

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

Mauro Franco Castro Mota

Uso de biochar de eucalipto na produção de cana-de-açúcar

Montes Claros
2020

Mauro Franco Castro Mota

Uso de biochar de eucalipto na produção de cana-de-açúcar

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal.

Orientador: Luiz Arnaldo Fernandes

Coorientador: Fernando Colen

Montes Claros

Junho de 2020

Mota, Mauro Franco Castro.

M917a
2020

Uso de biochar de eucalipto na produção de cana-de-açúcar [manuscrito] / Mauro Franco Castro Mota. Montes Claros, 2020.

67f.: il.

Tese (doutorado) - Área de concentração em Produção Vegetal. Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador(a): Luiz Arnaldo Fernandes

Banca examinadora: Fernando Colen, Rodinei Facco Pegoraro, Reginaldo Arruda Sampaio, Marcos Koiti Kondo, Maria das Dores Guimarães Veloso.

Inclui referências: f. 20-27; 36-39; 61-64

1. Biocarvão – Teses. 2. Cana-de-açúcar – Teses. 3. Carvão Vegetal – Teses. 4. Pirólise – Teses.. I. Fernandes, Luiz Arnaldo. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 631.8

ELABORADA PELA BIBLIOTECA UNIVERSITÁRIA DO ICA/UFMG
Nádia Cristina Oliveira Pires / CRB-6/2781



Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Ciências Agrárias
Doutorado em Produção Vegetal

ATA DE DEFESA DE TESE

Aos 30 dias do mês de junho de 2020, às 08:00 horas, sob a Presidência do Professor Luiz Arnaldo Fernandes, D. Sc. (Orientador - ICA/UFMG) e com a participação dos Professores Fernando Colen, D. Sc. (Coorientador - ICA/UFMG), Rodinei Facco Pegoraro, D. Sc. (ICA/UFMG), Regynaldo Arruda Sampaio, D. SC. (ICA/UFMG), Marcos Koiti Kondo, D. Sc. (Unimontes) e Maria das Dores Magalhães Veloso, D. Sc. (Unimontes), reuniu-se, por videoconferência, a Banca de tese de Mauro Franco Castro Mota, aluno do Curso de Doutorado em Produção Vegetal. O resultado da defesa de tese intitulada: "Uso de biochar de eucalipto na produção de cana-de-açúcar", sendo o aluno considerado aprovado. E, para constar, eu, Professor Luiz Arnaldo Fernandes, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.

OBS.: O aluno somente receberá o título após cumprir as exigências do ARTIGO 68 do regulamento do Curso de Doutorado em Produção Vegetal, conforme apresentado a seguir:

Art. 68 Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação ou Tese e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do Colegiado do Programa, com a anuência do orientador, no mínimo 3 (três) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação ou, 4 (quatro) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da tese, no prazo de 60 (sessenta) dias.

Montes Claros, 30 de junho de 2020.

Luiz Arnaldo Fernandes
Orientador

Fernando Colen
Coorientador

Rodinei Facco Pegoraro
Membro

Regynaldo Arruda Sampaio
Membro

Marcos Koiti Kondo
Membro

Maria das Dores Magalhães Veloso
Membro

Mauro Franco Castro Mota

Uso de biochar de eucalipto na produção de cana-de-açúcar

Aprovado pela banca examinadora constituída pelos professores:

Dr. Fernando Colen
Coorientador- UFMG

Dr. Rodinei Facco Pegoraro
UFMG

Dr. Reginaldo Arruda Sampaio
UFMG

Dr. Marcos Koiti Kondo
Unimontes

Dra. Maria das Dores Guimarães Veloso
Unimontes



Dr. Luiz Arnaldo Fernandes
Orientador – UFMG

Montes Claros, 30 de Junho de 2020.

A Deus, pelo dom gratuito da vida.

Aos meus pais, Dário e Aciolina, pela minha formação pessoal, pelo apoio e pelo incentivo incondicional.

À minha esposa, Valéria de Oliveira Mota, por me ajudar, apoiar e pelo convívio diário nessa caminhada.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me permitir mais essa oportunidade de crescer e por iluminar sempre meus caminhos.

À Universidade Federal de Minas Gerais, pela oportunidade de realização do curso de doutorado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de doutorado e de iniciação científica aos estudantes da graduação envolvidos no projeto.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão de recurso financeiro para realização do projeto de pesquisa.

Ao Professor Luiz Arnaldo Fernandes, pela confiança, pelos ensinamentos e pela orientação durante a condução do experimento e da redação da tese de doutorado. Sempre que precisei, foi muito solícito, dedicado e compreensivo.

Ao Professor Fernando Colen, pelo apoio na condução do experimento.

Aos amigos Orlando, Fenelon, Eulina, Matheus, Armando, Danilo, Andressa, Wilson e Ricardo, pelo apoio nas atividades do experimento.

Aos demais membros da banca, Professora Maria das Dores Guimarães Veloso e Professores Rodinei Facco Pegoraro, Regynaldo Arruda Sampaio e Marcos Koiti Kondo.

USO DE BIOCHAR DE EUCALIPTO NA PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO

O biochar ou biocarvão tem sido proposto como alternativa promissora para disposição final de resíduos sólidos, por aumentar o aporte de carbono e melhorar a qualidade dos solos. Assim, os estudos tiveram o objetivo de avaliar o biochar como substrato e condicionador de solo para produção de cana-de-açúcar. Para isso, foram montados dois experimentos: o primeiro, em casa de vegetação em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5 x 4, consistindo em cinco níveis de biochar (0, 25, 50, 75 e 100% v/v em substituição do substrato convencional) e quatro granulometrias (<1, 2, 4 e 9 mm), com nove repetições. O segundo, em campo, no delineamento em blocos ao acaso, com esquema fatorial 2 x 5, correspondendo aos tratamentos biochar + NPK e biochar sem correção da fertilidade e cinco doses de biochar (0, 10, 20, 30 e 40 Mg ha⁻¹), sendo conduzido por dois ciclos de corte (colheita). No primeiro experimento, foram avaliadas as seguintes características de mudas: tempo médio de brotação, velocidade de brotação, crescimento por meio da altura, número de folhas, comprimento e largura da folha + 2 e massa seca de parte aérea e de raízes. No segundo experimento, foram avaliados os atributos químicos do solo aos 60 (2017), 360 (2018) e 720 (2019) dias após a aplicação do biochar ao solo, e o crescimento de plantas foi avaliado aos 45, 60, 75, 105, 145, 180, 220, 250 e 290 dias após o plantio, por meio de número de folhas, altura da planta, comprimento e largura da folha + 2. A primeira e a segunda colheita foram realizadas aos 330 e 360 dias, respectivamente, e medidos o comprimento, o diâmetro, o número e a massa de colmo, os quais foram utilizados para estimar a produtividade. A granulometria menor que 1 mm propiciou melhor crescimento e desenvolvimento de mudas de cana-de-açúcar. No solo, a adição de doses de biochar diminuiu o pH e aumentou os teores de fósforo, cálcio, acidez potencial, carbono e nitrogênio total do solo. Para o cultivo de cana-de-açúcar por dois anos consecutivos, a aplicação de 36 Mg ha⁻¹ de biochar sem adubação complementar com NPK foi suficiente para obter produtividade equiparável aos tratamentos que receberam o complemento com NPK nos primeiro e segundo ciclos.

Palavras-chave: Biocarvão. *Saccharum officinarum* L. Carbono pirogênico. Pirólise.

USE OF EUCALYPTUS BIOCHAR IN SUGARCANE PRODUCTION

Biochar has been proposed as a promising alternative for the final disposal of solid waste, as it increases carbon supply and improves soil quality. Thus, the studies aimed at evaluating biochar as a substrate and soil conditioner for the production of sugarcane. Hence, two experiments were set up: the first in a greenhouse with a completely randomized design, under a 5 x 4 factorial scheme, consisting of five levels of biochar (0, 25; 50; 75; and 100% v / v to replace the conventional substrate) and four particle sizes (<1, 2, 4, and 9 mm), with nine replications. The second in the field, with a randomized block design, under a 2 x 5 factorial scheme, corresponding to the biochar + NPK and biochar treatments without fertility correction and five doses of biochar (0, 10, 20, 30, and 40 Mg ha⁻¹), carried out by two cutting (harvest) cycles. In the first experiment, the following seedling characteristics were evaluated: the average sprouting time, sprouting speed, growth by height, leaf number, leaf length and width + 2 and dry mass of shoot and roots. In the second experiment, the chemical attributes of the soil were evaluated at 60 (2017), 360 (2018), and 720 (2019) days after the application of the biochar to the soil, and the growth of plants was evaluated at 45, 60, 75, 105, 145, 180, 220, 250, and 290 days after planting, through the number of leaves, plant height, leaf length and width + 2. The first and second harvests were carried out at 330 and 360 days, respectively, and the stem length, diameter, number and mass, were measured to estimate productivity. The granulometry under 1 mm provided the best growth and development of sugarcane seedlings. In the soil, the addition of doses of biochar decreased pH and increased the levels of phosphorus, calcium, potential acidity, carbon and total nitrogen of the soil. For the cultivation of sugarcane for two consecutive years, the application of 36 Mg ha⁻¹ of biochar without complementary fertilization with NPK was sufficient to obtain productivity comparable to the treatments that received the complement with NPK in the first and second cycles.

Key words: biochar, *Saccharum officinarum* L., pyrogenic carbon, pyrolysis.

LISTA DE FIGURAS – ARTIGO I

Figura 1 – A) Disposição do substrato em tubetes e montagem do experimento; B) Experimento estabelecido aos 45 dias após o plantio.....	31
Figura 2 – A) Tempo Médio de Brotação (TMB) em função da granulometria; B) Índice de Velocidade Brotação (IVB) em função da proporção de substituição	33
Figura 3 – Área foliar (A) e Altura de planta (B) em função de níveis de substituição de substrato comercial e granulometrias.....	34
Figura 4 – A) Massa Seca de Parte Aérea (MSPA) e B) Massa Seca de Raiz (MSR) em função de níveis de substituição de substrato comercial e granulometrias.....	35

LISTA DE TABELAS – ARTIGO I

Tabela 1 – Atributos físicos e químicos do biochar utilizados no experimento.....	32
---	----

LISTA DE FIGURAS – ARTIGO II

Figura 1 – Precipitação pluvial, umidade relativa e temperaturas máxima, média e mínima mensais obtidas no município de Montes Claros, Estado de Minas Gerais, para o período de cultivo da cana-de-açúcar (junho de 2017 a julho de 2019).....	44
Figura 2 – Imagem ilustrativa da área onde foi realizada a aplicação do biochar ao solo e montagem do experimento (A) e aos 90 dias após o plantio da cana-de-açúcar (B).....	45
Figura 3 – Teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total do solo (NT) nos anos 2017, 2018 e 2019, nos tratamentos com biochar sem adição de NPK (BC) e biochar com adição de NPK (BC + NPK).....	47
Figura 4 – (A) teores de carbono orgânico total (COT) e (B) nitrogênio total do solo (NT) em função das doses de biochar nos anos de 2017, 2018 e 2019.....	48
Figura 5 – Dispersão dos diferentes tratamentos, considerando doses (0, 10, 20, 30, 40 Mg ha ⁻¹) em três anos de cultivo (2017, 2018 e 2019) para as duas primeiras variáveis canônicas.....	52
Figura 6 – Crescimento em altura das plantas cultivadas sobre doses de biochar sem adição de NPK (A) no primeiro ciclo e (B) no segundo ciclo. Com adição de NPK (C) no primeiro ciclo e (D) no segundo ciclo.....	54
Figura 7 – Altura de plantas aos 284 dias após o plantio em função das doses de biochar sem adição de NPK (BC) e de biochar com adição de NPK (BC + NPK), primeiro (I) e segundo ciclos (II)	55
Figura 8 – Índice de área foliar (IAF) das plantas cultivadas sobre doses de biochar sem adição de NPK (A) no primeiro ciclo e (B) no segundo ciclo. Com adição de NPK (C) no primeiro ciclo e (D) no segundo ciclo.....	56
Figura 9 – Índice da área foliar (IAF) de plantas aos 284 dias após o plantio em função das doses de biochar sem adição de NPK (BC) e com adição de NPK (BC+NPK), primeiro (I) e segundo ciclos (II)....	57
Figura 10 – Fertigrama do estado nutricional da cana-de-açúcar.	58
Figura 11 – Produtividade de cana-de-açúcar em toneladas de colmo por hectares em função de doses de biochar; (A) primeiro e (B) segundo ciclos.....	59
Figura 12 – Massa (A), comprimento (C) e diâmetro (C) de colmo em função de doses nos tratamentos BC e BC + NPK.....	60

LISTA DE TABELAS – ARTIGO II

Tabela 1 – Atributos físicos e químicos do biochar utilizado no experimento.....	45
Tabela 2 – Equações de regressão ajustadas para pH, fósforo, cálcio, acidez potencial, somas de bases, capacidade de troca de cátions, saturação por base em resposta a adição de doses de biochar.....	50
Tabela 3 – Correlações entre as duas primeiras Variáveis Canônicas (VC1 / VC2) e os atributos do solo cultivado com cana-de-açúcar e adubado com doses de biochar em três anos de cultivo.....	53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 Objetivo geral.....	13
2.2 Objetivos específicos.....	13
3. REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1 Aspectos gerais da produção de biochar.....	13
3.2 Potencial de sequestro de carbono do biochar.....	14
3.3 Atributos químicos do solo	15
3.4 Atributos físicos do solo	17
3.5 Biochar e suas perspectivas na produção agrícola.....	19
4. REFERÊNCIAS	20
5. ARTIGOS	28
5.1 ARTIGO I – Biochar como alternativa de substrato para produção de mudas de cana-de-açúcar	28
Resumo	29
INTRODUÇÃO.....	30
MATERIAL E MÉTODOS.....	30
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
CONCLUSÕES.....	36
LITERATURA CITADA.....	36
5.2 ARTIGO II – Produção de cana-de-açúcar e atributos químicos do solo após adubação com biochar	40
Introdução.....	43
Material e Métodos	43
Resultados e Discussão.....	47
a) Aporte de carbono e nitrogênio.....	47
b) Fertilidade do solo	49
c) Crescimento	53
d) Estado nutricional da cana-de-açúcar	57
e) Produtividade	58
Conclusões.....	60

Referências	61
-------------------	----

1. INTRODUÇÃO

O biochar ou biocarvão é produzido a partir da carbonização parcial de qualquer fonte de biomassa, sob baixa concentração ou nenhum fornecimento de oxigênio, processo denominado como pirólise. O termo pirólise vem do grego *piro*, que significa “fogo” e *lise*, que significa “quebra”. Dessa forma, a pirólise pode ser definida como “quebra pelo calor” (LEHMANN *et al.*, 2015). Nesse processo, as ligações menos estáveis de uma determinada molécula são quebradas pelo calor e transformadas em outras de maior estabilidade (HU; GHOLIZADEH, 2019). O material resultante da pirólise, o biocarvão, é rico em carbono estável (KOOKANA *et al.*, 2011). Por esse motivo, diversos estudos têm sugerido o uso do biochar para aumentar o potencial de armazenamento de carbono no solo, devido a sua alta estabilidade (JEFFERY *et al.*, 2015; PETER; MADARI, 2012).

O interesse global pelo biochar surgiu a partir da descoberta de solos antropogênicos em diversas partes do mundo, os quais são denominados de Terra Preta de Índio (TPI) e estão localizados na região amazônica (THOMAS *et al.*, 2015; AQUINO *et al.*, 2016; KERN *et al.*, 2017). Solos semelhantes a TPI também foram reportados na África, Austrália e Europa (SOLOMON *et al.*, 2016; DOWNIE *et al.*, 2011; WIEDNER *et al.*, 2015). Acredita-se que TPI tenham sido formadas ao longo de milhares de anos, por meio de ocupações humanas pré-históricas. Esses solos apresentam alto teor de carbono pirogênico (BERNARDES *et al.*, 2017), alto teor de fósforo, cálcio e magnésio (BARBOSA *et al.*, 2020), maior CTC, pH e baixo teor de alumínio quando comparado com os solos onde não há ocorrência da TPI (AQUINO *et al.*, 2016). Tais características são atribuídas ao maior teor de biocarvão presente nessas áreas.

O questionamento relatado em vários estudos é se a adição de carbono pirogênico em solos agrícolas tem efeito semelhante ao solo da TPI. Resultados encontrados na literatura sugerem que sim. Silva *et al.* (2017), avaliando tipos biochar em feijoeiro, constataram aumento no acúmulo de nutrientes e no rendimento de grãos com o aumento de doses de biochar. Butphu *et al.* (2019), avaliando o biochar de eucalipto em cana-de-açúcar na dose de 6,2 Mg ha⁻¹ com combinações de NPK, verificaram aumentos significativos na produtividade da cultura e na disponibilidade de Ca, K, além de maior eficiência do uso de N. Efeitos positivos também foram reportados por Abiven *et al.* (2015), no desenvolvimento de raízes e no crescimento de plantas de milho que receberam doses de biochar acima de 4 Mg ha⁻¹.

Esses resultados motivam novos estudos, sobretudo na cultura da cana-de-açúcar, por ser tratar de uma cultura altamente exigente em nutrientes e com alta capacidade produtiva. Além disso, na literatura há poucos trabalhos de campo e de longa duração com biochar e há muitas críticas sobre a viabilidade técnica e econômica de uso dos mesmos em grandes áreas (MAROUŠEK *et al.*, 2016).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o biochar como substrato para mudas e como condicionador de solo na produção de cana-de-açúcar ao longo do tempo.

2.2 Objetivos específicos

Avaliar o efeito do uso do biochar em diferentes granulometrias e proporções de substituição do substrato convencional, na produção de mudas de cana-de-açúcar;

Avaliar o aporte de carbono e nitrogênio ao solo pela aplicação de biochar;

Avaliar o potencial condicionador do biochar e a magnitude das alterações dos teores de nutrientes no solo ao longo do tempo;

Avaliar o crescimento, o desenvolvimento e a nutrição de plantas de cana-de-açúcar adubadas com biochar;

Avaliar a produtividade da cana-de-açúcar adubada com biochar.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Aspectos gerais da produção de biochar

Biochar ou biocarvão é considerado um material sólido, rico em carbono, obtido a partir da carbonização de qualquer fonte de biomassa, com pouco ou nenhum oxigênio, processo denominado pirólise (TANG *et al.*, 2016). Segundo Kookana *et al.* (2011), biochar e carvão vegetal são essencialmente o mesmo material; no entanto, o termo, biochar tem sido empregado quando é utilizado para o uso agrônomo, enquanto que o carvão vegetal é produzido para outros fins, tais como siderurgia, churrascaria, aquecedores etc. Para Maia *et al.* (2011), a tecnologia do uso do biochar tem sido considerada muito promissora em todo o mundo, especialmente porque ele se encaixa perfeitamente dentro da abordagem da bioenergia e como uma solução para atenuar as emissões de gases do efeito estufa.

No processo de pirólise, os materiais orgânicos são transformados em três estados: gasoso, líquido e sólido, e suas proporções variam de acordo com a matéria prima e as condições de pirólise utilizadas. Muitas vezes, as variáveis manipuláveis são a temperatura de pirólise, o tempo de permanência da matéria prima no reator e a atmosfera interna do reator de pirólise, sendo que a temperatura pode ter um grande efeito sobre as proporções relativas do produto final da matéria prima (KARAOSMANOGLU *et al.*, 2000).

Isso significa que as condições de pirólise podem ser adaptadas de acordo com o produto desejado. Segundo Zhao *et al.* (2018), a pirólise rápida favorece a produção de líquido, que pode ser armazenado e transportado mais facilmente e a um custo mais baixo do que a forma sólida da

biomassa. Entretanto, a pirólise lenta tem se mostrado mais apropriada para a produção de biochar para o uso agrônômico, pois favorece a produção na forma sólida e maximiza o rendimento do carvão.

O interesse global pelos estudos do biochar surgiu a partir de observações de ocorrência natural ou antropogênica de áreas de solo com alto teor de carbono pirolisado (KÄMPF *et al.*, 2003). Estudos recentes feitos nos solos da Amazônia revelaram a ocorrência de manchas de solo com tamanho variável, muitas delas inferiores a dois hectares, embora locais de até 350 ha tenham sido registrados (KERN *et al.*, 2017). Esses solos, com coloração escura e com alta fertilidade, são chamados de Terra Preta de Índio (NOVOTNY *et al.*, 2009).

O primeiro aspecto que chama a atenção na TPI, além da cor, é a sua riqueza em carbono pirogênico. Estudos feitos por Novotny *et al.* (2009) revelaram teor de carbono de até 150 g kg⁻¹ de solo, muito superior ao solo adjacente, que apresenta teor entre 20 e 310 mg kg⁻¹ de solo. Estudos avaliando a idade do carbono na TPI indicaram tempo de residência que variam entre 500 e 8.000 anos (SOUBIES, 1979; GLASER *et al.*, 2003). Depósitos de carvão de até 9.500 anos também foram encontrados em solos florestais na Guiana (HAMMOND *et al.*, 2007) e de até 23.000 anos de idade na Costa Rica (TITIZ; SANFORD, 2007). Essas evidências sugerem a produção de biochar e seu uso na agricultura como alternativa para o aumento do tempo de residência do carbono no solo, contribuindo para melhoria dos seus atributos físicos, químicos e do potencial produtivo das culturas agrícolas (KAMMANN *et al.*, 2015).

3.2 Potencial de sequestro de carbono do biochar

A maioria das estratégias de combate às emissões de gases do efeito estufa é focada em métodos que evitam as emissões, ou seja, visam a reduzir as emissões e não a remover o que já foi emitido (LIU *et al.*, 2014). Para Wigley (2018), mesmo se as concentrações de gases do efeito estufa forem estabilizadas nos próximos anos, não serão suficientes para evitar aumentos da temperatura e, por conseguinte, o aumento no nível dos oceanos. Por essa razão, devem-se adotar estratégias de manejo agrícola que visam a reduzir as emissões CO₂ para a atmosfera e a aumentar o tempo de residência do carbono na superfície terrestre.

Uma das alternativas de fixação de CO₂ atmosférico em larga escala é aumentar a biomassa da terra, por exemplo, por meio de reflorestamento, plantio direto e outras alterações no uso da terra. Outra alternativa é fixar o carbono nos oceanos, uma vez que o ecossistema aquático se destaca com o maior potencial de armazenamento de CO₂ por meio do crescimento e deposição de fitoplânctons (RONDON *et al.*, 2006). Segundo Falkowski *et al.* (1998), anualmente são exportados entre 5 e 15 bilhões de toneladas de carbono para o fundo dos oceanos. A longo prazo, esses sumidouros naturais de carbono podem ser limitados pela saturação do meio e consumo de fatores de crescimento (BOYD; TRULL, 2007). A fertilização dos oceanos, especialmente com ferro, tem sido proposta como um meio de estimular o crescimento de fitoplâncton e aumentar a taxa em que este processo de deposição do carbono orgânico ocorre, e assim proporcionar um meio útil para remover CO₂ atmosférico (MARTIN *et al.*, 1990).

