



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

César Florentino Puma Vega

Propriedades químicas e biológicas do solo enriquecido com biocarvão e cultivado com cana-de-açúcar

Montes Claros

2024

César Florentino Puma Vega

Propriedades químicas e biológicas do solo enriquecido com biocarvão e cultivado com 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: Prof. Luiz Arnaldo Fernandes

Montes Claros
2024

Vega, César Florentino Puma .

P983p
2024 Propriedades químicas e biológicas do solo enriquecido com biocarvão e cultivado com cana-de-açúcar [manuscrito]/ César Florentino Puma Vega. Montes Claros, 2024. 80f.: il.

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

Orientador: Luiz Arnaldo Fernandes

Banca examinadora: Luiz Arnaldo Fernandes, Fernando Colen, Luisa Julieth Parra Serrano, Samuel Petraccone Caixeta, Érika Manuela Gonçalves Lopes.

Inclui referências: f.19-29; 52-58; 76-80

1. Cana-de-açúcar -- Teses. 2. Cana-de-açúcar -- Mudas -- Teses. 3. Carvão vegetal (Biocarvão) -- Teses. 4. Solos -- Fertilidade -- Teses. 5. Cana-de-açúcar -- Nutrição -- Teses. I. Fernandes, Luiz Arnaldo. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 631.4

ATA DE DEFESA DE TESE

Aos 24 dias do mês de maio de 2024 às 14:00 horas, sob a Presidência do Professor Luiz Arnaldo Fernandes, D. Sc. (Orientador - UFMG/ICA) e com a participação dos Professores Fernando Colen, D. Sc. (UFMG/ICA), Luisa Julieth Parra Serrano, D. Sc. (UFMA), Samuel Petraccone Caixeta, D. Sc. (UFSJ) e da Pesquisadora Érika Manuela Gonçalves Lopes, D. Sc. (ABC – Agricultura de baixo Carbono), reuniu-se, por videoconferência, a Banca de tese de **César Florentino Puma Vega**, aluno do Curso de Doutorado em Produção Vegetal. O resultado da defesa de tese intitulada: “**Propriedades químicas e biológicas do solo enriquecido com biocarvão e cultivado com 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 65** do regulamento do Curso de Doutorado em Produção Vegetal, conforme apresentado a seguir:

Art. 65 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, 1 (um) exemplar impresso e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação ou tese, no prazo de 60 (sessenta) dias.

Montes Claros, 24 de maio de 2024.

Documento assinado digitalmente
 **FERNANDO COLEN**
 Data: 27/05/2024 11:01:45-0300
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Fernando Colen
 Membro

Documento assinado digitalmente
 **LUIZA JULIETH PARRA SERRANO**
 Data: 25/05/2024 15:11:25-0300
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Luisa Julieth Parra Serrano
 Membro

Documento assinado digitalmente
 **SAMUEL PETRACCONI CAIXETA**
 Data: 27/05/2024 10:02:21-0300
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Samuel Petraccone Caixeta
 Membro

Documento assinado digitalmente
 **ERIKA MANUELA GONCALVES LOPES**
 Data: 26/05/2024 09:45:49-0300
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Érika Manuela Gonçalves Lopes
 Membro

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ ARNALDO FERNANDES**
 Data: 25/05/2024 07:54:07-0300
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Luiz Arnaldo Fernandes
 Orientador

À minha amada esposa, Miriam, por seu amor incondicional, compreensão, paciência, e apoio inabalável, e à minha amada filha, Abigail, cuja presença trouxe alegria e inspiração para cada dia desta jornada acadêmica. Com muito amor e carinho,

DEDICO.

AGRADECIMENTO

A Deus, pela vida, saúde e sabedoria concedidas para a realização deste trabalho, e por todas as oportunidades oferecidas, pela força, proteção, companhia e tranquilidade que mim deu em todo momento.

À Universidade Federal de Minas Gerais - Instituto de Ciências Agrárias e ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal por permitirem a realização de minha trajetória acadêmica.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro. Ao Programa Nacional de Bercas y Crédito Educativo (PRONABEC), PERU, pela concessão da bolsa de estudos.

Aos membros da minha banca examinadora, pela disposição em participar, pelas contribuições e pela extrema competência na avaliação de esta tese.

A todos os professores do programa por todos os seus conhecimentos valiosos fornecidos.

Ao meu orientador Professor Luiz Arnaldo Fernandes, pela atenção, por todo apoio incondicional, confiança, instrução, paciência e amizade; contribuíram para esta conquista

Aos funcionários da biblioteca: Nádía, Raquel, Job, Luiz, Josiel e Cindy pelo espírito de solidariedade, presteza, contribuição, e atenção cordial, realizando um trabalho eficiente.

A todos os colegas do Setor, pela ajuda e convivência nas diferentes etapas da minha estadia.

Agradeço muito, mesmo, à minha esposa Miriam, pelo amor, pela companhia, pela espera paciente, pelo sacrifício da distância, pela ajuda, e por acreditar que posso mais do que imagino.

À minha mãe, Dona Maria, que, mesmo estando a quilômetros de distância, sempre esteve comigo, dando-me o seu apoio através de conselhos, ânimos e de incessantes orações por mim. Ao meu pai Florentino e a todos meus irmãos por suas orações.

MUITO OBRIGADO!

Propriedades químicas e biológicas do solo enriquecido com biocarvão e cultivado com cana-de-açúcar

RESUMO

Pesquisas realizadas nos últimos anos sobre o potencial do biocarvão como condicionador das propriedades do solo têm mostrado, no geral, resultados favoráveis para o cultivo de plantas. No entanto, pouco se sabe sobre seus efeitos a longo prazo e, ou quando aplicado na forma de fertilizante organomineral granulado para a produção de mudas. Os objetivos deste estudo foram 1) avaliar os efeitos do biocarvão sobre as propriedades químicas e biológicas do solo e na produtividade da cana-de-açúcar durante cinco anos; 2) avaliar as propriedades do solo, o crescimento e a nutrição de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar adubadas com fertilizantes organominerais granulados, produzidos a partir de biocarvão. Foram realizados três experimentos. O experimento I foi realizado em campo, em delineamento em blocos ao acaso em esquema fatorial 4x2+2 tratamentos adicionais (Controle 1 e 2), e quatro repetições. Os fatores corresponderam às doses de biocarvão (10, 20, 30 e 40 Mg ha⁻¹) e suas combinações sem e com fertilizante mineral NPK. O Controle 1 correspondeu ao solo natural, sem biocarvão e sem fertilizante NPK, e o Controle 2 o solo com aplicação de fertilizante NPK. Os experimentos II e III foram conduzidos por um período de 60 dias, em casa-de-vegetação e em delineamento inteiramente casualizado. No experimento II, o solo com diferentes fertilizantes organominerais (tratamentos) foi incubado em vasos com capacidade de 0,5 dm³. Os tratamentos foram: Controle – sem fertilizante (T); biocarvão (B); adubação mineral com NPK (M); biocarvão com adubação mineral NPK (BM); adubação organomineral, produzido a partir de biocarvão e fertilizante mineral NPK (OM). No experimento III, conduzido da mesma forma que experimento II, foram produzidas mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar. No experimento I, foram avaliadas a produtividade da cana-de-açúcar, a atividade química, física e biológica do solo e atividade das bactérias promotoras de crescimento. As máximas produtividades de cana-de-açúcar ocorrem com a aplicação de 37,71 Mg ha⁻¹ e de 31,00 Mg ha⁻¹ de biocarvão, nos tratamentos sem e com aplicação de fertilizante NPK, respectivamente. As doses de biocarvão favoreceram as propriedades químicas e biológicas do solo, exceto as bactérias diazotróficas onde não houve efeito. Nos experimentos II e III, a liberação de nutrientes do fertilizante mineral NPK, isolado ou em mistura com o biocarvão foi rápida, enquanto a do fertilizante organomineral foi relativamente lenta. Os maiores acúmulos de nutrientes na parte aérea das plantas de cana-de-açúcar foram nos tratamentos com fertilizante mineral NPK, isolado ou em mistura com o biocarvão, seguido do fertilizante organomineral, controle e biocarvão, nessa ordem.

Palavras-chave: *Saccharum officinarum* L.; biochar de eucalipto; mudas pré-brotadas; fertilidade do solo; nutrição de plantas.

Chemical and biological properties of soil enriched with biochar and cultivated with sugarcane

ABSTRACT

Researches carried out in recent years on the potential of biochar as a conditioner of soil properties has shown in general favorable results for plant cultivation. However, little is known about its long-term effects and/or when applied in the form of granulated organomineral fertilizer for seedling production. The objectives of this study were 1) to evaluate the effects of biochar on the chemical and biological properties of the soil and on sugarcane productivity over five years; 2) evaluate soil properties, growth and nutrition of pre-sprouted sugarcane seedlings fertilized with granulated organomineral fertilizers, produced from biochar. They were carried out three experiments. Experiment I was carried out in the field, in a randomized block design in a factorial scheme 4x2+2 additional treatments (Control 1 and 2), and four replications. The factors corresponded to the biochar doses (10, 20, 30 and 40 Mg ha⁻¹) and their combinations without and with NPK mineral fertilizer. Control 1 corresponded to natural soil, without biochar and without NPK fertilizer, and Control 2 to soil with application of NPK fertilizer. Experiments II and III were conducted over a period of 60 days, in a greenhouse and in a completely randomized design. In experiment II, the soil with different organomineral fertilizers (treatments) was incubated in pots with a capacity of 0.5 dm³. The treatments were: Control – no fertilizer (T); biochar (B); mineral fertilizer with NPK (M); biochar with NPK mineral fertilizer (BM); organomineral fertilizer, produced from biochar and NPK mineral fertilizer (OM). In experiment III, conducted in the same way as experiment II, pre-sprouted sugarcane seedlings were produced. In experiment I were evaluated sugarcane productivity, chemical, physical and biological activity of the soil and activity of growth-promoting bacteria. Maximum sugarcane productivities occur with the application of 37.71 Mg ha⁻¹ and 31.00 Mg ha⁻¹ of biochar, in treatments without and with application of NPK fertilizer, respectively. The doses of biochar favored the chemical and biological properties of the soil, except for diazotrophic bacteria where there was no effect. In experiments II and III, the release of nutrients from NPK mineral fertilizer, alone or in mixture with biochar was rapid, while that from organomineral fertilizer was relatively slow. The highest accumulations of nutrients in the aerial part of sugarcane plants were in treatments with NPK mineral fertilizer, alone or in mixture with biochar, followed by organomineral fertilizer, control and biochar, in that order.

Keywords: *Saccharum officinarum* L.; *Eucalyptus* charcoal; pre-sprouted seedlings; soil fertility; plant nutrition.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	11
2 REVISÃO DA LITERATURA	12
2.1 Solo	12
2.2 Terra Preta da Amazônia	13
2.3 Biocarvão	14
2.4 Cana-de-açúcar	17
2.5 Referências	19
3 ARTIGOS	26
3.1 ARTIGO 1	26
3.2 ARTIGO 2	59

1 INTRODUÇÃO GERAL

O biocarvão é um condicionador de solo rico em carbono, obtido por meio de um processo termoquímico, denominado pirólise, que transforma a biomassa em material carbonizado (LAIRD *et al.*, 2008). A origem do biocarvão está ligada à bacia do Rio Amazonas com a descoberta das Terras Pretas da Amazônia, também conhecidas por Terra Preta de Índio (TPI). Os solos das TPI são caracterizados por sua alta fertilidade e teores de carbono (LEHMANN *et al.*, 2003; SMITH, 1980). Atualmente, apesar de não existir um consenso sobre a origem da TPI, a sua descoberta levou o homem, a imitar os processos naturais, e propor um novo modelo de produção agrícola mais sustentável, por meio do uso dos biocarvões.

