.
- HIGASHI, E. N.; SILVEIRA, R. L. V. A.; MOREIRA, A. **Nutrição mineral em mudas de *Eucalyptus grandis*: crescimento, produção de matéria seca, concentração e acúmulo de nutrientes em função da idade**. Relatório de pesquisa parceria Siderúrgica Barra Mansa e RR Agroflorestal, 1998. 21p. (dados não publicados).
- HUNT, G. A. Effect of styroblock design and cooper treatment on morphology of conifer seedlings. In: TARGET SEEDLING SYMPOSIUM, MEETING OF THE WESTERN FOREST NURSERY ASSOCIATIONS, GENERAL TECHNICAL REPORT RM-200, 1., 1990, Roseburg. **Proceedings...** Fort Collins: USDA, p. 218-222, 1990.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS. PEVS 2019: **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura** – SIDRA. 2019. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pevs/tabelas/brasil/2019>>. Acesso em 14 de abril de 2021.

- JAISSWAL, A. K.; GRABER, E. R.; ELAD, Y.; FRENKEL, O. **Biochar as a management tool for soilborne diseases affecting early stage nursery seedling production.** *Crop Protect.*, 120, p. 34-42, 2019.
- JAISSWAL, K. A.; ELAD, Y.; GRABER, E. R. & FRENKEL, O. Rhizoctonia solani suppression and plant growth promotion in cucumber as affected by biochar pyrolysis temperature, feedstock and concentration. *Soil Biol. Biochem.* 69, 110–118, 2013.
- JUDD, T. S.; ATTIWILL, P. M.; ADAMS, M. A. Nutrient concentrations in *Eucalyptus*: a synthesis in relation to differences between taxa, sites and components. In: ATTIWILL, P. M.; ADAMS, M. A. (Ed.). **Nutrition of eucalypts.** Collingwood: CSIRO, 1996. p. 123-154.
- KÄMPF A. N. Seleção de materiais para uso como substrato. In: KÄMPF NA; FERMINO MH. (Eds.) **Substratos para plantas: a base da produção vegetal em recipientes.** Porto Alegre: Gênese, p.139-145, 2000.
- KÄMPF, A. N. Substrato. In: KÄMPF, A. N. **Produção comercial de plantas ornamentais.** 2. ed. Guaíba: Agrolivros, p. 45 - 72. 2005.
- KRATZ, D. **Substratos renováveis na produção de mudas de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage e *Mimosa scabrella* Benth.** 2011. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- KRATZ, D.; WENDLING, I. Crescimento de mudas de *Eucalyptus camaldulensis* em substratos à base de casca de arroz carbonizada. *Revista Ceres*, Viçosa. vol. 63. n. 3. p. 348-354, maio/jun. 2016.
- KRATZ, D.; WENDLING, I.; NOGUEIRA, A. C.; SOUZA, P. V. D. Substratos renováveis na produção de mudas de *Eucalyptus benthamii*. *Ciência Florestal*, 2013; 23(4): 607-621.
- LEITE, F. P. **Manejo nutricional para produção de mudas.** Belo Oriente: CENIBRA, 2003. 124 p.
- LERAYER, A. (Coord.). **Guia do eucalipto: oportunidades para um desenvolvimento sustentável.** São Paulo: Conselho de Informações sobre Biotecnologia, 2008.
- LOPES, J. L. W.; GUERRINI, I. A.; SAAD, J. C. C. Qualidade de mudas de eucalipto produzidas sob diferentes lâminas de irrigação e dois tipos de substrato. *Revista Árvore*, v. 31, n. 5, p. 835–843, 2007.
- MAEDA, S.; ANDRADE, G. de C.; FERREIRA, C. A.; SILVA, H. D.; AGOSTINI, R. B. Substratos alternativos para produção de mudas de *Eucalyptus badjensis*, obtidos a partir de resíduos das indústrias madeireira e cervejeira e da caprinocultura. Colombo: Embrapa Florestas, 2006. 5p. **Comunicado técnico**, 157.
- MARSCHNER, H. Mineral Nutrition of Higher Plants. San Diego: **Academic Press**, 888p. 1995.

- MORALES, M. M.; COMERFORD, N.; GUERRINI, I. A.; FALCAO, N. P. S.; REEVES, J. B. Sorption and desorption of phosphate on biochar and biochar-soil mixtures. **Soil Use and Management**. v. 29, p. 306, 2013.
- MOREIRA, F. M. S.; MOREIRA, F. W. Característica de germinação de 64 espécies de leguminosas florestais nativas da Amazônia, em condições de viveiro. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 26, n. 1/2, p. 3-16, 1996.
- MUNGUAMBE, J. F. **Qualidade morfológica de mudas clonais de eucalipto na fase de expedição em viveiros comerciais**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.
- MUNOZ, C.; GONGORA, S.; ZAGAL, E. Use of biochar as a soil amendment: A brief review. **Chil. J. Agric. Anim. Sci.** 32, 37–47, 2016.
- NOGUERA, P. A. et al. Coconut coir waste, a new viable ecologically - Friendly peat substitute. **Acta Horticulturae**, Wageningen, v. 517, p. 279-286, 2000.
- OLIVEIRA JÚNIOR, O. A. de. **Qualidade de mudas de *Eucalyptus urophylla* produzidas em diferentes substratos**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, 68f. 2009.
- PAIVA, H. N.; GOMES, J. M. **Propagação vegetativa de espécies florestais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, p. 40, 1995.
- PARVIAINEN, J. V. Qualidade e avaliação de qualidade de mudas florestais. In: SEMINÁRIO DE SEMENTES E VIVEIROS FLORESTAIS, 1. **Anais...** Curitiba: FUPEF, p. 59-90. 1981.
- PENG, F.; HE, P. W.; LUO, Y.; LU, X.; LIANG, Y.; FU, J. Adsorption of phosphate by biomass char deriving from fast pyrolysis of biomass waste. **CLEAN – Soil, Air, Water** 40:493–498, 2012.
- PETTER, F. A. et al. Biochar como condicionador de substrato para a produção de mudas de eucalipto. **Revista Caatinga**, v. 25, n. 4, p. 44–51, 2012.
- PRASAD, M. Physical, chemical and biological properties of coir dust. In **Proceedings of the International Symposium Growing Media and Plant Nutrition in Horticulture**, Freising, Germany, 2 September 1996; *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science (ISHS): Leuven, Belgium, Volume 450, pp. 21–30, 1997.
- PRASAD, M.; TZORTZAKIS, N.; MCDANIEL, N. Chemical characterization of biochar and assessment of the nutrient dynamics by means of preliminary plant growth tests. **Journal of Environmental Management**. 216, 89–95, 2017.
- REZENDE, F. A.; BARROS, D. L.; SANTOS, V. A. H. F.; LANGER, J.; ROSALINO, T. Uso do biochar na composição de substratos para produção de mudas de maracujá.

**XI ENCONTRO BRASILEIRO DE SUBSTÂNCIAS HÚMICAS.** p. 431-434, São Carlos – SP, 2015.

REZENDE, F. A.; SANTOS, V. A. H. F.; MAIA, C. M. B. F.; MORALES, M. M. Biochar in substrate composition for production of teak seedlings. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília. v. 51. n. 9. p. 1449-1456, set. 2016.

RUDEK, A.; GARCIA, F. A. DE O.; PERES, F. S. B. Avaliação da qualidade de mudas de eucalipto pela mensuração da área foliar com o uso de imagens digitais. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 17, p. 3775–3787, 2013.

SCHÄFER, G.; DE SOUZA, P. V. D.; FIOR, C. S. Um panorama das propriedades físicas e químicas de substratos utilizados em horticultura no sul do Brasil. **Ornamental Horticulture**, Campinas, v. 21, n. 3, p. 299-306, 2015

SCHONAU, A. P. G. The effects of fertilizing on the foliar nutrient concentrations in *Eucalyptus grandis*. **Fertilizer Research**, v.2, n.2, p.73-87, 1981.

SILVA, F. A. M.; NUNES, G. M.; ZANON, J. A.; GUERRINI, I. A.; SILVA, R. B. Resíduo agroindustrial e lodo de esgoto como substrato para a produção de mudas de *eucalyptus urograndis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.28, n.2, p.827-828, 2018.

SILVA, F.C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.: Embrapa Informação Tecnológica, 627p., 2009.

SILVA, L. F. V.; MELO, E. I.; GONÇALVEZ, P. A. S. Biochar de serragem de eucalipto como condicionador de substrato para produção de alface. **Revista Agri-Environmental Sciences**, Palmas-TO, v. 5, e019005, 2019.

SILVA, M. I.; MACKOWIAK, C.; MINOGUE, P.; REIS, A. F.; MOLINE, E. F. V. Potential impacts of using sewage sludge biochar on the growth of plant forest seedlings. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 47. n. 1. p. 1449-1456, nov. 2016.

SILVA, R. B. G.; SIMOES, D.; SILVA, M. R. Qualidade de mudas clonais de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* em função do substrato. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. v.16. n.3. p. 297–302, fev. 2012.

SILVEIRA, R. L. V. A.; ARAÚJO, E. F.; SOUZA, A. J. Avaliação do estado nutricional de clones de *Eucalyptus* na região sul da Bahia. In: **FERTIBIO 2000** Biodinâmica do solo, Santa Maria, 2000. Resumos... Santa Maria: UFSM, 2000. CD ROM.

SILVEIRA, R. L. V. A.; HIGASHI, E. N.; SGARBI, F. & MUNIZ, M. R. A. **Seja o doutor do seu eucalipto**. Piracicaba, Potafós, 32 p. 2001.

SILVEIRA, R. L. V. A.; LUCA, E. F.; CHALITTA, L. V. A. S.; HIGASHI, E. N.; LUZ, H. F. Nutrição mineral em viveiro de *Eucalyptus grandis*: produção de matéria

seca, concentração e acúmulo de nutrientes em função da idade. **Relatório de pesquisa da Eucatex**, 21p., 2000c. (dados não publicados).

SILVEIRA, R. L. V. A.; LUCA, E. F.; SHIBATA, F. Absorção de macronutrientes pelas mudas de *E. grandis* em condição de viveiro. In: **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 25., Viçosa, 1995. Resumos expandidos... Viçosa: SBCS, p.839-41, 1995a.

SILVEIRA, R. L. V. A.; LUCA, E. F.; SHIBATA, F. Absorção de micronutrientes pelas mudas de *E. grandis* em condição de viveiro. In: **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 25., Viçosa, 1995. Resumos expandidos... Viçosa: SBCS, p.842-45, 1995b.

SILVEIRA, R. L. V. A.; MALAVOLTA, E. **Nutrição e adubação potássica em *Eucalyptus***. Informações Agronômicas, Piracicaba, (POTAFOS. Encarte Técnico, 12), n. 91, 12 p. 2000.

SILVEIRA, R. L. V.A. **Efeito do potássio no crescimento, nas concentrações dos nutrientes e nas características da madeira juvenil de progênies de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden cultivadas em solução nutritiva**. Piracicaba, Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 169 p., 2000.

SIMON, E. D. T.; ANTUNES, W. R.; LEMOES, L. S.; TATTO, F. R.; PÖPPL NETO, J. C.; MORSELLI, T. B. G. A. Caracterização física e química de substratos alternativos para produção de mudas. **Revista da Jornada de Pós-Graduação e Pesquisa**, 2016.

SONNEVELD C; ENDE J; BES SS. Estimating the chemical compositions of soil solutions by obtaining saturation extracts or specific 1:2 by volume extracts. **Plant and Soil** 126: 169-175, 1990.

SOUZA, C. A. M.; OLIVEIRA, R. B.; LIMA, J. S. S. Crescimento em campo de espécies florestais em diferentes condições de adubação. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 3, p. 243-249, 2006.

STURION, J. A.; ANTUNES, J. B. M. Produção de mudas de espécies florestais. In: GALVÃO, A. P. M. (Ed.). **Reflorestamento de propriedades rurais para fins produtivos e ambientais: um guia para ações municipais e regionais**. Colombo: EMBRAPA Floresta, p. 125-150, 2000.

STURION, J. A.; GRAÇA, L. R.; ANTUNES, J. B. M. **Produção de mudas de espécies de rápido crescimento por pequenos produtores**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 20 p. (Circular Técnica, 37), 2000.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de solos, plantas e outros materiais**. 2. ed., Porto Alegre: UFRGS, 1995. (Boletim Técnico, 5).

- TRAZZI, P. A. **Substratos renováveis na produção de mudas de *Tectona grandis* Linn F.** 2011. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre.
- TRAZZI, P. A.; CALDEIRA, M. V. W.; COLOMBI, R. Avaliação de mudas de *Tecoma stans* utilizando bio sólido e resíduo orgânico. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 85, p. 218 - 226. 2010.
- TRAZZI, P. A., LEAHY, J. J., HAYES, M. H. B., & KWAPINSKI, W. Adsorption and desorption of phosphate on biochars. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 4(1), 37–46, 2016.
- UGARTE, J. F. O., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A. Vermiculita. In: CETEM (Org.), **Rochas e minerais industriais: Usos e especificações**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p. 865 – 888, 2009.
- VALERI, S. V.; CORRADINI, L. Fertilização em viveiros para produção de mudas de *Eucalyptus* e Pinus. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba: IPEF, p. 167-.189, 2000.
- WANG, J., XIONG, Z., KUZYAKOV, Y., Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. **GCB Bioenergy** 8, 512–523, 2016.
- WANG, Y., MA, Z., WANG, X., SUN, Q., DONG, H., WANG, G., ET AL., Effects of biochar on the growth of apple seedlings, soil enzyme activities and fungal communities in replant disease soil. **Sci. Hort.** 256, 108641, 2019.
- WENDLING, I.; GUASTALA, D.; DEDECEK, R. Physical and chemical characteristics of substrates for the production of *ilex paraguariensis* st. hil. Seedlings. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 31, n. 2, p. 209-220, 2007.
- WENDLING, I.; DUTRA, L. F. Produção de mudas de eucalipto por sementes. **Produção de mudas de eucalipto**. Colombo: EMBRAPA Florestas, p. 13-47, 2010.
- ZANETTI, M.; CAZETTA, J. O.; MATTOS JÚNIOR, D.; CARVALHO, S. A. de. Uso de subprodutos de carvão vegetal na formação do porta-enxerto limoeiro ‘Cravo’ em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.25, p.508-512, 2003.

## CAPÍTULO 2

### DINÂMICA DO CARBONO EM SOLO CULTIVADO COM EUCALIPTO SOB APLICAÇÃO DE BIOCÁRVÕES DE CASCA DE EUCALIPTO

#### RESUMO

A geração de resíduos provenientes do descascamento de toras nas indústrias gera preocupações em relação ao seu descarte. A utilização desses resíduos na geração de biocárvão pode ser uma solução para o descarte de resíduos e mitigação de problemas ambientais. Além disso, estudos revelam os efeitos benéficos do biocárvão nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Sendo assim, objetivou-se avaliar o efeito da aplicação de doses de biocárvão de casca de eucalipto, produzidos sob duas temperaturas de pirólise, sobre os diferentes compartimentos do carbono orgânico e atributos biológicos do solo sob cultivo de eucalipto. O experimento foi realizado na área experimental do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) - *Campus* de Alegre. O biocárvão foi caracterizado quimicamente. O delineamento utilizado foi em blocos casualizados em esquema fatorial 2 x 5, sendo: duas temperaturas de pirólise (350 e 600°C) e cinco doses de biocárvão (0; 0,25; 0,5; 1 e 2% do volume/volume de solo do sulco de plantio), com três repetições. Cada tratamento, em cada bloco, foi composto por 6 plantas de *Eucalyptus urograndis* dispostas em linhas. Os biocárvoes foram distribuídos previamente ao plantio, em sulco, com profundidade de 30 cm e largura de 40 cm. As determinações experimentais consistiram nas análises de carbono orgânico total (COT) e suas frações oxidáveis (F1, F2, F3 e F4), carbono e nitrogênio da biomassa microbiana (CBM, NBC), análises enzimáticas e emissão de CO<sub>2</sub> no solo, aos 730 e 913 dias, nas profundidades de 0-10 e 10-30 cm. Os resultados experimentais mostraram que houve influência da adição do biocárvão no aumento do COT e F4 aos 913 dias, principalmente pelo biocárvão produzido à 600°C, em ambas as profundidades. A aplicação de doses crescentes de biocárvão de casca de eucalipto reduziu o CBM e o qMIC. De maneira geral, a atividade enzimática não foi influenciada pela temperatura de pirólise e época de avaliação. Na camada de 0-10 cm, houve aumento das atividades das enzimas FA e BG até 1% da dose de biocárvão, para as temperaturas de pirólise de 600 e 350 °C, respectivamente. A atividade microbiana foi influenciada pela época de avaliação, a qual reduziu aos 913 dias (2ª avaliação).