A fertilização do oceano tem efeitos colaterais adversos. De acordo com Street; Payton (2005), estudos de biogeoquímica de ferro ao longo das últimas duas décadas têm descrito a complexidade do sistema oceânico. As tentativas de projetar esse sistema são suscetíveis de provocar uma resposta imprevisível e complexa. Com base no potencial para efeitos secundários prejudiciais, tais como hipóxia, crescimento de algas tóxicas ou consumo de nutrientes dos ecossistemas a jusante (CHISHOLM, 2001). Na convenção de Londres sobre prevenção da poluição marinha por resíduos e outras matérias, foi acordado que a eutrofização dos oceanos em larga escala deve ser tratada com extrema cautela e ainda não se justifica (LAL, 2004).

Diante dessas incertezas, o ecossistema terrestre parece ser a alternativa mais acessível para ser utilizado como sumidouros de carbono (STREET; PAYTON, 2005). A atratividade do solo como meio de armazenar e atenuar as mudanças climáticas é reduzida pela forma como esse carbono vai ser aportado ao solo. Por exemplo, o carbono sequestrado pelas florestas pode ser rapidamente devolvido para a atmosfera por incêndio ou uma retomada do desmatamento e o carbono do solo em sistema de plantio direto pode ser rapidamente perdido por uma retomada do revolvimento do solo (LEHMAN *et al.*, 2017). Diante disso, o armazenamento de carbono na forma de biochar tem sido proposto como um meio eficiente de atenuar as emissões de gases do efeito estufa, especialmente pela mudança do uso da terra.

Há duas formas principais em que biochar pode influenciar o ciclo global do carbono. A primeira é que, se o biocarvão for produzido a partir de material que de outra forma teria oxidado a curto e médio prazo, e o produto resultante for material rico em carbono estável, este ficará disposto numa condição de menor oxidação. A segunda é que produtos gasosos e líquidos de pirólise podem ser utilizados como um combustível, que pode compensar a utilização de combustíveis fósseis (LEHMANN, 2006).

Segundo Woolf (2008), para avaliar o potencial de sequestro de carbono do biochar, devem ser considerados quatro fatores: longevidade do carvão no solo, taxa de emissão, quantidade de biocarvão que pode ser adicionado ao solo e a eficiência da produção. Além de reduzir as emissões de CO₂, outros autores reportaram reduções de outros gases. Rondon *et al.* (2005) encontraram redução das emissões de óxido nitroso de 50% e a supressão de quase o total das emissões de metano em solos ácidos do leste da Colômbia adubados com biochar, com dose de 20 Mg ha⁻¹. De acordo com Lehmann *et al.* (2007), essas reduções podem ser explicadas pela melhor aeração e menor anaerobiose, o que possibilitaria a maior estabilização de C no solo. Os mesmos autores reiteraram ainda a necessidade de outros estudos para elucidar os mecanismos que levam à redução das emissões e quais condições de solo favorecem essa redução.

É evidente, a partir desta análise simplificada, que a taxa de emissão de gases é menor quando a biomassa de matéria prima é pirolisada e que a produção do biochar pode contribuir substancialmente para a mitigação das mudanças climáticas a curto e a longo prazo.

3.3 Atributos químicos do solo

Estudos realizados em ambiente controlado indicam que o efeito positivo do biochar sobre os

atributos químicos do solo estão relacionados principalmente a mudanças no pH, à capacidade de troca de cátions (CTC), carbono orgânico e, em alguns casos, à liberação direta ou indireta de nutrientes (LUO *et al.*, 2016). Segundo Gul *et al.* (2015), aumentos na disponibilidade de nutrientes de forma indireta estão relacionado às alterações das propriedades físicas do solo.

O efeito do biochar sobre o pH do solo é fortemente influenciado pelo teor de cinzas e tempo de manejo (VERHEIJEN *et al.*, 2010). Segundo Silber *et al.* (2010), biochar mais antigo tende a apresentar menor pH e teor de cinzas mais baixos e, conseqüentemente, menor efeito como corretivos da acidez do solo. O contrário acontece quando se testa biochar mais novo e com alto teor de cinzas (SHENG *et al.*, 2016).

Efeitos da aplicação de biochar no aumento do pH do solo têm sido reportados com frequência na literatura. Wrobel-Tobiszewska *et al.* (2016) observaram aumento do pH de 4,0 para 4,8 após a utilização de 50 Mg ha⁻¹ de biochar na cultura do eucalipto. Rhoades *et al.* (2017) relataram que a aplicação de biochar na dose de 20 Mg ha⁻¹, associado à aplicação de matéria orgânica não carbonizada na dose de 37 Mg ha⁻¹, aumentou o pH do solo de 5,7 para 6,4 em floresta de pinus. Existem dois possíveis mecanismos que explicam o aumento do pH em função da aplicação de biochar. O primeiro, pelo efeito corretivo do biochar, com presença de cinzas ricas em óxidos e hidróxidos de metais alcalinos (ZELAYA *et al.*, 2019). O segundo, pela complexação de grupos funcionais oxigenados (COO⁻) do biochar com o Al³⁺. Dessa forma, ocorre a liberação de hidroxilas (OH⁻) e o aumento da disponibilidade de cátions básicos, que propiciam o aumento do pH do solo (YUAN *et al.*, 2011; DAI *et al.*, 2017).

Outra característica química do solo influenciada pela aplicação do biochar é a CTC. A sua utilização tem aumentado a CTC do solo, favorecendo a disponibilização de nutrientes às plantas (ATKINSON *et al.*, 2010; LORENZ; LAL, 2014). Glisczynski *et al.* (2016) constataram que a aplicação de 30 Mg ha⁻¹ de biochar aumentou significativamente a CTC do solo em plantações de álamo. Além disso, Cheng *et al.* (2008) relataram que a CTC do solo aumentou de 1,7 a 7,1 cmol_c dm⁻³, com aplicação de biochar de carvalho durante um ano. As causas foram atribuídas à contínua oxidação do grupo funcional na superfície do biocarvão e adsorção de ácidos orgânicos pelo biochar.

Aumento do teor de carbono orgânico total (COT) em solos que receberam aplicação de biochar é consenso na literatura, explicado claramente por ser um material com alto teor de carbono (WANG *et al.*, 2014a; BURRELL *et al.*, 2016; HU *et al.*, 2019). Wang *et al.* (2014b) mostraram que a aplicação de biocarvão na dose de 5 Mg ha⁻¹ aumentou significativamente o estoque de carbono orgânico do solo. Entretanto, o mesmo efeito não foi observado quando aplicaram a mesma dose do material na forma não pirolisada. A principal razão para essas observações é que o carbono presente no biochar é estável e de difícil decomposição, contribuindo assim para a recalcitrância do carbono no solo (LORENZ; LAL, 2014). De acordo com Moreira (2007), o aumento do teor de COT com a aplicação de biochar se deve à persistência do carbono pirolisado, como verificado em solos da Terra Preta de Índio (TPI), que apresentam teores de carbono que atingem até 200 g kg⁻¹. Esse fato é especialmente importante em condições de clima tropical, em que a mineralização da matéria orgânica é relativamente rápida (FONTANA *et al.*, 2016).

Em contraste, outros estudos reportam que a aplicação do biochar influencia também as frações lábeis do estoque de carbono orgânico dos solos (LUO *et al.*, 2011; LORENZ; LAL, 2014). Wang *et al.* (2014b) relataram que a aplicação de biocarvão aumentou significativamente as concentrações de carbono orgânico solúvel e da biomassa microbiana (CBM), no primeiro mês após a aplicação. Tais efeitos a curto prazo podem ser atribuídos à liberação de compostos condensados (óleos), formados durante o processo da pirólise (SMITH *et al.*, 2010).

A capacidade do biochar em fornecer ou aumentar a disponibilidade de nutrientes está diretamente relacionada à sua composição, uma vez que o próprio biocarvão contém vários constituintes inorgânicos (BIEDERMAN; HARPOLE, 2013). A quantidade e o tipo de nutrientes presentes no biochar estão relacionados ao tipo de matéria-prima (GASKIN *et al.*, 2008), além da temperatura e da duração da pirólise, indicando que diferentes tipos de biocarvão afetarão de maneira diferente a disponibilidade dos nutrientes (LEI; ZHAN, 2013). Dijkstra *et al.* (2013) citam que o biocarvão produzido a partir de resíduos de madeira em geral contém teores consideráveis de potássio solúvel e concentrações variáveis de fósforo e cálcio. Sackett *et al.* (2015) mostraram que a concentração de potássio disponível aumentou significativamente no período inicial (2 a 6 semanas) após a aplicação de 5 Mg ha⁻¹ de biochar ao solo, enquanto as concentrações de cálcio e magnésio disponíveis aumentaram no período de 9 a 12 meses após a aplicação. Além disso, Gundale *et al.* (2016) relataram que a aplicação de 10 Mg ha⁻¹ de biochar aumentou a taxa de mineralização de N do solo após dois ciclos de cultivo. Outros estudos mostraram que a aplicação de biochar aumentou as concentrações de outros nutrientes, tais como boro e molibdênio (KLOSS *et al.*, 2014; LIU *et al.*, 2014). Em experimento realizado em casa de vegetação, Kloss *et al.* (2014) testaram biochar a 3% em três tipos de solo (Planossolo, Cambissolo e Chernossolo) e constataram aumentos significativos de boro e molibdênio. Petter; Mandari (2012) também verificaram que a disponibilidade de P no solo aumentou em 17% com uma dose de 32 Mg ha⁻¹ de biocarvão em relação ao controle. Outros estudos realizados por Silva *et al.* (2017) e Ali *et al.* (2019) também reportaram aumentos nos teores de Ca e P em resposta à adição de biochar ao solo, fato atribuído à concentração desses elementos no resíduo, bem como ao efeito indireto na disponibilidade de P, por meio da competição dos ácidos orgânicos restringindo a fixação do fósforo pelos óxidos.

3.4 Atributos físicos do solo

O uso intensivo do solo tem levado ao aumento crescente de áreas com baixa capacidade produtiva, causada pela perda da estrutura física (HARTMANN *et al.*, 2014). Os parâmetros mais afetados são aumento da densidade, perda da matéria orgânica, baixo armazenamento e baixa capacidade de retenção de água, os quais levam a efeitos negativos graves, tais como o crescimento reduzido da planta, a desagregação e o aumento da erosão do solo (KORMANEK *et al.*, 2015; HEYDARI *et al.*, 2017). Devido às características típicas do biochar, incluindo alta porosidade, baixa densidade e alta superfície específica, a aplicação de biochar geralmente diminui a densidade do solo, aumenta a porosidade e a capacidade de retenção de água (SANKURA *et al.*, 2014; CHANG *et al.*, 2017; TONKS *et al.*, 2017).

Estudo realizado por Prober *et al.* (2014) demonstraram que a aplicação de 20 Mg ha⁻¹ de biochar reduziu significativamente a densidade do solo após dois anos de cultivo, quando comparado às parcelas que não receberam biochar. Esse efeito foi atribuído pelos autores à baixa densidade do biocarvão aplicado ao solo. Outros estudos mostraram que a aplicação de biocarvão pode melhorar a porosidade e a estrutura do solo e, conseqüentemente, aumentar a capacidade de retenção de água do mesmo (HSEU *et al.*, 2014; GUL *et al.*, 2015). Por exemplo, Hseu *et al.* (2014) relataram que a abundância de microporos, definidos no estudo como poros de diâmetro entre 5-30 µm, aumentou de 4 para 27% a capacidade de retenção de água do solo, após a aplicação de biocarvão de casca de arroz na proporção de 10% p/p. Da mesma forma, Lu *et al.* (2014) descobriram que a aplicação do biocarvão de casca de arroz (2, 4, e 6%, v/v) aumentou significativamente a porosidade e a capacidade de retenção de água.

Chidumayo (1994), avaliando o efeito do biocarvão sob a água disponível em dois tipos de solo diferentes, constatou que só houve aumento na capacidade de retenção de água no solo arenoso; já no solo argiloso, o mesmo efeito não foi observado. Isso sugere que o carvão pode não ser atrativo para essa característica nesse tipo de solo. Por outro lado, o aumento em umidade disponível observada em solos arenosos pode tornar o biochar uma ferramenta útil na reversão da desertificação (CHIDUMAYO, 1994).

As propriedades físicas podem influenciar e levar a mudanças em outras propriedades do solo, principalmente químicas e biológicas, em função do surgimento de sítios de adsorção e habitats para crescimento e desenvolvimento de microrganismos do solo (BRADY; WEIL, 2008).

A superfície específica do biochar varia entre 200-400 m² g⁻¹, muito próxima à superfície específica da argila e superior à da areia (KISHIMOTO; SUGIRA, 1985). Tais parâmetros levam à hipótese de que a presença do biochar em solos arenosos pode suprir, de certa forma, a limitada disponibilidade de água, a baixa capacidade de troca catiônica, a disponibilidade de nutrientes e a atividade de microrganismos.

Em geral, a aplicação do biochar demonstrou influenciar positivamente as características dos agregados do solo (DING *et al.*, 2016). Segundo estudos realizados por Lei; Zhang (2013), a adição de biochar em solo argiloso (5%, v/v) promoveu aumentos significativos da formação de macroagregados e melhorou a estabilidade dos agregados. Lu *et al.* (2014) também reportaram que a adição de biocarvão de casca de arroz (2, 4 e 6%, v / v) aumentou a agregação do solo em 36%. Da mesma forma, Ouyang *et al.* (2013) descobriram que a adição de biochar de esterco bovino (2%, v/ v) promoveu a formação de macroagregados em solo.

Outra frente de investigação tem demonstrado resultados positivos em relação à capacidade do biochar em reduzir a lixiviação de poluentes nos solos (LEHMANN *et al.*, 2006). Essa possibilidade é sugerida pelo forte poder de adsorção do biochar por nutrientes solúveis, tais como amônio, nitrato (MIZUTA *et al.*, 2004), fosfato (RADOVIC *et al.*, 2001), além de metais pesados como cádmio, cobre, chumbo e zinco (LU *et al.*, 2017). Segundo Lehmann *et al.* (2007), se essa afinidade por íons for comprovada, então o biochar terá importante utilidade para o uso em locais contaminados.

3.5 Biochar e suas perspectivas na produção agrícola

O potencial do biochar em fornecer nutrientes para o crescimento e o desenvolvimento das plantas é bastante complexo e promissor, envolvendo diversos mecanismos, conforme visto anteriormente. Sabe-se que, de alguma forma, direta ou indiretamente, o biochar é capaz de trazer benefícios aos cultivos agrícolas e florestais, especialmente em solos tropicais, onde a matéria orgânica é essencial para a fertilidade do solo, devido ao alto grau de intemperização dos argilominerais que possuem baixa CTC (LORENZ; LAL, 2014). Nesses ambientes, o manejo sustentável da matéria orgânica é de primordial importância. O manejo sustentável do solo depende do aumento e da manutenção da qualidade da matéria orgânica. Isso implica a incorporação e a estabilização de compostos orgânicos do solo (GLISCZYNSKI *et al.*, 2016). Com isso, a capacidade produtiva do solo aumenta, o que também implica maior produção de biomassa e consequentemente maior reincorporação de carbono ao solo que, por sua vez, contribuirá para a manutenção da produtividade de cultivos agrícolas, fechando assim um círculo “benéfico” (GUL *et al.*, 2015).

Em diversas partes do mundo têm surgido variados estudos avaliando o efeito do carvão vegetal no rendimento das culturas;

No Paquistão, Shahzad *et al.* (2019) reportaram aumentos de 13% na cultura do trigo com a adição de carvão vegetal produzido a partir de esterco de galinha.

Nos Estados Unidos, Bonin *et al.* (2018) testaram biochar de madeira (resíduo de serraria) na produção de forragens (switchgrass) e observaram aumento do rendimento na produção de biomassa.

No Brasil, Silva *et al.* (2017) trabalhando com três tipos de biochar, reportaram aumento no rendimento e a acumulação de nutrientes nos grãos da planta de feijão.

No Egito, Amin; Eissa (2017), em estudo a fim de verificar o efeito de biochar de resíduos da cultura do milho (caule), observaram um incremento de 195% no rendimento de *Cucurbita sp.* (abobrinha) na maior dose (26 t ha⁻¹).

Vários trabalhos demonstraram efeito significativo na produtividade do arroz e de outras gramíneas com a aplicação de carvão vegetal ao solo (YAMATO *et al.*, 2006; RONDON *et al.*, 2006; KIMETU *et al.*, 2008).

Outros benefícios potenciais do biochar como condicionador e/ou fertilizante do solo são a maior eficiência do uso de fertilizantes químicos, especialmente potássio e fósforo e, consequentemente, a redução do custo de produção e o aproveitamento de subprodutos de processos de carbonização.

Diante dos temas revisados neste estudo, verificaram-se duas grandes “frentes” de pesquisa. Em primeiro lugar, as questões relacionadas ao potencial de redução das emissões de gases do efeito estufa, tais como longevidade do carbono no solo, taxa de emissão e eficiência de produção. Isso provavelmente variará dependendo das condições de pirólise e de matéria prima. Assim sendo, as pesquisas terão que avaliar o real potencial agrônomo do uso do biochar na agricultura e seus benefícios ao solo. Por fim, é notável que essa tecnologia de transformação de biomassa ofereça inúmeras possibilidades para resolver os problemas das mudanças climáticas e da perda da capacidade produtiva dos solos cultivados, especialmente pelo decréscimo no teor de carbono no solo.

4. REFERÊNCIAS

- ABIVEN, S.; HUND, A.; MARTINSEN, V.; CORNELISSEN, G. Biochar amendment increases maize root surface areas and branching: A shovelomics study in Zambia. **Plant and Soil**, v. 7, p.1–13, 2015.
- ALI, K.; WANG, X.; RIAZ, M.; ISLAM, B.; KHAN, Z. H.; SHAH, F.; HAQ, S. I. U. Biochar: an eco-friendly approach to improve wheat yield and associated soil properties on sustainable basis. **Pakistan journal of botany**, v. 51, p. 1255-1261, 2019.
- AMIN, A. E. E. A. Z.; EISSA, M. A. Biochar effects on nitrogen and phosphorus use efficiencies of zucchini plants grown in a calcareous sandy soil. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 17, p. 912-921, 2017.
- AQUINO, R. E. D.; MARQUES, J.; COSTA CAMPOS, M. C.; OLIVEIRA, I. A. D.; DE SOUZA BAHIA, R.; SANTOS, A.; COUTRIM DOS SANTOS, L. A. Characteristics of color and iron oxides of clay fraction in Archeological Dark Earth in Apuí region, southern Amazonas. **Geoderma**, v. 267, p. 35-44. 2016.
- ATKINSON, C. J; FITZGERALD, J. D.; HIPPS, N. A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. **Plant and Soil**, v. 12, p. 1–18, 2010.
- BARBOSA, J. Z.; MOTTA, A. C. V.; CORRÊA, R. S.; MUNIZ, A. W.; MARTINS, G. C.; SILVA, L. D. C. R.; BROADLEY, M. R. Elemental signatures of an Amazonian Dark Earth as result of its formation process. **Geoderma**, v. 361, p. 114085. 2020.
- BERNARDES, K. C.; LOURDES P. R.; PEDROSO, A. J. S.; RODRIGUES, P. G.; OKUMURA, R. S. Chemical attributes of archaeological black earth soils in Brazilian Amazon. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, p. 1334. 2017.
- BIEDERMAN, L. A.; HARPOLE, W. S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. **GCB Bioenergy**, v. 5, p. 202–214, 2013.
- BOYD, P.W.; TRULL, T. W. Understanding the export of biogenic particles in oceanic waters: Is there consensus? **Progress In Oceanography**, v. 72, p. 276-312, 2007.
- BONIN, C. L.; FIDEL, R. B.; BANIK, C.; LAIRD, D. A.; MITCHELL, R.; HEATON, E. A. Perennial biomass crop establishment, community characteristics, and productivity in the upper US Midwest: Effects of cropping systems seed mixtures and biochar applications. **European journal of agronomy**, v. 101, p. 121-128, 2018.
- BUTPHU, S.; RASCHE, F.; CADISCH, G.; KAEWPRADIT, W. Eucalyptus biochar application enhances Ca uptake of upland rice, soil available P, exchangeable K, yield, and N use efficiency of sugarcane in a crop rotation system. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 0, p. 1-11, 2019.

- BURRELL, L.D.; ZEHETNER, F.; RAMPAZZO, N.; WIMMER, B.; SOJA, G. Long term effects of biochar on soil physical properties. **Geoderma**, v. 282, p. 96–102, 2016.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 14. ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA., 2008. 965p.
- CHANG, L.; WANG, B.F.; LIU, X. H.; CALLAHAM, M.A.; GE, F. Recovery of collembola in pinus tabulae formis plantations. **Pedosphere**, v. 27, p. 129–137, 2017.
- CHENG, C.H.; LEHMANN, J.; ENGELHARD, M.H. Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular form and surface charge along a climosequence. **Geochim Cosmochim Acta**, v. 72, p. 1598–1610, 2008.
- CHIDUMAYO, E.N. Effects of wood carbonization on soil and initial development of seedlings in miombo wood land, Zambi, **Forest Ecological Management**, v. 70, p. 353–357, 1994.
- CHISHOLM, S. W.; FALKOWSKI, P. G.; CULLEN, J. J. Dis-Crediting Ocean Fertilization. **Science**, v. 294, p. 309-310, 2001.
- DAI, Z. M.; ZHANG, X. J.; TANG, C.; MUHAMMAD, N. W. U. J. .; BROOKES, P. C.; XU, J. M.; Potential role of biochars in decreasing soil acidification—a critical review. **Science of the Total Environment**, v. 16, p. 601–611, 2017.
- DIJKSTRA, F. A.; CARRILLO, Y.; PENDALL, E.; MORGAN, J. A. Rhizosphere priming: A 450 nutrient perspective. **Hypothesis and Theory Article**, v. 4, p. 1–8, 2013.
- DING, Y.; LIU, Y.; LIU, S.; LI, Z.; TAN, X.; HUANG, X.; ZHENG, B. Biochar to improve soil fertility. A review. **Agronomy for sustainable development**, v. 36, p. 36, 2016.
- DOWNIE, A. E., VAN ZWIETEN, L., SMERNIK, R. J., MORRIS, S., MUNROE, P. R.. Terra Preta Australis: Reassessing the carbon storage capacity of temperate soils. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 140, p. 137–147, 2011.
- FALKOWSKI, P.; SCHOLES, R.; BOYLE, E.; CANADELL, J.; CANFIELD, D.; ELSER, J.; GRUBER, N.; HIBBARD, K.; HOGBERG, P.; LINDER, S.; MACKENZIE, F.; MOORE, B.; PEDERSEN, T.; ROSENTHAL, Y.; SEITZINGER, S.; SMETACEK, V.; STEFFEN, W. “The global carbon cycle: a test of our knowledge of Earth as a system”, **Science**, v. 290, p. 291–296, 1998.
- FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G.; BALIEIRO, F. D. C.; MOURA, T. P. A. D.; MENEZES, A. R. D.; SANTANA, C. I. Characteristics and attributes of Oxisols under different land uses in the western region of the state of Bahia, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1457-1465, 2016.
- GASKIN, J.W.; STEINER, C.; HARRIS, K.; DAS, K.C.; BIBENS, B. Effect of low temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. **Trans Asabe**, v. 51, p. 2061–2069, 2008.