A utilização de biocarvão no solo despertou interesse como uma medida estratégica para enfrentar e reduzir os efeitos das mudanças climáticas, promovendo o sequestro de carbono nos solos, garantindo a segurança alimentar global e, a reincorporação de solos degradados aos sistemas produtivos (CRANE *et al.*, 2013; PAUSTIAN *et al.*, 2016).

O solo desempenha um papel fundamental na vida do planeta, e do ponto de vista agrícola a sua fertilidade precisa ser mantida e preservada ao longo do tempo. Para tanto, o uso de fertilizantes minerais ou químicos na agricultura é essencial para garantir o suprimento de nutrientes para a obtenção de altos rendimentos das culturas e na promoção da segurança alimentar global (LIU *et al.*, 2020). Embora os fertilizantes minerais contribuam para a produção agrícola, impactos adversos podem ser provocados devido ao uso inadequado destes, afetando a qualidade ambiental e produtividade do solo (DAR; BHAT, 2020).

A utilização de material orgânico ao solo na forma de resíduos, o aproveitamento de resíduos no solo como fonte de matéria orgânica, possibilita otimizar as propriedades química, físicas e biológicas do solo, contribuindo para um ambiente mais propício ao crescimento saudável das plantas (BOT; BENITES, 2005). Além disso, o uso de resíduos orgânicos com o intuito de incrementar a matéria orgânica do solo pode representar vantagens não só para as propriedades do solo, mas também para a manutenção e a viabilidade econômica dos cultivos a longo prazo (TODD *et al.*, 2014; GILBERT *et al.*, 2008).

Tecnologias recentes como a dos fertilizantes de liberação lenta, e os fertilizantes organominerais, têm ganhado espaço e atenção, pois, além de proporcionar liberação gradual

dos nutrientes, melhora as propriedades do solo e, conseqüentemente, oferece ganhos ambientais. Vários estudos com fertilizantes organominerais a base de biocarvão, comprovam a liberação mais lenta dos nutrientes no solo em relação aos fertilizantes minerais solúveis, proporcionando maior aproveitamento dos nutrientes pelas plantas (BANIK *et al.*, 2023; FACHINI *et al.*, 2022).

Diante do exposto, os objetivos deste estudo foram avaliar os efeitos do biocarvão sobre as propriedades químicas e biológicas do solo e na produtividade da cana-de-açúcar durante cinco anos, e analisar o crescimento e a nutrição de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar adubadas com fertilizantes organominerais granulados, produzidos a partir de biocarvão.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Solo

O solo é uma combinação heterogênea de matéria orgânica, minerais, organismos vivos, gases e água, as quais interagem entre si por meio de processos químicos, físicos e biogeoquímicos (ABRAHAMS, 2002; TOTSCHE *et al.*, 2018). Portanto, a natureza do solo é dinâmica e diversa, e é reconhecido como o meio poroso mais complexo da terra (YOUNG; CRAWFORD, 2004). O sucesso da vida no planeta está intimamente ligado ao papel crucial que o solo tem, como partícipe em atividades fundamentais para a manutenção do equilíbrio dos ecossistemas, por meio do fornecimento de serviços ambientais importantes, tais como, a purificação da água, o sequestro de carbono, a regulação do clima, a ciclagem de nutrientes, a produção de alimentos, fibras e energia.

O uso de fertilizantes na agricultura é essencial para garantir o suprimento de nutrientes para às culturas, de modo a obter altos rendimentos e promover a segurança alimentar global (LIU *et al.*, 2020). Nesse sentido, a construção e manutenção da fertilidade do solo são fundamentais para sustentar a produção agrícola mundial. Práticas adequadas devem ser incentivadas para garantir a saúde do solo, de modo a promover uma agricultura mais sustentável e a preservação da biodiversidade. Entretanto, para cumprir seus objetivos de produção, a agricultura contemporânea depende de diversos insumos, como pesticidas, fertilizantes minerais ou químicos, irrigação, sementes melhoradas, herbicidas, entre outros.

Embora esses insumos impulsionem a produção, o uso inadequado é motivo de preocupação devido aos impactos que podem causar na qualidade ambiental e na natureza do solo (DAR; BHAT, 2020).

De acordo com Steiner et al. (2007) a utilização de biocarvão associado aos fertilizantes NPK, dobrou o rendimento de grãos ao longo de quatro colheitas, quando comparado ao uso exclusivo de fertilizantes. Esses resultados corroboram com Lehmann et al. (2003) e evidencia maior eficiência no uso dos fertilizantes minerais quando associados aos biocarvões. Vários autores sugerem que a aplicação conjunta de fertilizantes orgânicos e químicos possibilita uma maior eficiência na liberação de nutrientes pelos fertilizantes químicos e a absorção desses elementos pelas plantas, melhorando a produtividade das culturas (GENG *et al.*, 2019; SHAH *et al.*, 2023; WANG *et al.*, 2022).

No contexto de fontes de nutrientes para as plantas e produção de alimentos é importante considerar que a população mundial está aumentando significativamente. Os últimos levantamentos indicaram que a população levou 12 anos para aumentar de sete para oito bilhões de habitantes e chegará a nove bilhões em 2037 (ONU, 2022). Diante disso, a demanda por alimentos para uma população crescente vai exigir maior otimização dos recursos naturais e, portanto, é preciso não somente de mecanismos que intensifiquem a produção de alimentos, fibras e energia, mas também, que sejam sustentáveis e que garantam a segurança alimentar. Como exemplo de estratégia de desenvolvimento sustentável, a união europeia priorizou o consumo e a produção de alimentos sustentáveis. Produzir grandes quantidades de alimentos com perda mínima de biodiversidade e, diminuições nas emissões de gases de efeito estufa e perdas de nutrientes do sistema solo são os principais desafios para a intensificação da produção agrícola (SCHRAMA *et al.*, 2018).

2.2 Terra Preta da Amazônia

Na região amazônica, o explorador Herbert Smith em 1879, descobriu pela primeira vez uma vasta extensão de terras com espessas camadas de solos com tonalidade escura e altamente férteis (MARRIS, 2006). A riqueza de carbono desses solos é a principal característica, podendo os teores atingir 150 g kg^{-1} , enquanto a média de carbono dos solos ao redor dessas áreas varia de 20 a 30 g kg^{-1} (GLASER *et al.*, 2002; SMITH, 1980). Além do

carbono, chama a atenção que após vários anos de cultivos consecutivos a fertilidade dessas terras permanece inalteradas.

Essas manchas escuras de solo na região amazônica são conhecidas por Terra Preta de Índio (TPI), sugerindo uma origem antrópica, devido às atividades cotidianas dos povos originários nesses locais, que utilizaram essas áreas para a produção de alimentos (GLASER; BIRK, 2012; GLASER *et al.*, 2001). Zhang *et al.* (2021), destacam o amplo reconhecimento que o modo de vida das comunidades antigas resultou na formação das TPI. Descobertas indicam, por exemplo, que altas concentrações de fósforo (P) e cálcio (Ca) nesses locais são resultantes, provavelmente, de restos ósseos (LIMA *et al.*, 2002; SCHAEFER *et al.*, 2004).

Por outro lado, Silva *et al.* (2021), apresentam uma nova hipótese sobre a origem da TPI, contrariando a origem antropogênica. Segundo os autores, a acumulação natural, sedimentação, de carbono e nutrientes ao longo de milhares de anos explicam a ocorrência das TPI, uma vez que tais quantidades são muito maiores do que aquelas esperadas pela atividade humana. Os autores justificam ainda que, somente seria possível atingir teores elevados de P e Ca se grandes populações humanas tivessem manejado continuamente os solos por milhares de anos antes mesmo do homem nômade se tornar sedentário. Diante desse cenário, muitas pesquisas têm buscado entender os efeitos do carvão pirogênico (material produzido por pirólise e que apresenta microestrutura gráfica) sobre as propriedades químicas, físicas e sua origem (OK *et al.*, 2015).

2.3 Biocarvão

A origem do biocarvão está ligada à bacia do rio Amazonas com a descoberta das TPI. Atualmente, apesar de não existir um consenso sobre a origem da TPI, a sua descoberta levou o homem, imitando processos naturais ainda não bem compreendidos, a propor um novo modelo de produção agrícola sustentável. A persistência do carbono do biocarvão no solo, juntamente com a melhoria da fertilidade, tem sido objeto de extensas investigações devido ao seu potencial impacto positivo na sustentabilidade agrícola (GLASER *et al.*, 2001).

O biocarvão é um material rico em carbono, produzido pelo processo de pirólise de biomassa, geralmente de origem vegetal. Em seu processo a matéria orgânica se decompõe

ao ser exposta a temperaturas entre 200-900 °C em um ambiente com baixa disponibilidade de oxigênio (SANCHEZ *et al.*, 2020). Portanto, a pirólise é um processo que consiste de uma série de reações simultâneas e sucessivas, que incluem desidratação, despolimerização, isomerização, aromatização, descarboxilação e carbonização (LEE *et al.*, 2019; XIAO *et al.*, 2020).

As características físicas do solo são diretamente influenciadas pela presença de biocarvão, o que pode ter efeitos relevantes para o crescimento das plantas. De modo geral, os biocarvões podem contribuir para a retenção de água pelo solo, para a agregação das partículas primárias, para a friabilidade e permeabilidade, e às mudanças de temperatura. Ademais, as propriedades químicas e biológicas do solo, também, podem ser afetadas pelo biocarvão, uma vez que há um aumento na ciclagem de nutrientes, capacidade de troca de cátions e a criação de habitats protetoras para os microrganismos do solo (IGALAVITHANA *et al.* 2017; LEHMANN *et al.*, 2006). Ainda em relação às propriedades biológicas, os biocarvões favorecem a abundância e diversidade de microrganismos benéficos ao solo, proporcionando um micro-habitat que neutraliza o ataque de microrganismos patogênicos (LIAO *et al.*, 2016; AJEMA, 2018).

Importante destacar que o efeito dos biocarvões sobre as propriedades do solo é influenciado não apenas por suas características, mas também pelas características e propriedades do solo (WEBER; QUICKER, 2018). Estudos recentes sobre os efeitos dos biocarvões sobre a produtividade das culturas indicaram que houve um aumento global na produtividade, porém, essas observações não foram para todos os tipos de biocarvões e solos (SCHMIDT *et al.*, 2021).

No solo, os biocarvões podem funcionar como um sumidouro de carbono, uma vez que possui formas mais estáveis desse elemento (GAO *et al.*, 2019). Entretanto, as condições de pirólise podem alterar as propriedades dos biocarvões. Por exemplo, biocarvões produzidos por meio de pirólise rápida tem uma taxa mais lenta de decomposição no solo do que os biocarvões produzidos por meio de pirólise lenta (FANG *et al.*, 2013; OK *et al.*, 2015). Desse modo, sugere-se utilizar biocarvões submetidos a pirólise rápida a fim de prolongar seus efeitos benéficos no solo (ALLOHVERDI *et al.*, 2021). Além das condições de pirólise,

a velocidade da decomposição dos biocarvões é influenciada pela matéria prima utilizada (TABAKAEV *et al.*, 2019).