**Palavras-chave:** *Eucalyptus urograndis*; Resíduo Florestal; Pirólise.

## ABSTRACT

### DYNAMICS OF CARBON IN SOIL CULTIVATED WITH EUCALYPTUS UNDER APPLICATION OF EUCALYPTUS SHELL BIOCHARS

The generation of waste from the debarking of logs in industries raises concerns about their disposal. The use of these residues in the generation of biochar can be a solution for the disposal of residues and mitigation of environmental problems. In addition, studies reveal the beneficial effects of biochar on the physical, chemical and biological properties of the soil. Therefore, the objective was to evaluate the effect of the application of doses of eucalyptus bark biochar, produced under two pyrolysis temperatures, on the different compartments of organic carbon and biological attributes of the soil under eucalyptus cultivation. The experiment was carried out in the experimental area of the Federal Institute of Espírito Santo (Ifes) - Campus de Alegre. The biochar was chemically characterized. The design used was in randomized blocks in a 2 x 5 factorial scheme, as follows: two pyrolysis temperatures (350 and 600°C) and five doses of biochar (0; 0.25; 0.5; 1 and 2% of the volume/volume of soil of the planting furrow), with three replications. Each treatment, in each block, consisted of 6 *Eucalyptus urograndis* plants arranged in rows. The biochars were distributed before planting, in a furrow, with a depth of 30 cm and a width of 40 cm. The experimental determinations consisted of the analysis of total organic carbon (TOC) and its oxidizable fractions (F1, F2, F3 and F4), carbon and nitrogen of microbial biomass (CBM, NBC), enzymatic analysis and CO<sub>2</sub> emission in the soil, at 730 and 913 days, at depths of 0-10 and 10-30 cm. The experimental results showed that there was an influence of the addition of biochar on the increase of TOC and F4 at 913 days, mainly by the biochar produced at 600°C, in both depths. The application of increasing doses of eucalyptus bark biochar reduced CBM and qMIC. In general, the enzymatic activity was not influenced by the pyrolysis temperature and evaluation time. In the 0-10 cm layer, there was an increase in FA and BG enzyme activities up to 1% of the biochar dose, for pyrolysis temperatures of 600 and 350 °C, respectively. The microbial activity was influenced by the time of evaluation, which reduced at 913 days (2nd evaluation).

**Keywords:** *Eucalyptus urograndis*; Forest Residue; Pyrolysis.



## 1. INTRODUÇÃO

A agricultura moderna visa produzir alimento e biomassa com alta produtividade para atender à crescente demanda da população humana por alimentos e bens manufaturados de forma que consiga mitigar os impactos ambientais. Uma das preocupações atuais é reduzir a emissão de gases de efeito estufa (GEE), sendo a agricultura um dos grandes contribuintes para esse impacto. A crescente produção resulta na geração de resíduos que devem ser descartados de forma segura. Biocarvão é um produto originado da pirólise de materiais orgânicos, podendo ser a solução para o descarte de resíduos e mitigação de problemas ambientais.

O Biocarvão é um produto sólido rico em carbono, originado do processo de conversão termoquímica da matéria orgânica em condições baixas ou até ausência de oxigênio, processo chamado pirólise (LEHMANN & JOSEPH, 2009; LABEGALINI, 2013). Devido à sua configuração molecular, o biocarvão é quimicamente e biologicamente mais estável que o material original, reduzindo sua taxa de decomposição, podendo permanecer estável no solo por centenas a milhares de anos (KRULL et al., 2006; ZIMMERMAN, 2010). A pirólise da biomassa resulta em três produtos, o biocarvão, o bio-óleo e o gás, ganhando popularidade crescente nos últimos anos como potencial substituto para os portadores de carbono fóssil e redução nas emissões de gases do efeito estufa (WEBER & QUICKER, 2018), bem como seu potencial para melhorar a qualidade do solo (KUPPUSAMY et al., 2016; LEHMANN E JOSEPH, 2015).

Muitos estudos têm se concentrado nos potenciais efeitos benéficos do biocarvão nas propriedades físicas do solo (HERATH et al., 2013), propriedades químicas (SYUHADA et al., 2016), fertilidade e rendimento das culturas (CORNELISSEN et al., 2018; GLASER et al., 2001; ZHANG et al., 2020), aumento de sequestro de carbono no solo (FIDEL et al., 2019; YADAV et al., 2017; WANG et al., 2016), redução do efeito salino e alcalino no solo (ZHAO et al., 2020), supressão de patógenos (JAISWAL et al., 2013), na retenção de água no solo (RAZZAGHI et al., 2019). No entanto, tais características e efeitos variam em variar em função do material de origem e condições de pirólise, dentre outros fatores (YU et al., 2019; EL-NAGGAR et al., 2019).

O conteúdo de matéria orgânica no solo (MOS) é um dos principais indicadores de qualidade ambiental, pois está envolvido e relacionado com as propriedades físicas, como a estrutura do solo (fornecimento de substâncias agregantes); químicas, como o suprimento de macro e micronutrientes, aumento da capacidade de troca catiônica (CTC),

tamponamento do pH; e biológicas do solo, pois é a principal fonte de carbono e energia para os organismos vivos do solo (PARRON et al., 2015; MARTINEZ-SALGADO et al., 2010; REEVES, 1997). O teor e a qualidade da MOS estão associados às atividades microbianas do solo, por ser a principal fonte de energia e nutrientes (SILVEIRA, 2007), a separação das frações mais ou menos recalcitrantes do carbono orgânico permite entender a dinâmica e inferir a qualidade da matéria orgânica do solo.

Solos de alta qualidade possuem alta atividade biológica, além de conterem populações microbianas balanceadas (CHAER et al., 2014). A emissão de CO<sub>2</sub> do solo e o conteúdo de carbono da biomassa microbiana (C-BM) e nitrogênio da biomassa microbiana (N-BM) são métodos tradicionais e mais utilizados para avaliar a atividade metabólica da população microbiana do solo, pois conseguem responder rapidamente a mudanças no manejo e no uso da terra (ZIBILSKE, 1994, MERCANTE et al., 2008), podendo variar em decorrência da umidade, temperatura, disponibilidade de nutrientes, textura, relação C/N, presença de resíduos orgânicos, entre outros (CREMON et al.; 2009; FERREIRA et al., 2008). As enzimas têm participação essencial nos processos relacionados à qualidade do solo, são originadas de todos os organismos vivos presentes no solo (fauna, raízes de plantas e microrganismos) (CHAER et al., 2014). As condições que favorecem a atividade da biota também favorecem a atividade enzimática, que, muitas vezes, relaciona-se positivamente com a produtividade ou com a qualidade do solo (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006).

Atividade enzimática, taxa de respiração, diversidade e biomassa microbiana são indicadores sensíveis às alterações ambientais e podem ser utilizadas como ferramentas de avaliação das melhores práticas de manejo (TURCO et al., 1994; SANTANA & BAHIA FILHO, 1998; DORAN & PARKIN, 1996).

Uma das características do biocarvão sobre a microbiota do solo é fornecer habitat para microrganismos por meio da distribuição de poros no biocarvão, pois protege os microrganismos da predação, dessecação, além de fornecer carbono e suprir necessidades energéticas e de nutrientes (SAITO & MURAMOTO, 2002; THIES & RILLIG, 2009).

O Brasil tornou-se referência mundial tecnológico no setor de árvores plantadas, com destaque de uma economia de baixo carbono, alta produtividade, práticas de manejo florestal e responsabilidade social. O segmento possui 9 milhões de hectares de árvores cultivadas, a maioria representada pelo cultivo do eucalipto (6,97 milhões de hectares) (IBA, 2020). Segundo o relatório anual da IBA (2019), em 2018 o setor gerou 52,0

milhões de toneladas de resíduos sólidos, sendo 36,9 milhões gerados pelas atividades florestais. A maior parte dos resíduos florestais são mantidos no campo.

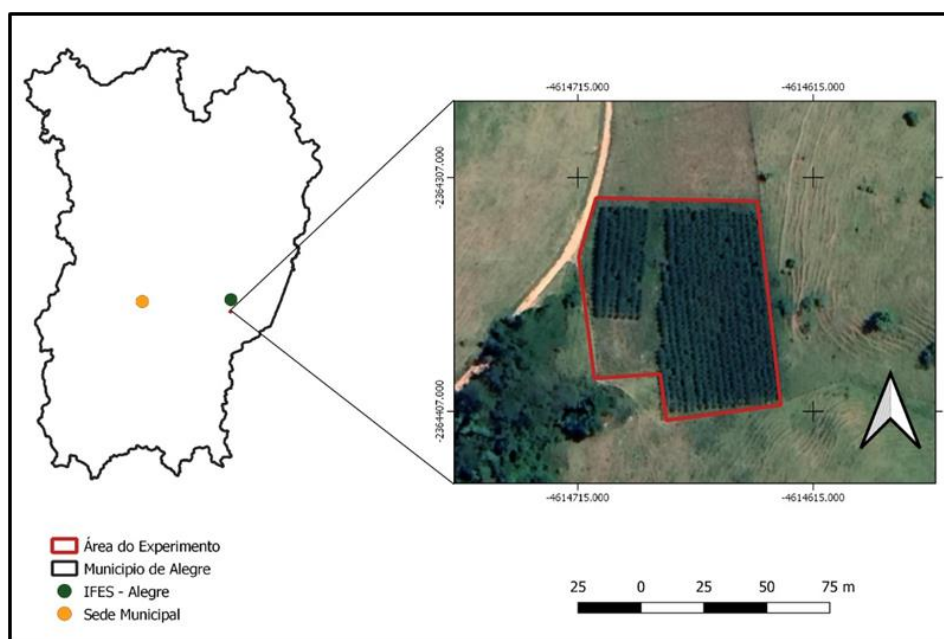
O processo de conversão termoquímica dos resíduos florestais em reator de pirólise é uma alternativa de melhorar a eficiência energética e adotar fontes renováveis para a geração de gás e bio-óleo, ambos de alto valor energético, e biocarvão, utilizando como condicionador de solo nas áreas de cultivo do eucalipto.

Assim, objetivou-se avaliar em longo prazo o efeito da aplicação de doses de biocarvão de casca de eucalipto, produzidos sob duas temperaturas de pirólise, sobre os diferentes compartimentos do carbono orgânico e atributos biológicos do solo para o cultivo de eucalipto.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

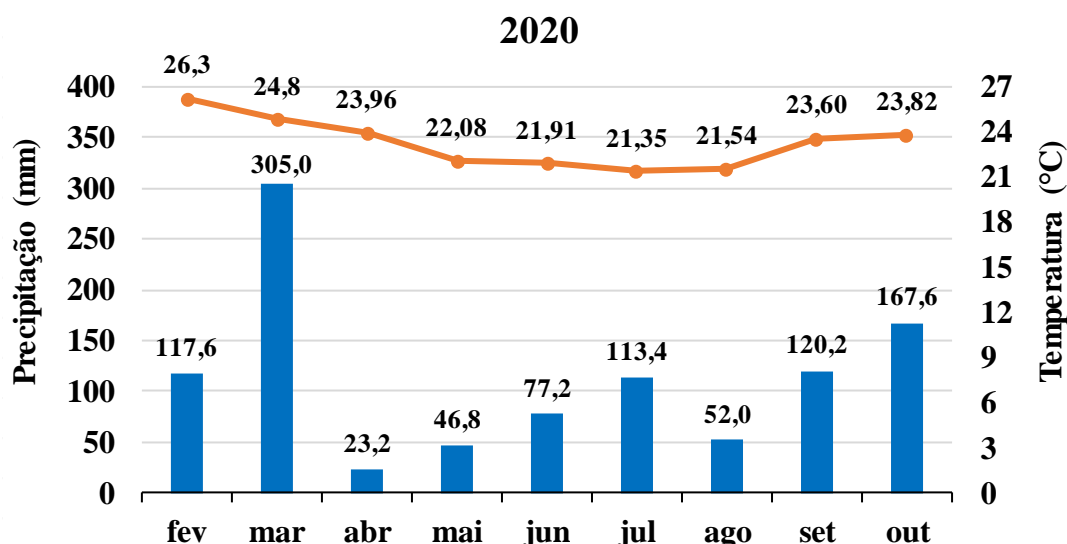
### 2.1. Área de instalação do experimento

Foi estabelecido um ensaio de campo na área experimental do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) - *Campus* de Alegre, localizado em Rive, distrito de Alegre, Estado do Espírito Santo, nas coordenadas 20° 46' 08" a latitude Sul e a 41° 27' 15" longitude Oeste (Figura 1), com altitude de 131 metros sob Latossolo Vermelho-Amarelo, textura média.



**Figura 1** – Mapa da área experimental referente ao ano de 2020, localizada em Rive, distrito de Alegre, Estado do Espírito Santo.

O clima da região é classificado como Aw na classificação climática de Köppen-Geiger, caracterizado por apresentar clima tropical com verão quente e chuvoso e inverno seco. A precipitação acumulada e temperatura média mensal registrada durante o período experimental foram coletados em uma estação meteorológica perto da área experimental, localizada no distrito de Rive, município de Alegre, Espírito Santo, Brasil (Figura 2).



**Figura 2** – Precipitação mensal acumulada e temperatura média registrada durante o período de condução do experimento, em 2020 no distrito de Rive, município de Alegre/ES.

Em 2011, a área do experimento era utilizada para criação de bufalos com sistema de piquetes e no ano seguinte foi inserida a criação de caprinos. A pastagem era conduzida com correção de acidez do solo, adubações de manutenção e irrigação.

Para implantação do experimento, foi realizada a caracterização química e física do solo na profundidade de 0 a 30 cm de profundidade e efetuada a divisão adequada dos blocos de plantio (Tabelas 1 e 2).

**Tabela 1** – Caracterização<sup>1</sup> química do solo utilizado na montagem do experimento

pH	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	T	SB	V
	-----mg/dm <sup>3</sup> -----			-----cmol/dm <sup>3</sup> -----						%
5,88	13,64	125,00	6,00	2,30	1,01	0,00	2,58	6,25	3,66	58,4

<sup>1</sup>pH em H<sub>2</sub>O (relação 1:2,5); K, Na = potássio e sódio trocáveis por fotometria de chama, após extração com Mehlich-1; Ca, Mg = cálcio e magnésio trocáveis por extração com cloreto de potássio e determinação em absorção atômica; Al = alumínio trocável extraído com KCl e determinação por titulação; H+Al = acidez potencial por extração com acetato de cálcio e determinação por titulação; P = fósforo por colorimetria após extração com Mehlich-1; T (Capacidade de troca de cátions potencial) = (K/390)+(Na/230)+Ca+Mg+(H+Al) (Teixeira et al., 2017).

**Tabela 2** – Caracterização<sup>1</sup> física do solo utilizado na montagem do experimento

<b>Areia Total</b>	<b>Silte</b>	<b>Argila</b>	<b>Classificação</b>
----- % -----			
68	7	25	Textura Média

<sup>1</sup>Silte e argila: Método da pipeta - agitação lenta

## 2.2. Produção e caracterização dos biocarvões

Foram utilizados biocarvões de casca de eucalipto, provenientes de resíduos do beneficiamento de plantios da região do Sul do Estado do Espírito Santo, sendo o material fornecido pela Usina Bragança. As cascas foram picadas para redução do tamanho inicial e então carbonizadas em reator de pirólise lenta, hermeticamente fechado modelo SPPT-V60 (Figura 3), sob duas temperaturas finais de pirólise (350 °C e 600 °C), com tempo de residência na temperatura final de 60 min. Ao fim do processo de pirólise, o biocarvão permaneceu no reator por cerca de 24h, garantindo que o mesmo atingisse a temperatura ambiente. O processo gera três produtos finais, o biocarvão (combustível sólido), o bio-óleo (combustível líquido) e o gás combustível (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e outros hidrocarbonetos).

Amostras dos biocarvões produzidos foram moídas em moinho tipo Willey e maceradas em almofariz de ágata, para serem passadas em peneira de 60 mesh (0,250 mm) para realização das análises de caracterização dos biocarvões. Teores totais de C, H e N (Tabela 3) foram determinados em analisador elementar (PerkinElmer 2400 Series II CHNS/O) e o teor de O foi estimado por diferença. A partir da análise elementar foi possível estabelecer as relações atômicas elementares de C/N, O/C e H/C.