GLASER, B.; AMELUNG, W.; Pyrogenic carbon in native grassland soils along a climosequence in North America. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 17, p. 1064-1071, 2003

GLISCZYNSKI, F. V.; PUDE, R.; AMELUNG, W.; SANDHAGE-HOFMANN A. Biochar-compost substrates in short-rotation coppice: effects on soil and trees in a three-year field experiment. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 179, p 574–583, 2016.

GUL, S.; WHALEN, J. K.; THOMAS, B. W.; SACHDEVA, V.; DENG, H. Physicochemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 206, p. 46–59, 2015.

GUNDALE, M.J.; NILSSON, M.C.; PLUCHON, N.; WARDLE, D.A. The effect of biochar management on soil and plant community properties in a boreal forest. **GCB Bioenergy**, v. 8, p. 777–789, 2016.

HAMMOND, D.; STEEGE, H.; VAN DER BORG, K. "Upland Soil Charcoal in the Wet Tropical Forests of Central Guyana". **Biotropica**, v. 39, p. 153-160, 2007.

HARTMANN, M.; NIKLAUS, P. A.; ZIMMERMANN. S.; SCHMUTZ, S.; KREMER, J.; ABARENKOV, K.; LÜSCHER, P.; WIDMER, F.; FREY, B. Resistance and resilience of the forest soil microbiome to logging-associated compaction. **The ISME journal**, v. 8, p. 226, 2014.

HEYDARI, M.; PRÉVOSTO, B.; NAJI, H. R.; MEHRABI, A. A.; POTHIER, D. Influence of soil properties and burial depth on Persian oak (*Quercus brantii*, Lindl) establishment in different microhabitats resulting from traditional forest practices. **European Journal of Forest Research**, v. 136, p. 1–19, 2017.

HU, J.; GUO, H.; WANG, X.; GAO, M. T.; YAO, G.; TSANG, Y. F.; ZHANG, S. Utilization of the saccharification residue of rice straw in the preparation of biochar is a novel strategy for reducing CO₂ emissions. **Science of the Total Environment**, v. 650, p. 1141-1148, 2019.

HU, X.; GHOLIZADEH, M. Biomass pyrolysis: A review of the process development and challenges from initial researches up to the commercialisation stage. **Journal of Energy Chemistry**, v. 39, p.109-143, 2019.

HSEU, Z. Y.; JIEN, S. H.; CHIEN, W. H.; LIOU, R. C. Impacts of biochar on physical properties and erosion potential of a mudstone slopeland soil. **The Scientific World Journal**, v. 24, p. 754-758, 2014.

JEFFERY, S.; BEZEMER, T. M.; CORNELISSEN, G.; KUYPER, T. W.; LEHMANN, J.; MOMMER, L.; GROENIGEN, J. W. The way forward in biochar research: targeting trade-offs between the potential wins. **Gcb Bioenergy**, v.7, p. 1-13, 2015.

KAMMANN, C. I.; SCHMIDT, H. P.; MESSERSCHMIDT, N.; LINSEL, S.; STEFFENS, D.; MU"LLER, C.; KYORO, H. W.; CONTE, P.; JOSEPH, S. Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. **Scientific reports**, v.5, p. 110-112, 2015.

KÄMPF, N.; WOODS, W. I.; SOMBROEK, W.; KERN, D. C.; CUNHA T. J. F. Classification of Amazonian dark Earths and other ancient anthropic soils; In: LEHMANN, J.; KERN, D. C.; GLASER, B.; WOODS, W. I. (Eds) **Amazonian Dark earths, Origin, Properties, Management**, Academic publishers, p. 77-104, 2003.

KARAOSMANOGLU, F.; ISIGIGUR-ERGUNDENLER, A.; SEVER, A. 'Biochar from the straw-stalk of rapeseed plant', **Energy and Fuels**, v. 14, p. 336–339, 2000.

KERN, D. C.; LIMA, H. P.; COSTA, J. A.; LIMA, H. V.; RIBEIRO, A. B.; MORAES, B. M., KAMPF, N. Terras pretas: approaches to formation processes in a new paradigm. **Geoarchaeology**, v. 32, p. 694–706, 2017.

KIMETU, J. M.; LEHMANN, J.; NGOZE, S.; MUGENDI, D. N.; KINYANGI, J.; RIHA, S.; VERCHOT, L.; RECHA, J. W.; PELL, A. Reversibility of productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient. **Ecosystems**, v. 11, n.5, p. 726-739, 2008.

KISHIMOTO, S.; SUGIRA, G. Charcoal as a soil condition. In: **Sopjymposium on forest product research international: achievements and the future**, 1985, Pretoria, Proceedings...Pretoria: National Timber Research Institute, v. 5, p. 22-26, 1985.

KORMANEK, M.; GŁĄB, T.; BANACH, J.; SZEWCZYK, G. Effects of soil bulk density on sessile oak *Quercus petraea*, Liebl seedlings. **European Journal of Forest Research**, v. 134, p. 969–979, 2015.

KLOSS, S.; ZEHETNER, F.; OBURGER, E.; BUECKER, J.; KITZLER, B.; WENZEL, W.W.; WIMMER, B.; SOJA, G. Trace element concentrations in leachates and mustard plant tissue (*Sinapis alba* L.) after biochar application to temperate soils. **Science of the Total Environment**, v. 481, p. 498–508, 2014.

KOOKANA, R.S.; SARMAH, A.K.; ZWIETEN, L.; VAN KRULL, E.; SINGH, B. Biochar application to soil: agronomic and environmental benefits and unintended consequences. **Advances in Agronomy**, v. 112, p. 103-143, 2011.

LAL, R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. **Science**, v. 304, p. 1623-1627, 2004.

LEHMANN, J.; GAUNT, J.; RONDON, M. "Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review", **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 11, p. 403–427, 2006.

LEHMANN, J.; KUZYAKOV, Y.; PAN, G.; OK, Y. S. Biochars and the plant-soil interface. **Plant and Soil**, v. 395, p. 1–5, 2015.

LEHMAN, R. M., OSBORNE, S. L., DUKE, S. E. Diversified no-till crop rotation reduces nitrous oxide emissions, increases soybean yields, and promotes soil carbon accrual. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, p. 76-83, 2017.

LEHMANN, J. "A handful of carbon" **Nature**, v. 447 p. 143-144, 2007.

- LEI, O.Y.; ZHANG, R.D. Effects of biochars derived from different feedstocks and pyrolysis temperatures on soil physical and hydraulic properties. **Journal of Soils and Sediments**, v. 13, p. 1561–1572, 2013.
- LIU, X.Y.; LI, L.Q.; BIAN, R.J.; CHEN, D.; QU, J.; WANJIRU KIBUE, G.; PAN, G.X.; ZHANG, X.H.; ZHENG, J.W.; ZHENG, J.F. Effect of biochar amendment on soil-silicon availability and rice uptake. **Journal of plant nutrition and soil science**, v. 177, p. 91–96, 2014.
- LIU, C.; LU, M.; CUI, J.; LI, B.; FANG, C. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A metaanalysis. **Global Change Biology**, v. 20, p. 1366–1381, 2014.
- LORENZ, K.; LAL, R. Biochar application to soil for climate change mitigation by soil organic carbon sequestration. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science.**, v. 177, p. 651–670, 2014.
- LU, S.G.; SUN, F.F.; ZONG, Y.T. Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol). **Catena**, v. 114, p. 37–44, 2014.
- LU, K.; YANG, X.; GIELEN, G.; BOLAN, N.; OK, Y. S.; NIAZI, N. K. LIU, D. Effect of bamboo and rice straw biochars on the mobility and redistribution of heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) in contaminated soil. **Journal of environmental management**, v. 186, p. 285-292, 2017.
- LUO, Y.; DURENKAMP, M.; LIN, Q.M.; NOBILI, M.; BROOKES, P.C. Soil priming effects and the mineralisation of biochar following its incorporation to soils of different pH. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, p. 2304–2314, 2011.
- LUO, Y.; YU, Z.Y.; ZHANG, K.L.; XU, J.M.; BROOKES, P.C. The properties and functions of biochars in forest ecosystems. **Journal of Soils and Sediments**, v.16, p. 2005–2020, 2016.
- MAIA, C. M. B. F.; MADARI, B. F.; NOVOTNY, E. H. Advance in Biochar Research in Brazil. **Global Science Books**, p. 53-58, 2011.
- MAROUŠEK, J.; VOCHOZKA, M.; PLACHÝ, J.; ŽÁK, J. Glory and misery of biochar. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 19, p. 311-317, 2016.
- MARTIN, J.H.; GORDON, R.M.; FITZWATER, S.E. “Iron in Antarctic waters” **Nature**, v. 345, p 156-158, 1990.
- MIZUTA, K.; MATSUMOTO, T.; HATATE, Y.; NISHIHARA, K.; NAKANISHI T. ‘Removal of nitrate and nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal’, **Bioresource Technology**, v. 95, p. 255–257, 2004.
- MOREIRA, A. Fertilidade, matéria orgânica e substâncias húmicas em solos antropogênicos da Amazônia Ocidental. **Bragantia**, v. 66, p. 307-315, 2007.
- NOVOTNY, E. H.; HAYES, M. H. B.; MADARI, B. E.; BONAGAMBA, T. J.; AZEVEDO, E. R.; SOUZA A. A.; CANÇÃO, G.; NOGUEIRA, C.M.; MANGRICH, A. S.; Lessons from the Terra Preta de Índio of the

Amazon region for the utilization of charcoal for soil amendment. **Journal of Brazilian Chemical Society**, v. 20, p. 1003-1010, 2009.

OUYANG, L.; WANG, F.; TANG, J.; YU, L.; ZHANG, R. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 13, p. 991-1002, 2013.

PETTER, F. A.; MADARI, B. E. "Biochar: Agronomic and environmental potential in Brazilian savannah soils." **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 761-768. 2012.

PROBER, S.M.; STOL, J.; PIPER, M.; GUPTA, V.V.S.R.; CUNNINGHAM, S.A. Enhancing soil biophysical condition for climate-resilient restoration in mesic woodlands. **Ecological Engineering**, v.71, p. 246–255, 2014.

RADOVIC, L. R.; MORENO-CASTILLA, C.; RIVERA-UTRILLA, J. 'Carbon materials as adsorbents in aqueous solutions', in L.R. RADOVIC (ed.), **Chemistry and Physics of Carbon**, p. 227–405, 2001.

RHOADES C. C.; MINATRE K.L.; PIERSON D. N.; FEGEL T.S.; COTRUFO M.F.; KELLY E. F. Examining the potential of forest residue-based amendments for post-wildfire rehabilitation in Colorado, USA. **Scientifica**, v. 21, p.1-10, 2017.

RONDON, M. A.; MOLINA, D.; HURTADO, M.; RAMIREZ, J.; LEHMANN, J.; MAJOR, J.; AMEZQUITA, E. Enhancing the productivity of crops and grasses while reducing greenhouse gas emissions through bio-char amendments to unfertile tropical soils. In: **18th World Congress of Soil Science**. Philadelphia, PA: International Union of Soil Sciences, 2006. p. 9-15. 2006.

RONDON, M.; RAMIREZ, J. A.; LEHMANN, J. "Charcoal additions reduce net emissions of greenhouse gases to the atmosphere", in: **Proceedings of the 3rd USDA Symposium on Greenhouse Gases and Carbon Sequestration**, v. 23, p. 208, 2005.

SACKETT, T.E; BASILIKO, N.; NOYCE, G.L.; WINSBOROUGH, C.; SCHURMAN, J.; IKEDA, C.; THOMAS, S.C. Soil and greenhouse gas responses to biochar additions in a temperate hardwood forest. **GCB Bioenergy**, v 7, p. 1062–1074, 2015.

SANKURA, H.; LEMMA, B.; RAM, N. Effect of changing natural forest and wetland to other land uses on soil properties and stocks of carbon and nitrogen in south Ethiopia. **Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences**, v. 9, p. 259–265, 2014.

SHAHZAD, K.; ABID, M.; SINTIM, H. Y.; HUSSAIN, S.; NASIM, W. Tillage and Biochar Effects on Wheat Productivity under Arid Conditions. **Crop Science**, v. 59, p.1 191-1199, 2019.

SHENG, Y.; ZHAN, Y.; ZHU, L. Reduced carbon sequestration potential of biochar in acidic soil. **Science of the Total Environment**, v. 572, p. 129-137, 2016.

- SILBER, A.; LEVKOVITCH, I.; GRABER, E. R. pH-Dependent Mineral Release and Surface Properties of Cornstraw Biochar: Agronomic Implications. **Environmental science & technology**, v. 44, p. 9318–9323, 2010.
- SILVA, I. C. B. D.; BASÍLIO, J. J. N.; FERNANDES, L. A.; COLEN, F.; SAMPAIO, R. A.; FRAZÃO, L. A. Biochar from different residues on soil properties and common bean production. **Scientia Agricola**, v. 74, p. 378-382. 2017.
- SMITH, J.L.; COLLINS, H.P.; BAILEY, V.L. The effect of young biochar on soil respiration. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, p. 2345–2347, 2010.
- SOUBIES, F. “Existence of a dry period in the Brazilian Amazonia dated through soil carbon, 6000-3000 years BP” *Cah. ORSTOM, sér. Géologie*, v. 1, p. 133, 1979.
- SOLOMON, D.; LEHMANN, J.; FRASER, J. A.; LEACH, M.; AMANOR, K.; FRAUSIN, V.; KRISTIANSEN, S. M.; MILLIMOUNO, D.; FAIRHEAD, J. Indigenous African soil enrichment as a climate-smart sustainable agriculture alternative. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 14, p. 71–76, 2016.
- STREET, J. H.; PAYTON A. “Iron, phytoplankton growth, and the carbon cycle”, **Metal Ions in Biological Systems**, v. 43, p. 153-93, 2005.
- TANG, X. F.; LIU, Y. G.; GU, Y. L.; XU, Y.; ZENG, G. M.; HU, X. J.; LIU, S. B.; WANG, X.; LIU, S. M.; LI, J. Biochar-based nano-composites for the decontamination of wastewater: A review. **Bioresource Technology**, v. 212, p. 318–333, 2016.
- TITIZ, B.; SANFORD, R. "Soil Charcoal in Old-Growth Rain Forests from Sea Level to the Continental Divide". **Biotropica**, v. 39, p. 673-682, 2007.
- TONKS, A.J.; APLIN, P.; BERIRO, D.J.; COOPER, H.; EVERS, S.; VANE, C.H.; SJÖGERSTEN S. Impacts of conversion of tropical peat swamp forest to oil palm plantation on peat organic chemistry, physical properties and carbon stocks. **Geoderma**, v. 289, p. 36–45, 2017.
- THOMAS, E., CAICEDO, C. A., MCMICHAEL, C. H., CORVERA, R., LOO, J. Uncovering spatial patterns in the natural and human history of Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) across the Amazon Basin. **Journal of Biogeography**, v. 42, p. 1367–1382. 2015.
- VERHEIJEN, F.; JEFFERY, S.; BASTOS, A. C.; VAN, D.E.R.; VELDE, M.; DIAFAS, I. Biochar application to soils. **Institute for Environment and Sustainability**, v. 24099, p. 162, 2010.
- WANG, C.; TU, Q.; DONG, D.; STRONG, P.; WANG, H.; SUN, B.; WU, W. Spectroscopic evidence for biochar amendment promoting humic acid synthesis and intensifying humification during composting. **Journal of hazardous materials**, v. 280, p. 409–416, 2014a.

WANG, Z. L.; LI, Y. F.; CHANG, S. X.; ZHANG, J. J.; JIANG, P. K.; ZHOU, G. M.; SHEN, Z. M. Contrasting effects of bamboo leaf and its biochar on soil CO₂ efflux and labile organic carbon in an intensively managed Chinese chestnut plantation. **Biology and fertility of Soils**, v. 50, p. 1109–1119, 2014b.

WIEDNER, K.; SCHNEEWEIS, J.; DIPPOLD, M. A.; GLASER, B. Anthropogenic dark earth in Northern Germany – the Nordic analogue to terra preta de índio in Amazonia. **Catena**, v. 132, p. 114–125, 2015.

WIGLEY, T. M. L. The Paris warming targets: emissions requirements and sea level consequences. **Climatic change**, v. 147, p. 31–45, 2018.

WOOLF, D. Biochar as a soil amendment: A review of the environmental implications. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 12, p. 302–321, 2008.

WROBEL-TOBISZEWSKA, A.; BOERSMA, M.; ADAMS, P.; SINGH, B.; FRANKS, S.; SARGISON, J.E. Biochar for eucalyptus forestry plantations. **Acta Horticulturae**, v. 1108, p. 55–62, 2016.

YAMATO, M.; OKIMORI, Y.; WIBOWO, I. F.; ANSHORI, S.; OGAWA, M. Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea, peanut and soil chemical properties in south Sumatra, Indonesia. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 52, n. 4, p. 489–495, 2006.

YUAN, J. H.; XU, R. K.; QIAN, W.; WANG, R. H. Comparison of the ameliorating effects on an acidic ultisol between four crop straws and their biochars. **Journal of Soils and Sediments**, v. 11, p. 741–750, 2011.

ZHAO, B.; O'CONNOR, D.; ZHANG, J.; PENG, T.; SHEN, Z.; TSANG, D. C.; HOU, D. Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rapeseed stem derived biochar. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 977–987, 2018.

ZELAYA, K. P. S.; ALVES, B. S. Q.; COLEN, F.; FRAZÃO, L. A.; SAMPAIO, R. A.; PEGORARO, R. F.; FERNANDES, L. A. Biochar na produção e nutrição da beterraba. **Ciência Rural**, v. 49, p. 01–09, 2019.

5. ARTIGOS

5.1 ARTIGO I – Biochar como alternativa de substrato para produção de mudas de cana-de-açúcar

Elaborado conforme as normas da revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental – AGRIAMBI

Biochar como alternativa de substrato para produção de mudas de cana-de-açúcar

Resumo

A busca por métodos que possibilitem a reutilização de resíduos agroindustriais tem fomentado diversos estudos com intuito de viabilizar a reciclagem de materiais que apresentam potencial de retorno ao processo produtivo, especialmente na indústria canavieira, por ser grande produtora de resíduos. O biochar tem se destacado como uma importante técnica de transformação e disposição final de biomassa, que pode ser utilizada diretamente no solo ou em viveiros de produção de mudas. Diante do exposto, o estudo teve o objetivo de avaliar a eficiência do uso do biochar em diferentes granulometrias e proporções de substituição do substrato comercial na produção de mudas de cana-de-açúcar. Para isso, foi montado um experimento no delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5 x 4, consistindo em: cinco proporções de biochar (0, 25, 50, 75 e 100% v/v em substituição do substrato convencional) e, quatro granulometrias (<1, 2, 4 e 9 mm), com nove repetições. Foram avaliados o tempo médio de brotação, o índice de velocidade de brotação, o crescimento por meio da altura, o número de folhas, o comprimento e a largura da folha + 2, além da massa seca de parte aérea e de raízes. A granulometria menor que 1 mm propiciou melhor crescimento e desenvolvimento de mudas de cana-de-açúcar e a substituição de substrato convencional por biochar promoveu o decréscimo nesses mesmos parâmetros.

Palavras-chave: Biocarvão, *Saccharum officinarum* L., Carbono pirogênico, Pirólise.

Biochar as an alternative substrate for the production of sugarcane seedlings

Abstract: The search for methods that enable the reuse of agro-industrial waste has fostered several studies in order to warrant the recycling of materials with the potential to return to the production process, especially in the sugarcane industry as it is a large producer of waste. Biochar has stood out as an important form of transformation and final disposal of biomass, which can be used directly in the soil or in seedling nurseries. Given the above, the study aimed at evaluating the efficiency of the use of biochar, in different granulometry and levels of substitution of the commercial substrate in the production of sugarcane seedlings. Thus, an experiment was set up in a completely randomized design, under a 5 x 4 factorial scheme, consisting of: five levels of biochar (0, 25, 50, 75, and 100% v / v in substitution of the conventional substrate) and, four particle sizes (<1, 2, 4, and 9 mm), with nine repetitions. The average sprouting time, sprouting speed index, growth through height, leaf number, leaf length and width + 2, in addition to the dry mass of the aerial part and root were evaluated. The granulometry under 1 mm provided the best growth and development of sugarcane seedlings and the replacement of conventional substrate for biochar provided a decrease in these same parameters.

Key words: biochar, *Saccharum officinarum* L., pyrogenic carbon, pyrolysis.

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é propagada de forma vegetativa pelo uso de toletes que contenham de 2 a 4 gemas. Esse sistema utiliza grande quantidade de material vegetativo e aumenta a quantidade de falhas no campo devido à presença de gemas dormentes ou inativas. Para solução desse problema tem sido desenvolvido o método de propagação pelo uso de gemas individualizadas (Landell et al., 2013). Esse sistema de multiplicação vem contribuindo para a produção rápida de mudas, associando elevado padrão de fitossanidade, vigor e uniformidade (Santos et al., 2020). A agroindústria canavieira é produtora de grandes quantidades de resíduos orgânicos que podem ser reutilizados no campo ou em viveiros de produção de mudas (Aguilar, 2018). Uma das possíveis formas de aproveitamento desses resíduos é a transformação em biomassa carbonizada, material denominado biochar.

O biochar é produzido a partir da carbonização parcial de qualquer fonte de biomassa sob baixo ou nenhum fornecimento de oxigênio, processo denominado de pirólise (Lehmann et al., 2015). Esse material apresenta características que aumentam a capacidade de retenção de água, a disponibilidade de nutrientes e a aeração devido à sua natureza porosa. Além disso, possui forma relativamente estável, cuja estrutura aromática policíclica confere alta estabilidade, elevada superfície específica e densidade de cargas (Jeffery et al., 2015; Puettmann et al., 2020). Segundo Kaudal et al. (2016), a estabilidade do biochar é uma característica desejável em substratos, já que os materiais à base de fibra de coco e cascas de árvores sofrem lenta decomposição ao longo do tempo e alteram as características hídricas. Além disso, transformações termoquímicas da biomassa permitem a obtenção de material livre de pragas, ervas daninhas e patógenos (Fornes et al., 2015; Xu et al., 2016).