Em relação ao enriquecimento do solo com carbono, os biocarvões, proporcionam aumento na biomassa microbiana, elevando os teores de carbono orgânico do solo (LEHMANN; JOSEPH, 2015). Portanto, os biocarvões apresentam potencial para melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, proporcionando o incremento da produtividade das culturas e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (CHENG *et al.*, 2018; DIATTA *et al.*, 2020).

A utilização de biocarvão tem sido proposta como uma importante prática para promover o desenvolvimento agrícola sustentável, graças aos seus benefícios, não somente para a agricultura, mas também para o meio ambiente (RIASCOS; HERRERA, 2020). Os estudos sobre aplicação de biocarvões ao solo evidenciam uma ampla variedade de doses para se obter os efeitos desejados. Por exemplo, doses mais elevadas (10 a 50 Mg ha⁻¹) são geralmente empregadas quando os biocarvões apresentam baixos teores de nutrientes, enquanto doses menores (<1 Mg ha⁻¹) são adotadas para biocarvões com teores mais elevados de nutrientes (JOSEPH *et al.*, 2021). De acordo com os autores, além do fornecimento de nutrientes, os biocarvões podem aumentar a eficiência dos fertilizantes minerais, quando aplicados de forma combinada.

Uma alternativa para suprir os baixos teores de nutrientes nos biocarvões é a aplicação conjunta com fertilizantes minerais. Em um estudo de combinação de biocarvão com fonte de nitrogênio mineral revelou que a aplicação 30 Mg ha⁻¹ de biocarvão combinada com 135 kg ha⁻¹ de N proporcionou maior produtividade de grãos de arroz quando comparados com doses elevadas de fertilizante nitrogenado, reduzindo assim a quantidade de uso de fertilizante mineral (ALI *et al.*, 2021). De modo similar, Fachini *et al.*, (2022) trabalhando com fertilizantes à base de biocarvão enriquecidos com potássio no formato de pellet e grânulo, observaram de modo geral, que ambas as formas apresentaram bom desempenho e liberação mais lenta de K e de outros nutrientes às plantas. Sahin *et al.* (2023) observaram que biocarvão enriquecido com ácido fosfórico concentrado apresentou maiores teores de P no solo e na planta, identificando a possibilidade de substituir parte dos fertilizantes fosfatados inorgânicos pelo biocarvão.

O interesse da comunidade científica sobre os biocarvões cresceu aceleradamente nos últimos anos. Por exemplo, por meio de uma busca sistemática de registro de publicações usando a palavra-chave Biochar (equivalente para biocarvão no português), na base de dados *Scopus*, foram encontrados 36.720 resultados de trabalhos publicados desde janeiro do ano 2000 até maio de 2024. O pico de trabalhos publicados foi no ano de 2023 com 6.927 publicações. Nos primeiros quatro meses do ano de 2024 já foram registradas 3.015 publicações sobre o tema. Destaca-se, também que com 17.737 trabalhos publicados, a China lidera o número de publicações, seguida pelos Estados Unidos e a Índia com 4.358 e 2.914 publicações, respectivamente. O Brasil aparece no décimo lugar com 1.056 publicações.

Apesar dos inúmeros aspectos positivos da utilização dos biocarvões, estudos revelam efeitos adversos nas propriedades químicas e biológicas do solo, na produtividade das culturas e na viabilidade econômica de utilização em grandes áreas (BRTNICKY *et al.*, 2021; ALVAREZ-CAMPOS *et al.*, 2018). Por exemplo, a presença de contaminantes orgânicos no biocarvão, incluindo hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH), compostos orgânicos voláteis (COV), e dioxinas, são questão de preocupação referida à contaminação do solo e aos riscos à saúde podendo ter efeito negativo nas propriedades e funções do solo (BRTNICKY *et al.*, 2021). Devido às suas propriedades mutagênicas e cancerígenas (YU, 2002; WANG *et al.*, 2018), os PAH podem ser absorvidos pelo solo e plantas, contaminando as cadeias alimentares (WANG *et al.*, 2018).

Em um estudo sobre a sustentabilidade ambiental, viabilidade econômica e o potencial como tecnologia para mitigar as emissões de gases de efeito estufa, verificou-se que o processo de pirólise contribui com 66 a 75% dos custos, variando de 116 a 197 dólares por tonelada de biocarvão e de 60 a 204 dólares por tonelada de CO₂ removido (SAHARUDIN *et al.* (2024). Os autores verificaram ainda que as matérias-primas utilizadas influenciam no custo de produção dos biocarvões e nas quantidades de CO₂ removido.

2.4 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma das culturas mais importantes das regiões tropicais e subtropicais do mundo, gerando centenas de milhares de empregos diretos e indiretos. É

importante fonte de renda e desenvolvimento, principal matéria-prima para a fabricação de açúcar, etanol e aguardente (SANTOS; DIOLA., 2015). Destaca-se como uma cultura bioenergética de vital importância devido ao seu rápido crescimento e elevado balanço energético, o que representa uma alternativa relevante na produção de biocombustíveis (TILMAN *et al.*, 2011; JUNGINGER *et al.*, 2014; LEGG, 2021). Seus caules possuem elevada concentração de sacarose o que atende, principalmente, às necessidades do setor sucroenergético (RODRIGUES *et al.*, 2018), o que lhe permite se situar como bom substituto dos combustíveis fósseis, e, conseqüentemente, reduzir o impacto antrópico no planeta (CONAB, 2023).

Condições edafoclimáticas favoráveis e o uso de tecnologias têm permitido aumentar a eficiência dos insumos, reduzir custos de produção e aumentar a produtividade da terra e dos recursos humanos (OLIVEIRA *et al.*, 2012; SHABBIR *et al.*, 2021). Brasil, Índia e China são os maiores produtores mundiais de cana-de-açúcar com 715,6; 405,4; 107,2 milhões de toneladas, respectivamente, no ano de 2021 (FAO, 2023). No Brasil, a estimativa da safra 2023/24 é de uma produção de 637,1 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, sendo que mais do 50% das áreas cultivadas encontram-se no Estado de São Paulo (CONAB, 2023).

Devido à sua alta produção de biomassa a cultura de cana-de-açúcar tem a capacidade de extrair quantidades consideráveis de nutrientes do solo. No Brasil, a cana-de-açúcar geralmente produz entre 25 e 40 toneladas por hectare de matéria seca, das quais entre 60 e 70% dessa biomassa é removida do campo na forma de colmos (SANTIAGO *et al.*, 2011). Por outro lado, a maioria das áreas de cultivo de cana-de-açúcar no Brasil apresentam solos de baixa fertilidade e ácidos. No entanto, a cana-de-açúcar é uma planta relativamente tolerante à acidez do solo e à presença de alumínio tóxico (MARINHO; ALBUQUERQUE, 1983; ROSSETTO *et al.*, 2004).

Butphu *et al.* (2019), avaliando o biocarvão de eucalipto, na dose de 6,2 Mg ha⁻¹, combinado com fertilizante mineral NPK, em lavouras de cana-de-açúcar, verificaram aumentos significativos na produtividade da cultura e na disponibilidade de Ca, K, além de maior eficiência do uso de N. Pang *et al.* (2022) baseados em seus resultados indicam que a combinação da fertilização nitrogenada com uma dose adequada de biocarvão pode ser uma estratégia eficaz para favorecer o crescimento das plantas e promover a sustentabilidade do

solo da rizosfera em sistemas de monocultura de cana-de-açúcar. Yang *et al.* (2015) utilizando de 10 a 20% de biocarvão no substrato para plantas de cana-de-açúcar em vaso, fase de muda (60 dias de idade), obtiveram aumentos significativos, tanto no volume como no comprimento da raiz em relação tratamento controle, sem biocarvão.

2.5 Referências

ABRAHAMS, P. W. Soils: their implications to human health. **Science of the Total Environment**, v. 291, n. 1-3, p. 1-32, 2002.

AJEMA, L. Effects of Biochar Application On Beneficial Soil Organism Review. *International Journal Of Research Studies In Science*, **Engineering And Technology**, v. 5, n. 5, p. 9-18. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15186.66247>, 2018.

ALI, I.; ZHAO, Q., WU, K.; ULLAH, S.; IQBAL, A.; LIANG, H., ...; JIANG, L. Biochar in combination with nitrogen fertilizer is a technique: to enhance physiological and morphological traits of Rice (*Oryza sativa* L.) by improving soil physio-biochemical properties. **Journal of Plant Growth Regulation**, p. 1-15, 2021.

ALLOHVERDI, T.; MOHANTY, A.K.; ROY, p.; Misra, m. A Review On Current Status Of Biochar Uses In Agriculture. **Molecules**, v. 26, n. 5584. <https://doi.org/10.3390/molecules26185584>, 2021.

ALVAREZ-CAMPOS, O.; LANG, T. A.; BHADHA, J. H.; McCRAY, J. M.; GLAZ, B.; DAROUB, S. H. Biochar and mill ash improve yields of sugarcane on a sand soil in Florida. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 253, p. 122-130, 2018.

ANDREA, F.; BINI, C.; AMADUCCI, S. Soil and ecosystem services: Current knowledge and evidences from Italian case studies. **Applied Soil Ecology**, v. 123, p. 693-698, 2018.

BOT, A.; BENITES, J., The Importance of Soil Organic Matter: Key to Drought-resistant Soil and Sustained Food Production. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, Rome, Italy Soil Bulletin v. 80, 2005.

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.

CHENG, N.; PENG, Y.; KONG, Y.; LI, J.; SUN, C. Combined effects of biochar addition and nitrogen fertilizer reduction on the rhizosphere metabolomics of maize (*zea mays* L.)

seedlings. **Plant and soil**, v. 433, p. 19-35. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3811-6>, 2018.

CHEW, J.; ZHU, L.; NIELSEN, S.; GRABER, E.; MITCHELL, D. R.; HORVAT, J.; MOHAMMED, M.; LIU, M.; VAN ZWIETEN, L.; DONNE, S.; MUNROE, P.; TAHERYMOOSAVI, S.; PACE, B.; RAWAL, A.; HOOK, J.; MARIO, C.; THOMAS, D. S.; GENXING, P.; LI, L., ... FAN, X. Biochar based fertilizer: Supercharging root membrane potential and biomass yield of rice. **Science of the Total Environment**, v. 713, n. 136431, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136431>.

CONAB. **Boletim da Safra de Cana-de-Açúcar**. 1st Levantamento: Safra 2023/24. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-açucar>. Acesso em: 17 maio. 2023.

CRANE-DROESCH, A.; ABIVEN, S.; JEFFERY, S.; TORN, M. S. Heterogeneous global crop yield response to biochar: a meta-regression analysis. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 4, 044049, 2013.

DAR, S. A.; BHAT, R. A. Aquatic pollution stress and role of biofilms as environment cleanup technology. **Fresh water pollution dynamics and remediation**, p. 293-318, 2020.

DIATTA, A. A.; FIKE, J. H.; BATTAGLIA, M. L.; GALBRAITH, J. M.; BAIG, M. B. effects of Biochar On Soil Fertility And Crop Productivity in arid regions: a review. **Arabian journal of geosciences**, v. 13, n. 14, Article 595, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05586-2>.