**Figura 3** - Reator de Pirólise Lenta, Modelo SPPT-V60

O teor de cinzas foi determinado pela incineração de amostras (1g) em forno tipo mufla (550 °C por 4h). As cinzas foram solubilizadas em HCl 0,5 mol L<sup>-1</sup>, na proporção 1:20 (AL-WABEL et al., 2013) para determinação dos teores de P, K, Ca e Mg e quantificadas por fotocolorimetria (P), fotometria de chama (K) e por espectrofotometria de absorção atômica (Ca e Mg). A CTC foi determinada por saturação do complexo de troca catiônica com acetato de cálcio (CaOAc 0,5 mol L<sup>-1</sup>, pH igual a 7) e posterior titulação com NaOH (0,1mol L<sup>-1</sup>) para extração do Ca adsorvido e determinação da CTC e pH determinado em água na proporção 1:20 (RAJKOVICH et al, 2011). A densidade foi realizada pelo método da proveta conforme o método ASTM D2854 adaptada (ASTM 2009) (Tabela 4).

**Tabela 3** - Teores elementares<sup>1</sup> C, H, N e O e relações C/N, H/C e O/C em biocarvões de casca de eucalipto produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise (350 e 600 °C)

Temperatura de Pirólise	Teor elementar (%)				C/N	H/C	O/C
	C	H	N	O			
350 °C	54,99	3,12	0,6	41,28	107,01	0,68	0,56
600 °C	65,05	1,44	0,51	34,37	149,8	0,26	0,38

<sup>1</sup>Determinados em Analisador Perkin Elmer Serie II 2400; O (%) =100-C-H-N.

**Tabela 4** – pH e teores totais<sup>1</sup> de macronutrientes presentes nos biocarvões de casca de eucalipto produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise (350 °C e 600 °C)

Temperatura de pirólise	P	K	Ca	Mg	CTC	pH	Cinzas	Da
	----- g kg <sup>-1</sup> -----				cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	H <sub>2</sub> O	%	kg dm <sup>-3</sup>
350 °C	0,37	7,41	2,91	0,62	99,21	7,20	16,84	0,23
600 °C	0,44	9,45	3,79	0,75	19,76	8,15	26,01	0,23

<sup>1</sup>Obtidos por digestão nitroperclórica (Teixeira et al., 2017). P= fósforo; K= potássio; Ca= cálcio; Mg= magnésio; Da= densidade.

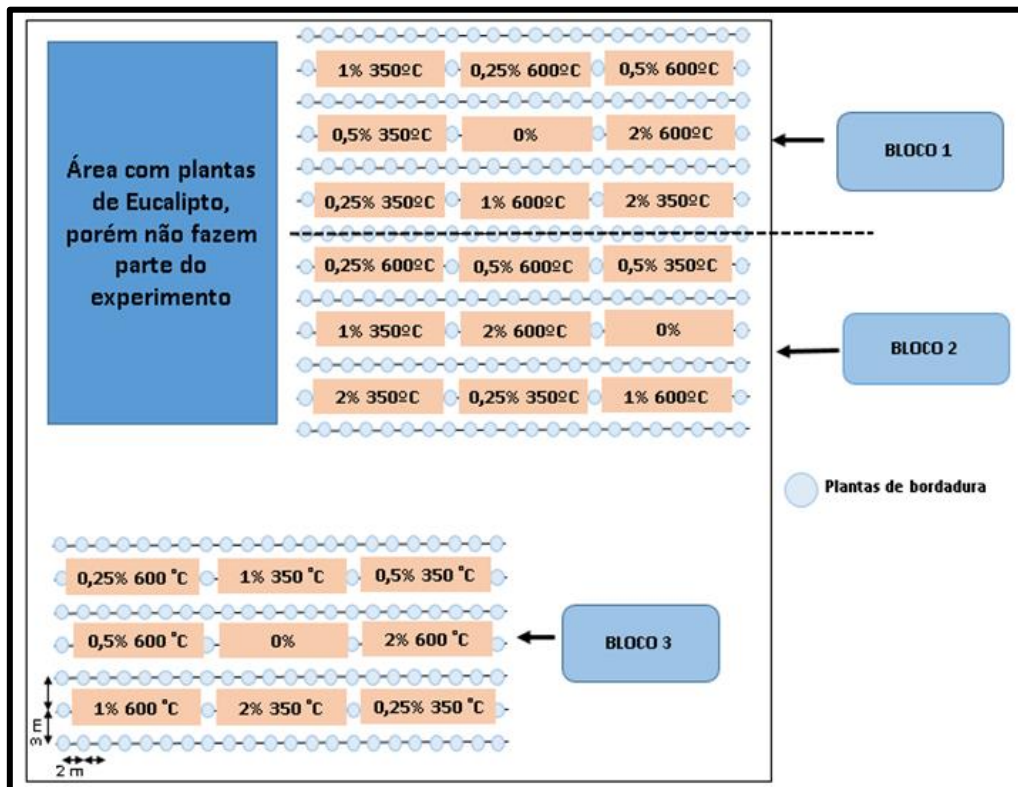
### 2.3. Delineamento experimental

O ensaio de campo foi implantado em março de 2018, distribuindo os tratamentos sob um delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial 2 x 5, sendo: duas temperaturas de pirólise (350 e 600°C) e cinco doses de biocarvão (0; 0,25; 0,5; 1 e 2% do volume/volume considerando-se o volume de solo do sulco de plantio), com três repetições.

Cada tratamento, em cada bloco, foi composto por 6 plantas de *Eucalyptus urograndis* dispostas em linhas, previamente sorteadas em cada bloco. Os biocarvões foram distribuídos previamente ao plantio, em sulco, com profundidade de 30 cm e largura de 40 cm (Figura 4). O espaçamento aplicado para o plantio foi de 3 m entre linhas de plantio por 2 m entre plantas. Entre cada tratamento e bloco foi introduzida uma linha de plantio sem a adição de biocarvão, constituindo assim as bordaduras do experimento (Figura 5).



**Figura 4** – Biocarvões no sulco de plantio.



**Figura 5** - Croqui da área representando a distribuição espacial dos tratamentos dispostos em cada bloco.



## 2.5. Atividades de manutenção

Durante a condução do experimento, foram realizadas as atividades de manutenção da área de estudos, por meio do controle de pragas e doenças, irrigação, roçagem, adubação e controle de plantas invasoras.

Devido às condições de fertilidade do solo (Tabela 1), favoráveis à cultura do eucalipto, optou-se pela ausência de correção da acidez do solo. Dessa forma, seguiram-se apenas as recomendações de adubação de manutenção. A primeira parcela de adubação ocorreu durante o plantio das mudas de eucalipto, onde a adubação fosfatada foi realizada em dose única no plantio e dividida em duas partes de mesma massa que foram aplicadas em lados adjacentes às mudas (10 cm) na profundidade de 30 cm, e quantidade total equivalente a 20 kg de  $P_2O_5$   $ha^{-1}$  com base numa camada de 20 cm de solo. As adubações nitrogenada e potássica foram aplicadas em um total equivalente a 40 kg de N  $ha^{-1}$  e 30 kg  $K_2O$   $ha^{-1}$ , respectivamente, sendo divididas em 3 parcelas, uma em plantio, juntamente com a adubação fosfatada, e duas em cobertura aos 90 dias e aos 270 dias após o plantio, realizadas na projeção da copa da planta. As adubações foram realizadas utilizando os formulados N-P-K, 03-17-00 mais 12-00-12, durante o plantio para suprir a demanda dos três nutrientes, e com somente o 12-00-12 para suprir a demanda por N e K durante as adubações de cobertura.

## 2.6 Caracterização química do solo

Amostras de solo foram coletadas e caracterizadas quimicamente aos 730 dias (abr/2020) e 913 dias (out/2020), após plantio do eucalipto. As análises químicas do solo foram realizadas a fim de caracterizar quimicamente o solo da área e auxiliar a discussão dos dados (Tabela 5 e 6).

As análises foram feitas embasadas em metodologias preconizadas por Teixeira et al. (2017): pH do solo em  $H_2O$  foi determinado utilizando a relação solo-solução 1:2,5 de v/v. Os teores de cálcio ( $Ca^{2+}$ ), magnésio ( $Mg^{2+}$ ) e alumínio ( $Al^{3+}$ ) foram extraídos com cloreto de potássio ( $KCl$  1 mol  $L^{-1}$ ), sendo  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  determinados por espectrofotômetro de absorção atômica e  $Al^{3+}$  por titulação com  $NaOH$  0,025 mol  $L^{-1}$ . O sódio ( $Na^+$ ) e potássio trocável ( $K^+$ ) e fósforo disponível (P) foram extraídos com Mehlich<sup>-1</sup> ( $HCl$  0,05 mol  $L^{-1}$  +  $H_2SO_4$  0,0125 mol  $L^{-1}$ ), sendo o  $Na^+$  e o  $K^+$  determinados por fotometria de chama e o P por colorimetria. A acidez potencial ( $H+Al$ ) foi extraída utilizando a solução de acetato de cálcio -  $Ca(OAc)_2$  0,5 mol  $L^{-1}$  a pH 7,0 e determinada



por titulação com NaOH 0,025 mol L<sup>-1</sup>. Com bases nos dados obtidos foram também calculados os índices: soma de bases (SB), obtida pela soma dos teores de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>; CTC total (T), obtida pela soma da SB mais a acidez potencial; e por último a saturação por bases (V) obtida pelo valor percentual da SB em relação a T.

**Tabela 5** – Valores médios dos atributos químicos nas camadas de 0-10 cm e 10-30 cm do solo, em função de doses de biocarvões, produzidos com temperatura de pirólise de 350 °C e duas épocas de avaliação (730 e 913 dias)

DOSE	pH H <sub>2</sub> O	P ----- mg dm <sup>-3</sup>	Na mg dm <sup>-3</sup>	K ----- mg dm <sup>-3</sup>	Ca ----- mg dm <sup>-3</sup>	Mg ----- mg dm <sup>-3</sup>	Al ----- cmolc dm <sup>-3</sup>	H+Al ----- cmolc dm <sup>-3</sup>	T ----- cmolc dm <sup>-3</sup>	SB ----- cmolc dm <sup>-3</sup>	V ----- %
<b>1ª Avaliação (730 dias)</b>											
<b>----- 0 - 10 cm -----</b>											
<b>0</b>	5,31	13,31	1,33	81,67	1,91	0,83	0,05	3,61	2,95	6,56	44,35
<b>0,25</b>	5,37	9,06	2,33	71,67	1,87	0,75	0,07	3,86	2,81	6,67	42,01
<b>0,5</b>	5,34	12,69	1,67	78,67	2,27	1,16	0,17	3,59	3,63	7,22	50,21
<b>1</b>	5,44	10,41	2,33	69,00	2,17	0,93	0,00	3,04	3,28	6,32	51,98
<b>2</b>	5,44	12,46	2,33	76,00	2,19	0,84	0,02	3,42	3,24	6,66	48,76
<b>----- 10 - 30 cm -----</b>											
<b>0</b>	5,31	10,57	1,33	61,33	2,14	0,91	0,03	3,56	3,21	6,77	46,57
<b>0,25</b>	5,25	8,37	2,67	47,67	1,85	0,75	0,10	3,26	2,73	5,99	45,31
<b>0,5</b>	5,47	6,57	1,33	74,67	2,04	0,96	0,18	3,42	3,20	6,62	48,26
<b>1</b>	5,48	5,51	1,33	50,00	2,07	0,91	0,03	3,09	3,11	6,20	50,38
<b>2</b>	5,42	10,84	2,00	70,33	2,13	0,77	0,05	3,39	3,09	6,48	47,10
<b>2ª Avaliação (913 dias)</b>											
<b>----- 0 - 10 cm -----</b>											
<b>0</b>	5,75	13,83	0,00	170	2,02	1,17	0,00	3,20	3,62	6,82	53,23
<b>0,25</b>	5,47	10,45	0,00	140,67	2,11	0,99	0,02	3,28	3,45	6,74	50,74
<b>0,5</b>	5,40	6,65	0,00	145,33	2,09	1,15	0,00	3,72	3,62	7,34	49,43
<b>1</b>	5,53	10,97	0,00	153,00	1,98	1,10	0,00	3,39	3,47	6,86	50,26
<b>2</b>	5,55	7,76	1,00	231,67	2,23	1,06	0,00	3,23	3,89	7,12	54,71
<b>----- 10 - 30 cm -----</b>											
<b>0</b>	5,17	15,45	0,00	81,33	1,95	0,99	0,07	3,72	3,14	6,87	45,53
<b>0,25</b>	5,29	7,24	0,00	51,00	2,01	0,93	0,08	3,28	3,07	6,35	48,30
<b>0,5</b>	5,40	4,95	0,00	68,67	2,25	1,13	0,02	3,83	3,56	7,39	48,30
<b>1</b>	5,38	9,20	0,00	68,67	1,87	1,02	0,07	3,61	3,07	6,68	45,44
<b>2</b>	5,33	6,71	0,00	65,33	2,07	0,94	0,05	3,34	3,18	6,51	48,45

P= fósforo; K= potássio; Na= sódio; Ca= cálcio; Mg= magnésio; Al= alumínio; H+Al= acidez potencial; SB= soma de bases; T= CTC total; V= saturação por bases.

**Tabela 6** – Valores médios dos atributos químicos nas camadas de 0-10 cm e 10-30 cm do solo, em função de doses de biocarvões, produzidos com temperatura de pirólise de 600 °C e duas épocas de avaliação (730 e 913 dias)

DOSE	pH H <sub>2</sub> O	P	Na	K	Ca	Mg	Al	H+Al	T	SB	V
		mg dm <sup>-3</sup>				cmolc dm <sup>-3</sup>					%
<b>1ª Avaliação (730 dias)</b>											
----- 0 - 10 cm -----											
<b>0</b>	5,31	13,31	1,33	81,67	1,91	0,83	0,05	3,61	2,95	6,56	44,35
<b>0,25</b>	5,22	8,01	1,00	86,00	2,01	0,98	0,05	2,99	3,22	6,21	51,57
<b>0,5</b>	5,45	9,54	1,00	116,67	2,20	1,07	0,03	3,39	3,57	6,97	51,51
<b>1</b>	5,42	10,29	1,67	83,33	2,20	0,97	0,02	3,59	3,39	6,97	48,59
<b>2</b>	5,54	9,33	3,00	96,00	2,48	0,98	0,03	3,15	3,71	6,86	54,51
----- 10 - 30 cm -----											
<b>0</b>	5,31	10,57	1,33	61,33	2,14	0,91	0,03	3,56	3,21	6,77	46,57
<b>0,25</b>	5,32	7,87	1,00	82,00	1,85	1,06	0,02	3,20	3,12	6,33	49,90
<b>0,5</b>	5,48	7,13	1,33	60,00	2,25	0,98	0,00	3,17	3,39	6,56	51,96
<b>1</b>	5,40	11,65	2,33	58,67	2,48	0,99	0,00	3,50	3,63	7,14	50,56
<b>2</b>	5,74	5,67	3,67	71,33	2,54	0,95	0,00	2,54	3,69	6,23	58,81
<b>2ª Avaliação (913 dias)</b>											
----- 0 - 10 cm -----											
<b>0</b>	5,75	13,83	0,00	170	2,02	1,17	0,00	3,20	3,62	6,82	53,23
<b>0,25</b>	5,46	14,71	0,00	160,00	2,36	1,38	0,02	3,58	4,16	7,73	53,56
<b>0,5</b>	5,72	27,93	0,00	286,67	2,59	1,42	0,00	3,59	4,74	8,33	56,61
<b>1</b>	5,53	12,79	0,00	146,67	2,28	1,14	0,00	3,15	3,79	6,93	54,56
<b>2</b>	5,49	7,14	0,00	162,33	2,14	1,06	0,02	3,72	3,62	7,35	49,06
----- 10 - 30 cm -----											
<b>0</b>	5,17	15,45	0,00	81,33	1,95	0,99	0,07	3,72	3,14	6,87	45,53
<b>0,25</b>	5,26	8,90	0,00	59,67	2,12	1,22	0,03	3,85	3,50	7,35	47,58
<b>0,5</b>	5,53	15,68	0,00	154,33	2,40	1,33	0,00	3,59	4,12	7,71	53,25
<b>1</b>	5,38	6,93	0,00	69,67	2,01	0,96	0,00	3,23	3,14	6,37	49,21
<b>2</b>	5,75	4,95	0,67	86,67	2,54	1,13	0,03	3,20	3,90	7,10	55,78

P= fósforo; K= potássio; Na= sódio; Ca= cálcio; Mg= magnésio; Al= alumínio; H+Al= acidez potencial; SB= soma de bases; T= CTC total; V= saturação por bases.