Outros estudos relatam aumentos da atividade microbiológica em substratos com uso do biochar (De Tender et al., 2016; Zheng et al., 2016). Segundo esses autores, os poros do biochar servem de refúgio para fungos micorrízicos abusculares que aumentam a absorção de nutrientes pelas plantas, além da colonização de bactérias fixadoras de N (Vaccari et al., 2015). As características referidas nos estudos citados acima são altamente dependentes do tamanho de partícula, assim como da proporção de substituição. Nematí et al. (2015) citam que a substituição acima de 25% do substrato por biochar pode elevar o pH para uma faixa crítica (acima de 7), em que a disponibilidade de micronutrientes catiônicos é reduzida. Para Zulfiqar et al. (2019), esse problema pode ser facilmente controlado com uso de ácidos, e por isso recomendam proporção de substituição de até 50%. Além disso, a proporção de substituição depende de outros fatores, como matéria prima utilizada, temperatura de pirólise e adaptação da cultura (Huang & Gu et al., 2019).

Nesse sentido, objetivou-se com o presente estudo avaliar o uso do biochar em diferentes granulometrias e proporções de substituição do substrato convencional na produção de mudas de cana-de-açúcar.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no período de agosto a setembro de 2018, em casa de vegetação do Instituto Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais (ICA-UFMG), cujas coordenadas

geográficas são 16° 40' S e 43° 50' W, e altitude de 646 m. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo “Aw” (tropical quente, com inverno seco).

O experimento foi montado utilizando gemas individualizadas de cana-de-açúcar da variedade SP 81 3250, no delineamento inteiramente casualizado, sob esquema fatorial 5 x 4, consistindo em cinco proporções de biochar (0, 25, 50, 75 e 100% v/v, em substituição ao substrato convencional) e quatro granulometrias (<1, 2, 4 e 9 mm), com nove repetições (Figura 1A).

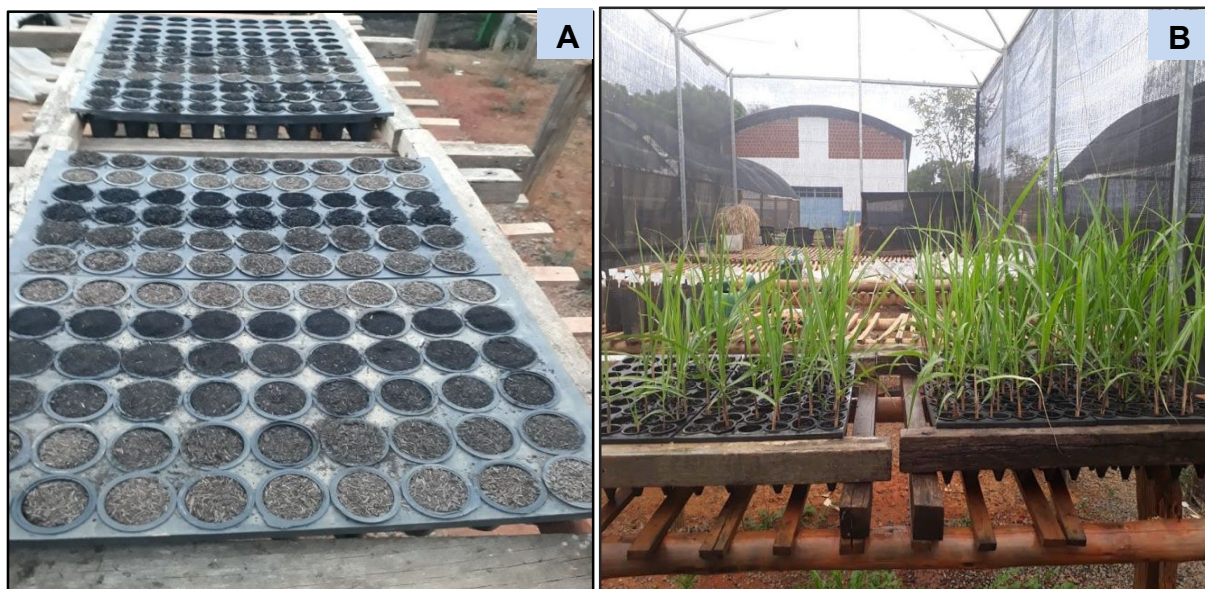


Figura 1 – A) Disposição do substrato em tubetes e montagem do experimento; B) Experimento estabelecido aos 45 dias após o plantio.

O substrato comercial utilizado foi o Bioplant®, composto de casca de pinus, esterco, serragem, fibra de coco, vermiculita, casca de arroz, cinza, gesso agrícola, carbonato de cálcio, magnésio, termofosfato magnesiano e aditivos.

O biochar utilizado no estudo foi obtido a partir de pirólise muito lenta de madeira de floresta plantada de eucalipto, com temperaturas entre 400 a 450 °C atingidas, por um longo tempo de residência, geralmente de 48 a 72 horas. O biochar produzido foi caracterizado quanto ao pH e à densidade, conforme Rajkovich et al. (2012), e as cinzas de acordo com o procedimento ASTM D1762-84. A composição elementar (C, H, N, S e O) foi determinada por combustão seca em analisador elementar (CNHS/O). Os teores de nutrientes, chumbo e cádmio foram determinados por ICP-MS/MS, após digestão em microondas com ácido nítrico concentrado (USEPA 3051). Os resultados estão demonstrados na tabela 1. Em seguida, o material foi misturado e homogeneizado com substrato comercial (BIOPLANT®) e distribuído nos tubetes.

Tabela 1. Atributos físicos e químicos do biochar utilizados no experimento

	pH	H	O	COT	NT	P	Ca	Mg	S	
	H ₂ O	----- % -----				----- g kg ⁻¹ -----				
Média	6,10	2,46	22,6	56,7	0,50	8,00	13,8	12,4	2,60	
IC	0,15	0,18	1,18	2,01	0,04	0,61	0,61	1,19	0,64	
	Cu	Zn	Fe	Mn	Si	Ni	Pb	Cd	Ds	Cinza
	----- mg kg ⁻¹ -----							g cm ⁻³		%
Média	51,5	270,0	1,43	56,9	798,6	5,20	3,03	4,50	0,45	10,0
IC	3,80	18,1	0,37	6,16	19,6	0,53	0,45	0,53	0,03	1,02

IC: Intervalo de confiança; n=3

As gemas foram cortadas uniformemente a 2,3 cm de comprimento, retirando-se aquelas mortas ou quebradas. Em seguida, foram depositadas na posição horizontal em tubetes plásticos contendo substrato no volume de 0,018 cm³. As gemas foram colocadas na parte superior dos tubetes e posteriormente cobertas com 2,5 cm de substrato e/ou biocarvão, de acordo com o método desenvolvido por Landell et al. (2013). As plantas foram mantidas em casa de vegetação por 45 dias. A irrigação foi feita diariamente, de forma manual, com um auxílio de uma mangueira, até atingir a saturação completa do substrato.

As avaliações da emergência de plântula foram realizadas diariamente, a partir do plantio. Foram consideradas emergidas aquelas plântulas que apresentaram ruptura da superfície do substrato. De posse desses dados, foram calculados o tempo médio de brotação (TMB) e o índice de velocidade de germinação, conforme descrito por Maguire (1962), e aqui chamado de índice de velocidade de brotação (IVB), calculado pela equação;

$$IVB = \frac{N}{\sum n_i \left(\frac{1}{d_i} \right)}$$

Onde N = número de gemas brotadas; n_i = número de gemas brotadas na data i ; d_i = dias até a brotação.

O crescimento das plantas foi avaliado no final do experimento, aos 45 dias de cultivo. Nessa ocasião, foi mensurado o número de folhas, altura de plantas, comprimento e largura da folha + 2. Compreende-se a altura de plantas a distância entre a superfície do substrato e a primeira folha completamente expandida. Essas variáveis foram utilizadas para estimar a área foliar (AF), conforme a equação:

$$AF = C \times L \times N \times 0,75$$

Em que C é o comprimento da folha +2; L é a maior largura da folha + 2; N é o número de folhas abertas com pelo menos 20% de área verde e 0,75 é o fator de correção para a área foliar.

Para a avaliação da massa seca de parte aérea (MSPA) e de raiz (MSR), as mudas foram retiradas dos tubetes e seccionadas na altura do colo, separando-se a parte aérea da raiz. Posteriormente, o

material foi levado à estufa de circulação forçada de ar a 60°C, até a obtenção de massa constante. Logo após, foi determinada a massa seca dos materiais, por meio de balança digital de precisão.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (teste F) e, quando significativos ($p \leq 0,05$), realizou-se análise de regressão e ajuste das equações, selecionando-se o modelo com melhor coeficiente de determinação, significância dos coeficientes e com explicação biológica, utilizando-se o programa estatístico SISVAR® (Ferreira, 2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O índice de velocidade de brotação (IVB) e o tempo médio de brotação (TMB) não foram influenciados significativamente ($p \leq 0,05$) pela interação proporção de substituição do biochar *versus* granulometria do substrato. Obteve-se apenas o efeito isolado de granulometria. O tratamento com tamanho de partícula de 2 mm apresentou o menor tempo de brotação (11 dias). Já os tratamentos com menor (<1mm) e maior partículas (9mm) apresentaram os maiores TMB (Figura 2A).

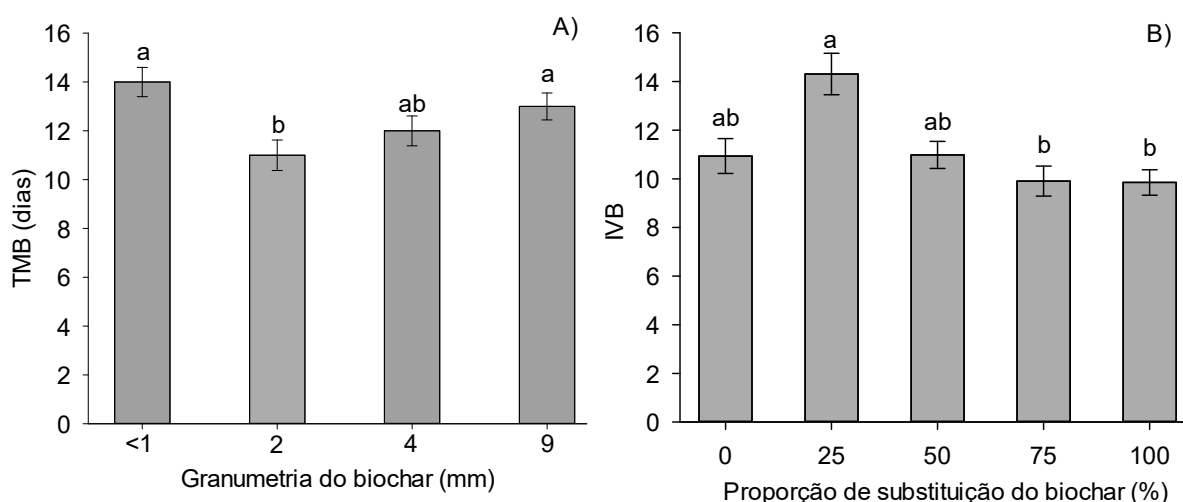


Figura 2 – A) Tempo Médio de Brotação (TMB) em função da granulometria; B) Índice de Velocidade Brotação (IVB) em função da proporção de substituição. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

O maior tempo de brotação no tratamento com partícula menor que 1 mm pode estar associado à maior densidade do material, que pode servir de barreira física e atrasar a brotação. Da mesma forma, partículas maiores também podem restringir a brotação, pela baixa capacidade retenção de água. De acordo com Oliveira et al. (2018), partículas maiores que 2,5 mm podem reduzir a capacidade de retenção de água do substrato para além das necessidades hídricas das plantas.

A proporção de substituição de 25% do substrato comercial propiciou o maior IVB (Figura 2B). Esse resultado sugere efeito positivo do biochar como condicionador de substrato. No entanto, os menores IVB foram observados nos tratamentos com as maiores substituições (75 e 100%). Esses resultados ficaram abaixo dos encontrados por Cavalcante et al. (2012), que verificaram aumentos na

percentagem de emergência, bem como no índice de velocidade de emergência de mudas de maracujazeiro com proporções de substituição acima de 50% de substrato comercial por biochar.

A avaliação dos dados de área foliar e de altura das plantas demonstrou que as partículas de menor granulometria (<1 mm) propiciaram maior crescimento e desenvolvimento de plantas (Figura 3A). Segundo Kloss et al. (2014), a granulometria é importante na qualidade física do material, tendo influência determinante sobre o arranjo das partículas, o espaço poroso e a capacidade de retenção de água. Nesse sentido, é possível que a redução do tamanho de partícula tenha maximizado o potencial condicionador do substrato.

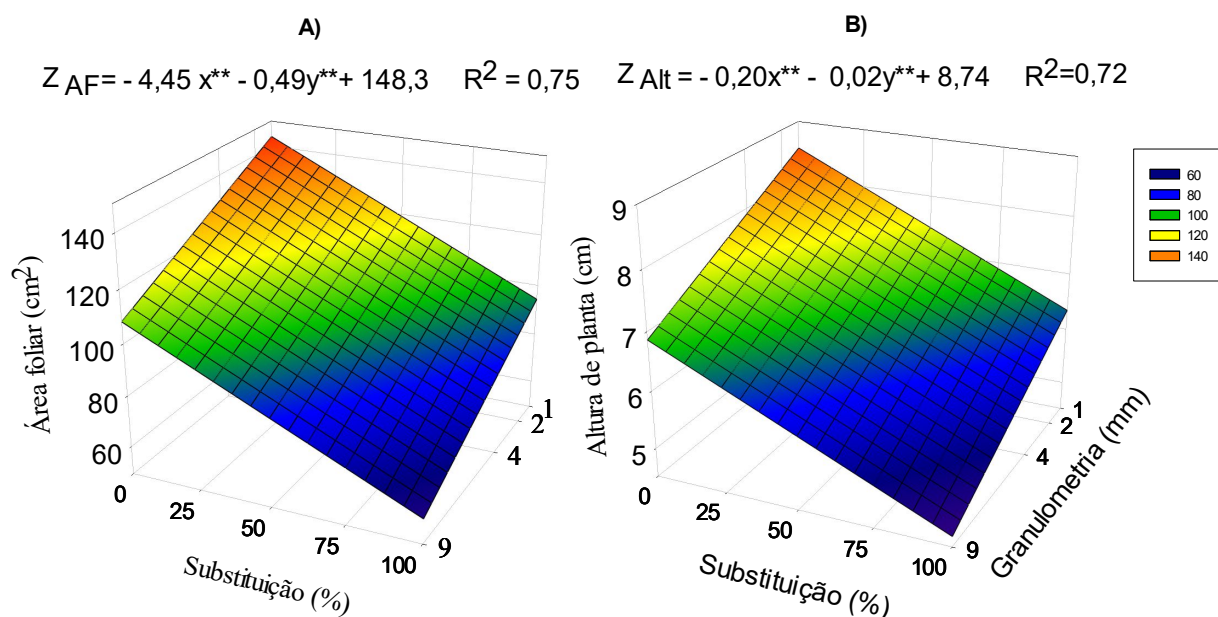


Figura 3 – Área foliar (A) e Altura de planta (B) em função de níveis de substituição de substrato comercial e granulometrias e, *, ** significativo a 1 e 5%, respectivamente.

Outra possível explicação seria o aumento considerável da superfície específica em função da redução do tamanho de partícula. Soma-se a isso a própria superfície específica do biochar, que varia entre 200-400 m² g⁻¹, muito próxima à superfície específica da argila (Kishimoto & Sugira, 1985). Tais parâmetros levam à hipótese de que a presença do biochar em partículas menores possa ter propiciado maior disponibilidade de água em relação aos tratamentos com partículas maiores.

Além disso, nos tratamentos com menor granulometria, as quantidades de biochar em massa foram maiores do que nos tratamentos com maior granulometria, de forma que a quantidade de material com microporosidade foi maior no tratamento com granulometria menor que 1 mm. Vários autores relatam a importância da microporosidade do biochar na sua retenção de água e de nutrientes (Batista et al., 2018; Suliman et al., 2018). Dessa forma, nos tratamentos com menores granulometrias, além da maior retenção de água, também deve ter ocorrido menor perda de nutrientes por lixiviação, devido à maior densidade de cargas elétricas presentes nos microporos.

Por outro lado, o fator substituição do substrato convencional por biochar reduziu de forma linear a área foliar e a altura das plantas. Esse fato sugere baixa eficiência do biochar em fornecer nutrientes às mudas, especialmente nessas condições, em que a demanda por nutriente prontamente disponível é

relativamente maior. Lima et al. (2016), trabalhando com biochar em substrato para produção de mudas de espécies florestais, observaram efeito positivo somente quando este foi associado ao fornecimento de N e P. Bons resultados envolvendo o potencial fertilizante do biochar têm sido reportados nas condições de campo pela interação solo-biochar, pelo efeito indireto (Pluchon et al., 2014). No entanto, no presente estudo, como componente de substratos, não foram verificados esses efeitos do biochar.

O aumento da granulometria reduziu de forma significativa a Massa Seca de Parte Aérea (MSPA) e a Massa Seca de Raiz (MSR). Em relação ao tratamento com maior tamanho de partícula (9 mm), a MSPA e a MSR foram 20% e 19%, respectivamente, superior no tratamento com partículas mais finas (<1 mm). Esses resultados estão associados à redução do crescimento em altura e área foliar (Figura 4). Resultados semelhantes foram encontrados por Oliveira et al. (2018), que, trabalhando com biochar em diferentes granulometrias, sugerem uso de biochar com partículas variando entre 1,4 e 1,65 mm. Assim como Ulyett et al. (2014), que recomendaram o uso de biochar com partículas menores do que 2 mm.

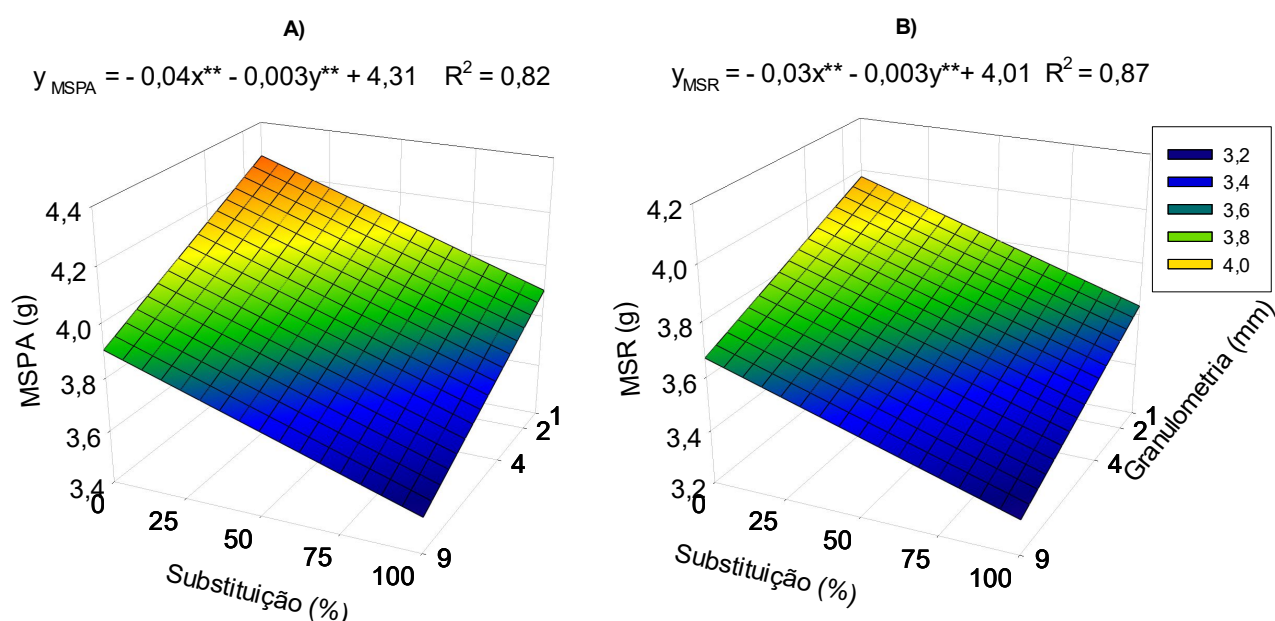


Figura 4 – A) Massa Seca de Parte Aérea (MSPA) e B) Massa Seca de Raiz (MSR) em função de níveis de substituição de substrato comercial e granulometrias e, *,** significativo a 1 e 5%, respectivamente.

Assim como os outros parâmetros de crescimento e desenvolvimento de plantas, a substituição de substrato comercial por biochar propiciou redução da MSPA e da MSR (Figura 4). Esse efeito, explicado pelo modelo linear negativo, pode ter sido fortemente influenciado pelos altos níveis de biochar testados. Esses resultados corroboram os encontrados por Silva et al. (2019), que relataram que concentrações de biochar superiores a 75% (m/m) influenciaram negativamente, principalmente o desenvolvimento radicular. Desse modo, Rezende et al. (2016), trabalhando com níveis de substituição de biochar por substrato comercial na produção de mudas de *Tectona grandis* (Teca), recomendam

nível de substituição de 25% (m/m). Ghezzehei et al. (2014) e Figueiredo et al. (2017) levantam a hipótese de que a presença de compostos fenólicos ou poliaromáticos adicionados pelo biochar ao substrato podem representar um aumento de fitotoxicidade e prejudicar o desenvolvimento da plântula.

Esses resultados evidenciam que a menor granulometria propicia o melhor desenvolvimento da planta. Com relação à proporção de substituição de substrato comerciais, recomendam-se mais estudos, focados principalmente em níveis de substituição que variam de zero a 25%, uma vez que houve uma redução linear nas variáveis estudadas.

Os parâmetros avaliados no presente estudo foram semelhantes aos obtidos por outros autores que, embora não tenham trabalhado especificamente com biochar, obtiveram mudas com altura que variaram entre 8 e 12 cm quando medidas até a primeira folha expandida, ou 20 a 30 cm quando medidas até a última folha. Para massa seca de parte aérea, os valores variaram entre 4 a 15 g, e de raiz, entre 3 e 10 g. A amplitude da variação está relacionada com o tempo de permanência no viveiro, que normalmente varia entre 30 e 60 dias, além do efeito de variedades (Gírio et al., 2015; Giraldeli et al., 2018).

CONCLUSÕES

1. A granulometria menor que 1 mm propiciou melhor crescimento e desenvolvimento de mudas de cana-de-açúcar.
2. A substituição de substrato comercial por biochar reduziu o crescimento e o desenvolvimento de mudas de cana-de-açúcar.