FACHINI, J.; FIGUEIREDO, C.C.; VALE, A.T. Assessing potassium release in natural silica sand from novel K-enriched sewage sludge biochar fertilizers. **Journal of Environmental Management**, v. 314, p. 115080, 2022.

FANG, Y.; SINGH, B.; SINGH, B.P.; KRULL, E. Biochar Carbon Stability in four contrasting soils. **European Journal of Soil Science**, v. 65, p. 60-71, 2013.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2023. **FAOSTAT – Crops and livestock products** [online]. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 01 jun. 2023.

GAO, S.; DELUCA, T.H.; CLEVELAND, C.C. Biochar additions Alter Phosphorus And Nitrogen Availability In Agricultural Ecosystems: A Meta-Analysis. **science total environmental**, v. 654, p. 463-472, 2019.

GENG, Y.; CAO, G.; WANG, L.; WANG, S. Effects of equal chemical fertilizer substitutions with organic manure on yield, dry matter, and nitrogen uptake of spring maize and soil nitrogen distribution. **PLoS ONE**, 2019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219512>.

GILBERT, R.A.; MORRIS, D.R.; RAINBOLT, C.R.; McCRAY, J.M.; PERDOMO, R.E.; EILAND, B.; GERARD, P.; MONTES, G., Sugarcane Response to mill mud, fertilizer, and soybean nutrient sources on a sandy soil. **Agronomy journal**, v. 100, p. 845-854, 2008.

GLASER, B.; BIRK, J. J. State of the Scientific Knowledge On Properties and Genesis Of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de índio). **Geochimica et cosmochimica acta**, v. 82, p. 39-51, 2012.

GLASER, B.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; Zech, W. The Terra Preta phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. **Naturwissenschaften**, v. 88, p. 37-41, 2001.

GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. **Biology and fertility of soils**, v. 35, p. 219-230, 2002.

IGALAVITHANA, A. D. et al. Effect of corn residue biochar on the hydraulic properties of sandy loam soil. **Sustainability**, v. 9, p. 2-10, 2017.

INTANI, K.; LATIF, S.; KABIR, A. K. M. R.; MÜLLER, J. Effect of Self-Purging Pyrolysis On Yield of Biochar From Maize Cobs, Husks And Leaves. **Bioresource technology**, v. 218, p. 541-551, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.114>.

JOSEPH, S.; COWIE, A. L.; VAN ZWIETEN, L.; BOLAN, N.; BUDAI, A.; BUSS, W.; LEHMANN, J. How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. **GCB Bioenergy**, 2021. [doi:10.1111/gcbb.12885](https://doi.org/10.1111/gcbb.12885).

JUNGINGER, M.; GOH, C.S.; FAAIJ, A. **International Bioenergy Trade: History, Status e Outlook on Securing Sustainable Bioenergy Supply, Demand and Markets**, 1st ed.; Springer: Amsterdam, 2014.

KOLTON, M.; HAREL, Y. M.; PASTERNAK, Z.; GRABER, E. R.; ELAD, Y.; CYTRYN, E. Impact of biochar application to soil on the root associated bacterial community structure of fully developed greenhouse pepper plants. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 77, n. 14, p. 4924-4930, 2011. <https://doi.org/10.1128/AEM.00148-11>.

KUZYAKOV, Y; FRIEDEL, J. K; STAHR, K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, p. 1485–1498, 2000.

LAIRD, D. A. The charcoal vision: a win–win–win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. **Agronomy journal**, v. 100, n. 1, p. 178-181, 2008.

LEE, J.; SARMAH, A. K.; KWON, E. E. Production and Formation of Biochar. **Biochar from Biomass and Waste**, p. 3-18, 2019. doi:10.1016/b978-0-12-811729-3.00001-7.

LEGG, S. IPCC, **Climate Change 2021—The Physical Science Basis**, 2021. Disponível em: <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.315096509383738>.

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.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management: Science, technology and implementation**. London: Routledge, 2015.

LEHMANN, J.; PEREIRA da SILVA, J.; STEINER, C.; NEHLS, T.; ZECH, W.; GLASER, B., Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant and Soil**, v. 249, p. 343-357, 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1022833116184>.

LIAO, N.; LI, Q.; ZHANG, W.; ZHOU, G.; MA, L.; MIN, W.; YE, J.; HOU, Z. Effects of biochar on soil microbial community composition and activity in drip-irrigated desert soil. **European Journal of Soil Biology**, v. 72, p. 27-34, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.12.008>.

LIMA, H. N.; SCHAEFER, C. E.; MELLO, J. W., GILKES, R. J.; KER, J. C. Pedogenesis and pre-Colombian land use of “Terra Preta Anthrosols”(“Indian black earth”) of Western Amazonia. **Geoderma**, v. 110, n. 1-2, p. 1-17, 2002.

LIU, Y.; ZOU, L.; WANG, Y. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of agricultural eco-efficiency in China in recent 40 years. **Land Use Policy**, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104794>.

MARINHO, M. L.; G. A. C. ALBUQUERQUE, G.A.C. Calagem. In: FILHO, J. O. (Ed.). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: Planalsucar, 1983, p. 179.

MARRIS E. Putting the carbon back: Black is the new green. **Nature**, v. 442, p. 624-626, 2006.

OK, Y.S.; UCHIMIYA, S.M.; CHANG, S.X.; BOLAN, N. **Biochar: Production, Characterization and Applications**. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2015.

OLIVEIRA, T.B.A.; SELIG, P.M.; BARBOSA, V.M.; DE SOUZA CAMPOS, L.M.; BORNIA, A.C.; DE OLIVEIRA, M.W. Tecnologia e custos de produção de cana-de-açúcar: Um estudo de caso em uma propriedade agrícola. **Latin American Journal of Business Management**, v. 3, p. 150-172, 2012.

ONU. Organização das Nações Unidas. **ONU News Perspectiva Global Reportagens Humanas**. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2022/11/18053>. Acesso em: 20 mai. 2023.

PANG, Z.; HUANG, J.; FALLAH, N.; LIN, W.; YUAN, Z.; HU, C. Combining N fertilization with biochar affects root-shoot growth, rhizosphere soil properties and bacterial communities under sugarcane monocropping. **Industrial Crops and Products**, v. 182, n. 114899, 2022.

PAUSTIAN, K.; LEHMANN, J.; OGLE, S.; REAY, D.; ROBERTSON, G. P.; SMITH, P. Climate-smart soils. **Nature**, v. 532, n. 7597, p. 49-57, 2016.

PRONK, G.J.; HEISTER, K.; VOGEL, C.; BABIN, D.; BACHMANN, J.; DING, G.-C.; DITTERICH, F.; GERZABEK, M.H.; GIEBLER, J.; HEMKEMEYER, M.; et al. Interaction of minerals, organic matter, and microorganisms during biogeochemical interface formation as shown by a series of artificial soil experiments. **Biology and Fertility of Soils**, v. 53, p. 9-22, 2017.

RIASCOS, M.S.; HERRERA, G.T. Impact of biochar use on agricultural production and climate change. A review. **Agronomia colombiana**, v. 38, n. 3, p. 367-381, 2020.

RODRIGUES, J.D.; JADOSKI, C.J.; FAGAN, E.B.; ONO, E.O.; SOARES, L.H.; DOURADO NETO, D. **Fisiologia da Produção de Cana-de-açúcar**, 1st ed. São Paulo: Andrei, 2018.

ROSSETTO, R.; SPIRONELLO, A.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Bragantia**, v. 63, p. 105-119, 2004.

SAHARUDIN, D. M.; JESWANI, H. K.; AZAPAGIC, A. Biochar from agricultural wastes: Environmental sustainability, economic viability and the potential as a negative emissions technology in Malaysia. **Science of The Total Environment**, v. 919, p. 170266, 2024.

SAHIN, O.; GUNES, A.; BABAR, S. K.; DENIZ, K.; KADIOGLU, Y. K.; OZTURK, S.; INAL, A. Phosphorus-Enriched Rice Husk Biochar Affected Growth and Mineral Nutrition of Wheat and Its Residual Effects on Maize Production. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 3, p. 3085-3094, 2023.

SANCHEZ-REINOSO, A. D.; ÁVILA-PEDRAZA, E. A.; RESTREPO, H. Use of Biochar in agriculture. **Acta Biológica Colombiana**, v. 25, n. 2, p. 327-338, 2020. Doi:10.15446/abc.v25n2.79466.

SANTIAGO, A. D.; ROSSETTO, R.; DE MELLO IVO, W.; URQUIAGA, S. (n.d.). Chapter 5. Sugarcane. **Energy Crops**, p. 77-103, 2011. Doi:10.1039/9781849732048-00077.

SANTOS, F.; DIOLA, V. Chapter 2-Physiology. SANTOS, F; BOREM, A; CALDAS, C. Sugarcane-Agricultural production, bioenergy and ethanol. **Elsevier Inc**, v. 13, 2015.

SCHAEFER, C. E. G.; LIMA, H. N.; GILKES, R. J.; MELLO, J. W. Micromorphology and electron microprobe analysis of phosphorus and potassium forms of an Indian Black Earth (IBE) Anthrosol from Western Amazonia. **Soil Research**, v. 42, n. 4, p. 401-409, 2004.

SCHMIDT, H. P.; KAMMANN, C.; HAGEMANN, N.; LEIFELD, J.; BUCHELI, T. D.; SÁNCHEZ MONEDERO, M. A.; CAYUELA, M. L. Biochar in agriculture—A systematic review of 26 global meta-analyses. **GCB Bioenergy**, v. 13, n. 11, p. 1708-1730, 2021.

SCHRAMA, M., DE HAAN, J. J., KROONEN, M., VERSTEGEN, H., & VAN DER PUTTEN, W. H. Crop yield gap and stability in organic and conventional farming systems. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 256, p. 123-130, 2018.

SHABBIR, R.; JAVED, T.; AFZAL, I.; EL SABAGH, A.; ALI, A.; VICENTE, O.; CHEN, P. Modern Biotechnologies: Innovative and Sustainable approaches for the improvement of sugarcane tolerance to environmental stresses. **Agronomy**, v. 11, n. 1042, 2021.

SHAH, M. H. et al. Organic fertilizer sources improve the yield and quality attributes of maize (*Zea mays* L.) hybrids by improving soil properties and nutrient uptake under drought stress. **Journal of King Saud University-Science**, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102570>.

SILVA, L. C. R., CORRÊA, R. S., WRIGHT, J. L., BOMFIM, B., HENDRICKS, L., GAVIN, D. G., SANTOS, R. V. A new hypothesis for the origin of Amazonian Dark Earths. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, 2021. Doi:10.1038/s41467-020-20184-2.

SMITH, N. J. H. Anthrosols and human carrying capacity in Amazonia. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 70, n. 4, p. 553-566, 1980.

STEINER, C.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; NEHLS, T.; de MACEDO, J. L. V.; BLUM, W. E.; ZECH, W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. **Plant and soil**, v. 291, p.275-290, 2007.

TABAKAEV, R.; KANIPA, I.; ASTAFEV, A.; DUBININ, Y.; YAZYKOV, N.; ZAVORIN, A.; YAKOVLEV, V. Thermal enrichment of different types of biomass by low-temperature pyrolysis. **Fuel**, v. 245, p. 29–38, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.02.049>.

TILMAN, D.; BALZER, C.; HILL, J.; BEFORT, B. L. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the national academy of sciences**, v. 108, n. 50, p. 20260-20264, 2011.