## 2.7. Determinações experimentais

### 2.7.1. Coleta das amostras de solo

Aos 730 dias (abr/2020) e 913 dias (out/2020) após o plantio do eucalipto, foram realizadas amostragens de solo nas linhas de plantio, no centro da distância entre duas plantas, na posição média da linha de cada tratamento, nas camadas de 0-10 cm e 10-30 cm para avaliar o efeito dos tratamentos sobre os atributos biológicos e relacionados à matéria orgânica. As amostras foram peneiradas e passadas em peneira de 2,0 mm, sendo

parte das amostras acondicionadas sob refrigeração ( $\pm 4^{\circ}\text{C}$ ) e parte secas ao ar para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

### 2.7.2. Atributos biológicos e relacionados à matéria orgânica

A avaliação dos atributos relacionados à matéria orgânica consistiu na determinação dos teores de carbono orgânico total (COT) e as frações oxidáveis do carbono. O COT foi determinado via oxidação úmida com dicromato de potássio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$   $0,167 \text{ mol L}^{-1}$ ) em meio ácido ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) com aquecimento externo (bloco digestor) e determinação por titulometria com sulfato ferroso amoniacal ( $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) (Yeomans & Bremner, 1988). As frações do carbono oxidável foi determinado por oxidação em via úmida com dicromato de potássio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$   $0,167 \text{ mol L}^{-1}$ ) utilizando diferentes concentrações de ácido sulfúrico (3, 6 e  $9 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) para separar as frações menos ou mais oxidáveis, conforme proposto por Chan et al. (2001), com modificações sugeridas por Mendonça e Matos (2005). O carbono orgânico encontrado nas frações F1 e F2 é considerado mais lábil, ou seja, de mais fácil mineralização, porém as frações F3 e F4 são frações consideradas menos lábeis, mais estáveis no solo.

F1= C oxidado a  $3 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ;

F2= C oxidado a  $6 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  - C oxidado a  $3 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ;

F3= C oxidado a  $9 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  - C oxidado a  $6 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ;

F4= COT - C oxidado a  $9 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Os teores de carbono da biomassa microbiana (CBM) e nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) foram determinados pelo método irradiação-extração (MENDONÇA & MATOS, 2005). O conteúdo de CSM foi extraído com a solução extratora  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (pH calibrado em 6,5-6,8). O método baseia-se na extração do C microbiano após a morte dos microrganismos e lise celular pelo uso de microondas, com a liberação dos constituintes celulares e posterior quantificação. O CBM e o NBM nos extratos foram quantificados de acordo com Tedesco et al. (1995). Após a obtenção dos dados, foi calculada o quociente microbiano (qMIC), que é a relação entre o teor de CBM e COT, que indica a qualidade da matéria orgânica, assim como a eficiência de conversão do C do solo em C microbiano.

A atividade da fosfatase ácida e  $\beta$ -glucosidase foram avaliadas pelo método descrito em Tabatabai (1994). O método da fosfatase ácida é baseado na determinação

colorimétrica de p-nitrofenol liberado após a incubação de solo com p-nitrofenil fosfato por 1h a 37°C. A atividade de  $\beta$ -glucosidase é baseada na determinação colorimétrica de p-nitrofenol liberado pela enzima, após a incubação de solo com solução de p-nitrofenil-beta-D-glicopironosídeo por 1h a 37°C.

#### 2.7.4. Emissão de CO<sub>2</sub> do solo

As emissões de CO<sub>2</sub> do solo foram coletadas e registradas diretamente no campo por câmara de fluxo (LI-8100-102) com analisador portátil modelo LI-8100 (Li-Cor, USA), que consiste em um sistema fechado. Para isso, foram instalados no dia anterior à primeira avaliação, anéis de PVC (10 cm de diâmetro) na superfície do solo, no centro das linhas de plantio, entre a terceira e quarta planta de cada tratamento em cada parcela. Foram realizadas sete avaliações mensais, desde a primeira coleta (730 dias) e a última coleta de solo aos 913 dias. As medidas foram sempre realizadas pela manhã, entre 8h e 10h. Temperatura e umidade do solo foram medidas próximos ao anel, simultaneamente às emissões de CO<sub>2</sub>, com auxílio de um sensor FDR (Frequency Domain Reflectometry ou Reflectometria no Domínio de Frequência).

#### 2.8. Análises estatísticas

O conjunto de dados de cada atributo avaliado foi submetido à análise de variância para obtenção da soma dos quadrados e graus de liberdade dos resíduos. Seguiu-se então com a análise, via contrastes ortogonais (Tabela 7), onde os contrastes C1 e C2 avaliaram as diferenças entre temperaturas de pirólise em que foram produzidos os biocarvões em uma mesma época de avaliação e os contrastes C3 e C4 avaliam o efeito do tempo (época de avaliação) para os dados obtidos em tratamentos sob aplicação de um mesmo tipo de biocarvão/temperatura de pirólise

**Tabela 7** – Coeficientes e contrastes ortogonais aplicados aos atributos biológicos e relacionados à matéria orgânica estudados

Tratamentos	C1	C2	C3	C4
350 °C/730 dias	1	0	1	0
600 °C/730 dias	-1	0	0	1
350 °C/913 dias	0	1	-1	0
600 °C/913 dias	0	-1	0	-1

C1 = 350°C vs 600°C/730 dias; C2 = 350°C vs 600°C/913 dias; C3 = 350°C/730 dias vs 350°C/913 dias; C4 = 600°C/730 dias vs 600°C/913 dias.

Foram também realizadas análises de regressão a fim de investigar o efeito das doses dos biocarvões sobre os atributos biológicos e relacionados à matéria orgânica. Todos os procedimentos estatísticos foram realizados com o software R (R Core Team, 2021).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Atributos biológicos e relacionados à matéria orgânica

Os teores médios de carbono orgânico total e frações oxidáveis em função de temperaturas de pirólise (350 °C e 600 °C) e épocas de avaliação (730 e 913 dias após plantio) se encontram na Tabela 8. As frações F1, F2 e F3 do carbono oxidável foram semelhantes entre os tratamentos e épocas de avaliação, nas duas profundidades. Não houve diferenças significativas entre temperaturas e épocas de avaliação na profundidade de 0-10 cm (Tabela 9).

Segundo Chan et al. (2001), as frações F1 e F2 são frações consideradas mais lábeis e estão associadas à formação de macroagregados e à disponibilidade de nutrientes. Já as frações F3 e F4 estão relacionadas com compostos de maior estabilidade química.

**Tabela 8** – Valores médios das frações oxidáveis do carbono (F1, F2, F3 e F4) e carbono orgânico total (COT), nas camadas de 0-10 e 10-30 cm, em função de temperaturas de pirólise em que os biocarvões foram produzidos (350 e 600°C) e épocas de avaliação (730 e 913 dias)

Variável	730 dias		913 dias	
	350°C	600°C	350°C	600°C
	----- 0-10 cm -----			
<b>F1 (g kg<sup>-1</sup>)</b>	3,127	2,961	3,205	3,297
<b>F2 (g kg<sup>-1</sup>)</b>	2,301	2,490	2,402	2,440
<b>F3 (g kg<sup>-1</sup>)</b>	1,657	1,473	2,198	1,922
<b>F4 (g kg<sup>-1</sup>)</b>	2,606	2,908	6,297	7,270
<b>COT (g kg<sup>-1</sup>)</b>	9,691	9,832	14,103	14,928
	----- 10-30 cm -----			
<b>F1 (g kg<sup>-1</sup>)</b>	2,607	2,676	2,690	3,006
<b>F2 (g kg<sup>-1</sup>)</b>	2,315	2,614	2,623	2,059
<b>F3 (g kg<sup>-1</sup>)</b>	1,666	1,583	1,548	1,973
<b>F4 (g kg<sup>-1</sup>)</b>	2,934	4,212	6,031	6,915
<b>COT (g kg<sup>-1</sup>)</b>	9,397	11,152	12,892	13,954

**Tabela 9** – Contrastes ortogonais obtidos e suas significâncias, para as frações oxidáveis do carbono (F1, F2, F3 e F4) e carbono orgânico total (COT), nas camadas de 0-10 e 10-30 cm do solo

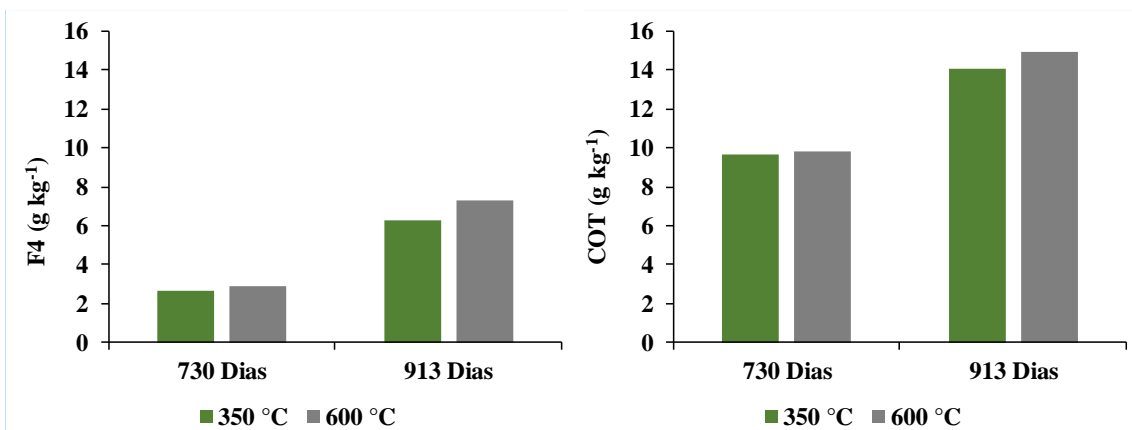
Variável <sup>a</sup>	C1	C2	C3	C4
----- 0-10 cm -----				
<b>F1 (g kg<sup>-1</sup>)</b>	0,166 <sup>ns</sup>	-0,091 <sup>ns</sup>	-0,078 <sup>ns</sup>	-0,335 <sup>ns</sup>
<b>F2 (g kg<sup>-1</sup>)</b>	-0,189 <sup>ns</sup>	-0,038 <sup>ns</sup>	-0,101 <sup>ns</sup>	0,051 <sup>ns</sup>
<b>F3 (g kg<sup>-1</sup>)</b>	0,184 <sup>ns</sup>	0,276 <sup>ns</sup>	-0,542 <sup>ns</sup>	-0,450 <sup>ns</sup>
<b>F4 (g kg<sup>-1</sup>)</b>	-0,302 <sup>ns</sup>	-0,972 <sup>ns</sup>	-3,691***	-4,362***
<b>COT (g kg<sup>-1</sup>)</b>	-0,141 <sup>ns</sup>	-0,825 <sup>ns</sup>	-4,412***	-5,096***
----- 10-30 cm -----				
<b>F1 (g kg<sup>-1</sup>)</b>	-0,069 <sup>ns</sup>	-0,317 <sup>ns</sup>	-0,083 <sup>ns</sup>	-0,330 <sup>ns</sup>
<b>F2 (g kg<sup>-1</sup>)</b>	-0,299 <sup>ns</sup>	0,564*	-0,308 <sup>ns</sup>	0,555*
<b>F3 (g kg<sup>-1</sup>)</b>	0,083 <sup>ns</sup>	-0,425 <sup>ns</sup>	0,118 <sup>ns</sup>	-0,390 <sup>ns</sup>
<b>F4 (g kg<sup>-1</sup>)</b>	-1,278**	-0,884*	-3,098***	-2,703***
<b>COT (g kg<sup>-1</sup>)</b>	-1,755***	-1,062*	-3,495***	-2,801***

C1 = 350°C vs 600°C/730 dias; C2 = 350°C vs 600°C/913 dias; C3 = 350°C/730 dias vs 350°C/913 dias; C4 = 600°C/730 dias vs 600°C/913 dias;

\*\*\*significativo a 0,1% pelo teste F; \*\* significativo a 1% pelo teste F; \* significativo a 5% pelo teste F; e ns: Não significativo pelo teste F.

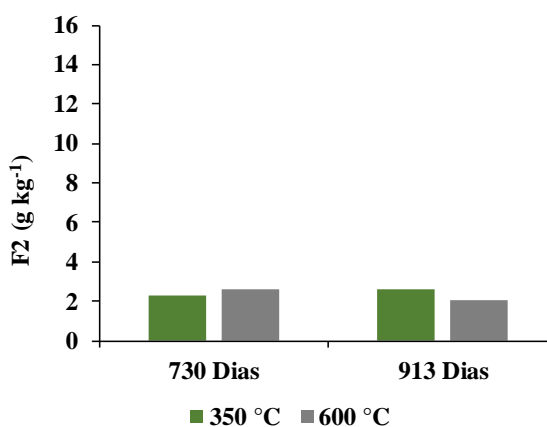
O biocarvão não é um material biologicamente inerte, mesmo produzidos a temperaturas elevadas apresentam uma pequena fração de C na forma lábil, sendo rapidamente degradado por microrganismos quando adicionado ao solo (AMELOOT et al., 2013; SHENG et al., 2016). A fração lábil do biocarvão está relacionada ao tipo de matéria prima e à temperatura de pirólise, no qual temperaturas de pirólise mais elevadas tendem a formar C com elevado grau de aromaticidade e reduzir o C lábil.

A F4, fração considerada mais estável, e o COT aumentaram em relação ao tempo de avaliação para as duas temperaturas de pirólise avaliadas (Figura 6). O incremento de material orgânico encontrado na camada superior do solo na segunda avaliação está relacionado à alta produção e acumulação de serrapilheira apresentados pela cultura do eucalipto e a época de avaliação, que se sucedeu ao final da estação seca. Silva et al. (2018) e Valadão et al. (2019) observaram maiores incrementos de biomassa, principalmente de folhas, ao final da estação seca. O aumento da abscisão foliar acontece naturalmente devido a alterações ambientais, principalmente frio e estresse hídrico (CIANCIARUSO et al., 2006; SILVA et al. 2007; GIÁCOMO et al. 2012).



**Figura 6** – Valores médios da fração do carbono oxidável F4 e COT, na profundidade de 0-10 cm, em função da temperatura de pirólise e época de avaliação.

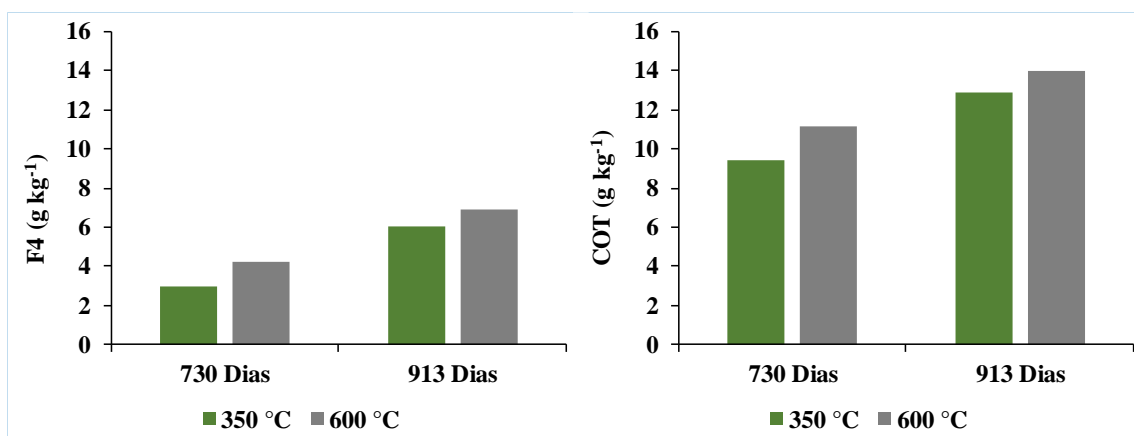
Na camada de 10-30 cm, houve diferença para as frações F2 entre as temperaturas de pirólise (350 e 600 °C), aos 913 dias e entre épocas de avaliação para a temperatura a 600°C, havendo redução do carbono (Figura 7). A aplicação de biocarvão produzido a 350°C promoveu maiores teores de carbono oxidável F2 (2,623 g kg<sup>-1</sup>) do que biocarvões produzidos a 600°C (2,059 g kg<sup>-1</sup>), aos 913 dias. Resultado condizente com a literatura, no qual relata o aumento do efeito no grau de aromaticidade (recalcitrância) conforme se aumenta a temperatura de pirólise, e, conseqüentemente, redução nos compostos de C lábil (CHATTERJEE, et al., 2020; AL-WABEL et al., 2013; ASHWORTH et al., 2014). A recalcitrância do biocarvão pode ser observada pelos constituintes e relações elementares H/C (grau de aromaticidade) (AL-WABEL et al., 2013) e o O/C (grau de polaridade) (MIMMO et al., 2014), no qual quanto menores suas relações, maior a recalcitrância do biocarvão (Tabela 3) (CHATTERJEE, et al., 2020).