LITERATURA CITADA

- Aguiar, M. M., Pietrobon, V. C., Pupo, M. M. D. S., Torres, N. H., Americo, J. H., Salazar-Banda, G. R., & FERREIRA, L. F. R. Evaluation of commercial cellulolytic enzymes for sugarcane bagasse hydrolysis. *Cellulose Chemistry and Technology*, v 52, p. 695-699. 2018.
- Batista, E. M., Shultz, J., Matos, T. T., Fornari, M. R., Ferreira, T. M., Szpoganicz, B., Mangrich, A. S. Effect of surface and porosity of biochar on water holding capacity aiming indirectly at preservation of the Amazon biome. *Scientific Reports*, v8, p.1-9, 2018. DOI:10.1038/s41598-018-28794-z.
- Cavalcante, Í. H. L., Petter, F. A., Albano, F. G., da Silva, R. R. S., & da Silva Júnior, G. B. Biochar no substrato para produção de mudas de maracujazeiro amarelo. *Revista de la Facultad de Agronomía*, v. 111, p.41-47, 2012.
- De Tender, C.A., Debode, J., Vandecasteele, B., D'Hose, T., Cremelie, P., Haegeman, A., Ruttink, T., Dawyndt, P., Maes, M. Biological, physicochemical and plant health responses in lettuce and strawberry in soil or peat amended with biochar. *Appl. Soil Ecol.* V.107, p.1–12. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.05.001>.
- Ferreira, D. F. Sisvar: A computer statistical analysis system. *Revista Ciência e Agrotecnologia*, v.35, p.1039-1042, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>.

- Figueiredo, N.A.; Costa, L.M.; Melo, L.C.A.; Siebeneichler, E.A.; Tronto, J. Characterization of biochars from different sources and evaluation of release of nutrients and contaminants. *Revista Ciência Agronômica*, v.48, p.395-403, 2017. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170046>.
- Fornes, F., R. M. Belda, and A. Lidón. Analysis of two biochars and one hydrochar from different feedstock: Focus set on environmental, nutritional and horticultural considerations. *Journal of Cleaner Production*. V 86 p.40–8, 2015 doi: 10.1016/j.jclepro.2014.08.057.
- Ghezehei, T.A.; Sarkhot, D. V.; Berhe, A.A. Biochar can be used to capture essential nutrients from dairy wastewater and improve soil physico-chemical properties. *Solid Earth*, v.5, p. 953-962, 2014. <https://doi.org/10.5194/se-5-953-2014>.
- Giraldeli, A. L.; Silva, A. F. M.; de Brito, F. C.; da Silva Araújo, L.; Pagenotto, A. C. V.; de Moraes, J. P.; Victoria Filho, R. Crescimento inicial de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar em duas modalidades de aplicação de herbicidas. *Revista Brasileira de Herbicidas*, v.17, p.588-591, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.7824/rbh.v17i3.588>.
- Huang, L., Gu, M. Effects of biochar on container substrate properties and growth of plants – a review. *Horticulturae* v5, p.14-19, 2019 <https://doi.org/10.3390/horticulturae5010014>.
- Jeffery, S.; Bezemer, T. M.; Cornelissen, G.; Kuiper, T. W.; Lehmann, J.; Mommer, L.; Groenigen, J. W. The way forward in biochar research: targeting trade-offs between the potential wins. *Gcb Bioenergy*, v.7, p. 1-13. 2015. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12132>.
- Kaudal, B. B., Chen, D., Madhavan, D. B., Downie, A., & Weatherley, A. An examination of physical and chemical properties of urban biochar for use as growing media substrate. *Biomass and Bioenergy*, v 84, p. 49-58. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.012>.
- Kishimoto, S.; Sugira, G. Charcoal as a soil condition. In: *Sopjymposium on forest product research international: achievements and the future*. National Timber Research Institute, v. 5, p. 22-26, 1985
- Kloss, S., Zehetner, F., Wimmer, B., Buecker, J., Rempt, F., & Soja, G. Biochar application to temperate soils: effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v.177, p.3-15, 2014. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200282>.
- Landell, M. G. A.; Campana, M. P.; Figueiredo, P. Sistema de multiplicação de cana-de-açúcar com uso de mudas pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas. 2.ed. rev. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2013. 16p. Documentos IAC, 109.
- Lehmann, J.; Kuzyakov, Y.; Pan, G.; Ok, Y. S. Biochars and the plant-soil interface. *Plant and Soil*. v. 395, p. 1–5, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2658-3>.
- Lima, S. L., Junior, B. H. M., da Silva Melo-Santos, K., Reis, S. M., Petter, F. A., Vilar, C. C., & Marimon, B. S. Biochar no manejo de nitrogênio e fósforo para a produção de mudas de angico. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.51, p.120-131, 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000200004>.
- Maguire J.D. Speed of germination aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop science*. v 2. P 176-177, 1962.
- Nemati, M. R., Simard, F., Fortin, J. P., & Beaudoin, J. Potential use of biochar in growing media. *Vadose Zone Journal*, v14, p.66-69. 2015. <https://doi.org/10.2136/vzj2014.06.0074>.

- Oliveira, M. N.; Santos, P.A.; Costa, S.G.G.; Barbosa, C.M.A.; Mota, O.E.A. Biochar Dosage and Granulometry Influencing Soil Density and Water Retention. *International Journal of Agriculture Sciences*, v.10, p. 5153-5157, 2018. <http://dx.doi.org/10.9735/0975-3710.10.4.5153-5157>.
- Puettmann, M., Sahoo, K., Wilson, K., & Oneil, E. Life cycle assessment of biochar produced from forest residues using portable systems. *Journal of Cleaner Production*, v 250, p.119564. 2020 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119564>.
- Pluchon, N., Gundale, M. J., Nilsson, M. C., Kardol, P., & Wardle, D. A. Stimulation of boreal tree seedling growth by wood-derived charcoal: effects of charcoal properties, seedling species and soil fertility. *Functional Ecology*, v.28, p. 766-775, 2014. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12221>.
- Rajkovich, S.; Enders, A.; Hanley, K.; Hyland, C.; Zimmerman, A. R.; Lehmann, J. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils*, v. 48, n. 3, p. 271–284, 2012. 10.1007/s00374-011-0624-7.
- Rezende, F. A., Santos, V. A. H. F. D., Maia, C. M. B. D. F., Morales, M. M. Biochar in substrate composition for production of teak seedlings. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v51, p.1449-1456, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000900043.
- Santos, L. S., Braga, N. C. C., Rodrigues, T. M., Neto, A. R., Brito, M. F., & da Costa Severiano, E. Pre-sprouted Seedlings of Sugarcane Using Sugarcane Industry By-products as Substrate. *Sugar Tech*, v1. p.1-11. 2020 <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00798-y>.
- Silva Giro, L. A. D.; Ferreira Dias, F. L.; Reis, V. M.; Urquiaga, S., Schultz, N.; Bolonhezi, D.; Mutton, M. A. Bactérias promotoras de crescimento e adubação nitrogenada no crescimento inicial de cana-de-açúcar proveniente de mudas pré-brotadas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v25, p.33-43, 2015 <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000100004>.
- Silva, L. F. V., de Melo, E. I., & Gonçalves, P. A. S. Biochar de serragem de eucalipto como condicionador de substratos para produção de mudas de alface. *Agri-Environmental Sciences*, v. 5, p. 01-08, 2019 . <https://orcid.org/0000-0002-8308-8874>.
- Suliman, W., Harsh, J. B., Abu-Lail, N. I., Fortuna, A. M., Dallmeyer, I., & Garcia-Pérez, M. The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil., *Science of the Total Environment*. v.574, p.139-147. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.025>.
- Ulyett, J.; Sakrabani, R.; Kibblewhite, M.; Hann, M. Impact of biochar addition on water retention, nitrification and carbon dioxide evolution from two sandy loam soils. *European Journal of Soil Science*, v 65, p.96-104. 2014. <https://doi.org/10.1111/ejss.12081>.
- Vaccari, F.P., Maienza, A., Miglietta, F., Baronti, S., Di Lonardo, S., Giagnoni, L., Lagomarsino, A., Pozzi, A., Pusceddu, E., Ranieri, R., Valboa, G., Genesio, L., 2015. Biochar stimulates plant growth but not fruit yield of processing tomato in a fertile soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. V 207, p.163–170. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.04.015>.
- Xu, X., Y. Kan, L. Zhao, and X. Cao. Chemical transformation of CO₂ during its capture by waste biomass derived biochars. *Environmental Pollution*. v 213, p.533–540, 2016. doi: 10.1016/j.envpol.2016.03.013.

- Zheng, J., Chen, J., Pan, G., Liu, X., Zhang, X., Li, L., Bian, R., Cheng, K., Zheng, J. Biochar decreased microbial metabolic quotient and shifted community composition four years after a single incorporation in a slightly acid rice paddy from southwest China. *Science of the Total Environment*. v571,p.206–217. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.135>.
- Zulfiqar, F., Allaire, S.E., Akram, N.A., Mendez, A., Younis, A., Peerzadee, A.M., Shaukat, N., Wright, S.R. Challenges in organic component selection and biochar as an opportunity in potting substrates: a review. *Journal of Plant Nutrition*. V.42, p.1386–1401. 2019. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1617310>.

5.2 ARTIGO II – Produção de cana-de-açúcar e atributos químicos do solo após adubação com biochar

Elaborado conforme as normas da revista Pesquisa Agropecuária Brasileira – PAB

Resumo – O biochar tem sido proposto como uma alternativa promissora para disposição final de resíduos sólidos, para aumentar o aporte de carbono e melhorar a qualidade dos solos. Diante do exposto, o estudo teve o objetivo de avaliar os atributos do solo e a produção de cana-de-açúcar sob doses de biochar. Para isso, foi conduzido um experimento por dois anos no delineamento em blocos ao acaso, em esquema fatorial 2 x 5, correspondendo aos tratamentos biochar + NPK e biochar sem correção da fertilidade e cinco doses de biochar (0, 10, 20, 30 e 40 Mg ha⁻¹). Durante a condução do experimento, avaliaram-se o solo, o crescimento de plantas e a produtividade da cultura. A adição de doses de biochar propiciou maior crescimento de plantas; no solo, diminuiu o pH e aumentou os teores de fósforo, cálcio, acidez potencial, carbono e nitrogênio total do solo. Considerando-se os dois anos de cultivo da cana-de-açúcar, a aplicação de 36 Mg ha⁻¹ de biochar sem adubação complementar com NPK foi suficiente para obter produtividade equiparável aos tratamentos que receberam o complemento com NPK nos primeiro e segundo ciclos.

Termos para indexação: Biocarvão, *Saccharum officinarum*, Carbono pirogênico, Pirólise

Abstract – Biochar has been proposed as a promising alternative for the final disposal of solid residues, to increase or reduce carbon and to improve soil quality. Given the above, the study aimed at assessing soil attributes and the production of sugarcane under doses of biochar. Thus, an experiment was conducted for two years in a square block design, under a 2 x 5 factorial scheme, corresponding to the biochar + NPK and biochar controls without fertility correction and five doses of biochar (0, 10, 20, 30, and 40 Mg ha⁻¹). During the experiment, soil, plant growth and crop growth, were evaluated. The addition of doses of biochar provided greater growth of plants, in the soil, lowered the pH and increased the levels of phosphorus, calcium, acid potential, carbon and total nitrogen of the soil. During the two years of sugar cane cultivation, an application of 36 Mg ha⁻¹ of biochar without complementary fertilization with NPK was sufficient to obtain an outcome comparable to the uses that received NPK-supplemented in the first and second cycles.

Index terms: Biocarbon, *Saccharum officinarum*, Pyrogenic carbon, Pyrolysis.

Introdução

O biochar ou biocarvão é um material produzido a partir da carbonização parcial de qualquer fonte de biomassa sob baixo ou nenhum fornecimento de oxigênio, processo denominado pirólise. O termo pirólise vem do grego *piro*, que significa “fogo” e *lise*, que significa “quebra” (Lehmann et al., 2015). Dessa forma, a pirólise pode ser definida como “quebra pelo calor”. Nesse processo, as ligações menos estáveis de uma determinada molécula são quebradas pelo calor e transformadas em outras de maior estabilidade (Hu & Gholizadeh, 2019).

O material resultante da pirólise é rico em carbono estável e tem potencial de melhorar as propriedades físicas e químicas do solo e, por conseguinte, a produtividade das culturas (Hussain et al., 2016). Além disso, outros estudos têm recomendado o uso do biochar para aumentar o potencial de armazenamento de carbono, devido à sua alta estabilidade e recalcitrância no solo (Jeffery et al., 2015; Puettmann et al., 2020), e assim reduzir as emissões de gases do efeito estufa (GEE).

Resultados encontrados na literatura evidenciam efeitos positivos do biochar no crescimento de plantas. Em estudo avaliando tipos de biochar, Silva et al. (2016) constataram aumento no acúmulo de nutrientes e no rendimento de grãos em feijoeiro, fato atribuído pelos autores ao aumento da disponibilidade de nutriente e/ou melhorias na qualidade dos solos. Butphu et al. (2019) avaliando o biochar de eucalipto em cana-de-açúcar na dose de 6,2 Mg ha⁻¹ com combinações de NPK, verificaram aumento significativo na produtividade da cultura e na disponibilidade de Ca, K, além de maior eficiência do uso de N. Efeitos positivos também foram reportados por Abiven et al. (2015), que encontraram aumentos significativos no desenvolvimento de raízes e no crescimento das plantas de milho em doses de biochar acima de 4 Mg ha⁻¹.

Esses resultados motivam novos estudos, sobretudo na cultura da cana-de-açúcar, por ser uma cultura altamente exigente em solo e com alta capacidade produtiva. Além disso, na literatura há poucos trabalhos de campo e de longa duração com biochar e há muitas críticas sobre a viabilidade econômica de seu uso em grandes áreas (Maroušek et al., 2016). Desse modo, objetivou-se com esse trabalho avaliar a produção da cana-de-açúcar e os atributos químicos do solo após adubação com biochar.

Material e Métodos

O experimento foi realizado na área experimental do Instituto Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais (ICA-UFMG), cujas coordenadas geográficas são 16° 40' S e 43° 50' W, com altitude de 646 m. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo “Aw” (tropical quente, apresentando inverno seco). Os dados mensais referentes a precipitação pluviométrica, umidade relativa e temperaturas máxima, média e mínima, obtidos pela estação meteorológica da região, estão descritos na Figura 1.

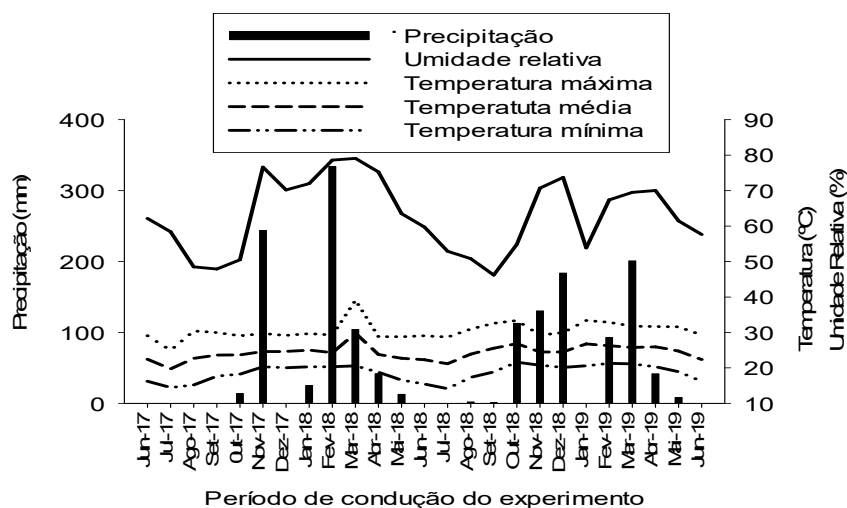


Figura 1 – Precipitação pluvial, umidade relativa e temperaturas máxima, média e mínima mensais obtidas no município de Montes Claros, Estado de Minas Gerais, para o período de cultivo da cana-de-açúcar (junho de 2017 a julho de 2019).

O solo da área é classificado como Nitossolo Vermelho Amarelo eutrófico (Santos et al. 2013), de textura argilosa, tendo na camada de 0 a 0,2 m de profundidade as seguintes características: pH (H_2O) = 6,3; MOS (matéria orgânica do solo) = 40,5 g kg^{-1} ; P = 3,10 mg dm^{-3} e K = 66,00 mg dm^{-3} (Mehlich 1); Ca^{2+} = 6,5 cmol_c dm^{-3} e Mg^{2+} = 3,20 cmol_c dm^{-3} (KCl 1 mol L^{-1}); H+Al = 2,20 cmol_c dm^{-3} (acetato de cálcio 0,5 mol L^{-1} , pH 7,0).

A variedade de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) escolhida para a realização do experimento foi a SP 81 3250, plantada utilizando-se o método do colmo-semente em sulcos de plantio. O experimento foi montado no delineamento em blocos ao acaso, em esquema fatorial 2 x 5, sendo biochar sem adição de NPK (BC) e biochar com adição de NPK (BC + NPK) e cinco doses de biochar (0, 10, 20, 30 e 40 Mg ha^{-1}), com quatro repetições.

A correção da fertilidade no tratamento BC + NPK foi feita por meio da adubação de plantio para a cultura da cana-de-açúcar, conforme a Recomendação de Corretivos e Fertilizantes de Minas Gerais (Souza et al., 1999). Para o nível muito baixo de P, realizou-se a aplicação de 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 na fórmula 4-30-10, sendo distribuído diretamente no sulco de plantio a uma profundidade de 0,2 m.

A adubação em cobertura da cana planta foi realizada aos 90 dias após o plantio, quando as plantas apresentaram aproximadamente 0,8 m de altura. Foram aplicados 80 kg ha^{-1} de N na forma de ureia e 100 kg ha^{-1} de K_2O na forma cloreto de potássio (KCl). A adubação em cobertura da cana soca (segundo ciclo) foi realizada de forma manual, também quando as plantas apresentavam aproximadamente 0,8 m de altura, aplicando-se 120 kg ha^{-1} de K_2O (KCl) e 80 kg ha^{-1} de N (ureia).

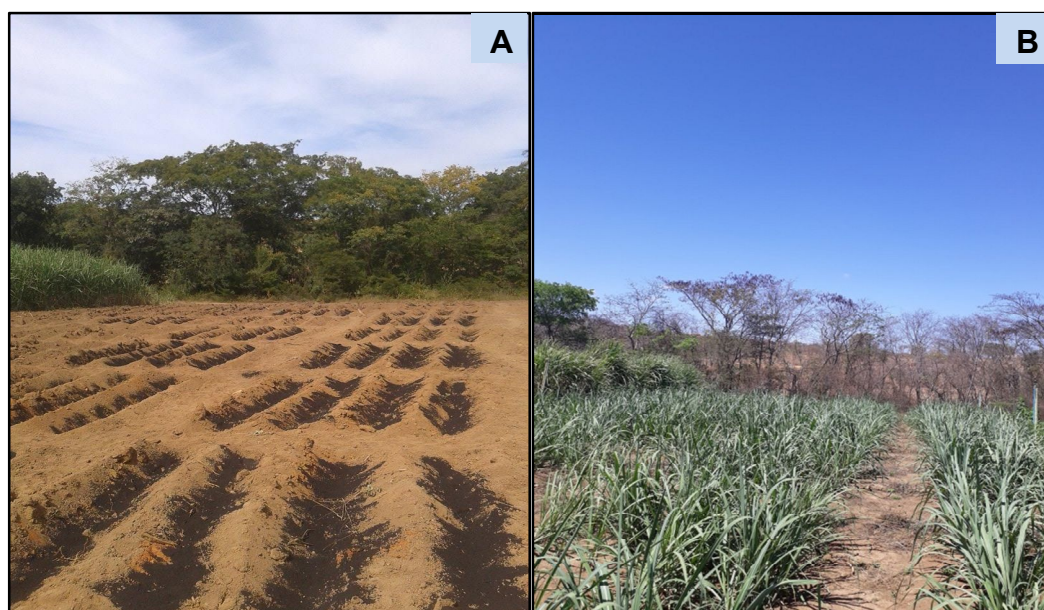


Figura 2 – Imagem ilustrativa da área onde foi realizada a aplicação do biochar ao solo e montagem do experimento (A) e aos 90 dias após o plantio da cana-de-açúcar (B).

Para o controle de plantas daninhas foi aplicado herbicida à base de ureia (3,4-dichlorophenyl) - 1,1- dimethylurea (DIUROM), na dose de 2 kg ha^{-1} de i. a. em jato dirigido na pós-emergência inicial das plantas daninhas, e capina manual para plantas remanescentes, usando-se o mesmo procedimento para o segundo ciclo da cultura.

O biochar foi produzido por meio de pirólise muito lenta (carbonização) de floresta plantada de eucalipto, em que as temperaturas variam entre 400 e 450 °C, por um longo tempo de residência, geralmente de 48 a 72 horas. Após, o biochar foi caracterizado quanto ao pH e à densidade, conforme Rajkovich et al. (2012), e as cinzas de acordo com o procedimento ASTM D1762-84. A composição elementar (C, H, N, S e O) foi determinada por combustão seca em analisador elementar (CNHS/O). Os teores de nutrientes, chumbo e cádmio foram determinados por ICP-MS/MS, após digestão em microondas com ácido nítrico concentrado (USEPA 3051).

Tabela 1 – Médias dos valores dos atributos físicos e químicos do biochar utilizado no experimento

	pH	H	O	C	N	P	Ca	Mg	S	
	----- % -----					----- g kg ⁻¹ -----				
Média	6,10	2,46	22,6	56,7	0,50	8,00	13,8	12,4	2,60	
IC	0,15	0,18	1,18	2,01	0,04	0,61	0,61	1,19	0,64	
	Cu	Zn	Fe	Mn	Si	Ni	Pb	Cd	Ds	Cinza
	----- mg kg ⁻¹ -----								g cm ⁻³	%
Média	51,5	270,0	1,43	56,9	798,6	5,20	3,03	4,50	0,45	10,0
IC	3,80	18,1	0,37	6,16	19,6	0,53	0,45	0,53	0,03	1,02

IC: Intervalo de confiança, n=3

O plantio da cana-de-açúcar foi realizado em 25 de junho de 2017 no espaçamento entre fileiras de 1 m e 10 gemas viáveis por metro linear, totalizando 100 000 plantas ha⁻¹. As unidades experimentais foram compostas por quatro fileiras simples com 30 plantas, totalizando 120 plantas por parcela. Dessas, 48 do centro da parcela foram utilizadas para avaliação experimental, consistindo na parcela útil. Utilizou-se o sistema de plantio “pé com ponta” na distribuição dos colmos, colocados uniformemente no fundo do sulco. Os colmos foram cortados em toletes que variaram de três a quatro gemas. Posteriormente, efetuou-se a cobertura com 5 a 10 cm de solo sobre os toletes.