- TODD, J.; GLAZ, B.; IREY, M.S.; ZHAO, D.; HU, C.J.; EL-HOUT, N., Sugarcane genotype selection on a sand soil with and without added mill mud. **Agronomy journal**, v. 106, p. 315-323, 2014.
- TOTSCHKE, K. U.; AMELUNG, W.; GERZABEK, M. H.; GUGGENBERGER, G.; KLUMPP, E.; KNIEF, C.; KOGEL-KNABNER, I. Microaggregates in soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 181, n. 1, p. 104-136, 2018.
- WANG, J.; XIA, K.; WAIGI, M.G.; GAO, Y.; ODINGA, E.S.; LING, W.; LIU J. Application of biochar to soils may result in plant contamination and human cancer risk due to exposure of polycyclic aromatic hydrocarbons. **Environment. International**, v. 121, p. 169-177, 2018.
- WANG, T. *et al.* Impact of climate variability on grain yields of spring and summer maize. **Computers and Electronics in Agriculture**, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107101>.
- WEBER, K.; QUICKER, P. Properties of biochar. **Fuel**, v. 217, p. 240-261, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054>.
- XIAO, R.; YANG, W.; CONG, X.; DONG, K.; XU, J.; WANG, D.; YANG, X. Thermogravimetric analysis and reaction kinetics of lignocellulosic biomass pyrolysis. **Energy**, v. 201, Article 117537, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117537>.
- YANG, L.; LIAO, F.; HUANG, M.; YANG, L.; Li, Y. Biochar improves sugarcane seedling root and soil properties under a pot experiment. **Sugar tech**, v. 17, p. 36-40, 2015.
- YOUNG, I.M.; CRAWFORD, J.W. Interactions and Self-Organization in the Soil-Microbe Complex. **Science**, v. 304, p. 1634-1637, 2004.
- YU, H. Environmental carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons: photochemistry and phototoxicity. **Journal of environmental science and health. Part C. Environ. Carcinogen. Ecotoxicol. Rev.** 20, p. 149-183, 2002.
- ZHANG, Q.; BOL, R.; AMELUNG, W.; MISSONG, A.; SIEMENS, J.; MULDER, I.; KLUMPP, E. Water dispersible colloids and related nutrient availability in Amazonian Terra Preta soils. **Geoderma**, v. 397, n. 115103, 2021. [doi:10.1016/j.geoderma.2021.115103](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115103).

3 ARTIGOS

3.1 ARTIGO 1 – Biocarvão melhora as propriedades do solo e a produtividade da cana-de-açúcar ao longo do tempo

Este artigo foi elaborado conforme normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo.

Biocarvão melhora as propriedades do solo e a produtividade da cana-de-açúcar ao longo do tempo

RESUMO: Nos últimos anos, têm sido publicados muitos trabalhos com biocarvões, demonstrando seus efeitos sobre as propriedades do solo. No entanto, a utilização em grandes áreas agrícolas ainda é controversa devido ao fato de que as quantidades utilizadas em experimentos em vasos são bastante elevadas quando extrapoladas para cultivos no campo. O objetivo do estudo foi avaliar os efeitos do biocarvão sobre a produtividade da cana-de-açúcar e nas propriedades químicas e biológicas do solo, durante cinco anos. O experimento foi realizado em delineamento em blocos ao acaso em esquema fatorial 4x2+2 tratamentos adicionais (Controle 1 e 2), e quatro repetições. Os fatores corresponderam a doses de biocarvão (10, 20, 30 e 40 Mg ha⁻¹) e suas combinações sem e com fertilizante mineral NPK. O Controle 1 correspondeu ao solo natural, sem biocarvão e sem fertilizante NPK, e o Controle 2 a solo sem biocarvão e com aplicação de fertilizante NPK. Anualmente, ao longo de cinco anos, logo após a colheita, foram coletadas amostras de solo, na linha de plantas para análises químicas e microbiológicas. As máximas produtividades de cana-de-açúcar ocorrem com a aplicação de 37,71 Mg ha⁻¹ e de 31,00 Mg ha⁻¹ de biocarvão, nos tratamentos sem e com aplicação de fertilizante NPK, respectivamente. As doses de biocarvão aumentaram a disponibilidade de nutrientes, a capacidade de troca de cátions, o carbono orgânico do solo, o número de esporos de fungos micorrízicos arbusculares e a glomalina. Para as bactérias diazotróficas (*Azospirillum* spp., *Herbaspirillum* spp. e *Gluconacetobacter* spp.) não houve efeito dos tratamentos.

Palavras-chave: *Saccharum officinarum*, fungos micorrízicos, glomalina, bactérias diazotróficas, biochar de eucalipto.

Biochar improves soil properties and sugarcane productivity over time

ABSTRACT: In recent years, it has been published a lot of works on biochars, demonstrating their effects on soil properties. However, the use in large agricultural areas is still controversial due to the fact that the quantities used in experiments in pots are quite high when extrapolated to crops in field. The objective of the study was to evaluate the effects of biochar on sugarcane productivity and the chemical and biological properties of the soil, for five years. The experiment was carried out in a randomized block design in a factorial scheme $4 \times 2 + 2$ additional treatments (Control 1 and 2), and four replications. The factors corresponded to biochar doses (10, 20, 30 and 40 Mg ha⁻¹) and their combinations without and with NPK mineral fertilizer. Control 1 corresponded to natural soil, without biochar and without NPK fertilizer, and Control 2 to soil without biochar and with application of NPK fertilizer. Annually, over five years, immediately after harvest, soil samples were collected from the plants line for chemical and microbiological analyses. Maximum sugarcane productivities occur with the application of 37.71 Mg ha⁻¹ and 31.00 Mg ha⁻¹ of biochar, in treatments without and with application of NPK fertilizer, respectively. Biochar doses increased nutrient availability, cation exchange capacity, soil organic carbon, the number of arbuscular mycorrhizal fungal spores and glomalin. For diazotrophic bacteria (*Azospirillum* spp., *Herbaspirillum* spp. and *Gluconacetobacter* spp.) there were no effect of the treatments.

Keywords: *Saccharum officinarum*, mycorrhizal fungi, glomalin, diazotrophic bacteria, *Eucalyptus* charcoal.

INTRODUÇÃO

O solo é a base da produção de alimentos e fornece vários serviços funcionais, como manutenção da sua fertilidade, promoção da estabilidade do ecossistema e regulação das mudanças climáticas. A interferência humana nos ecossistemas naturais, principalmente pela agricultura, afeta os ciclos biogeoquímicos de nutrientes e o estoque de carbono do solo (Guillot et al., 2021). Como alternativa para melhorar as propriedades do solo e, principalmente, incorporar formas mais estáveis de carbono ao solo, tem se proposto o uso de biocarvões na agricultura (Silva et al., 2021).

A descoberta de manchas escuras de solo na região amazônica, de origem antrópica ou natural (Silva et al., 2021; Lombardo et al., 2022), denominadas Terra Preta de Índio (TPI), tem motivado a incorporação de biocarvões ao solo, na perspectiva, não somente de melhorar as propriedades do solo, mas também de compensar as emissões de carbono para a atmosfera e diminuir a poluição devido a disposição de resíduos orgânicos ao ambiente (Ye et al., 2019).

Neste contexto, com o objetivo de imitar as TPI, tem aumentado o interesse global pelos biocarvões (Kern et al., 2017). Os biocarvões são produtos da pirólise de qualquer fonte de biomassa em ausência ou em condições limitadas de oxigênio (Lal et al., 2016). No entanto, a aplicação de biocarvão pode influenciar negativamente as propriedades do solo (Brtnicky et al., 2021), sendo necessário mais estudos de longo prazo e em condições de campo (Pokovai et al., 2020). Além disso, a viabilidade do uso dos biocarvões como condicionadores das propriedades do solo é controversa, devido as grandes quantidades a serem utilizadas e dos riscos de perdas por deriva pela ação do vento e de inalação pelos aplicadores (Marousek et al., 2017; Brtnicky et al., 2021). As partículas finas de biocarvão, por abrasão de partículas maiores de biocarvão, além do pequeno tamanho e baixa densidade, podem conter compostos tóxicos produzidos durante a pirólise (Li et al., 2018; Brtnicky et al., 2021).

No Brasil, a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) para a produção de açúcar e etanol é cultivada em grandes áreas em sistema de monocultura, o que pode acarretar a degradação do solo ao longo do tempo, principalmente em cultivos irrigados (Dias; Sentelhas, 2018). Por outro lado, essas áreas podem apresentar um grande potencial para a

adição de biocarvão, de modo a compensar as emissões de carbono para atmosfera além de melhorar as propriedades do solo e a produtividade das culturas.

Embora o número de artigos científicos publicado seja relativamente elevado, há poucos estudos de campo e de longa duração com biocarvões. Nesse contexto, a hipótese do trabalho foi que, ao longo do tempo, o biocarvão melhora as propriedades do solo e aumenta os teores de carbono e a produtividade da cana-de-açúcar. O trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos do biocarvão sobre as propriedades químicas e biológicas do solo e produtividade da cana-de-açúcar irrigada durante cinco anos.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização e clima

O experimento foi conduzido no Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, na cidade de Montes Claros – MG, (16° 41' 2,03" S; 43° 50' 19,28" O; 646 m de altitude), no período de 2017 a 2022. O clima da região é classificado como tropical (Aw) com inverno seco e verão úmido (ALVARES et al., 2013). Os dados de médias mensais referentes a precipitação pluviométrica, umidade relativa e temperatura obtidos pela estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022), localizada próxima a área experimental, estão representados na Figura 1.

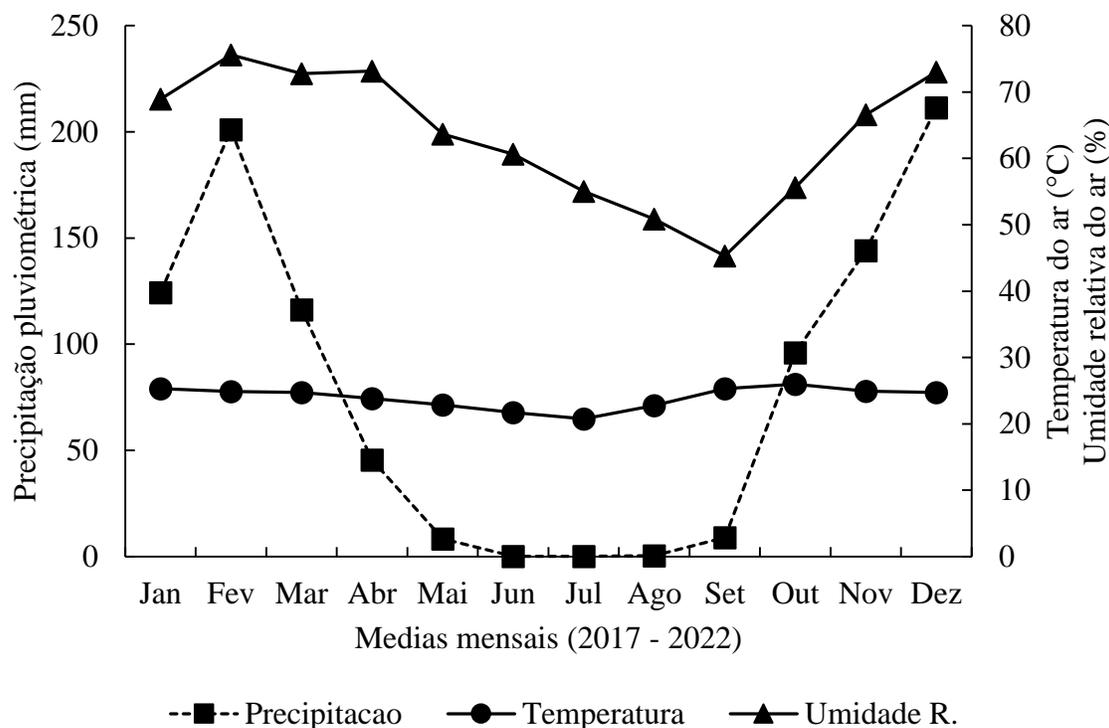


Figura 1. Médias mensais de precipitação pluviométrica, umidade relativa e temperatura do ar do município de Montes Claros – MG, no período de 2017 a 2022 (INMET 2022).