**Figura 7** – Valores médios de F2, na profundidade de 10-30 cm, em função da temperatura de pirólise e tempo de avaliação.

Foram observadas diferenças significativas em todos os contrastes para o COT e F4, fração mais estável do carbono, com maiores valores para a temperatura de pirólise de 600°C e acréscimo em relação à época de avaliação, com maiores teores aos 913 dias (Figura 8). A estabilidade do biocarvão pode ser medida pela capacidade de o biocarvão resistir à degradação física e microbiana. À medida que a temperatura de pirólise aumenta, o teor elementar de carbono e cinzas aumentam, estruturas de anel amorfo são transformadas em anéis aromáticos, que são muito mais estáveis (TAG et al., 2016). Segundo Tag et al. (2016), as relações H:C e O:C são indicadores para a estabilidade do biocarvão aplicado ao solo. Ippolito et al. (2012) sugeriram que um biocarvão com proporção O/C <0,4 e H/C <0,6 são mais estáveis, sendo mais eficazes no sequestro de carbono.

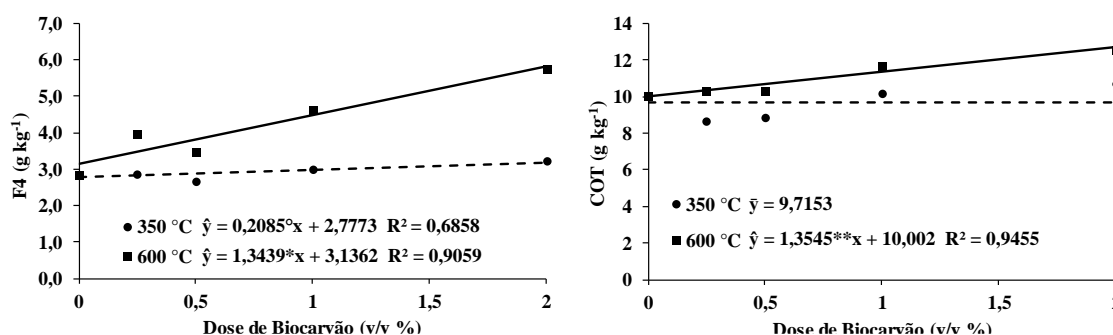
Os biocarvões produzidos a 600°C apresentaram proporções de O/C de 0,38 e H/C de 0,26 (Tabela 3), enquanto biocarvões produzidos a 350°C apresentaram relações maiores do que sugeridas por Ippolito et al. (2012) (O:C = 0,56 e H:C = 0,68), ou seja, de menor estabilidade. Houve acréscimo nos teores de COT e F4 na camada de 10-30 cm em função do tempo, principalmente nos biocarvões produzidos a 600°C, mostrando que além de estabilidade do carbono provindo do biocarvão, houve incorporação de carbono em maiores profundidades ao longo do tempo. Estudos indicam a interação do carbono pirogênico com a matéria orgânica natural do solo, no qual a adição de biocarvões teriam a capacidade de sorver e proteger (estabilizar) a matéria orgânica natural (KASOZI et al., 2010; LEHMAN et al., 2011). Essa reação é variável pelas características químicas de superfície do biocarvão, que são dependentes do material vegetal, temperatura de pirólise, e superfície específica do biocarvão (KASOZI et al., 2010).



**Figura 8** – Valores médios da fração do carbono oxidável F4 e COT, na profundidade de 10-30 cm, em função da temperatura de pirólise e tempo de avaliação.



Foram obtidos ajustes lineares para o carbono oxidável F4 e COT para a temperatura de pirólise de 600 °C, na profundidade de 10-30 cm (Figura 9). A fração F4 e o COT aumentaram em função do aumento das doses do biocarvão produzido a 600 °C, sendo mais eficiente no aumento de carbono na estrutura do solo do que biocarvões produzidos a 350 °C.



**Figura 9** – Fração do carbono oxidável F4 e COT, em função de doses de biocarvão (0; 0,25; 0,5; 1,0; e 2,0) e temperatura de pirólise (350 e 600 °C), na profundidade de 10-30 cm, aos 730 dias após plantio. °, \*, \*\* e \*\*\*\* significativo a 10, 5, 1 e 0,1% pelo teste t. F4 = fração oxidável; COT = carbono orgânico total.

Os dados de carbono da biomassa microbiana (CBM), nitrogênio da biomassa microbiana (NBM), o quociente microbiano (qMIC), bem como as análises enzimáticas, fosfatase ácida (FA) e β-glucosidase (BG), estão presentes na Tabela 10. Na camada de 0-10 cm do solo, foi encontrada diferença significativa para o carbono da biomassa microbiana (CBM), apenas para a temperatura de pirólise de 600°C, em relação às épocas de avaliação, já o NBM e qMIC apresentaram diferença significativa entre épocas de avaliação para ambas as temperaturas (350 e 600 °C) (Tabela 11).

A biomassa microbiana é a fração viva da matéria orgânica, responsável por diversos processos bioquímicos e biológicos. Quando a atividade microbiana é alta, ocorre maior decomposição e conseqüentemente, liberação de nutrientes para as plantas, porém, também pode significar perdas de C do solo a longo prazo (SOUZA et al., 2010; PADILHA et al., 2014).

O CBM reduziu aos 913 dias, apresentando diferença significativa para a temperatura de pirólise de 600°C em ambas as camadas do solo. Já para a temperatura de pirólise de 350°C, o CBM aumentou aos 913 dias, na camada de 10-30 cm, em comparação aos 730 dias.

**Tabela 10** – Teores médios dos atributos biológicos, nas camadas de 0-10 e 10-30 cm, em função de temperaturas de pirólise e épocas de avaliação (730 e 913 dias)

Variável	730 dias		913 dias	
	350°C	600°C	350°C	600°C
----- 0-10 cm -----				
CBM ( $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo)	173,61	186,96	164,84	162,80
NBM ( $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo)	5,09	6,48	12,19	11,50
qMIC (%)	1,91	2,03	1,18	1,09
FA ( $\mu\text{g p-nitrofenol h}^{-1} \text{g}^{-1}$ solo)	402,98	400,61	451,05	429,92
BG ( $\mu\text{g p-nitrofenol h}^{-1} \text{g}^{-1}$ solo)	71,21	59,37	73,73	67,54
----- 10-30 cm -----				
CBM ( $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo)	132,93	209,18	170,80	143,57
NBM ( $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo)	3,61	8,58	11,24	12,17
qMIC (%)	1,37	1,95	1,25	1,06
FA ( $\mu\text{g p-nitrofenol h}^{-1} \text{g}^{-1}$ solo)	397,12	409,97	417,82	394,16
BG ( $\mu\text{g p-nitrofenol h}^{-1} \text{g}^{-1}$ solo)	56,60	58,76	64,60	60,93

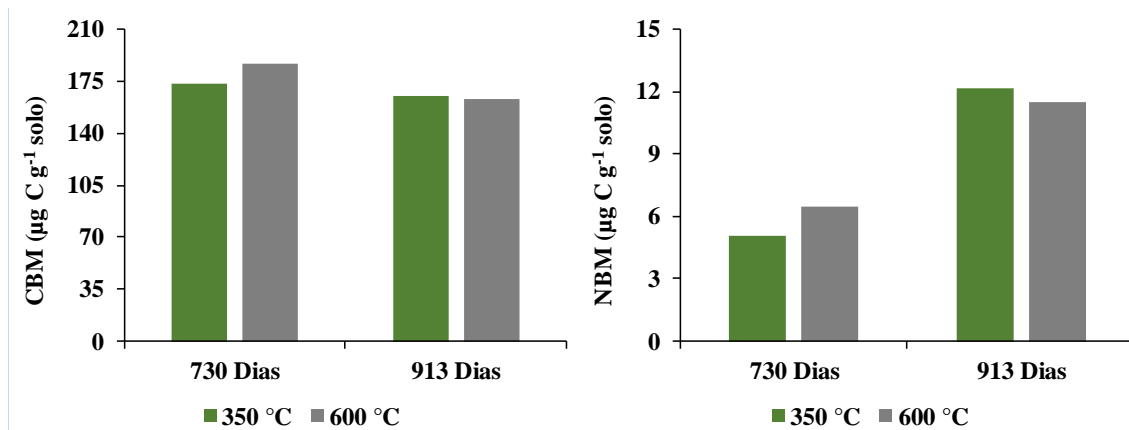
CBM = carbono da biomassa microbiana; NBM = nitrogênio da biomassa microbiana; qMIC = quociente microbiano; FA = fosfatase ácida; BG =  $\beta$ -glucosidase.

**Tabela 11** – Contrastes ortogonais dos atributos biológicos, nas camadas de 0-10 e 10-30 cm do solo, em função de temperaturas de pirólise em que os biocarvões foram produzidos (350 e 600°C) e épocas de avaliação (730 e 913 dias)

Variável <sup>1</sup>	C1	C2	C3	C4
----- 0-10 cm -----				
CBM ( $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo)	-13,347 <sup>ns</sup>	2,038 <sup>ns</sup>	8,770 <sup>ns</sup>	24,155*
NBM ( $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo)	-1,392 <sup>ns</sup>	0,683 <sup>ns</sup>	-7,097***	-5,023***
qMIC (%)	-0,124 <sup>ns</sup>	0,089 <sup>ns</sup>	0,728***	0,941***
FA ( $\mu\text{g p-nitrofenol h}^{-1} \text{g}^{-1}$ solo)	2,364 <sup>ns</sup>	21,129 <sup>ns</sup>	-48,072 <sup>ns</sup>	-29,308 <sup>ns</sup>
BG ( $\mu\text{g p-nitrofenol h}^{-1} \text{g}^{-1}$ solo)	11,837*	6,189 <sup>ns</sup>	-2,523 <sup>ns</sup>	-8,171 <sup>ns</sup>
----- 10-30 cm -----				
CBM ( $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo)	-76,253***	27,222 <sup>ns</sup>	-37,872*	65,603***
NBM ( $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo)	-4,974***	-0,933 <sup>ns</sup>	-7,624***	-3,584**
qMIC (%)	-0,576***	0,193 <sup>ns</sup>	0,120 <sup>ns</sup>	0,888***
FA ( $\mu\text{g p-nitrofenol h}^{-1} \text{g}^{-1}$ solo)	-12,854 <sup>ns</sup>	23,662 <sup>ns</sup>	-20,704 <sup>ns</sup>	15,813 <sup>ns</sup>
BG ( $\mu\text{g p-nitrofenol h}^{-1} \text{g}^{-1}$ solo)	-2,156 <sup>ns</sup>	3,675 <sup>ns</sup>	-7,998 <sup>ns</sup>	-2,167 <sup>ns</sup>

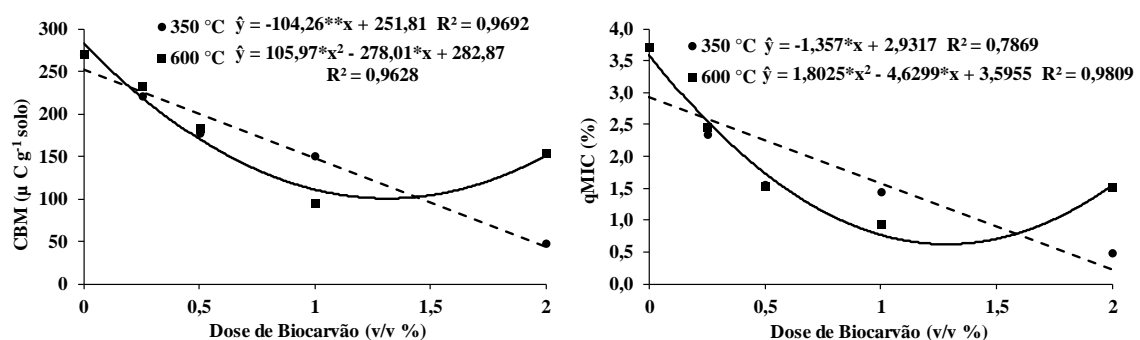
C1 = 350°C vs 600°C/730 dias; C2 = 350°C vs 600°C/913 dias; C3 = 350°C/730 dias vs 350°C/913 dias; C4 = 600°C/730 dias vs 600°C/913 dias. CBM = carbono da biomassa microbiana; NBM = nitrogênio da biomassa microbiana; qMIC = quociente microbiano; FA = fosfatase ácida; BG =  $\beta$ -glucosidase.

\*\*\*significativo a 0,1% pelo teste F; \*\* significativo a 1% pelo teste F; \* significativo a 5% pelo teste F; e ns: Não significativo pelo teste F.

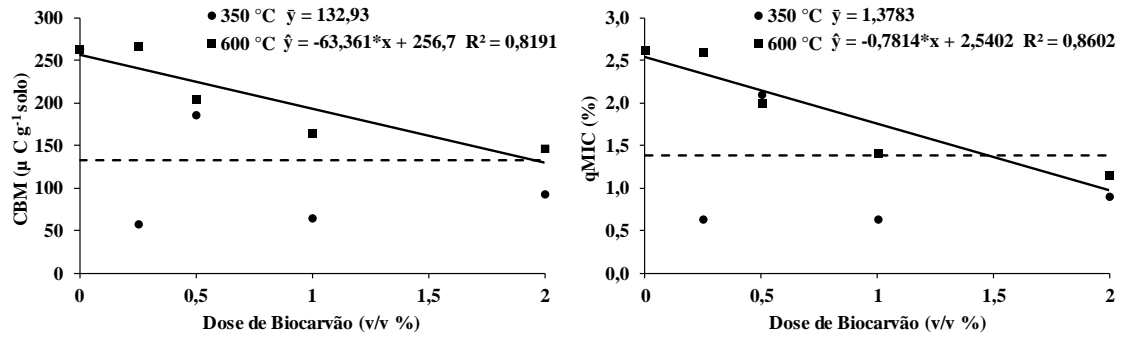


**Figura 10** – Valores médios do carbono da biomassa microbiana (CBM) e nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) em função de doses (0; 0,25; 0,5; 1,0; e 2,0) e temperatura de pirólise (350 e 600 °C), na profundidade de 0-10 cm.

Foram obtidos ajustes de regressão para o CBM e quociente microbiano (qMIC) nas profundidades de 0-10 cm (Figura 12) e 10-30 cm do solo (Figura 13), aos 730 dias, onde apresentaram comportamentos semelhantes. Na camada de 0-10 cm, a temperatura de pirólise de 350°C teve comportamento linear, onde o teor de CBM e o qMIC reduziram com o aumento da dose de biocarvão. Já a temperatura de pirólise de 600 °C apresentou comportamento quadrático, em que se observou um decréscimo do teor de CBM e o qMIC até a dose de 1% e incremento a partir dessa dose de biocarvão.



**Figura 12** – Carbono da biomassa microbiana (CBM) e quociente microbiano (qMIC) em função de doses (0; 0,25; 0,5; 1,0; e 2,0 %) e temperatura de pirólise (350 e 600 °C) do biocarvão, na profundidade de 0-10 cm, aos 730 dias após plantio. °, \*, \*\* e \*\*\* significativo a 10, 5, 1 e 0,1% pelo teste t.



**Figura 13** – Carbono da biomassa microbiana (CBM) e quociente microbiano (qMIC) em função de doses (0; 0,25; 0,5; 1,0; e 2,0) e temperatura de pirólise (350 e 600 °C) do biocarvão, na profundidade de 10-30 cm aos 730 dias após plantio. °, \*, \*\* e \*\*\* significativo a 10, 5, 1 e 0,1% pelo teste t.