As amostras de solo foram coletadas no mês de julho de 2017, 2018 e 2019, correspondendo a 60, 360 e 720 dias após a incorporação do biochar ao solo. Em cada parcela, foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0-0,20 m de profundidade com auxílio de um trado do tipo ‘holandês’. Quatro subamostras foram coletadas (0,1 m da linha de plantio) para formar uma amostra composta. Depois de coletadas, as amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas, passadas em peneira com malha de 2 mm, obtendo-se assim a terra fina seca ao ar (TFSA). Com a TFSA determinou-se o pH e os teores de P, K, Ca, Mg, H + Al, os quais foram utilizados para calcular a soma de bases (SB), a capacidade de troca de cátions (CTC) e a saturação por bases (V), segundo o método de Teixeira et al. (2017). O carbono orgânico total (COT) foi determinado pelo método da oxidação úmida, com aquecimento externo (Yeomans & Bremner, 1988). O nitrogênio total (NT) foi determinado pelo o método de Teixeira et al. (2017).

O crescimento das plantas foi avaliado em dois ciclos de cultivos, aos 45, 60, 75, 105, 145, 180, 220, 250 e 290 dias. Em cada avaliação, foram medidos número de folhas, altura de planta, comprimento e largura da folha + 2. A área foliar (AF) foi estimada pela equação:

$$AF = C \times L \times N \times 0,75$$

Em que: *C* é o comprimento da folha +2; *L* é a maior largura da folha + 2; *N* é o número de folhas abertas com pelo menos 20% de área verde e 0,75 é o fator de correção para área foliar.

O índice de área foliar (IAF) foi determinado pela razão entre a área foliar total (AFT) em m², média de 10 plantas vezes número de plantas por hectare, e a área do solo correspondente (10.000 m²), conforme proposto por Santos et al. (2009).

A cana-de-açúcar foi colhida aos 330 dias após o plantio (primeiro ciclo) e a cana soca (segundo ciclo) aos 370 dias após o primeiro corte. Foram consideradas área útil as duas fileiras centrais, sendo excluídos 0,3 m de suas extremidades. Após a coleta das plantas, foi realizada a mensuração do comprimento, diâmetro, contagem de colmos e pesagem do material em cada parcela, para estimar a produtividade em toneladas de colmo por hectares.

Para a avaliação do estado nutricional das plantas, foram coletadas amostras da folha + 1 e determinaram-se os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B e Zn, conforme Malavolta et al. (1997).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (teste F) e, quando significativos ($p \leq 0,05$), realizou-se análise de regressão para as variáveis quantitativas e testes de média para as qualitativas. As equações de regressão foram ajustadas com base no maior coeficiente de determinação e explicação biológica do modelo. Além disso, para os dados de solo foi realizada a análise de variância por meio do modelo multivariado (teste de Pillai) e, quando significativo ($p \leq 0,05$),

realizou-se a análise por meio de variáveis canônicas (VC), com o objetivo de verificar as variáveis que mais contribuíram para a variação total dos dados.

Resultados e Discussão

a) Aporte de carbono e nitrogênio

Para os teores de carbono orgânico e nitrogênio total do solo não houve efeito da adição das adubações com NPK (Figura 3) nos três anos de avaliação. No entanto, houve aumento do teor de COT com o tempo. Esses resultados podem ser atribuídos à deposição de resíduos da cana-de-açúcar, uma vez que não foram utilizadas queimadas para a colheita e não houve revolvimento do solo durante os três anos de cultivo. De acordo com Almeida et al. (2016), avaliando o estoque de carbono em áreas de cana-de-açúcar irrigadas na região Norte do Estado de Minas Gerais de até 9 anos de cultivo, verificou-se que a manutenção da palhada sobre a superfície do solo contribuiu para a manutenção dos estoques de carbono do solo, de forma semelhante àqueles encontrados em áreas de vegetação nativa adjacentes aos canaviais.

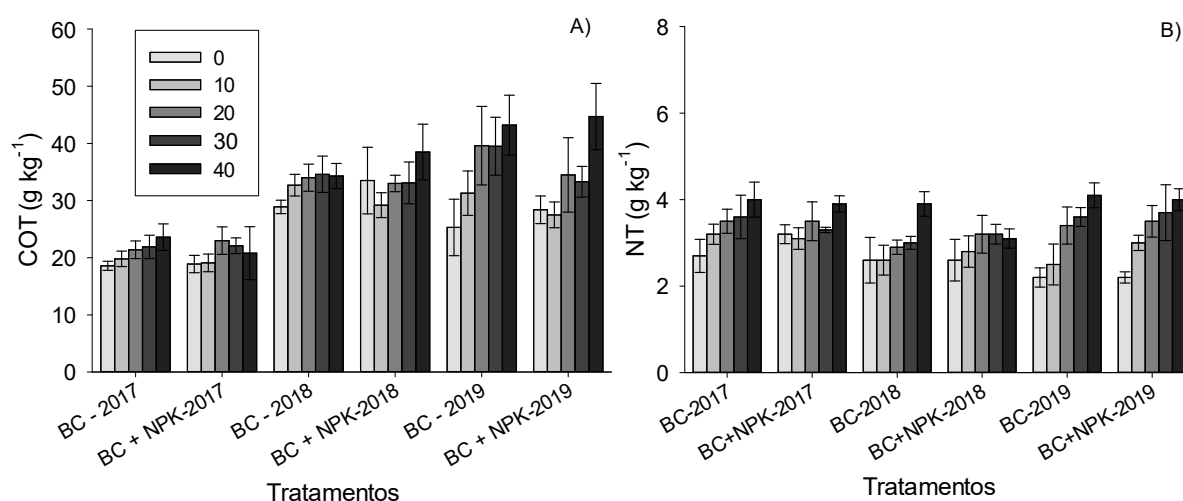


Figura 3 – Teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total do solo (NT) nos anos 2017, 2018 e 2019, nos tratamentos com biochar sem adição de NPK (BC) e biochar com adição de NPK (BC + NPK). Barras verticais indicam o erro padrão das médias.

O aumento do teor de COT ao longo do tempo também pode estar associado ao aumento da atividade microbiana e ao maior desenvolvimento do sistema radicular em função da adição de doses biochar. Tais parâmetros refletem no aumento do carbono da biomassa microbiana, conforme relatado por Wang et al. (2014), em que a aplicação de biocarvão aumentou significativamente as concentrações de carbono orgânico solúvel e da biomassa microbiana ao longo do tempo.

Em relação à aplicação de biochar, verificou-se nos três anos avaliados que houve um aumento linear dos teores de COT com o aumento das doses de biochar (Figura 4A). O teor de COT aumentou de 19,0 para 22,6 g kg⁻¹ no ano de 2017, de 27,2 para 36,4 g kg⁻¹ no ano de 2018 e de 28,3 para 42,3 g

kg⁻¹ no ano de 2019. Antes do cultivo da cana-de-açúcar, o teor de COT do solo era de 40,5 g kg⁻¹. No entanto, com o preparo do solo (aração e gradagens) e irrigação, o teor de COT foi reduzido para 19,0 g kg⁻¹ (ano de 2017) e somente atingiu o valor inicial após o terceiro ano de cultivo (ano de 2019), na maior dose de biochar.

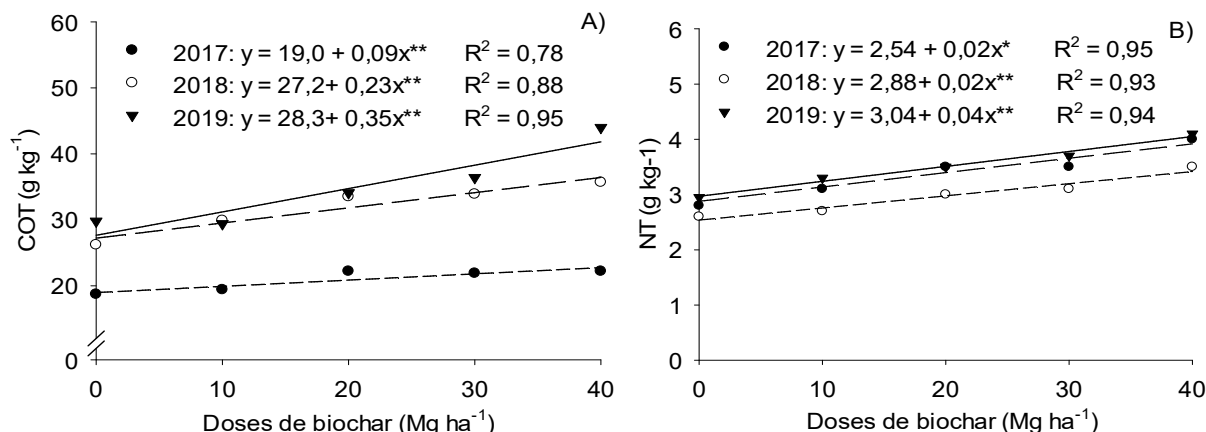


Figura 4 – (A) teores de carbono orgânico total (COT) e (B) nitrogênio total do solo (NT) em função das doses de biochar nos anos de 2017, 2018 e 2019.

O aumento e a manutenção do estoque de carbono do solo em longo prazo têm sido relacionados à estabilidade do carbono pirogênico (Jeffery et al., 2015; Puettmann et al., 2020). Esses autores citam que o carbono do biochar e seus componentes são altamente recalcitrantes nos solos, com tempos de residência relatados para o biochar de madeira entre 100 e 1000 anos, ou seja, cerca de 10-1000 vezes mais residente que a matéria orgânica não pirolisada. Dessa forma, a aplicação de biochar visando ao aumento do estoque de carbono do solo é uma técnica potencialmente promissora para a mitigação de gases de efeito estufa (Li et al., 2018; Wu et al., 2018; Zhang et al., 2019).

Por outro lado, alguns autores relatam a ocorrência do efeito “priming” em solos adubados com biochar. Esse efeito se refere à aceleração da mineralização da matéria orgânica, uma vez que o biochar adiciona ao solo compostos orgânicos solúveis e favorece as condições que aceleram a mineralização do COT, como a manutenção da umidade, a correção da acidez e a adição de nutrientes ao solo (Fang et al., 2015; Wang et al., 2015; Fang et al. 2019).

Na região amazônica, nas áreas denominadas “Terra Preta de Índio”, os solos apresentam textura e mineralogia similares aos das áreas adjacentes. No entanto, possuem 70 vezes mais carbono estável, responsável pela estabilidade e recalcitrância da matéria orgânica desses solos e pelos elevados valores de CTC ao longo de centenas de anos (Bezerra et al., 2016; Bernardes et al., 2017; Barbosa et al., 2020). Nesse sentido, a adição de biochar ao solo promove a formação da “Nova Terra Preta de Índio”, por contribuir para a estabilidade e recalcitrância da matéria orgânica do solo, além do incremento do estoque de carbono (emissões negativas de carbono para a atmosfera), do aumento da CTC e do desenvolvimento de uma agricultura mais sustentável nos trópicos úmidos (Luo et al., 2016).

Para o nitrogênio total do solo (NT), semelhantemente ao verificado para o COT, não houve diferenças entre os tratamentos sem ou com adubações com NPK (Figura 4B). Esses resultados

podem ser explicados pelos elevados teores de matéria orgânica do solo (teor de MOS antes do cultivo, 40,5 g kg⁻¹).

De forma similar ao verificado para o COT, porém em menor magnitude, houve incremento do NT com o aumento das doses de biochar (Figura 4B), possivelmente em função de o biochar ser uma fonte de nitrogênio, e pelo aumento do COT. O teor de NT aumentou de 2,5 para 3,3 no ano de 2017; em 2018, aumentou de 2,8 para 4,0; e no ano de 2019, de 3,0 para 4,6 g kg⁻¹ (Figura 3B). Importante destacar que no tratamento controle, dose zero, em três anos de avaliação, o teor de NT aumentou de 2,5 para 3,0 g kg⁻¹, ou seja, um aumento de 20%. Já no tratamento com aplicação de 40 Mg kg⁻¹ de biochar, foi de 3,3 g kg⁻¹ (ano de 2017) para 4,6 g kg⁻¹ (anos de 2018), o que corresponde a um aumento de 39%. Esses aumentos do NT, tanto no tratamento sem biochar quanto naqueles que receberam adubação com biochar, se devem provavelmente à palhada proveniente das plantas de cana-de-açúcar.

Almeida et al. (2016) também verificaram aumento do teor de NT em áreas de cultivos irrigados de cana-de-açúcar com manutenção da palhada sobre a superfície do solo e atribuíram esse aumento ao acúmulo de matéria orgânica e da maior estabilidade das frações húmica dos sistemas sem revolvimento do solo.

b) Fertilidade do solo

Para os atributos do solo relacionados à fertilidade (acidez do solo, disponibilidade de nutrientes e CTC), não houve efeito das adubações com NPK, mas houve influência significativa das doses de biochar. A ausência de efeito das adubações com NPK pode ser atribuída à fertilidade natural do solo, apresentada antes da implantação da cana-de-açúcar, segundo interpretação de Sousa & Lobato (2004). Para solo de textura média, a acidez apresentou-se adequada (pH em H₂O = 6,3), teores adequados de MOS (40,5 g kg⁻¹), potássio (66 mg dm⁻³), cálcio (6,5 cmol_c dm⁻³) e magnésio (3,20 cmol_c dm⁻³); porém, baixo teor de fósforo (3,10 mg dm⁻³). Além disso, com exceção do primeiro ano (2017), em que a coleta do solo foi feita 30 dias após a adubação de plantio, nos demais, as coletas foram realizadas sempre antes da adubação com NPK. Dessa forma a absorção pela cultura também pode ter contribuído para tal efeito.

A adição de biochar e o cultivo da cana-de-açúcar diminuíram o pH do solo ao longo do tempo em relação ao valor do solo inicial (pH antes do cultivo = 6,3). Para a maior dose, 40 Mg ha⁻¹, houve redução de 0,56; 0,32 e 0,28 unidades nos anos de 2017, 2018 e 2019, respectivamente (Tabela 2). Essa redução do pH, ou aumento da acidez ativa do solo no ano de 2017, antes da primeira adubação nitrogenada, pode ser atribuída, por exemplo, ao processo de absorção iônica radicular de nutrientes e a mineralização da matéria orgânica do solo, favorecida pela irrigação, pela adubação com fósforo, pelo preparo do solo e pela própria adubação com biochar. Durante o processo de mineralização da matéria orgânica do solo pelos microrganismos, ocorre a liberação de ácidos orgânicos que contribuem para elevar a acidez (Abujabhah et al., 2016).

Nos demais anos, além dos fatores citados para o ano de 2017, a adição de fertilizantes nitrogenados pode ter contribuído para a redução do pH do solo. Este fato foi positivo, especialmente

para esse solo, onde o uso de água subterrânea de caráter alcalino na irrigação tende a elevar o pH para uma faixa em que reduz a disponibilidade de micronutrientes, especialmente os catiônicos. Em diversos trabalhos, têm sido relatados aumentos significativos do pH do solo em função do uso do biochar, sendo o efeito corretivo do biochar sobre a acidez do solo atribuído à presença de cinzas ricas em óxidos e hidróxidos de metais alcalinos (Zelaya et al., 2019).

Tabela 2 – Equações de regressão ajustadas para pH, fósforo, cálcio, Acidez potencial, somas de bases, capacidade de troca de cátions, saturação por base em resposta a adição de doses de biochar.

Atributo	----- 2017-----		----- 2018 -----		----- 2019 -----	
	Equação	R^2	Equação	R^2	Equação	R^2
¹ pH	$y = 6,19 - 0,014x$	0,94	$y = 6,32 - 0,008x$	0,93	$y = 6,77 - 0,007x$	0,83
² P	$y = 3,30 + 0,039x$	0,86	$y = 1,61 + 0,026x$	0,91	$y = 1,14 + 0,032x$	0,80
³ Ca	$y = 6,56 + 0,032x$	0,87	$y = \hat{y} = 7,45$	-	$y = \hat{y} = 8,80$	-
³ H + Al	$y = 3,40 + 0,10x$	0,93	$y = 2,39 + 0,03x$	0,97	$y = 1,79 + 0,03x$	0,66
³ SB	$y = 9,12 + 0,04x$	0,84	$y = \hat{y} = 10,65$	-	$y = \hat{y} = 11,43$	-
³ CTC	$y = 9,48 + 0,03x$	0,68	$y = 12,76 + 0,04x$	0,81	$y = \hat{y} = 13,90$	-
⁴ V	$y = 72,40 - 0,36x$	0,93	$y = 80,84 - 0,13x$	0,99	$y = 85,63 - 0,15x$	0,61

¹(H₂O); ² (mg dm⁻³); ³ (cmol_c dm⁻³); ⁴ (%)

A capacidade do biochar em elevar o pH do solo e manter os valores elevados ao longo dos anos pode ser atribuído aos seus teores de cinzas. O biochar de madeira de eucalipto utilizado no presente estudo apresentou um teor médio de cinzas de 10% (Tabela 1), enquanto os dos biochars de lodo de esgoto e da mistura de lodo de esgoto com bagaço de cana, estudados por Zelaya et al. (2019), apresentaram teores médios de cinzas 62 e 52%, respectivamente. Dessa forma, tanto a matéria prima, como as condições de pirólise e a própria idade do biochar influenciam os teores de cinzas e, consequentemente, o poder de correção da acidez do solo pelos biochars. Segundo Silber et al. (2010), biochars mais antigos tendem a apresentar pH e teor de cinzas mais baixos e, consequentemente, menor efeito como corretivos da acidez do solo. Além disso, deve se considerar o tipo de solo ao comparar os efeitos dos biochars sobre as propriedades do solo.

Embora o teor de P naturalmente se encontrar em um nível muito baixo, a adição de doses de biochar ao solo propiciou aumentos significativos no teor de P em todas as épocas avaliadas. Da mesma forma, porém apenas no primeiro ano, houve acréscimo de 20% no teor de Ca para a maior dose, 40 Mg ha⁻¹. Petter et al. (2012) também verificaram que a disponibilidade de P no solo aumentou em 17% com uma dose de 32 Mg ha⁻¹ de biocarvão em relação ao controle.

Outros estudos realizados por Silva et al. (2017) e Ali et al. (2019) também reportaram aumentos nos teores de Ca e P em resposta à adição de biochar ao solo, atribuindo tal fato à concentração desse elemento no resíduo, bem como ao efeito indireto na disponibilidade de P, por meio da competição dos ácidos orgânicos, restringindo a fixação do fósforo.

Em concordância com a afirmação anterior, Abujabhah et al. (2016) citam que além de ser fonte de P, os constituintes da matéria orgânica apresentam caráter aniônico, pois os grupos funcionais dos compostos orgânicos da MOS são dependentes de pH, e em pH do solo superior a 3,5 (valor do ponto de equilíbrio de cargas - PCZ da MOS) predominam grupamentos funcionais com cargas negativas de superfície. Assim os compostos orgânicos da MOS podem interagir com a fase sólida do solo (óxidos) e bloquear os seus sítios de adsorção, aumentando a solubilidade do ânion fosfato (Hue, 1991; Novais & Smyth, 1999).

A acidez potencial ($H + Al$) também aumentou com a adição de doses de biochar ao solo e cultivo da cana-de-açúcar em relação ao controle (dose 0), possivelmente em razão dos mesmos fatores descritos para o aumento da acidez ativa.

De forma similar ao Ca, a soma de bases (SB) aumentou em 17% no primeiro ano de avaliação. Todavia, não houve efeito significativo nas outras avaliações, sendo que o aumento observado na soma de bases na primeira época se deu em função do acréscimo do cálcio.

A CTC (T) do solo aumentou em 12% em relação ao tratamento controle, dose 0. Esses aumentos podem ser explicados pela adição de bases, especialmente o Ca, e em maior proporção, pelo aumento da acidez potencial ($H+Al$). Aumentos na CTC do solo também foram reportados por Silva et al. (2016) e Gondek et al. (2019). Para esses autores, o aumento da retenção de cátions pelo biochar torna-se extremamente importante para solos de baixa CTC e pobres em matéria orgânica, condição prevalente nas regiões de clima tropical e nos solos da região do cerrado, normalmente pobres em matéria orgânica.

A saturação por bases (V) decresceu com o aumento das doses de biochar. Esse fato pode ser explicado pelo aumento da acidez potencial e, por conseguinte, da CTC potencial, em maior proporção que o acréscimo de base ao solo. Soma-se a isso a retirada de bases do complexo de troca em consequência da absorção pela cultura. Dessa forma, houve redução da porcentagem da CTC ocupada por bases (V). No presente estudo, tanto a CTC quanto a saturação por bases foram estimadas em função da soma de bases e da acidez potencial, de forma que, quanto maior a acidez potencial, maior a CTC e menor a saturação por bases.

De acordo com a análise de variância multivariada, observou-se efeito significativo ($p \leq 0,05$) de doses e tempo de cultivo. Por meio do estudo de variáveis canônicas (VC), verificou-se que as duas primeiras variáveis canônicas foram suficientes para explicar 72,5% da variação observada, permitindo representá-la satisfatoriamente em um gráfico de dispersão bidimensional (Figura 5).

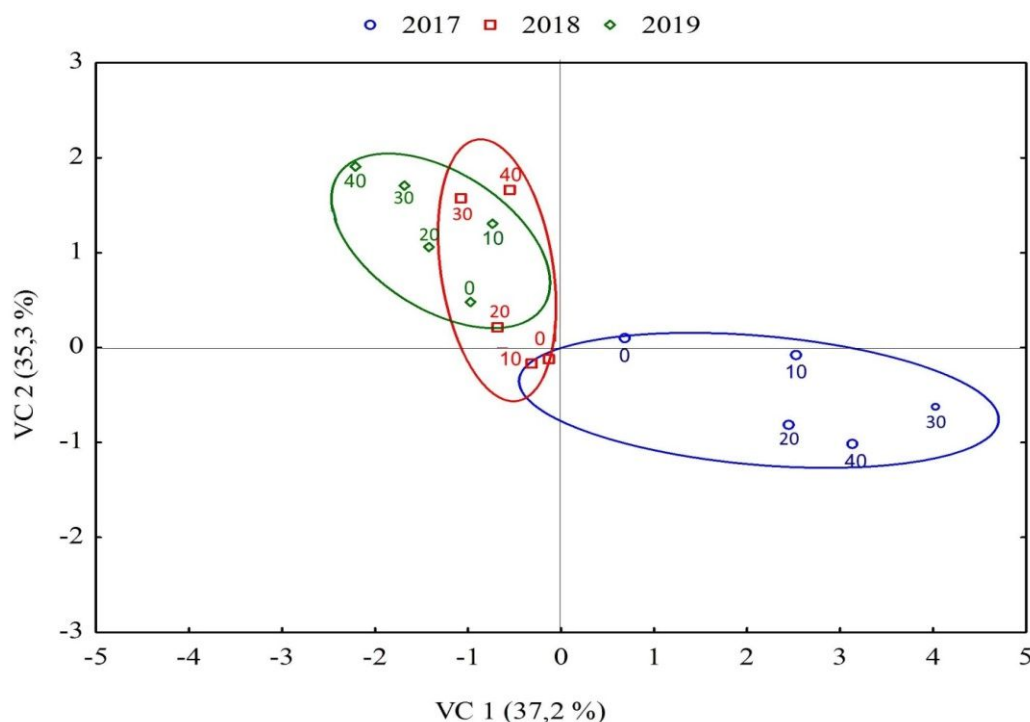


Figura 5 – Dispersão dos diferentes tratamentos, considerando doses (0, 10, 20, 30, 40 Mg ha⁻¹) em três anos de cultivo (2017, 2018 e 2019) para as duas primeiras variáveis canônicas.