O solo da área experimental é um Cambissolo (Inceptisol), cujos atributos químicos e físicos da camada de 0-20 cm de profundidade, determinados conforme Teixeira et al., (2017), são apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Atributos químicos e físicos da camada de 0-20 cm de profundidade do solo da área experimental antes do plantio da cana-de-açúcar.

pH-H ₂ O	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al
	----- mg dm ⁻³ -----		----- cmol _c dm ⁻³ -----			
6,3	3,1	66,0	6,5	3,2	0	2,2
SB	T	V	COS	Argila	Silte	Areia
----- cmol _c dm ⁻³ -----		--- % ---	----- g kg ⁻¹ -----			
9,86	12,06	81,2	23,5	431	215	354

Al: acidez potencial trocável; H+Al: acidez potencial total; SB: soma de bases; T: CTC potencial; V: saturação por bases; COS: carbono orgânico do solo.

Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento estatístico utilizado foi o de blocos ao acaso, em esquema fatorial 4x2 com 2 tratamentos adicionais (controles) e quatro repetições (Figura 2). Os tratamentos corresponderam a quatro doses de biocarvão (10, 20, 30 e 40 Mg ha⁻¹), sem e com correção da fertilidade do solo com fertilizante NPK. O tratamento Controle 1: solo sem adição de biocarvão e sem correção da fertilidade e o Controle 2: solo sem biocarvão e com correção da fertilidade com NPK.

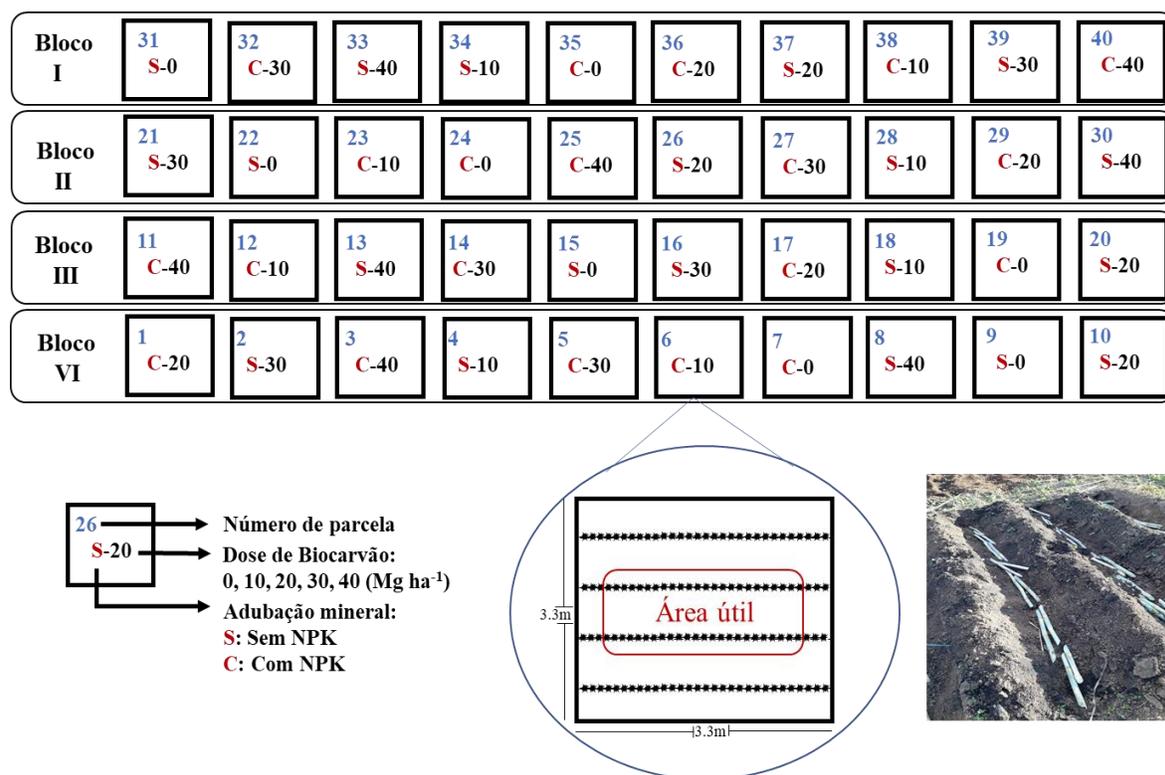


Figura 2. Esquema da área experimental com a distribuição dos tratamentos nas parcelas.

Nos tratamentos com fertilizante NPK foram aplicados 13,3 kg ha⁻¹ de N, 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 33,3 kg ha⁻¹ de K₂O na adubação de plantio, por meio do adubo formulado 4-30-10 (333,3 kg ha⁻¹) e, quando as plantas atingiram aproximadamente 0,8 metros de altura foram aplicados 100 kg ha⁻¹ de K₂O e 80 kg ha⁻¹ de N em cobertura, na forma de cloreto de potássio e ureia, respectivamente. As adubações em cobertura com nitrogênio e potássio foram repetidas anualmente, durante todo o período experimental, sendo as aplicações de

fertilizantes realizadas após a colheita, quando as plantas apresentavam aproximadamente 0,8 metros de altura.

Produção e caracterização do biocarvão

O biocarvão foi produzido por meio de pirólise lenta de madeira de eucalipto a 350 °C com tempo de residência de 48 horas. Após a pirólise, amostras de biocarvão foram levadas ao laboratório para a caracterização química e física (Tabela 2).

O biocarvão foi caracterizado quanto ao pH, densidade e condutividade elétrica, conforme Rajkovich *et al.*, (2012). As cinzas foram determinadas de acordo com o procedimento descrito em ASTM D1762-84 (ASTM 2013). 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 de acordo com USEPA 3051 (USEPA, 1994).

O número de Iodo foi determinado conforme a norma MB-3410 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1991). O Poder de Neutralização (PN) do biocarvão foi determinado pelo método da titulação com ácido e base, conforme Fidel *et al.*, (2017). A capacidade de troca de cátions (CTC) dos biocarvão foi determinada conforme Domingues *et al.*, (2017).

Tabela 2. Caracterização química e física do biocarvão de madeira de eucalipto.

Rend.	Ds	Cinzas	H	O	C	N	H/C	O/C	C/N	
%	g cm ⁻³		-----		%	-----	-----	Relação atômica		
31,4	0,45	10	2,46	22,6	56,7	0,50	0,04	0,4	113,4	
P	Ca	Mg	K	S	CTC	PN	NI	pH	CE	
-----		g kg ⁻¹	-----		cmol _c kg ⁻¹	mL HCl/ud. pH	mg I ₂ g ⁻¹	-	dS m ⁻¹	
8,00	13,8	12,4	1,0	2,60	9,5	0,64	204	6,10	0,36	
Cu	Zn	Fe	Mn	Si	Ni	Pb	Cd	C fixado		
-----				mg kg ⁻¹	-----				%	
51,5	270,0	1,43	56,9	798,6	5,20	3,03	4,50	69,5		

Rend = rendimento; Ds = densidade; PN = poder de neutralização; NI = número de iodo.

Implantação e condução do experimento

O experimento foi conduzido no período de 2017 a 2022. No ano de 2017 foi realizado o preparo do solo, com uma aração com arado de discos e duas gradagens. Aos sessenta dias antes do plantio, após a segunda gradagem, foram abertos sulcos de 20 cm de profundidade, espaçados um metro entre si. Na sequência, o biocarvão, previamente triturado e passado em peneira de malha de 5 mm, foi incorporado manualmente nos sulcos de plantio, de acordo com os respectivos tratamentos. Após a incorporação do biocarvão, a área experimental foi irrigada por aspersão convencional, mantendo a umidade do solo próxima à capacidade de campo até a época do plantio.

Aos sessenta dias após a incorporação do biocarvão, os sulcos foram reabertos para aplicação do NPK nos tratamentos correspondentes. Logo após, a cana-de-açúcar, variedade SP 81 3250, foi plantada utilizando o método do colmo-semente, em sulcos com espaçamento de um metro entre si, com 10 gemas viáveis por metro linear de sulco de plantio. As unidades experimentais foram compostas por quatro fileiras simples de três metros de comprimento com 30 plantas, totalizando 120 plantas por parcela, dessas, 48 plantas do centro da parcela foram utilizadas para avaliação do experimento, constituindo a área útil.

Para o controle de plantas daninhas, no ano de 2017, foi aplicado o herbicida a 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 para as plantas remanescentes realizou uma capina manual. Nos demais ciclos (anos), sempre que necessário, foi realizada a capina manual. As ponteiros da cana após a colheita foram mantidas na superfície do solo. O plantio foi realizado no mês de agosto de 2017 e as colheitas ocorreram no mês de julho dos anos seguintes.

Amostragem e análise do solo

Nos anos de 2018 a 2022, foram coletadas anualmente amostras de solos nas camadas de 0-0,20 m de profundidade para análises químicas e biológicas. Para a avaliação da

produtividade foram colhidas todas as plantas da área útil de cada parcela experimental e posteriormente foi efetuada a pesagem dos colmos.

As análises químicas do solo foram realizadas conforme Teixeira et al., (2017): pH - água; P e K - Mehlich 1; Ca e Mg - KCl 1 mol L⁻¹; H + Al - acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ e, carbono orgânico do solo (COS) - Walkley & Black.

O número ou densidade de esporos de *fungos* micorrízicos *arbusculares* (FMAs) foi determinada pelo peneiramento úmido, seguido de centrifugação em água e sacarose (Gendemann e Nicolson, 1963). A glomalina, proteína reativa facilmente extraível foi determinada pelo método de Bradford (Wright e Upadhyaya, 1996). O número de bactérias diazotróficas (*Azospirillum* spp., *Herbaspirillum* spp. e *Gluconacetobacter* spp.) no solo foi determinado pelo método do número mais provável, na presença ou ausência da película, característica de cada espécie, utilizando-se a tabela de McCrady (Döbereiner et al., 1995).

Análises estatísticas

Para todas as variáveis estudadas foram considerados os dados dos cinco anos de avaliação do experimento, iniciando com o período da colheita (2018 a 2022). Os dados foram submetidos à análise de variância e, quando significativo, foi realizada análise de regressão para as doses de biocarvão e Teste de Dunnet ($p < 0,05$) para comparar individualmente as médias dos tratamentos Controle 1 e Controle 2 com cada uma das doses de biocarvão. Análise de correlação de Pearson foi utilizada para determinar as relações entre o carbono orgânico do solo e a produtividade de colmos de cana-de-açúcar com as propriedades químicas e microbiológicas do solo. Todas as análises estatísticas foram realizadas usando o software R versão 4.2.1.