Na profundidade de 10-30 cm, o biocarvão produzido a 600 °C apresentou comportamento linear, reduzindo o teor de CBM e o qMIC com o aumento da dose de biocarvão. A diminuição do CBM com o aumento da taxa de aplicação de biocarvão diverge com outros estudos (LEHMANN et al., 2011; LU et al., 2015; PURAKAYASTHA et al., 2015) sendo explicado em parte por variações das doses de biocarvão e tipo de matéria prima, temperatura de pirólise, tipo de solo, etc. O pH do solo ou de um microssítio é determinante para a atividade e distribuição dos microrganismos, geralmente, os fungos são mais adaptados a valores de pH menores que 5.0 (acidófilos) e as bactérias e os actinomicetos, a valores de pH entre 6.0 e 8.0 (neutrófilos e basófilos) (LEITE & ARAÚJO 2007). O aumento das doses de biocarvão influencia o aumento do pH do solo, principalmente para biocarvões pirolisados a altas temperaturas, podendo ser o fator que influenciou a redução da atividade microbiana por uma possível alteração da estrutura da comunidade microbiana de fúngica para bacteriana.

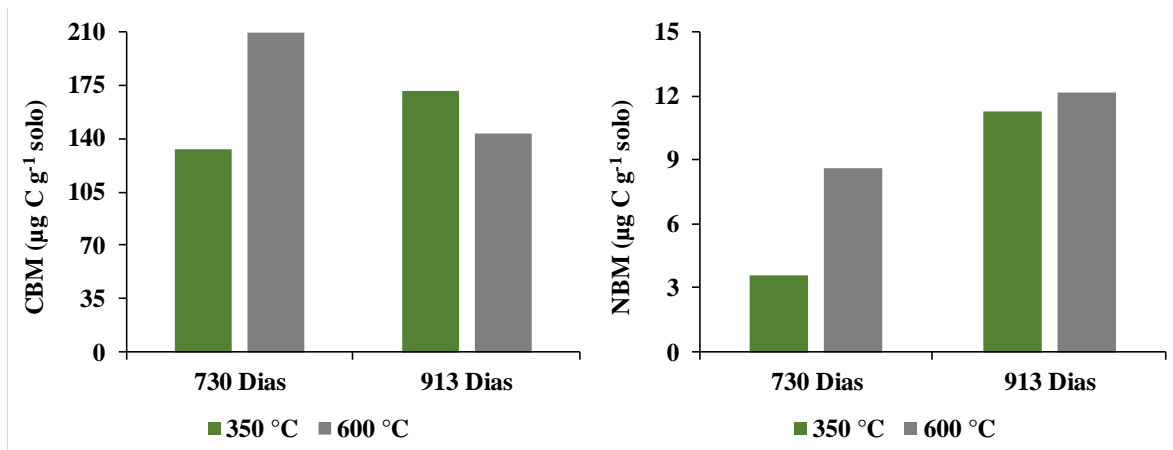
O biocarvão é um material com alto teor de C e grau de aromaticidade, que garante seu alto nível de recalcitrância. Quando adicionado ao solo, cinzas e C orgânico lábil também são adicionados, atuando como fonte de energia e nutrientes, favorecendo a abundância e atividades microbianas (LIMA et al., 2018; LIU, et al., 2020). A dinâmica do C no solo é intermediada pela demanda de energia e nutrientes da microbiota (KUZUYAKOV, 2009). A baixa atividade microbiana pode estar relacionada também aos baixos teores da fração considerada mais lábil do carbono orgânico (F1 e F2), frações mais disponíveis para os microrganismos do solo. As reduções das frações de C lábil

podem estar relacionadas a uma possível ocorrência de efeito “*priming*” no início do experimento e conseqüentemente, redução das atividades microbianas.

Alguns autores relacionaram a adição do biocarvão com efeito *priming*, relatando que a adição de biocarvão causou aumento na mineralização do C lábil e N do solo (JONES et al., 2011; WANG et al., 2016). A ocorrência de efeito “*priming*” - aceleração da degradação de matéria orgânica -, causada pelo biocarvão, foi observada por Wardle et al. (2008), no material orgânico na interface solo-liteira, e por Luo et al. (2011), na matéria orgânica original. Uma meta-análise realizada por Wang et al. (2016) relata que apesar do biocarvão possuir maior teor de C aromático, estudos de curto prazo mostraram a ocorrência de decomposição de frações de carbono não condensadas ou menos condensadas do biocarvão e um resultado de vários estudos implicam que essa decomposição desapareceu após 2 anos, mantido em um nível muito baixo por longos períodos (KUZUYAKOV et al., 2009, 2014; FANG et al., 2014a, b).

Petter (2010) relatou que a aplicação de doses até 32 Mg ha<sup>-1</sup> de carvão de eucalipto não alterou a atividade microbiana (respiração e CBM). Dempster et al. (2012) relataram que o CBM reduziu com o aumento do volume de aplicação de biocarvão de biomassa de eucalipto. Estudos encontraram compostos voláteis presentes no biocarvão potenciais inibidores da atividade microbiana (DEENIK et al., 2010) ou que são liberados após sua aplicação ao solo introdução ao solo (SPOKAS et al., 2010).

Enquanto que o CBM da área aplicada com biocarvão produzido à 600 °C diminuiu, o NBM aumentou aos 913 dias em comparação aos 730 dias (Figura 14), apresentando diferenças significativas para as duas temperaturas de pirólise. Estudos realizados por Dempster et al. (2012) relataram que o aumento de doses de biocarvão de eucalipto, produzido com temperatura de pirólise de 600 °C, promoveu redução do CBM, mas não do NBM, podendo corroborar com a possibilidade da alteração da comunidade microbiana.



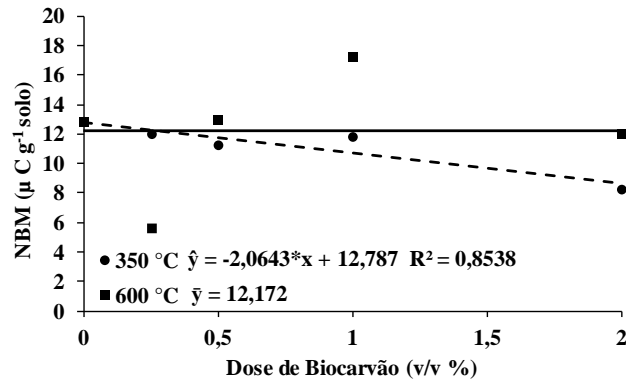
**Figura 14** – Valores médios do carbono da biomassa microbiana (CBM) e nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) em função de doses (0; 0,25; 0,5; 1,0; e 2,0) e temperatura de pirólise (350 e 600 °C), na profundidade de 10-30 cm.

Chen et al. (2015) observaram aumento da abundância de Bradyrhizobiaceae com a adição de biocarvão em um arrozal. A adição de biocarvão ao solo podem ter efeitos estimulantes aos microrganismos capazes de fixar nitrogênio.

Atualmente, há uma compreensão limitada da influência do biocarvão nos processos de N do solo, e em particular os organismos envolvidos nas transformações. A adição de biocarvão ao solo pode aumentar significativamente o pH do solo (LEHMANN et al., 2011; CHAN e Xu, 2009 ) ou alterar o pH do microporo local, potencialmente fornecendo um habitat mais favorável para organismos nitrificantes (DE BOER e KOWALCHUK, 2001).

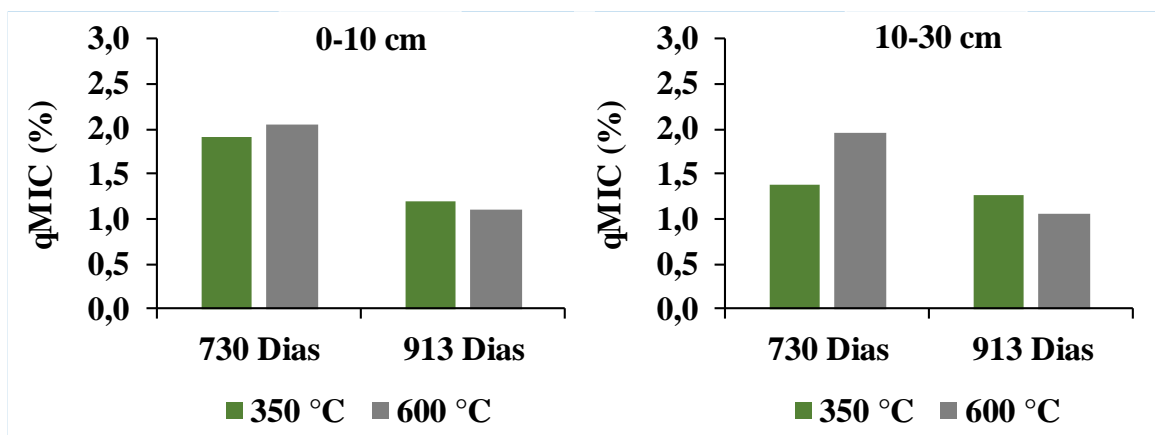
Obeve-se ajuste de regressão linear para o NBM, na profundidade de 10-30 cm aos 913 dias, onde se pode observar um decréscimo do NBM com o aumento da dose do biocarvão para a temperatura de pirólise de 350°C (Figura 15).

O qMIC apresentou comportamento semelhante ao CBM, reduzindo sua taxa com o tempo, apresentando diferença significativa entre épocas de avaliação para as duas temperaturas de pirólise na profundidade de 0-10 cm (Figura 16). Na profundidade de 10-30 cm, só a temperatura de pirólise de 600°C apresentou diferença significativa entre épocas de avaliação, porém também apresentou diferença significativa entre temperaturas de pirólise aos 730 dias. Todos os tratamentos apresentaram valores de qMIC superiores a 1%.



**Figura 15** – Nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) em função de doses (0; 0,25; 0,5; 1,0; e 2,0%) e temperatura de pirólise (350 e 600 °C) do biocarvão, na profundidade de 10-30 cm aos 913 dias após plantio °, \*, \*\* e \*\*\* significativo a 10, 5, 1 e 0,1% pelo teste t.

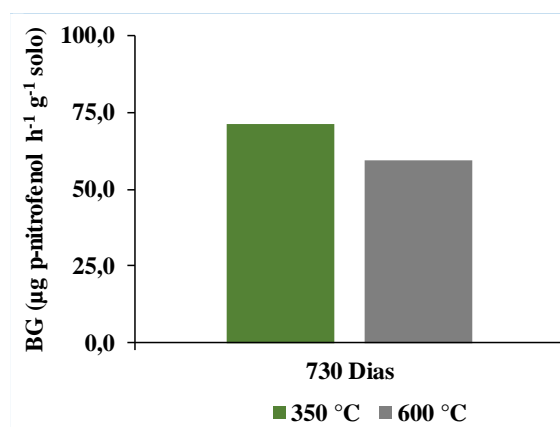
O quociente microbiano representa cerca de 1% a 4% do COT do solo, comumente, valores abaixo de 1% são atribuídos a algum fator limitante à atividade microbiana do solo (JAKELAITIS et al., 2008). A amplitude dos valores de qMIC pode ser interpretada como o padrão de entrada ou de saída de MOS, a eficiência de conversão de C microbiano, as perdas de C do solo e estabilização do C orgânico da fração mineral do solo (LOPES et al., 2011). Segundo SILVA et al. (2010), o quociente microbiano indica a quantidade de carbono do solo que está imobilizado na biomassa microbiana. De acordo com Balota et al. (1998), solos que possuem maior ou menor quociente microbiano indicam, respectivamente, tendência ao acúmulo ou perda de C do solo.



**Figura 16** – Valores médios quociente microbiano (qMIC) em função de doses (0; 0,25; 0,5; 1,0; e 2,0) e temperatura de pirólise (350 e 600 °C), na profundidade de 0-10 e 10 – 30 cm.

No geral, não foram identificadas influências dos tratamentos nas atividades enzimáticas fosfatase ácida (FA) e  $\beta$ -glucosidase (BG) no solo. A atividade enzimática do solo pode ser usada para indicar a intensidade de alguns processos bioquímicos, sendo considerada um dos principais contribuintes para a atividade microbiana do solo (BALOTA et al., 2013). Apenas a atividade de  $\beta$ -glucosidase apresentou diferença significativa entre temperaturas de pirólise, no qual a temperatura de 350°C teve maior atividade de BG, na avaliação de 730 dias. Martins Filho (2017) verificou aumentos nas atividades enzimáticas  $\beta$ -glucosidase com adição de biocarvão de casca de café nas doses de 4 Mg ha<sup>-1</sup> e aumento da atividade enzimática da fosfatase ácida na dose de 4 Mg ha<sup>-1</sup> para biocarvão de casca de café e na dose de 16 Mg ha<sup>-1</sup> para biocarvões de borra de café. A  $\beta$ -glucosidase é uma enzima extracelular envolvida na mineralização de carbono, sendo, portanto, de interesse para avaliar a resistência à degradação da MO em solos com biocarvão (SINSABAUGH et al., 2008; AMELOOT et al., 2014).

Bhaduri et al. (2016) relataram aumentos nos teores de CBM, carbono orgânico e atividade enzimática microbiana pela ação do biochar de casca de amendoim, produzido a 300 °C. Os autores verificaram que o BC produzido a baixas temperaturas foi capaz de promover um efeito positivo, sendo mais eficiente em propiciar alterações na atividade microbiana do solo.



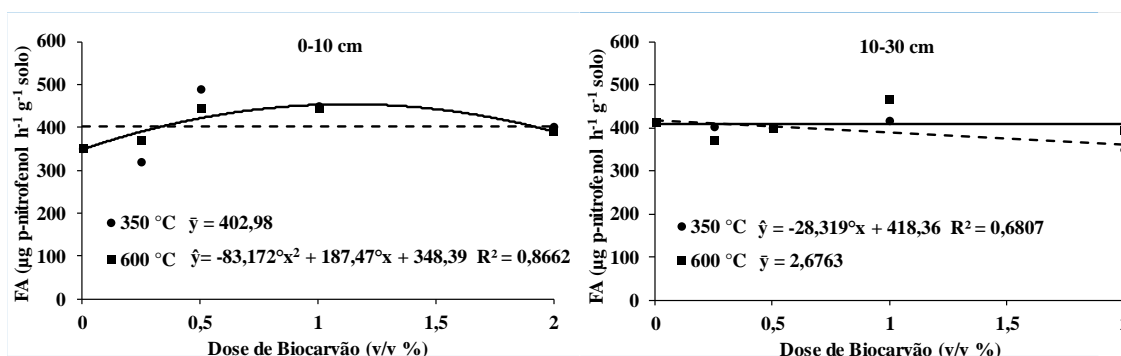
**Figura 17** - Valores médios de  $\beta$ -glucosidase (BG) em função de doses (0; 0,25; 0,5; 1,0; e 2,0) e temperatura de pirólise (350 e 600 °C), na profundidade de 0-10 e 10 – 30 cm.

Foram obtidos ajustes de regressão para a FA aos 730 dias (Figura 18) e de BG aos 913 dias (Figura 19) em ambas as profundidades.

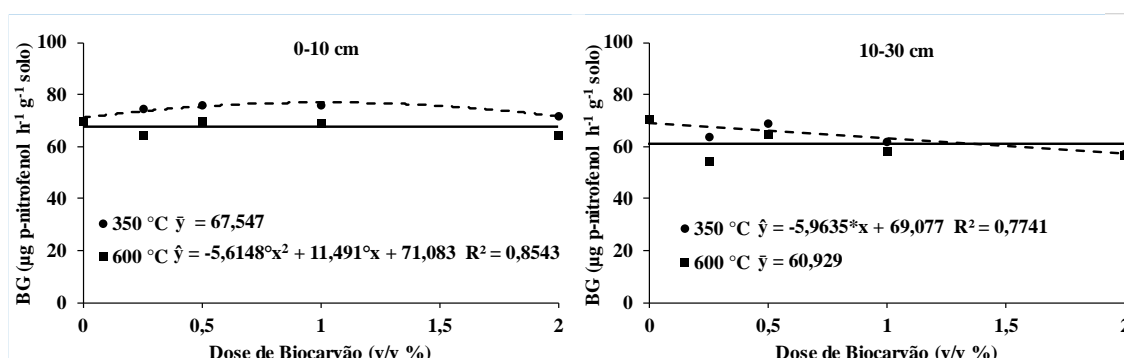
As duas enzimas tiveram comportamentos semelhantes, porém, em épocas diferentes. Na camada de 0-10 cm, houve aumento das atividades da FA e BG até 1% da



dose de biocarvão, para as temperaturas de pirólise de 600 e 350 °C, respectivamente. Já na camada de 10-30 cm, as enzimas reduziram com aumento das doses de biocarvão produzido à temperatura de pirólise de 350 °C.