Na dispersão gráfica, foi possível identificar a dissimilaridade entre os tratamentos, mais claramente para o efeito de tempo e, em menor grau, para o efeito de doses, o que pode estar relacionado ao fato de as duas primeiras variáveis canônicas não explicarem 80% da variância acumulada, no caso 72,5%. Como haveria necessidade de dispersão tridimensional para tão pouca diferença, o mesmo não foi feito, o que certamente não levaria a uma melhora na apresentação dos dados. No entanto, pôde-se observar que houve uma tendência de as maiores doses (30 e 40 Mg ha⁻¹) apresentarem maiores escores canônicos (VC). Por isso, ficaram dispersas mais à extremidade do plano bidimensional. Já as menores doses (0 e 10 Mg ha⁻¹) tenderam a apresentar menor VC. Para o efeito de tempo de cultivo, observa-se que o primeiro ano (2017) se diferenciou mais fortemente dos dois últimos anos (2018 e 2019) e estão agrupados por linhas coloridas (Figura 5). Tal efeito pode ser atribuído ao aumento de variáveis que apresentaram maior contribuição (Tabela 3), especialmente o COT, que apresentou aumento de 43% em função da deposição de resíduos da cana-de-açúcar, uma vez que não foram utilizadas queimadas para a colheita e não houve revolvimento do solo durante os três anos de cultivo. De acordo com Almeida et al. (2016), avaliando o estoque de carbono em áreas de cana-de-açúcar irrigadas na região Norte do Estado de Minas Gerais de até 9 anos de cultivo, verificou-se que a manutenção da palhada sobre a superfície do solo contribuiu para a manutenção dos estoques de carbono do solo semelhantes àqueles encontrados em áreas de vegetação nativa adjacentes aos canaviais.

Tabela 3. Correlações entre as duas primeiras Variáveis Canônicas (VC1 / VC2) e os atributos do solo cultivado com cana-de açúcar e adubado com doses de biochar em três anos de cultivos.

Atributos	VC1	VC2
pH	-0,65	0,48
P	0,58	0,70
COT	-0,71	0,08
NT	-0,23	0,19
K	-0,08	0,21
Ca	-0,16	0,35
Mg	-0,05	-0,33
H+Al	-0,07	0,72
SB	-0,05	0,16
t	0,01	-0,06
T	-0,74	-0,10
V	0,79	0,29

Números em destaques indicam variáveis de maior importância

A análise da correlação canônica relaciona-se com as variações químicas encontradas no solo em função da adição de biochar ao longo do tempo. Segundo Hair Junior et al. (2005), quanto maior a correlação, mais importante é a variável e, portanto, maior é a contribuição para a variação total dos dados. Nesse sentido, de acordo com dados da tabela 3, as variáveis pH (-0,65), carbono orgânico total (-0,71), capacidade de troca de cátions (-0,74) e saturação por bases (0,79) foram as que apresentaram maior correlação para a primeira variável canônica (VC1). Os sinais negativos de pH, de COT e da CTC indicam aumento e positivo na V indica decréscimo ao longo do tempo. Possivelmente, o aumento da acidez potencial (H+Al) e o baixo efeito de soma de bases (0,16) contribuíram para redução da V.

Na segunda variável canônica (VC2), P (0,70) e H + Al (0,72) apresentaram maior importância e os sinais positivos indicam aumento. Já os atributos NT, Mg, K, Ca, SB e t apresentaram menor importância relativa.

Em síntese, esses dados confirmam as variações químicas mais significativas no solo do presente estudo e reforçam que as variáveis pH, COT, P e H+Al foram as que mais se alteraram e, portanto, podem ser utilizadas na predição de alterações químicas do solo.

c) Crescimento

Para o crescimento em altura de plantas avaliado ao longo dos primeiro e segundo ciclos de cultivo (Figura 6), houve efeito significativo ($p \leq 0,05$) da interação entre adubação com NPK e doses de biochar. Tanto no primeiro quanto no segundo ciclo, independentemente da adubação com NPK, o padrão de crescimento em altura das plantas foi semelhante. Nos primeiros 221 dias após o plantio

(primeiro ciclo) ou corte (segundo ciclo), o crescimento foi relativamente rápido. A partir dos 221 dias até os 284 dias de avaliação, o crescimento em altura foi pouco significativo. A partir disso, presume-se que a planta tenha atingido o limite, uma vez que foi cessada a irrigação.

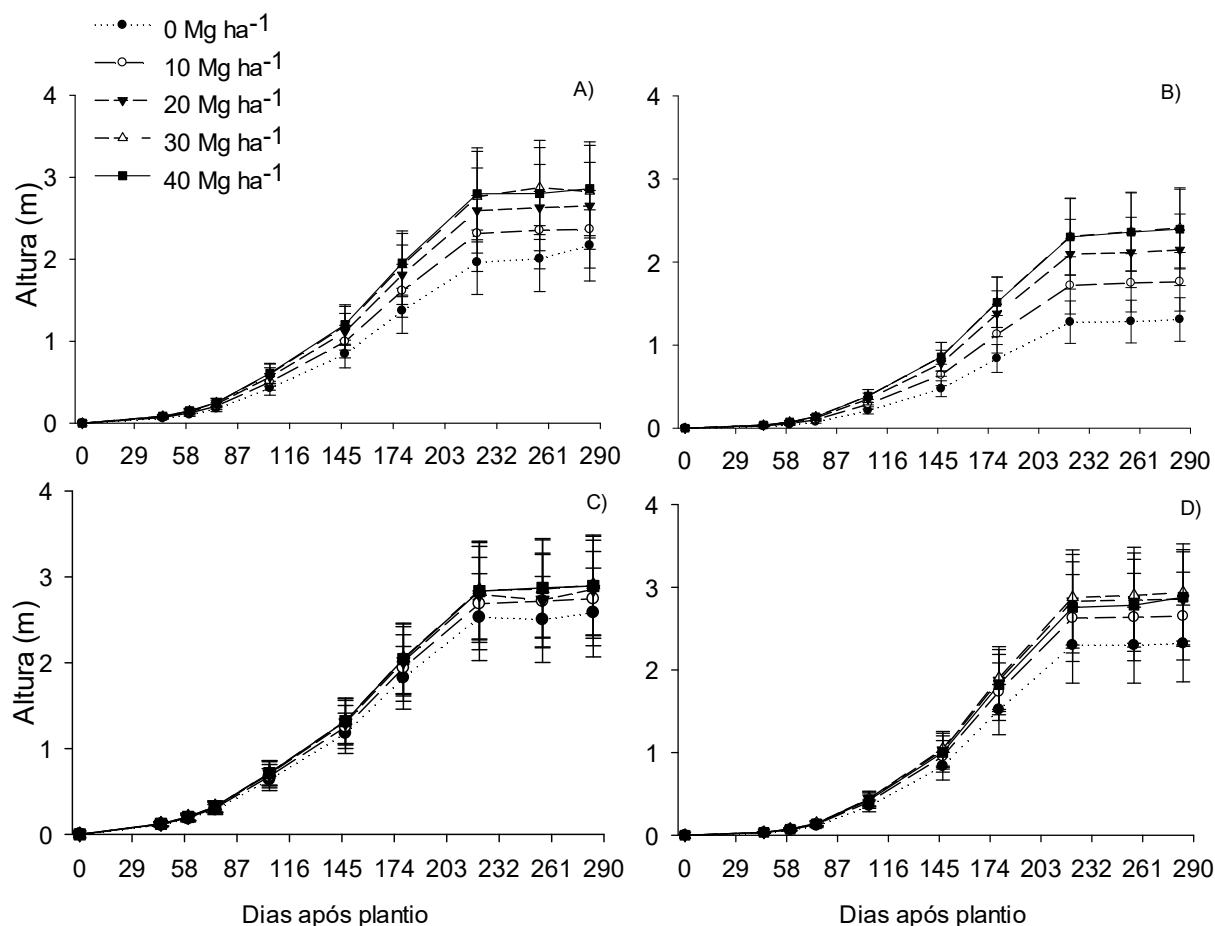


Figura 6 – Crescimento em altura das plantas cultivadas sobre doses de biochar sem adição de NPK (A) no primeiro ciclo e (B) no segundo ciclo. Com adição de NPK (C) no primeiro ciclo e (D) no segundo ciclo. Barras verticais correspondem ao erro padrão das médias.

No primeiro (Figura 6A, 6B) e no segundo ciclo (Figura 6C, 6D), verificou-se que o efeito das doses na altura das plantas aumentou com a idade das plantas, principalmente nos tratamentos sem aplicação de NPK. As maiores diferenças na altura nos tratamentos sem NPK podem ser atribuídas às quantidades de nutrientes adicionadas via biochar. Dessa forma, no tratamento sem biochar (dose zero) e sem complementação com NPK, as alturas das plantas tenderam a ser menores com o tempo de cultivo (Figuras 6A e 6B). Por outro lado, quando foi feito o complemento com NPK, observou-se redução do efeito das doses de biochar, uma vez que, mesmo na dose zero, houve adição de nutrientes via fertilizantes minerais. No entanto, observou-se que no segundo ciclo de cultivo com adubação NPK (Figura 6D), as diferenças em altura das plantas em função das doses foram maiores que no primeiro ciclo, provavelmente devido à exportação de nutrientes adicionados via biochar, pela colheita da cana-de-açúcar no primeiro ciclo.

Em relação ao efeito das doses na última época de avaliação, aos 284 dias após o plantio, nos primeiro e segundo ciclos, verificou-se que as alturas das plantas aumentaram linearmente com as doses de biochar, tanto nos tratamentos sem e com adubação com NPK (Figura 7).

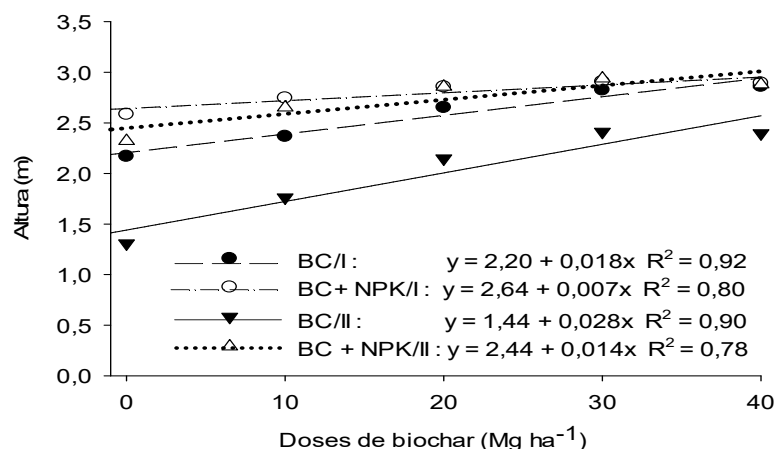


Figura 7 – Altura de plantas aos 284 dias após o plantio, em função das doses de biochar sem adição de NPK (BC) e de biochar com adição de NPK (BC + NPK), primeiro (I) e segundo ciclos (II).

De acordo com as equações ajustadas para o crescimento em altura em função das doses de biochar aos 284 dias, observou-se que, no primeiro ciclo, as alturas das plantas na dose zero de biochar foram maiores do que aquelas do segundo ciclo (Figura 7), possivelmente pela maior disponibilidade de nutrientes resultantes da aplicação de biochar. Da mesma forma, quando se compara a altura de plantas na dose zero com a na dose de 40 Mg ha⁻¹ de biochar nos dois ciclos, o aumento do crescimento foi de 0,72 e 0,36 m no primeiro ciclo, e de 1,12 e 0,56 m no segundo ciclo, no tratamento sem e com NPK, respectivamente. Esses resultados indicam que o efeito do biochar é maior quando não se aplica NPK, e que, no segundo ciclo, aumentou a diferença entre a menor e a maior dose de biochar.

Efeito positivo do biochar no crescimento de plantas tem sido reportado com frequência na literatura. Silva et al. (2016) constataram aumento no acúmulo de nutrientes e no rendimento de grãos em feijoeiros adubados com biochar, devido ao aumento da disponibilidade de nutrientes e/ou melhorias na qualidade do solo. Efeitos positivos também foram reportados por Butphu et al. (2019), que, avaliando biochar de eucalipto em cana-de-açúcar na dose acima de 6,2 Mg ha⁻¹ com combinações de NPK, verificaram aumentos significativos no crescimento e na produtividade da cultura, em função da maior disponibilidade de nutrientes. No presente estudo, as alturas máximas das plantas variaram entre 2 e 3 m, valores próximos aos encontrados por Santos et al. (2009) e Oliveira et al. (2007), que foram de 2,6 e 3,3 m, respectivamente.

Para o índice de Área Foliar (IAF), o padrão de crescimento foi semelhante nos dois ciclos de cultivo, independentemente da adubação com NPK (Figuras 8).

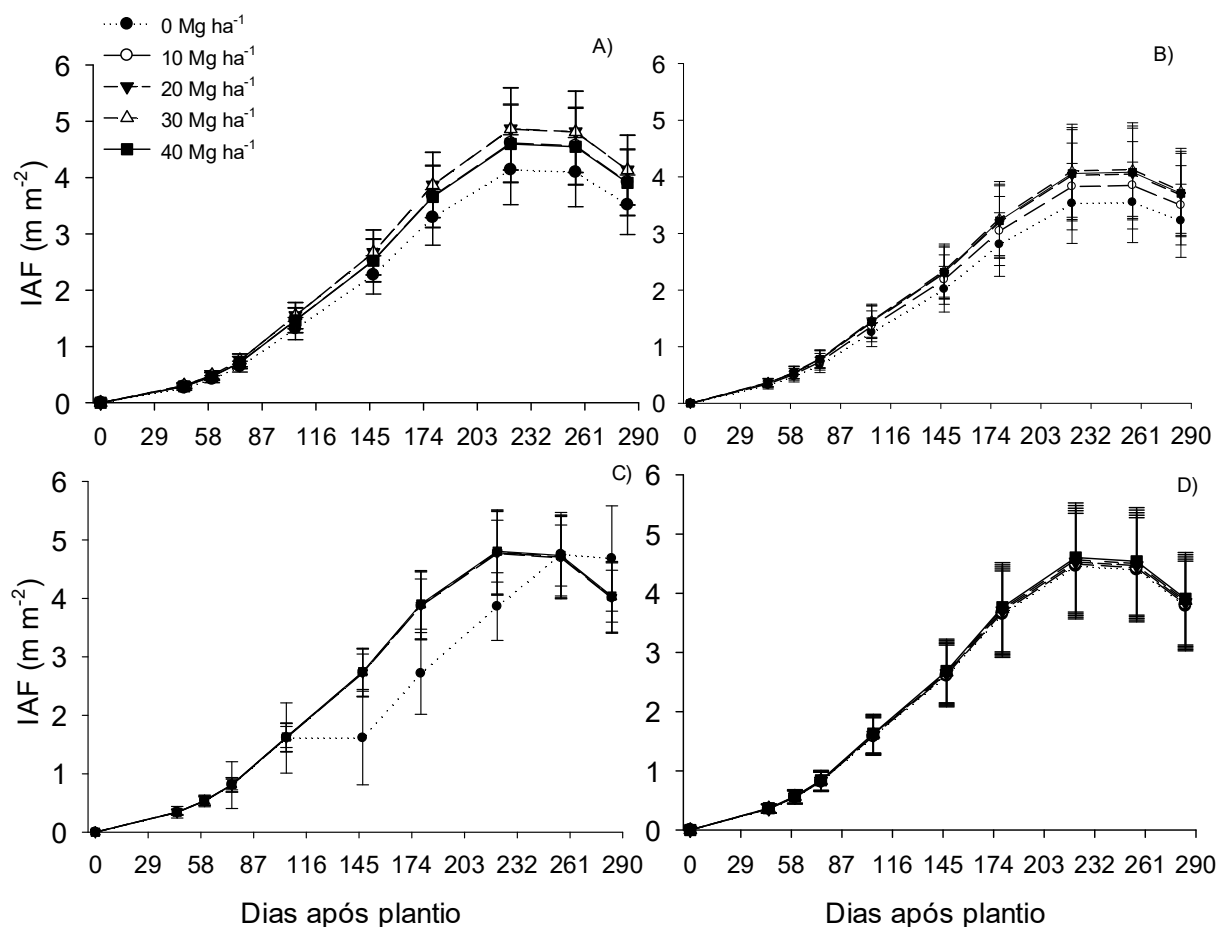


Figura 8 – Índice de área foliar (IAF) das plantas cultivadas sobre doses de biochar: sem adição de NPK (A) no primeiro ciclo e (B) no segundo ciclo; com adição de NPK (C) no primeiro ciclo e (D) no segundo ciclo. Barras verticais correspondem ao erro padrão das médias.

De acordo com os tempos de avaliação, verificou-se, semelhantemente ao obtido para a altura de plantas, que as maiores diferenças entre as doses de biochar foram observadas nos tratamentos BC, tanto no primeiro quanto no segundo ciclo de cultivo (Figura 8), com exceção da dose zero no tratamento BC+NPK no primeiro ciclo, que, a partir dos 105 dias após o plantio, o IAF diferiu ligeiramente das demais doses.

Para o IAF avaliado aos 284 dias após o plantio, no primeiro ciclo e no segundo ciclo, não houve efeito da adubação com NPK e das doses de biochar (Figura 8). Esses resultados podem ser explicados pelo fato de o IAF ser uma variável pouco sensível e, portanto, pouco influenciada por esses tratamentos.

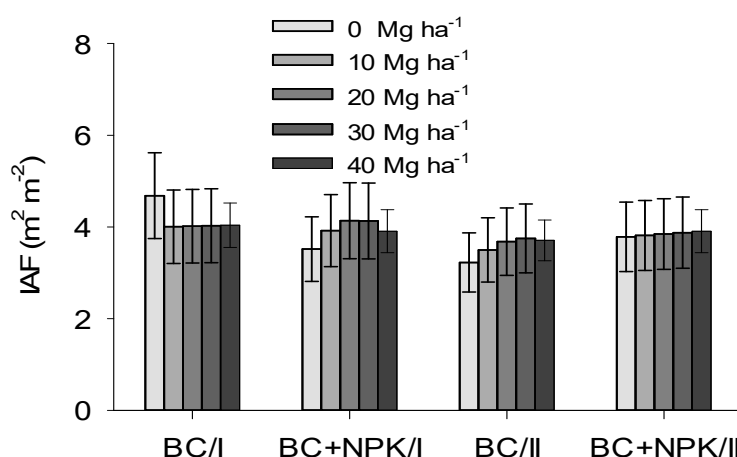


Figura 9. Índice da área foliar (IAF) de plantas aos 284 dias após o plantio, em função das doses de biochar sem adição de NPK (BC) e com adição de NPK (BC+NPK), primeiro (I) e segundo ciclos (II)

No presente estudo, o IAF variou de 3,2 a 4,7 m², sendo, portanto, semelhantes aos valores máximos obtidos para a cana-de-açúcar por Santos et al. (2007) e Oliveira et al. (2007): 3,5 e 5 m², respectivamente.

d) Estado nutricional da cana-de-açúcar

As avaliações do estado nutricional da cana-de-açúcar feitas por meio da determinação dos teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B e Zn na folha +1 demonstraram não haver nenhuma anormalidade nos teores desses nutrientes, ou seja, todos estavam dentro das faixas de referência (Figura 9), conforme proposto por Martinez et al. (1999). A ausência de efeito, mesmo com diferenças na produtividade e no crescimento, pode ser explicada pelo efeito de diluição e/ou concentração, ou seja, o teor do nutriente foi diluído com o maior crescimento ou concentrado com o menor crescimento da planta (Jarrell & Beverly, 1981). No entanto, presume-se que, nos tratamentos com maiores produtividades, as quantidades de nutrientes absorvidas pelas plantas tenham sido maiores, uma vez que as concentrações foram semelhantes. É importante destacar que não foram observados sintomas visuais de deficiência nutricional nas plantas.