RESULTADOS

pH, cálcio e magnésio do solo

Para o pH, Ca e Mg do solo houve efeito significativo ($p < 0,05$) das doses de biocarvão, porém, não houve efeito da aplicação de fertilizante NPK e da interação entre os fatores doses e adubação (Tabela 3).

Tabela 3. Valores médios de pH, cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), potássio (K), capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação por bases (V) do solo, obtidos nos tratamentos Controle 1 (C1), Controle 2 (C2), e nos tratamentos sem (-NPK) e com (+NPK) adubação com fertilizante mineral NPK e doses de biocarvão.

Variável	C1	C2	+NPK	Dose de biocarvão (Mg ha ⁻¹)			
				10	20	30	40
pH	6,52 a	6,48 a	Média	6,43ns	6,43ns	6,45ns	6,38*ns
				Y = y = 6,42			
Ca cmol _c dm ⁻³	7,91 a	7,81 a	Média	8,11ns+	8,24*+	8,43*+	8,47*+
				y = 7,9975+0,0126**x		R ² = 0,95	
Mg cmol _c dm ⁻³	0,79 a	0,78 a	Média	0,85*+	0,88*+	0,91*+	0,99*+
				y = 0,795+0,0045**x		R ² = 0,93	
P mg dm ⁻³	1,17 b	5,55 a	-NPK	1,54ns+	2,05*+	2,66*+	3,43*+
				y = 0,8488+0,0629**x		R ² = 0,99	
			+NPK	6,69*+	8,72*+	11,86*+	12,27*+
				y = 4,9150+0,1988**x		R ² = 0,93	
K mg dm ⁻³	87,36 a	95,94 a	-NPK	96,56*ns	100,31*+	102,80*+	107,72*+
				y = 92,858+0,3596**x		R ² = 0,98	
			+NPK	104,67*+	112,56*+	117,23*+	117,78*+
				y = 102,06 + 0,43**x		R ² = 0,88	
CTC mg dm ⁻³	12,67 a	12,59 a	-NPK	13,4*+	14,16*+	14,88*+	15,49*+
				y = 12,74+0,0698**x		R ² = 0,99	
			+NPK	13,72*+	15,22*+	15,63*+	15,9*+
				y = 13,38 + 0,0695**x		R ² = 0,85	
V %	70,5 a	70,2 a	-NPK	68,38ns+	65,98*+	63,77*+	62,18*+
				y = 70,288-0,2083**x		R ² = 0,99	
			+NPK	67,6ns+	62,34*+	62,8*+	62,39*+
				y = 73,634 - 0,7573**x + 0,0121**x ²		R ² =0,88	

Para os tratamentos Controle 1 e Controle 2, médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem entre si pelo teste F ($p < 0,05$). Médias seguidas pelo sinal * diferem do Controle 1 e médias seguidas pelo sinal + diferem do Controle 2, pelo teste de Dunnet ($p < 0,05$).

Os tratamentos Controle 1 (solo natural, sem correção) e Controle 2 (com correção da fertilidade do solo com fertilizantes minerais) apresentaram valores semelhantes de pH (Tabela 3). Em relação as doses de biocarvão, apenas o pH obtido na dose 40 Mg ha⁻¹ diferiu do Controle 1. Nas demais doses, o pH foi semelhante aos valores obtidos nos tratamentos Controle 1 e Controle 2. Não houve diferença significativa entre as doses de biocarvão e o valor médio de pH foi 6,42, classificado como alto, de acordo com Alvarez V. et al., (1999).

Os teores de cálcio trocável foram semelhantes entre os tratamentos controles (Tabela 3). Apenas o valor obtido no tratamento Controle 1 foi semelhante ao da dose 10 Mg ha⁻¹ de biocarvão. Para o Controle 2, o teor de cálcio foi inferior aos obtidos em todas as doses de biocarvão (10, 20, 30 e 40 Mg ha⁻¹). Com as doses crescentes de biocarvão, o teor de cálcio aumentou linearmente, independentemente da aplicação de fertilizante NPK. De acordo com a equação, para cada 1 Mg ha⁻¹ de biocarvão houve um aumento de 0,0126 cmol_c dm⁻³ de cálcio.

Para o magnésio trocável não houve diferenças significativas entre os tratamentos controle, mas houve diferença significativa entre os tratamentos Controle 1 e Controle 2 com as doses de biocarvão (Tabela 3). Em relação às doses, houve um incremento linear dos teores de magnésio com o aumento das doses de biocarvão, independentemente, da aplicação de fertilizante NPK. Para cada 1 Mg ha⁻¹ de biocarvão houve um acréscimo de 0,0045 cmol_c dm⁻³ de magnésio no solo.

De acordo com as equações ajustadas, os teores de cálcio variaram de 8,12 a 8,50 cmol_c dm⁻³ nas doses de 10 e 40 Mg ha⁻¹ de biocarvão respectivamente, enquanto os teores de magnésio variaram de 0,84 a 0,98 cmol_c dm⁻³ nas doses de 10 e 40 Mg ha⁻¹ de biocarvão respectivamente. Esses valores, são classificados como alto para o cálcio e médio para o magnésio (Alvarez V et al., 1999).

Fósforo e potássio do solo

Para o fósforo disponível e potássio trocável houve efeito significativo para doses de biocarvão, adubação com fertilizante NPK, bem como para a interação entre os fatores doses e adubação NPK (Tabela 3).

O teor de fósforo no tratamento Controle 2 foi maior que no Controle 1. Na dose 10 Mg ha⁻¹ de biocarvão, sem aplicação de NPK, o teor de fósforo foi semelhante ao do Controle 1, enquanto nas demais doses os teores de fósforo foram maiores que no Controle 1. Com o aumento das doses de biocarvão nos tratamentos sem NPK, os teores de fósforo aumentaram linearmente, aumentando de 1,48 (dose de 10 Mg ha⁻¹) para 3,36 mg dm⁻³ (dose de 40 Mg ha⁻¹), sendo ainda classificados como muito baixo (Alvarez V. *et al.*, 1999). Com a aplicação de NPK, os teores de fósforo obtidos nas diferentes doses de biocarvão foram maiores que os obtidos nos tratamentos Controle 1 e Controle 2. Os teores de fósforo aumentaram linearmente com as doses de biocarvão (Tabela 3), aumentando de 6,9 para 12,87 mg dm⁻³, ou seja, passando de baixo (dose de 10 Mg ha⁻¹ de biocarvão) para alto (dose de 40 Mg ha⁻¹ de biocarvão).

Para o potássio, não houve diferença significativa entre os tratamentos Controle 1 e Controle 2 (Tabela 3). Em todas as doses de biocarvão sem aplicação de NPK, os teores de potássio foram maiores do que o obtido no Controle 1. Apenas na dose 10 Mg ha⁻¹ de biocarvão foi semelhante ao Controle 2. Com o aumento das doses de biocarvão, os teores de potássio aumentaram linearmente, aumentando de 96,45 (dose de 10 Mg ha⁻¹) para 107,24 mg dm⁻³ (dose de 40 Mg ha⁻¹), ambos valores classificados como altos (Alvarez V. *et al.*, 1999).

Com a aplicação de NPK, os teores de potássio obtidos nas diferentes doses de biocarvão foram maiores que os obtidos no tratamento Controle 1 e Controle 2 (Tabela 3). Os teores de potássio aumentaram linearmente com as doses de biocarvão, aumentando de 106,36 mg dm⁻³ (dose de 10 Mg ha⁻¹) para 119,26 mg dm⁻³ (dose de 40 Mg ha⁻¹) e mesmo na menor dose de biocarvão os teores de potássio foram classificados como altos (Alvarez V. *et al.*, 1999).

Capacidade de troca de cátions e saturação por bases do solo

Para potencial da capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação por bases (V) houve efeito significativo para doses de biocarvão, adubação com fertilizante NPK e para a interação entre os fatores (Tabela 3).

Os valores de CTC nos tratamentos Controle 1 e Controle 2 foram semelhantes entre si, e estes menores do que os obtidos nas diferentes doses de biocarvão, com e sem aplicação de fertilizante NPK (Tabela 3). Para os tratamentos sem aplicação de fertilizante NPK, a CTC aumentou linearmente com as doses de biocarvão, e os valores variaram de 13,44 (dose 10 Mg ha⁻¹) a 15,53 cmol_c dm⁻³ (dose 40 Mg ha⁻¹), sendo classificados como alto e muito alto, respectivamente (Alvarez V. *et al.*, 1999).

Com aplicação de fertilizante NPK, os valores de CTC foram ajustados a uma equação linear em função das doses de biocarvão (Tabela 3). Na menor dose biocarvão, 10 Mg ha⁻¹ (14,08 cmol_c dm⁻³ de CTC) e na maior dose, 40 Mg ha⁻¹ de biocarvão (16,16 cmol_c dm⁻³ de CTC), os valores de CTC foram classificados como alto e muito alto, respectivamente (Alvarez V. *et al.*, 1999).

Os valores de V não diferiram significativamente entre os tratamentos Controle 1 e Controle 2 (Tabela 3). Com ou sem a aplicação de fertilizante NPK, os valores de V obtidos na dose 10 Mg ha⁻¹ de biocarvão foram semelhantes ao valor do Controle 1. Nas demais doses de biocarvão, os valores de V foram menores do que os valores dos tratamentos Controle 1 e Controle 2, com ou sem aplicação de fertilizante NPK (Tabela 3).

Em relação às doses, sem aplicação de fertilizante NPK, os valores de V diminuíram linearmente com o incremento de biocarvão, passando de 68,21 (10 Mg ha⁻¹ de biocarvão) para 61,96% (40 Mg ha⁻¹ de biocarvão), ambos valores classificados como altos (Alvarez V. *et al.*, 1999).

Com aplicação de fertilizante NPK, os valores de V se ajustaram a uma equação quadrática em função das doses de biocarvão, sendo o menor valor (61,78%) obtido na dose 31,29 Mg ha⁻¹ de biocarvão. O maior valor, obtido na dose 10 Mg ha⁻¹ de biocarvão (67,27%), e o menor valor (61,78%), obtido na dose 31,29 Mg ha⁻¹ de biocarvão, foram classificados como altos (Alvarez V. *et al.*, 1999).

Carbono orgânico, fungos micorrízicos, glomalina e bactérias diazotróficas

Para a carbono orgânico do solo (COS), número de esporos de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) e glomalina houve efeito significativo das doses de biocarvão, porém,

não houve interação entre os fatores (Tabela 4). Os valores de COS não diferiram entre os tratamentos Controle 1 e Controle 2. Independentemente da aplicação de fertilizante NPK, os teores de COS nos tratamentos com biocarvão foram superiores aos obtidos nos tratamentos Controle 1 e Controle 2 e aumentaram linearmente com o aumento das doses.

De acordo com a equação ajustada para o COS em função das doses de biocarvão, os teores variaram de 31,49 (dose 10 Mg ha⁻¹ de biocarvão) a 42,70 g kg⁻¹ (dose 40 Mg ha⁻¹ de biocarvão), classificados como alto e muito alto, respectivamente (Alvarez V. *et al.*, 1999).

Tabela 4. Valores médios de carbono orgânico do solo (COS), número de esporos de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), glomalina e número de bactéria diazotróficas no solo, obtidos nos tratamentos Controle 1 (C1), Controle 2 (C2), e nos tratamentos sem (-NPK) e com (+NPK) adubação com fertilizante mineral NPK e doses de biocarvão.