**Figura 18** – Fosfatase ácida (FA) em função de doses (0; 0,25; 0,5; 1,0; e 2,0 %) e temperatura de pirólise (350 e 600 °C) do biocarvão, na profundidade de 0-10 e 10-30 cm aos 730 dias após plantio. °, \*, \*\* e \*\*\* significativo a 10, 5, 1 e 0,1% pelo teste t.



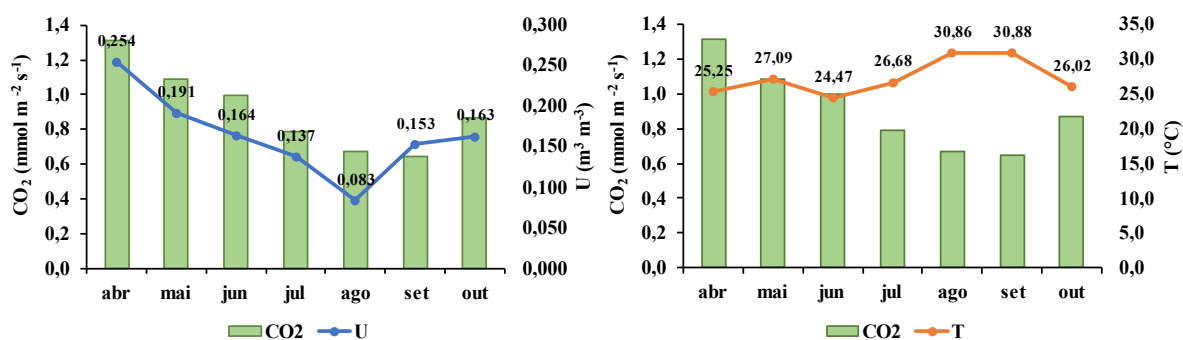
**Figura 19** –  $\beta$ -glucosidase (BG) em função de doses (0; 0,25; 0,5; 1,0; e 2,0 %) e temperatura de pirólise (350 e 600 °C) do biocarvão, na profundidade de 0-10 e 10-30 cm aos 913 dias após plantio. °, \*, \*\* e \*\*\* significativo a 10, 5, 1 e 0,1% pelo teste t.

De acordo com o relato de Prayogo et al. (2014), os altos teores de carbono no solo podem ser atribuídos à maior agregação de suas partículas, possibilitando a proteção do biochar e da MOS contra o processo de degradação. Nesse mesmo trabalho, foi verificado que a aplicação de biochar de salgueiro dificultou a ação enzimática microbiana, por promover a sorção dessas enzimas, possibilitando assim a redução da decomposição da MOS.

### 3.2. Emissão de CO<sub>2</sub> do solo

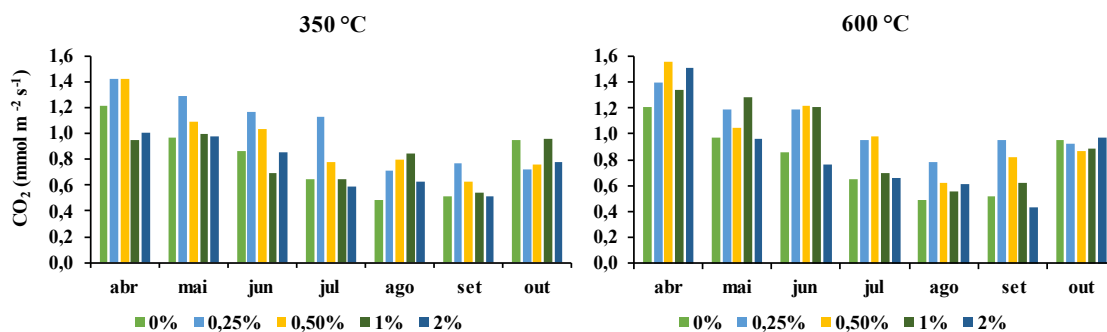
A produção de CO<sub>2</sub> está ligada à ação dos microrganismos que decompõem a matéria orgânica do solo e à respiração das raízes das plantas. Já o transporte ou difusão está relacionado com a estruturação física do solo, sobretudo a porosidade que condiciona aeração e permite o fluxo de gases no solo (Sá et al., 2001). As atividades biológicas estão intimamente ligadas às condições de temperatura e à umidade do solo, influenciando a emissão de CO<sub>2</sub> do solo. Percebe-se que os maiores teores de CO<sub>2</sub> ocorreram nos meses em que a umidade do solo encontrava-se mais elevada (Figura 20).

A água influencia diretamente a atividade biológica dos solos pela difusão de nutrientes, na motilidade microbiana, influenciando pH, além de estar relacionada com a temperatura e a aeração. A atividade das células dos organismos é governada pelas leis da termodinâmica, onde a temperatura influencia diretamente (acelerando ou retardando) a ocorrência dos processos metabólicos microbianos (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).



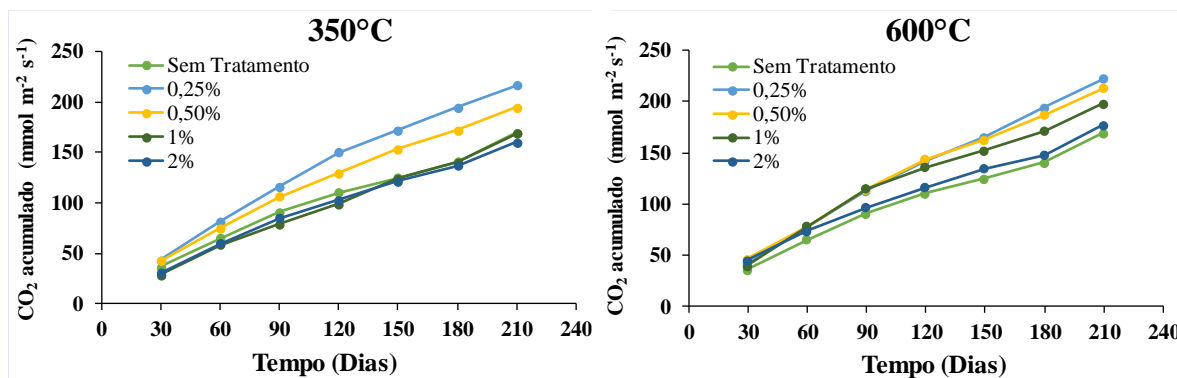
**Figura 20** – Valores médios de umidade (U) e temperatura (T) do solo sobre a emissão de CO<sub>2</sub>.

A emissão de CO<sub>2</sub> do solo é oriunda de processos biológicos e físicos que alteram a produção e o transporte de CO<sub>2</sub> que sai do solo e vai para a atmosfera. A Figura 21 apresenta os dados de CO<sub>2</sub> emitido pelos tratamentos com emprego de biocarvão produzidos a 350 °C e 600 °C. As temperaturas de pirólise do biocarvão apresentaram tendências semelhantes. A redução das emissões de abril/2020 (730 dias) para outubro/2020 (913 dias) corrobora com as reduções de CBM e qMIC, podendo inferir que houve redução na atividade microbiana do solo.



**Figura 21** – Emissão de CO<sub>2</sub> em tratamentos com aplicação de biocarvão produzidos a 350 e 600 °C.

O acúmulo de CO<sub>2</sub> (Figura 22) mostra maiores emissões de CO<sub>2</sub> nos tratamentos sob menores doses de biocarvão (0,25 e 0,50%) para as duas temperaturas de pirólise. Esse comportamento provavelmente esteja relacionado ao fato de maiores doses de biocarvão podem causar um efeito “*priming*”, reduzindo frações lábeis do carbono orgânico e conseqüentemente, reduzindo atividades microbianas. Também pode estar ligado ao fato de maiores doses de biocarvão influenciarem a formação de agregados, que o C, ao ser incorporado ao agregado, torna-se de difícil acesso aos microrganismos.



**Figura 22** - Emissão de CO<sub>2</sub> acumulado em tratamentos com aplicação de biocarvão produzidos a 350 °C e 600 °C.

#### 4. CONCLUSÕES

A adição de biocarvão no solo promoveu aumento de carbono orgânico total (COT) e das frações mais estáveis do carbono (F4) ao longo do tempo para as duas temperaturas de pirólise, em ambas as camadas de solo. Dentre as temperaturas de pirólise, o biocarvão pirolisado a 600 °C foi superior ao biocarvão pirolisado a 350 °C.

O teor do carbono da biomassa microbiana (CBM) e quociente microbiano (qMIC) reduziram aos 913 dias após o plantio, em ambas as profundidades, em função da aplicação de biocarvão pirolisado a 600°C. No entanto, o teor do CBM aumentou na camada de 10-30 com a aplicação de biocarvão pirolisado a 350°C.

O teor de nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) aumentou na segunda época de avaliação (913 dias) em ambas as profundidades, principalmente nos tratamentos com biocarvões pirolisados a 600°C.

Os teores de CBM e qMIC reduziram com o aumento das doses de biocarvão pirolisado a 350°C, na camada de 0-10, e com a adição de biocarvão pirolisado a 600°C na camada de 10-30cm do solo. Já a aplicação de biocarvão pirolisado a 600°C teve comportamento quadrático na camada de 0-10, onde houve um decréscimo até a dose de 1%, aumentando os teores de CBM e qMIC com doses maiores.

De maneira geral, a atividade enzimática não foi influenciada pela temperatura de pirólise e época de avaliação. Na camada de 0-10 cm, houve aumento das atividades das enzimas FA e BG até 1% da dose de biocarvão, para as temperaturas de pirólise de 600 e 350 °C, respectivamente.

A atividade microbiana foi influenciada pela época de avaliação. As condições climáticas proporcionadas na segunda avaliação (913 dias) reduziram a atividade microbiana no solo.

## 5. REFERÊNCIAS

AL-WABEL, M.; AL-OMRAN, A.; EL-NAGGAR, A. H.; NADEEM, M.; USMAN, A. R. A. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes. **Bioresour. Technol.**, 131, pp. 374-379, 2013.

AMELOOT, N.; STEVEN, S.; DAS, K. C.; KANAGARATNAM, J.; STEFAAN DE, N. Biochar amendment to soils with contrasting organic matter level: effects on N mineralization and biological soil properties. **Global Change Biology Bioenergy**, p. n/a– n/a, 2013.

AMELOOT, N.; STEVEN, S.; DAS, K. C.; KANAGARATNAM, J.; STEFAAN DE, N. Biochar amendment to soils with contrasting organic matter level: effects on N mineralization and biological soil properties. **Global Change Biology Bioenergy**, p. n/a– n/a, 2014.

ANDERSON, C. R.; CONDRON, L. M.; CLOUGH, T. J.; FIERS, M.; STEWART, A.; HILL, R. A.; SHERLOCK, R. R.; Biochar induced soil microbial community change:

implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus. **Pedobiologia** 54, 309–320, 2011.

ASHWORTH, A. J.; SADAKA, S. S.; ALLEN, F. L.; SHARARA, M. A.; KEYSER, P. D. Influence of pyrolysis temperature and production conditions on switchgrass biochar for use as a soil amendment. **BioResources** 9, 7622–7635, 2014.

BALOTA, E. L. et al. Biomassa microbiana e sua atividade em solos sob diferentes sistemas de preparo e sucessão de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 641-649, 1998.

BALOTA, E. L.; NOGUEIRA, M. A.; MENDES, I. C.; HUNGRIA, M.; FAGOTTI, D. S. L.; MELO, G. M. P.; SOUZA, R. C.; MELO, W. J.; Enzimas e seu papel na qualidade do solo. **Tópicos Ciência do solo**, v. 8, p. 221-278, 2013.

BHADURI, D.; SAHA, A.; DESAI, D.; MEENA, H. N. Restoration of carbon and microbial activity in salt-induced soil by application of peanut shell biochar during short-term incubation study. **Chemosphere** 148:86–98, 2016)

CHAER, G. M.; GAIAD, S.; DOS SANTOS, A. B.; GROCHOSKI, R. Caracterização Microbiológica do Solo. **Embrapa**, 2014.

CHAN, K. Y.; XU, Z. Biochar: nutrient properties and their enhancement. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, London, pp. 67e84, 2009.

CHATTERJEE, R., SAJJADI, B., CHEN, W. Y., MATTERN, D. L., HAMMER, N., RAMAN, V., DORRIS, A. Effect of pyrolysis temperature on physicochemical properties and acoustic-based amination of biochar for efficient CO<sub>2</sub> adsorption. **Frontiers in Energy Research**, 8, 85, 2020.

CHEN, J. *et al.* Change in active microbial community structure, abundance and carbon cycling in an acid rice paddy soil with the addition of biochar. **European Journal of Soil Science**. 67(6), 857–867 (2016).

CIANCIARUSO, M. C.; PIRES, J. S. R.; DELITTI, W. B. C.; SILVA, E. F. L. P. Produção de serrapilheira e decomposição do material foliar em um cerradão na Estação Ecológica de Jataí, município de Luiz Antônio, SP, Brasil. **Acta Bot. Bras.**, 20(1): 49-59, 2006.

CORNELISSEN, G.; NURIDA, N. L.; HALE, S. E.; MARTINSEN, V.; SILVANI, L.; MULDER, J. Fading positive effect of biochar on crop yield and soil acidity during five growth seasons in na Indonesian Ultisol. **Science of The Total Environment**, v. 634, p. 561–568, 2018.

CREMON, C. et al. Atributos do solo em diferentes fitofisionomias do Cerrado Mato-

grossense. **Agrarian**, v. 2, n.6, p. 47-59, out./dez. 2009.

CROWLEY, D. Biochar effects on soil biota — a review. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 43, p. 1812-1836, 2011.

DAI, Z.; ZHANG, X.; TANG, C.; MUHAMMAD, N.; WU, J.; BROOKES, P. C.; XU, J. Potential role of biochars in decreasing soil acidification—a critical review. **Science of the Total Environment**, v. 581, p. 601-611, 2017.

DE BOER, W.; KOWALCHUK, G. A. Nitrification in acid soils: micro-organisms and mechanisms. **Soil Biol Biochem** **33**: 853–866, 2001.

DEMPSTER, N.; GLEESON, B.; SOLAIMAN, M.; JONES, L.; MURPHY, V. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil. **Plant and Soil**, **354**, 311– 324, (2012a).

DEMPSTER, N.; JONES, L.; MURPHY, V. Organic nitrogen mineralisation in two contrasting agro-ecosystems is unchanged by biochar addition. **Soil Biology and Biochemistry**, **48**, 47– 50, 2012b.

DORAN, J.W. & PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; CELEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. Defining soil quality for sustainable environment. Madison, **Soil Science Society of America**, p. 3-21, 1994. (Special Publication, 35)

EL-NAGGAR, A., LEE, S. S., RINKLEBE, J., FAROOQ, M., SONG, H., SARMAH, A. K., A.K.; ZIMMERMAN, A.R.; AHMAD, M.; SHAHEEN, S.M.; OK, Y.S. Biochar application to low fertility soils: a review of current status, and future prospects. **Geoderma**. v. 337, p. 536–554, 2019.

FANG, Y.; SINGH, B. P.; SINGH, B. Temperature sensitivity of biochar and native carbon mineralisation in biochar-amended soils. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 191, 158–167, 2014b.

FANG, Y.; SINGH, B.; SINGH, B. P.; KRULL, E. Biochar carbon stability in four contrasting soils. **European Journal of Soil Science**, 65, 60–71, 2014a.

FERREIRA, E. A. B.; MEIRELLES, M. L.; FRANCO, A. C.; SANTOS, J. L. M. Influência de variações ambientais sobre o fluxo de CO<sub>2</sub> em solos sob campo limpo úmido no cerrado. In: IX Simpósio nacional do cerrado: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais. **Simpósio nacional do Cerrado**, Brasília-DF, p. 3, 2008.

FIDEL, R.; LAIRD, D.; PARKIN, T. Effect of biochar on soil greenhouse gas emissions at the laboratory and field scales. **Soil Systems** v. 3, p. 8, 2019.