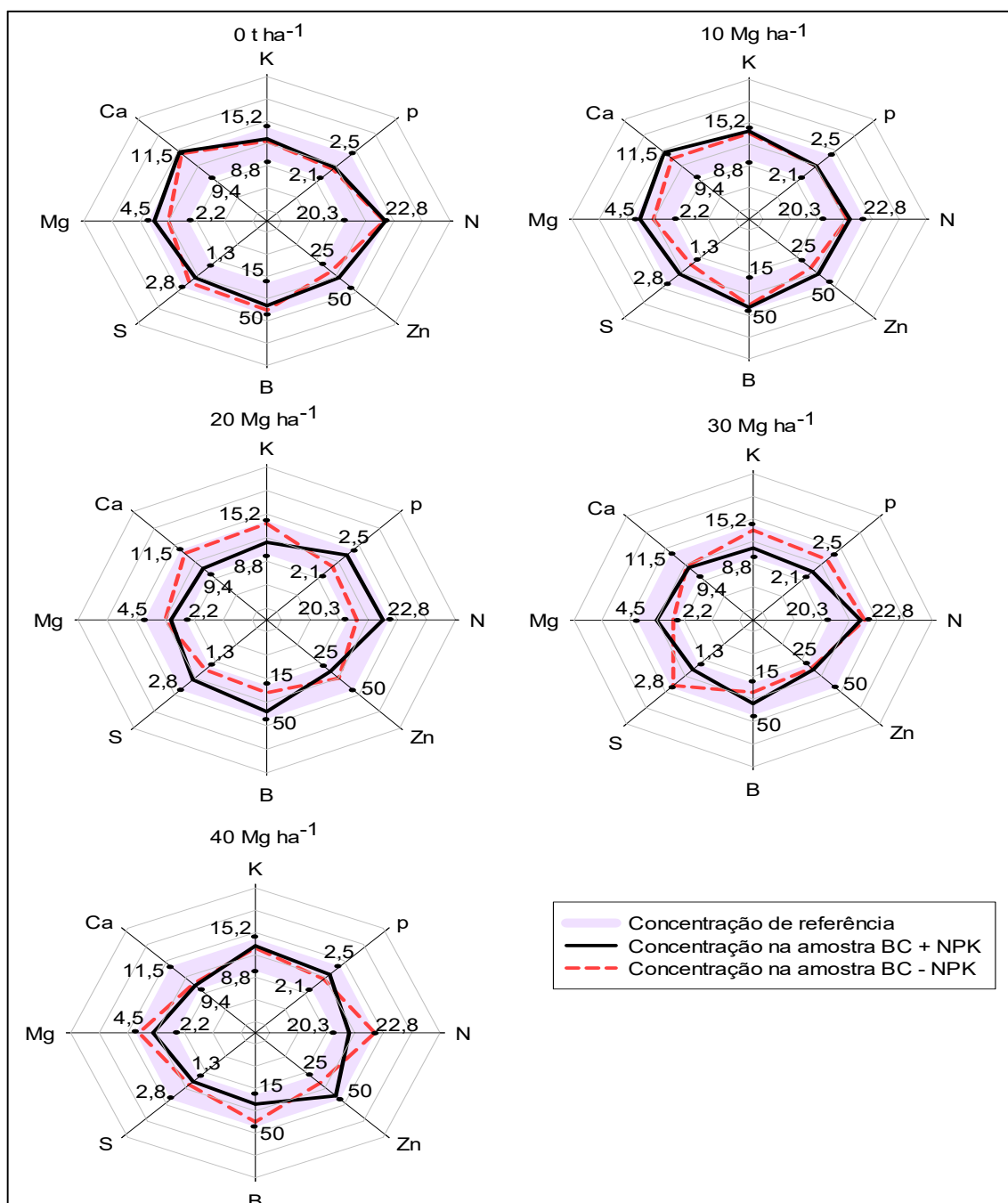


Figura 10 – Fertigrama do estado nutricional da cana-de-açúcar.

e) Produtividade

Houve efeito da interação entre tratamentos (BC e BC+NPK) e dose ($p \leq 0,05$). Entretanto, quando se realizou desdobramento de dose dentro do nível BC+NPK, foi observada a ausência de efeito, sendo a produtividade média constante em 162 Mg ha⁻¹ (Figura 10A). De acordo com a equação ajustada, na dose zero do tratamento BC-NPK, a produtividade foi de 128 Mg ha⁻¹ e atingiu-se a máxima produtividade de 171 Mg ha⁻¹ na dose de 28 Mg ha⁻¹ de biochar, o que correspondeu a um aumento de 33% da produtividade.

O mesmo efeito foi observado no segundo ciclo, em que a produtividade no tratamento BC+NPK, independente da dose, foi de 131 Mg ha⁻¹ (Figura 10B). Entretanto, no tratamento BC, pela equação ajustada, na dose zero de biochar, a produtividade foi de 119 Mg ha⁻¹ e atingiu-se a máxima produtividade de 140 Mg ha⁻¹ na dose de 36 Mg ha⁻¹ de biochar, o que correspondeu a um aumento de 17% da produtividade. Esse decréscimo do efeito do biochar do primeiro para o segundo ciclo está relacionado à exportação nutrientes pela a cultura na primeira colheita. Em estudos também com biochar de eucalipto aplicado em solo arenoso, Butphu et al. (2019) observaram que aplicação de 6,2 Mg ha⁻¹ de biochar foi suficiente para elevar a produtividade da cana-de-açúcar em 41%. A produtividade do presente estudo foi similar à encontrada por Cruz et al. (2014) em outro experimento com a mesma variedade e em condições locais semelhantes.

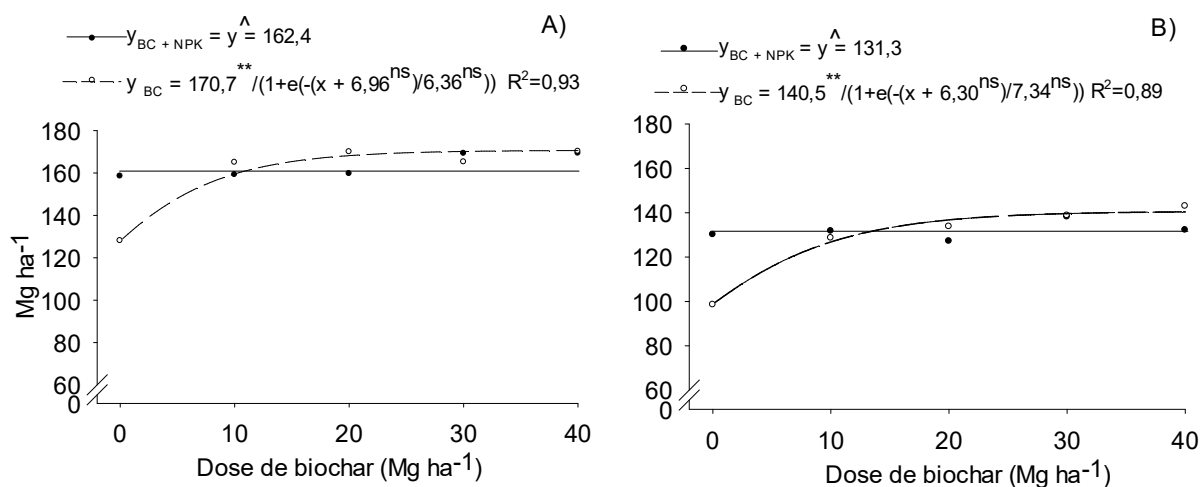


Figura 11 – Produtividade de cana-de-açúcar em toneladas de colmo por hectares em função de doses de biochar; (A) primeiro e (B) segundo ciclos; ** significativo a 5%; ns não significativo.

Em síntese, com as doses de 28 Mg ha⁻¹ de biochar nos tratamentos que não receberam complementação com NPK no primeiro ciclo e de 36 Mg ha⁻¹ de biochar no segundo ciclo, obteve-se a produtividade máxima equiparável aos tratamentos que receberam o complemento com NPK.

Comparando-se apenas o efeito dos tratamentos BC e BC + NPK dentro de cada dose para as variáveis massa e comprimento de colmo, é possível observar que apenas na dose zero houve diferença significativa, na qual o tratamento BC + NPK apresentou massa e comprimento de colmo de 1585 g e 2,30 m, respectivamente, sendo superior ao tratamento BC, que apresentou massa de colmo de 1282 g e colmo com 2,03 m (Figura 11). Todavia, em nenhum dos tratamentos foi observada diferença estatística para o diâmetro de colmo. Com isso é possível inferir que o rendimento em massa de colmo nos tratamentos que receberam biochar se deu em função de maior crescimento e altura das plantas.

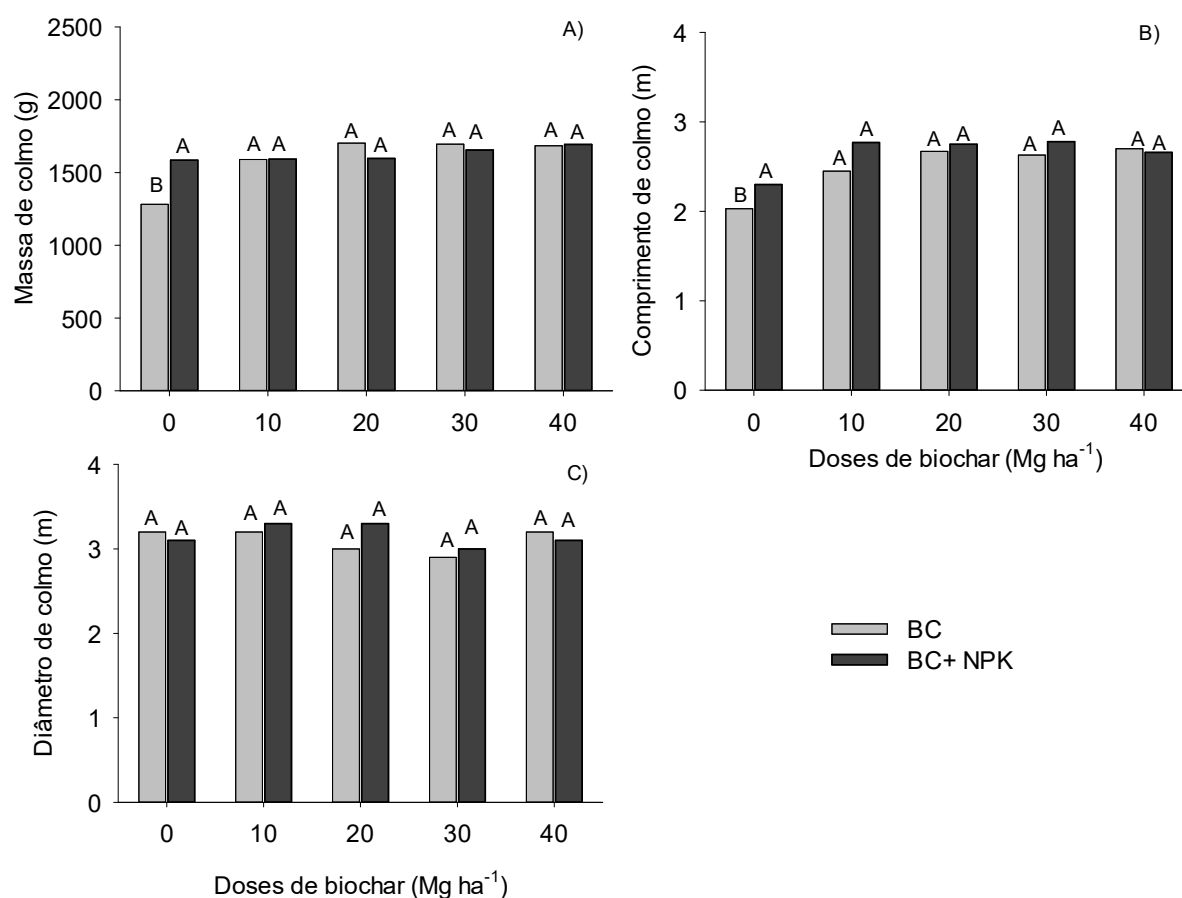


Figura 12 - Massa (A), comprimento (B) e diâmetro (C) de colmo em função de doses nos tratamentos BC e BC + NPK. Médias seguidas de mesma letra diferem entre si pelo teste tukey a 0,05 de significância.

No entanto, salienta-se que os efeitos positivos observados no crescimento, massa de colmo e, por conseguinte, na produtividade da cultura podem ter sido fortemente influenciados pelo tipo de solo – especialmente por apresentar textura média, níveis consideráveis de matéria orgânica, K, Ca e Mg – que, possivelmente associado ao efeito fertilizante e condicionador do biochar, tenha propiciado um ambiente favorável ao crescimento e desenvolvimento das plantas. Bernardes et al. (2017) citam que o carvão vegetal é considerado um material bastante estável no solo, contribui para o aumento da capacidade de troca catiônica (CTC) e assim proporciona maior disponibilidade de nutrientes.

Outros autores levantam a hipótese de que o biochar – em função da sua grande porosidade e superfície específica propiciar um ambiente favorável ao desenvolvimento de microrganismos, especialmente as micorrizas – favoreça a interação planta–microrganismo, auxiliando a absorção de nutrientes e, por fim, a produtividade (Wang et al. 2014).

Conclusões

A adição de doses de biochar diminuiu o pH e aumentou os teores de fósforo, cálcio, acidez

potencial, carbono e nitrogênio total do solo.

As maiores doses de biochar propiciaram o maior desenvolvimento de plantas em altura e índice de área foliar nos primeiro e segundo ciclos.

Para o cultivo de cana-de-açúcar por dois anos consecutivos, a aplicação de 36 Mg ha⁻¹ de biochar sem adubação complementar com NPK foi suficiente para obter produtividade equiparável aos tratamentos que receberam o complemento com NPK nos primeiro e segundo ciclos.

Referências

ABIVEN, S.; HUND, A.; MARTINSEN, V.; CORNELISSEN, G. Biochar amendment increases maize root surface areas and branching: A shovelomics study in Zambia. **Plant and soil**, v. 395, n. 1-2, p. 45-55, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2533-2>.

ABUJABHAH, I. S.; BOUND, S. A.; DOYLE, R.; BOWMAN, J. P. Effects of biochar and compost amendments on soil physico-chemical properties and the total community within a temperate agricultural soil. **Applied Soil Ecology**, v.98, p.243-253, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.10.021>.

ALI, K.; WANG, X.; RIAZ, M.; ISLAM, B.; KHAN, Z. H.; SHAH, F.; HAQ, S. I. U. Biochar: an eco-friendly approach to improve wheat yield and associated soil properties on sustainable basis. **Pakistan journal of botany**, v.51, p.1255-1261, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.30848/PJB2019-4>.

ALMEIDA, L. S.; FERREIRA, V. A. S.; FERNANDES, L. A.; FRAZAO, L. A. ; OLIVEIRA, A. L. G. ; SAMPAIO, R. A. Indicadores de qualidade do solo em cultivos irrigados de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1539-1547, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900053>.

BARBOSA, J. Z.; MOTTA, A. C. V.; CORRÊA, R. S.; MUNIZ, A. W.; MARTINS, G. C.; SILVA, L. D. C. R.; BROADLEY, M. R. Elemental signatures of an Amazonian Dark Earth as result of its formation process. **Geoderma**, v.361, p.114-085. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114085>.

BEZERRA, J.; TURNHOUT, E.; VASQUEZ, I. M.; RITTLE, T. F.; ARTS, B.; KUYPER, T. W. The promises of the Amazonian soil: shifts in discourses of Terra Preta and biochar. **Journal of Environmental Policy & Planning**, p 623–635. 2016. doi:10.1080/1523908x.2016.1269644.

BERNARDES, K. C.; LOURDES P. R.; PEDROSO, A. J. S.; RODRIGUES, P. G.; OKUMURA, R. S. Chemical attributes of archaeological black earth soils in Brazilian Amazon. **Australian Journal of Crop Science**, v.11, p.1334. 2017. DOI: 10.21475/ajcs.17.11.10.pne611.

BUTPHU, S.; RASCHE, F.; CADISCH, G.; KAEWPRADIT, W. Eucalyptus biochar application enhances Ca uptake of upland rice, soil available P, exchangeable K, yield, and N use efficiency of sugarcane in a crop rotation system. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**. v.0, p.1-11, 2019. DOI: 10.1002/jpln.201900171.

CRUZ, L. R.; GERASEEV, L. C.; DO CARMO, T. D.; SANTOS, L. D. T.; BARBOSA, E. A.; COSTA, G. A.; SANTOS JUNIOR, A. Características agronômicas e composição bromatológica de variedades de cana-de-açúcar. **Bioscience Journal**, v 30, p. 1779-1786, 2014.

FANG, Y., SINGH, B., & SINGH, B. P.. Effect of temperature on biochar priming effects and its stability in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 80, p.136-145, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.10.006>.

FANG, Y.; SINGH, B. P.; NAZARIES, L.; KEITH, A.; TAVAKKOLI, E.; WILSON, N., SINGH, B. Interactive carbon priming, microbial response and biochar persistence in a Vertisol with varied inputs of biochar and labile organic matter. **European Journal of Soil Science**, v.70, p.960-974. 2019. <https://doi.org/10.1111/ejss.12808>.

GONDEK, K.; MIERZWA-HERSZTEK, M.; KOPEĆ, M.; SIKORA, J.; GŁĄB, T.; SZCZUROWSKA, K.. Influence of biochar application on reduced acidification of sandy soil, increased cation exchange capacity, and the content of available forms of K, Mg, and P. **Polish Journal of Environmental Studies**, v.28, p.103-111. 2019.

HU, X.; GHOLIZADEH, M. Biomass pyrolysis: A review of the process development and challenges from initial researches up to the commercialisation stage. **Journal of Energy Chemistry**.v39, p.109-143, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2019.01.024>.

JARREL, W. M.; BEVERLY, R. B. The dilution effect in plant nutrition studies. **Advances in Agronomy**. v.34,p.197-224,1981. [https://doi10.1016/S0065-2113\(08\)60887-1](https://doi10.1016/S0065-2113(08)60887-1).

JEFFERY, S.; BEZEMER, T. M.; CORNELISSEN, G.; KUYPER, T. W.; LEHMANN, J.; MOMMER, L.; GROENIGEN, J. W. The way forward in biochar research: targeting trade-offs between the potential wins. **GCB Bioenergy**, v.7, p. 1-13, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12132>.

HAIR JUNIOR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W.C. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre: Bookman, 2005. 593p.

HUE, N. V. Effect of organic acids anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. **Soil Science**, n.152, p.463-471. 1991.

HUSSAIN, M.; FAROOQ, M.; NAWAZ, A.; AL-SADI, A. M.; SOLAIMAN, Z. M.; ALGHAMDI, S. S.; SIDDIQUE, K. H. Biochar for crop production: potential benefits and risks. **Journal of Soils and Sediments**, v 17, p.685-716, 2016 DOI 10.1007/s11368-016-1360-2.

LEHMANN, J.; KUZUYAKOV, Y.; PAN, G.; OK, Y. S. Biochars and the plant-soil interface. **Plant Soil**. v. 395, p. 1–5, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2658-3>.

LI, Y.; HU, S.; CHEN, J.; MÜLLER, K.; LI, Y.; FU, W.; WANG, H. Effects of biochar application in forest ecosystems on soil properties and greenhouse gas emissions: a review. **Journal of soils and sediments**, v18, p.546-563, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1906-y>.

LUO Y.; YU Z. Y.; ZHANG K. L.; XU J. M.; BROOKES PC. The properties and functions of biochars in forest ecosystems. **Journal of Soils and Sediments**. v.16, p 2005–2020, 2016. DOI 10.1007/s11368-016-1483-5.

MARTINEZ, H. E. P.; SOUZA, R. B.; ALVAREZ V., V. H.; MENEZES, J. F. S.; OLIVEIRA, J. A.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVARENGA, A. P.; FONTES, P. C. R. Avaliação da fertilidade, padrões para diagnose foliar e potencial de resposta à adubação de lavouras cafeeiras de Minas Gerais. In: ZAMBOLIM, L. (ed.) *Café: produtividade, qualidade e sustentabilidade*. Viçosa: UFV, 1999. p. 209-238.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações. **Piracicaba: Potafos**, 1997. p.115-230.

MAROUŠEK, J., VOCHOZKA, M., PLACHÝ, J., & ŽÁK, J. Glory and misery of biochar. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v.19, p.311-317, 2016. DOI 10.1007/s10098-016-1284-y

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, UFV, DPS, 1999. p.399.

OLIVEIRA, R. A.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; WEBER, H.; IDO, O. T.; BESPALHOK-FILHO, J. C.; ZUFFELLATO-RIBAS, K. C.; SILVA, D. K. T. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.37, p.71-76, 2007.

PETTER, F. A.; MADARI, B. E. Biochar: Agronomic and environmental potential in Brazilian savannah soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n.7, p.761-768, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000700009>.

PUETTMANN, M.; SAHOO, K.; WILSON, K.; ONEIL, E. Life cycle assessment of biochar produced from forest residues using portable systems. **Journal of Cleaner Production**, v 250, p.119564. 2020 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119564>.

RAJKOVICH, S.; ENDERS, A.; HANLEY, K.; HYLAND, C.; ZIMMERMAN, A. R.; LEHMANN, J. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. **Biology and Fertility of Soils**, v. 48, n. 3, p. 271–284, 2012. 10.1007/s00374-011-0624-7.

SANTOS, H.G.; JACOMINE P. K. T.; ANJOS L. H.C. DOS, OLIVEIRA V. A.; LUMBRERAS J. F.; COELHO M. R.; ALMEIDA J. A.; CUNHA T. J. F.; OLIVEIRA J B.; Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, p.353, 2013.

SANTOS, V. R. D.; MOURA FILHO, G. U.; ALBUQUERQUE, A. W.; COSTA, J. P. D. U.; SANTOS, C. G.; SANTOS, A. C. D. U. Crescimento e produtividade agrícola de cana-de-açúcar em diferentes fontes de fósforo. **Revista Brasileira de Engenharia agrícola e ambiental**. v.13, p.389–396. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000400004>.

- SILBER, A., LEVKOVITCH, I., GRABER, E. R. pH-Dependent Mineral Release and Surface Properties of Cornstraw Biochar: Agronomic Implications. **Environmental science & technology**. v 44, p.9318–9323, 2010. DOI: [10.1021/es101283d](https://doi.org/10.1021/es101283d).
- SILVA, I. C. B. D.; BASÍLIO, J. J. N.; FERNANDES, L. A.; COLEN, F.; SAMPAIO, R. A.; FRAZÃO, L. A. Biochar from different residues on soil properties and common bean production. **Scientia Agricola**, v.74, p.378-382. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2016-0242>.
- SOUZA, M.; GUIMARÃES, P. T. G.; CARVALHO, J. G.; FRAGOAS, J. C. Abacaxizeiro. In: CFSEMG. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa-MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, p.194-194. 1999.
- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T.A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D.M.G. & LOBATO, E., eds. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2.ed. Planaltina, Embrapa Cerrados, 2004. p.147-168.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.
- WANG, J.; XIONG, Z.; KUZUYAKOV, Y. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. **GCB Bioenergy**, v 8, p.512–523. 2015 doi:10.1111/gcbb.12266.
- WANG, C.; ANDERSON, C.; SUÁREZ-ABELENDIA, M.; WANG, T.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; AHMAD, R.; HERATH, H. M. S. K. The chemical composition of native organic matter influences the response of bacterial community to input of biochar and fresh plant material. **Plant and soil**, v.395, p.87-104. 2014. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2621-3>.
- WU, D., SENBAYRAM, M., ZANG, H., UGURLAR, F., AYDEMIR, S., BRÜGGEMANN, N., BLAGODATSKAYA, E. Effect of biochar origin and soil pH on greenhouse gas emissions from sandy and clay soils. **Applied Soil Ecology**, v 129, p.121–127. 2018 doi:10.1016/j.apsoil.2018.05.009.
- YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v.19, p.1467-1476. 1988. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>.
- ZHANG, C., ZENG, G., HUANG, D., LAI, C., CHEN, M., CHENG, M., WANG, R. Biochar for environmental management: Mitigating greenhouse gas emissions, contaminant treatment, and potential negative impacts. **Chemical Engineering Journal**, v.373, p.902–922. 2019. doi:10.1016/j.cej.2019.05.139.
- ZELAYA, K. P. S.; ALVES, B. S. Q.; COLEN, F.; FRAZÃO, L. A.; SAMPAIO, R. A.; PEGORARO, R. F.; FERNANDES, L. A. Biochar na produção e nutrição da beterraba. **Ciência Rural**, v.49. 2019 <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20180684>.