- GIÁCOMO, R. G.; PEREIRA, M. G. & MACHADO, D. L. Aporte e decomposição de serapilheira em áreas de Cerradão e Mata Mesofítica na Estação Ecológica de Pirapitinga – MG. **Ciência Florestal**, 22(4): 669- 680, 2012.
- GLASER, B.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. The ‘Terra Preta’ phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. **Naturwissenschaften** v. 88, p. 37–41, 2001.
- GUL, S.; WHALEN, J. K. Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils - review paper. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 103, p. 1-15, 2016.
- HANG, X.; QU, J.; LI, H.; LA, S.; TIAN, Y.; GAO, L. Biochar addition combined with daily fertigation improves overall soil quality and enhances water-fertilizer productivity of cucumber in alkaline soils of a semi-arid region. **Geoderma**, 363, 114170, 2020.
- HERATH, H.M.S.K.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; HEDLEY, M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An Alfisol and an Andisol. **Geoderma** 209:188–197, 2013.
- IBA – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual**. Ano base 2018. São Paulo, 80p. 2019.
- IBA – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual**. Ano base 2019. São Paulo, 66p. 2020.
- IPPOLITO J. A.; LAIRD, D. A.; BUSSCHER, W. J. Environmental benefits of biochar. **Journal of Environmental Quality**, v. 41, p. 967–972, 2012.
- JAISWAL, K. A.; ELAD, Y.; GRABER, E. R. & FRENKEL, O. Rhizoctonia solani suppression and plant growth promotion in cucumber as affected by biochar pyrolysis temperature, feedstock and concentration. **Soil Biol. Biochem**, v. 69, p. 110–118, 2013.
- JAKELAITIS, A.; SILVA, A. A. DA; SANTOS, J. B. DOS; VIVIAN, R. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.38, p.118-127, 2008.
- JEFFERY, S.; VERHEIJEN, F. G. A.; VELDE, M.; BASTOS A. C. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 144, p. 175-187, 2011.
- Jones L, Murphy V, Khalid M, Ahmad W, Edwards-Jones G, DeLuca H (2011) Short-term biochar-induced increase in soil CO<sub>2</sub> release is both biotically and abiotically mediated. **Soil Biology and Biochemistry**, 43, 1723– 1731
- KASOZI, G. N.; ZIMMERMAN, A. R.; NKEDI-KIZZA P.; GAO, B. **Catechol and humic acid sorption onto a range of laboratory-produced black carbons (biochars)**

- KRULL, E. S.; SWANSTON, C. W.; SKJEMSTAD, J. O.; MCGOWAN, J. A. Importance of charcoal in determining the age and chemistry of organic carbon in surface soils. **J. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**. Vol. 111, Issue G4, 2006.
- KUPPUSAMY, S.; THAVAMANI, P.; MEGHARAJ, M.; VENKATESWARLU, K.; NAIDU, R. Agronomic and remedial benefits and risks of applying biochar to soil: current knowledge and future research directions. **Environment International**, 87, p. 1-12, 2016.
- KUZYAKOV, Y.; BOGOMOLOVA, I.; GLASER, JONES, L.; ROUSK, J.; EDWARDS-JONES, G.; DELUCA, H.; MURPHY, V. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three-year field trial. **Soil Biology and Biochemistry**, 45, 113–124, 2012.
- KUZYAKOV, Y.; SUBBOTINA, I.; CHEN, H.; BOGOMOLOVA, I.; XU, X. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by <sup>14</sup>C labeling. **Soil Biol. Biochem.** 41, 210–219. 2009.
- LABEGALINI, A. **Obtenção de biochar a partir da pirólise rápida da torta de pinhão manso: uso como adsorvente e suporte**. 116 f. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.
- LEHMAN, J.; RILLIG, M. C.; THIES, J.; MASIELLO, C. A.; HOCKADAY, W. C.; CROWLEY, D. Biochar effects on soil biota – a review. **Soil Biology and Biochemistry**, 43, 1912– 1836, 2011.
- LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management: An introduction. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (ed). **Biochar for environmental management: Science and Technology**, Londres, Earthscan, v.1, p.4-18, 2009.
- LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for Environmental Management: Science and Technology**. 2 ed. London: Earthscan, 976 p. 2015.
- LEITE, L.F.C. & ARAÚJO, A.S. Ecologia microbiana do solo. Teresina, **Embrapa Meio Norte**, 2007. 24p. (Documentos/Embrapa Meio-Norte)
- LIMA, J. R. S. et al. Effect of biochar on physicochemical properties of a sandy soil and maize growth in a greenhouse experiment. **Geoderma**, v. 319, p. 14-23, 2018.
- LIN, Z.; LIU, Q.; LIU, G.; COWIE, L. A.; BEI, Q.; LIU, B.; WANG, X.; MA, J.; ZHU, J.; XIE, Z. Effects of different biochars on *Pinus elliottii* growth, N use efficiency, soil N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions and C storage in a subtropical area of China. **Pedosphere**, v. 27, p. 248-261, 2017.



- LIU B et al. A fast chemical oxidation method for predicting the long-term mineralization of biochar in soils. **Sci Total Environ** 718:137390, 2020.
- LIU, S. et al. Mineral-ions modified biochars enhance the stability of soil aggregate and soil carbon sequestration in a coastal wetland soil. **Catena**, v. 193, p. 104618, 2020.
- LOPES, E. L. N. et al. Microbial biomass and soil chemical properties under different land use systems in northeastern Pará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.4, Viçosa, jul./aug., 2011.
- LU, H.; LASHARI, M. S.; LIU, X.; JI, H.; LI, L.; ZHENG, J.; KIBUE, G. W.; JOSEPH, S.; PAN, G. Changes in soil microbial community structure and enzyme activity with amendment of biochar-manure compost and pyroligneous solution in a saline soil from Central China. **Euro J Soil Biol**, 70:67–76, 2015b.
- LUO, Y.; DURENKAMP, M.; DE NOBILI, M.; LIN, Q.; BROOKES, P. C. Short term soil priming effects and the mineralization of biochar following its incorporation to soils of different pH. **Soil Biology and Biochemistry**, v.43, p.2304-2314, 2011.
- MARTINEZ-SALGADO, M. M.; GUTIERREZ-ROMERO, V.; JANNSENS, M.; ORTEGA-BLU, R. Biological soil quality indicators: a review. In: MENDEZ-VILAS, A. (Ed.). **Current research, technology and education topics in applied microbiology and microbial biotechnology**. [Badajoz]: Formatex Research Center, p. 319–328, (Microbiology book series, 2), 2010.
- MENDES, I.C., SOUSA, D.M.G., REIS JÚNIOR, F.B. Bioindicadores de qualidade de solo: dos laboratórios de pesquisa para o campo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia** 32, 185-203, 2015.
- MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria Orgânica do Solo: Métodos de Análises**. Viçosa, UFV, p. 107, 2005.
- MERCANTE, F. M.; SILVA, R. F.; FRANCELINO, C. S. F.; CAVALHEIRO, J. C. T.; OTSUBO, A. A. Biomassa microbiana, em um Argissolo Vermelho, em diferentes coberturas vegetais, em área cultivada com mandioca. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 34, n. 4, p. 479-485, 2008.
- MIMMO, T., PANZACCHI, P., BARATIERI, M., DAVIES, C., TONON, G. Effect of pyrolysis temperature on miscanthus (*Miscanthus × giganteus*) biochar physical, chemical and functional properties. **Biomass Bioenergy** 62, 149–157, 2014.
- MOREIRA, F. M. & SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Editora UFLA, 2006. 626p.
- MOREIRA, F. M. S; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do solo**. Lavras: UFLA, 729 p., 2006,

- NIAZI, N. K.; BIBI, I.; SHAHID, M.; OK, Y. S.; BURTON, E. D.; WANG, H.; SHAHEEN, S. M.; RINKLEBE, J.; LÜTTGE, A. Arsenic removal by perilla leaf biochar in aqueous solutions and groundwater: an integrated spectroscopic and microscopic examination. **Environmental Pollution**, v. 232, p. 31-41, 2018.
- PADILHA, K. M.; FREIRE, M. B. G. S.; DUDA, G. P.; SANTOS, U. J.; SILVA, A. O.; SOUZA, E. R. Indicadores biológicos de dois solos com a incorporação de subproduto da agroindústria de café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 38:1377–1386, 2014.
- PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B. de; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. (Ed.). Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica. Brasília, DF: **Embrapa**, 372 p. 2015.
- PETTER, F. A. **Biomassa carbonizada como condicionador de solo: aspectos agrônômicos e ambientais do seu uso em solos de cerrado**. 2010. 130p. Tese Doutorado (Doutorado em Produção Vegetal), Curso de Pós-graduação em Produção Vegetal, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.
- PRAYOGO, C.; JONES J. E.; BAEYENS, J.; BENDING, G. D Impact of biochar on mineralisation of C and N from soil and willow litter and its relationship with microbial community biomass and structure. *Biol Fertil Soils* 50:695–702, 2014.
- PURAKAYASTHA, T. J.; KUMARI, S.; PATHAK, H. Characterisation, stability, and microbial effects of four biochars produced from crop residues. **Geoderma** 239 (240): 293–303, 2015.
- RANDOLPH, P.; BANSODE, R. R.; HASSAN, O. A.; REHRAH, D.; RAVELLA, R.; REDDY, M. R.; WATTS, D. W.; NOVAK, J. M.; AHMEDNA, M. Effect of biochars produced from solid organic municipal waste on soil quality parameters. **Journal Environmental Management**, v.192, p. 271-280, 2017.
- RAZZAGHI, F.; OBOUR, P.B.; ARTHUR, E. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. **Geoderma**, v. 361, p. 114055, 2020.
- REEVES, D. W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 43, n. 1-2, p. 131–167, 1997.
- SÁ, J. C. M.; CERRI, C. C.; DICK, W. A.; LAL, R.; VENZKE FILHO, S. P.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. J. Organic mater dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America**, v. 65, p. 1486-1499, 2001.

SAITO, M., MARUMOTO, T. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi: the status quo in Japan and the future prospects. **Plant and Soil** 244, p. 273-279, 2002.

SANTANA, D. F. & BAHIA-FILHO, A. F. C. Soil quality and agricultural sustainability in the Brazilian Cerrado. In: **World Congress Of Soil Science**, 16., Montpellier, França. Proceedings. Montpellier, ISS, 1998.

SHENG, Y.; ZHU, Z. Biochar alters microbial community and carbon sequestration potential across different soil pH. **Science of the Total Environment**, v.622-623, p.1391- 1399, 2018.

SILVA, C. J. da, et al. Produção de serapilheira no Cerrado e Floresta de Transição Amazônia-Cerrado do Centro-Oeste Brasileiro. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 37, n. 4, p. 543 – 548, 2007.

SILVA, H. R.; FERREIRA, J. L. S.; NEVES, F. Serapilheira acumulada de eucalipto em sistema integrado de lavoura-pecuária-floresta. **Revista Agrotecnologia**, Ipameri, v. 9, n. 2, p. 74-82, 2018.

SILVEIRA, A. O. **Atividades enzimáticas como indicadores biológicos da qualidade de solos agrícolas do Rio Grande do Sul**. 81 f. Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2007.

SINGH, R.; BABU, J. N.; KUMAR, R.; SRIVASTAVA, P.; SINGH, P.; RAGHUBANSHI, A. S. Multifaceted application of crop residue biochar as a tool for sustainable agriculture: an ecological perspective. **Ecological Engineering**, v. 77, p. 324-347, 2015

SINSABAUGH, R. L.; LAUBER, C. L.; WEINTRAUB, M. N.; AHMED, B.; ALLISON, S. D.; CRENSHAW, C.; CONTOSTA, A. R.; CUSACK, D.; FREY, S.; GALLO, M. E.; GARTNER, T. B.; HOBBIE, S. E.; HOLLAND, K.; KEELER, B. L.; POWERS, J. S.; STURSOVA, M.; TAKACS-VESBACH, C.; WALDROP, M. P.; WALLENSTEIN, M. D.; ZAK, D. R.; ZEGLIN, L. H. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale. **Ecology Letters** 11, 1252e1264, 2008.

SOUZA, E. D.; COSTA, S. E. V. G. A.; ANGHINONI, I.; LIMA, C. V. S.; CARVALHO, P. C. F.; MARTINS, A. P. Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34:79-88, 2010.

SYUHADA, A. B.; SHAMSHUDDIN, J.; FAUZIAH, C. I.; ROSENANI, A. B.; ARIFIN, A. Biochar as soil amendment: impact on chemical properties and corn nutriente uptake in a Podzol. **Canadian Journal of Soil Science**. 96, 400–412, 2016.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R.W.; SCOTT, A.; BOTTOMELEY, P.J., eds. **Methods of soil analysis: microbiological and**

**biochemical properties.** Madison, Soil Science Society of America, p. 778-835, 1994. (Special Publication, 5).

TAG, A. T.; TAGHIZADEH-TOOSI, A.; CLOUGH, T. J.; SHERLOCK, R. R.; CONDRON, L. M. Effects of Feedstock Type and Pyrolysis Temperature on Potential Applications of Biochar. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 2016.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais.** 2. ed. Porto Alegre: UFRGS/Departamento de Solos, (Boletim Técnico, 5), p. 174, 1995.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. **Manual de métodos de análise de solo** – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF. Embrapa, 573 p. 2017.

THIES, J.E., RILLIG, M. Characteristics of biochar: biological properties. In: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), Biochar for Environmental Management: **Science and Technology.** Earthscan, London, p. 85-105, 2009.

TURCO, R. F.; KENNEDY, A. C.; JAWSON, M. D. Microbial indicators of soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. Defining soil quality for a sustainable environment. **Madison, Soil Science Society of America**, p.73-90, 1994. (Special Publication, 35)

VALADÃO, M. B. X.; CARNEIRO, K. M. S.; INKOTTE, J.; RIBEIRO, F. P.; MIGUEL, E. P.; GATTO, A. Litterfall, litter layer and leaf decomposition in Eucalyptus stands on Cerrado soils. **Scientia Forestalis**, v.47, p. 256-264, 2019

WANG, J.; XIONG, Z.; KUZYAKOV, Y. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. **GCB Bioenergy**, v. 8, p. 512–523, 2016.

WANG, J.; XIONG, Z.; KUZYAKOV, Y.; Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. **GCB Bioenergy** 8 512–23, 2016.

WARDLE, D. A.; NILSSON, M. C.; ZACKRISSON, O. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus. **Science**, v.320, p.629, 2008.

WEBER, K.; QUICKER, P. Properties of biochar. **Fuel**, v. 217, n. September 2017, p. 240–261, 2018.

YADAV, R.; YADAV, M. R.; KUMAR, R.; PARIHAR, C. M.; YADAV, N.; BAJIA, R.; RAM, H.; MEENA, R. K.; YADAV, D.; YADAV, B. Role of biochar in mitigation of climate change through carbon sequestration. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, V. 6, p. 859–866, 2017.

YU, H. W.; ZOU, W. X.; CHEN, J. J.; CHEN, H.; YU, Z. B.; HUANG, J.; TANG, H. R.; WEI, X. Y. GAO, B. Biochar amendment improves crop production in problem soils: a review. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 8-21, 2019.

ZHANG, X.; QU, J. S.; LI, H.; LA, S. K.; TIAN, Y. Q.; GAO, L. Biochar addition combined with daily fertigation improves overall soil quality and enhances water-fertilizer productivity of cucumber in alkaline soils of a semi-arid region. **Geoderma**, v. 363, p. 114170, 2020.

ZHAO, W.; ZHOU, Q.; TIAN, Z.; CUI, YUTONG.; LIANG, Y.; WANG, H. Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain. **Science of the Total Environment**, v. 722, p. 137428, 2020.

ZHENG, J.; HAN, J.; LIU, Z.; XIA, W.; ZHANG, X.; LI, L.; LIU, X.; BIAN, R.; CHENG, K.; ZHENG, J.; PAN, G. Biochar compound fertilizer increases nitrogen productivity and economic benefits but decreases carbon emission of maize production. **Agriculture, Ecosystems Environment**, v. 241, p. 70-78, 2017.

ZIBILSKE, L. M. Carbon mineralization. In: WEAVER, R. W.; SCOTT, A.; BOTTOMLEY, P. J. (Ed.). **Methods of soil analysis: microbiological and bioisotical properties**. Madison: Soil Science Society of America, p. 10-35, 1994. (Special Publication 5).

ZIMMERMAN, A. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar). **Environmental Science and Technology**, v. 44, p. 1295-1301, 2010.