Variável	C1	C2	+NPK	Dose de biocarvão (Mg ha ⁻¹)			
				10	20	30	40
COS g kg ⁻¹	27,30 a	28,28 a	Média	31,98*+ y = 27,75 + 0,3738**x	35,56*+ R ² = 0,91	36,82*+ R ² = 0,91	44,02*+ R ² = 0,91
FMAs Nº esporos /50g	78,30 a	75,97 a	Média	89,09*+ y = 76,6 + 1,522**x	98,22*+ R ² = 0,97	99,54*+ R ² = 0,97	98,95*+ R ² = 0,97
Glomalina mg g ⁻¹	5,97 a	6,29 a	Média	7,24*+ y = 6,8996 + 0,0403**x	7,78*+ R ² = 0,98	8,14*+ R ² = 0,98	8,47*+ R ² = 0,98
<i>Azospirillum</i> spp. Nº células g ⁻¹	5 x 10 ⁶	8 x 10 ⁶	Média	8 x 10 ⁶	9 x 10 ⁶	10 x 10 ⁶	10 x 10 ⁶
<i>Herbaspirillum</i> spp. Nº células g ⁻¹	15 x 10 ⁵	12 x 10 ⁵	Média	8 x 10 ⁶	7 x 10 ⁵	9 x 10 ⁵	7 x 10 ⁵
<i>Gluconacetobacter</i> spp. Nº células g ⁻¹	4 x 10 ⁶	2 x 10 ⁶	Média	4 x 10 ⁶	3 x 10 ⁶	3 x 10 ⁶	5 x 10 ⁶

Para os tratamentos Controle 1 e Controle 2, médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem entre si pelo teste F (p<0,05). Médias seguidas pelo sinal * diferem do Controle 1 e médias seguidas pelo sinal + diferem do Controle 2, pelo teste de Dunnet (p<0,05).

Para a número de esporos e glomalina, não houve diferença significativa entre o Controle 1 e o Controle 2, sendo os valores obtidos nesses tratamentos menores do que os obtidos com a aplicação de biocarvão (Tabela 4), independentemente do fertilizante NPK. O número de esporos foi ajustado a uma equação quadrática, enquanto os valores de glomalina foram ajustados a uma equação linear em função das doses de biocarvão. A densidade de esporos por 50 g de solo aumentou de 89,39, na dose 10 Mg ha⁻¹ de biocarvão, para 100,43,

valor máximo obtido na dose de 31,31 Mg ha⁻¹ de biocarvão. Para a glomalina, os valores aumentaram de 7,3 mg g⁻¹, na dose 10 Mg ha⁻¹ de biocarvão, para 8,51 mg g⁻¹ na dose 40 Mg ha⁻¹ de biocarvão, ou seja, um aumento de 23,51%.

Para o número de células de bactéria diazotróficas não houve efeito dos tratamentos, e os valores médios foram 8,33 x 10⁶ para *Azospirillum* spp., 9,67 x 10⁵ para *Herbaspirillum* spp. e 3,83 x 10⁶ para *Gluconacetobacter* spp. (Tabela 4).

Produtividade da cana-de-açúcar

Para a produtividade de colmos de cana-de-açúcar verificaram-se efeitos significativos para doses de biocarvão, adubação com fertilizante NPK, bem como para a interação entre os fatores doses e adubação (Tabela 5). A produtividade obtida no tratamento Controle 2 foi significativamente maior que a do Controle 1. A partir da dose de biocarvão para a produtividade máxima de colmos de cana-de-açúcar obtidas sem (37,71 Mg ha⁻¹ de biocarvão) e com (31 Mg ha⁻¹ de biocarvão) NPK, estimaram-se os valores dos atributos químicos do solo, do número de esporos de fungos micorrízicos e de glomalina, correspondentes às doses de biocarvão (Tabela 5).

Tabela 5. Valores médios de produtividade de colmos de cana-de-açúcar obtidos nos tratamentos Controle 1 (C1), Controle 2 (C2), e nos tratamentos sem (-NPK) e com (+NPK) adubação com fertilizante mineral NPK e doses de biocarvão e, valores estimados dos atributos químicos do solo, esporos de fungos micorrízicos (FM), glomalina e células de bactéria diazotróficas obtidos na dose de biocarvão correspondente a produtividade máxima de cana-de-açúcar nos tratamentos sem (-NPK) e com (+NPK) fertilizante NPK.

		Produtividade (Mg ha ⁻¹)							
C1	C2	10		20		30		40	
		-NPK	+NPK	-NPK	+NPK	-NPK	+NPK	-NPK	+NPK
103b	138 ^a	124* ⁺	143* ⁺	136*	151* ⁺	145* ⁺	155* ⁺	146* ⁺	152* ⁺
pH		Ca (cmol _c dm ⁻³)		Mg (cmol _c dm ⁻³)		P (mg dm ⁻³)		K (mg dm ⁻³)	
-NPK	+NPK	-NPK	+NPK	-NPK	+NPK	-NPK	+NPK	-NPK	+NPK
6,42	6,42	8,47	8,38	0,96	0,93	3,22	11,08	106,42	115,39
CTC (cmol _c dm ⁻³)		V (%)		COS (g kg ⁻¹)		FM (esp. / 50g)		Glom (mg g ⁻¹)	
-NPK	+NPK	-NPK	+NPK	-NPK	+NPK	-NPK	+NPK	-NPK	+NPK
15,37	15,53	62,43	61,79	41,85	39,34	99,44	100,43	8,42	8,15

Para os tratamentos Controle 1 e Controle 2, médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem entre si pelo teste F (p<0,05). Médias seguidas pelo sinal * diferem do Controle 1 e médias seguidas pelo sinal + diferem do Controle 2, pelo teste de Dunnet (p<0,05).

O pH do solo para a produtividade máxima de cana-de-açúcar foi classificado como alto (acidez fraca), fósforo médio; magnésio, potássio, V e COS alto; cálcio e CTC muito alto (Alvarez V. et al., 1999).

A produtividade da cana-de-açúcar, independentemente, da aplicação de fertilizante NPK se ajustou a modelos quadráticos em função das doses de biocarvão (Figura 3). De acordo com a equação de regressão, quando não foi aplicado fertilizantes NPK, a maior produtividade foi de 146 Mg ha⁻¹ de colmos de cana-de-açúcar, obtida na dose correspondente a 37,71 Mg ha⁻¹ de biocarvão (Figura 3). Quando foi aplicado o fertilizante NPK, a maior produtividade foi de 154 Mg ha⁻¹ de colmos de cana-de-açúcar, obtida na dose correspondente a 31,00 Mg ha⁻¹ de biocarvão (Figura 3).

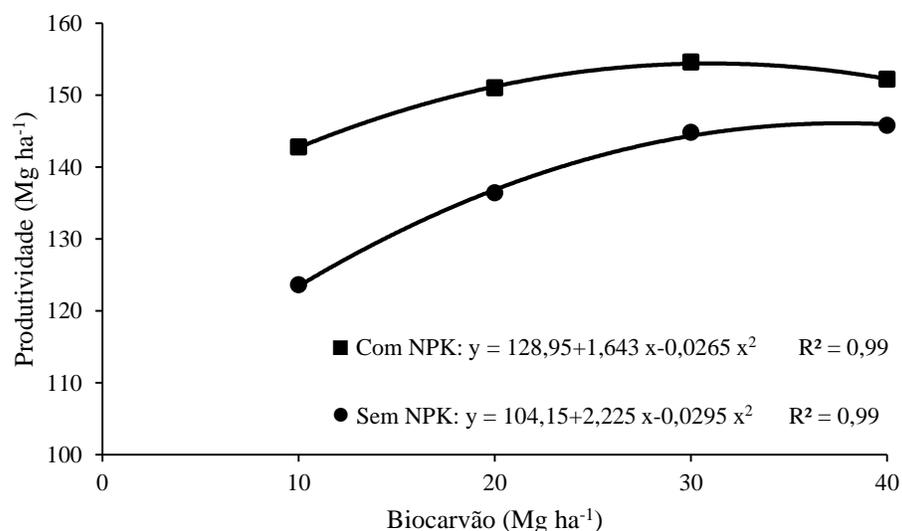


Figura 3. Equações de regressão para produtividade de colmo de cana-de-açúcar em função das doses de biocarvão, sem e com aplicação de fertilizante mineral NPK.

Correlações entre as variáveis

As variáveis COS e produção de colmos de cana-de-açúcar foram correlacionadas entre si e com as demais variáveis, cujos efeitos dos tratamentos foram significativos. Na

Figura 4 estão apresentadas somente as correlações com nível de significância menor que 5%. De acordo com os valores dos coeficientes, as correlações foram classificadas em forte ($r > 0,7$ ou $> 70\%$) ou fracas ($r \leq 0,7$ ou $\leq 70\%$).

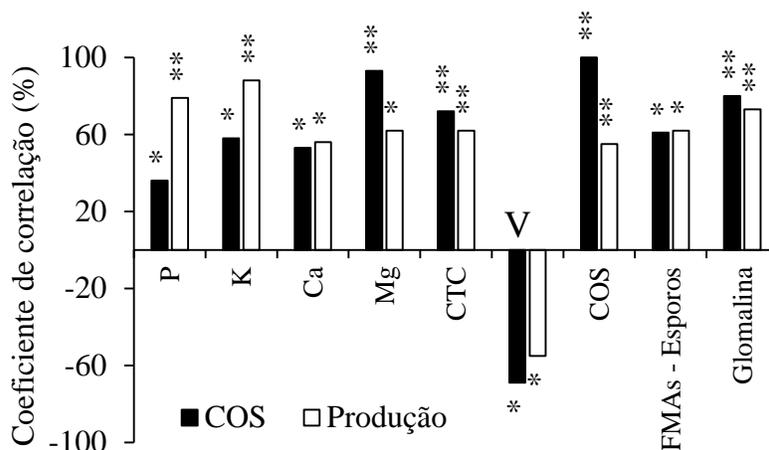


Figura 4. Coeficientes de correlação ($r \times 100$) entre as variáveis carbono orgânico do solo (COS) e produção de colmos de cana-de-açúcar com fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V), número de esporos de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs – esporos) e glomalina. * ou ** coeficiente de correlação menor que 70% ou maior que 70%.

O COS e a produção de colmos de cana-de-açúcar correlacionaram entre si e com as variáveis fósforo disponível (P), exceto para o COS; potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) trocáveis; capacidade de troca de cátions (CTC); saturação por bases (V); número de esporos de fungos micorrízicos (FMAs – esporos) e a glicoproteína glomalina, independentemente, da aplicação de fertilizante NPK. Para a saturação por bases, as correlações foram negativas, enquanto que para as demais variáveis, as correlações com o COS e, ou com a produção foram positivas.

DISCUSSÃO

pH, cálcio e magnésio do solo

O pH do solo não foi alterado significativamente ao longo dos cinco anos de cultivo da cana-de-açúcar, mesmo nas doses mais elevadas de biocarvão. A maioria dos biocarvões possuem pH alcalino devido a presença de cinzas formadas durante o processo de pirólise, sendo que, de modo geral, quanto maior a temperatura, maior o teor de cinzas (Brtnicky et al., 2021; Lu et al., 2022). As cinzas são ricas em bases, como, por exemplo, carbonato de potássio (KHCO_3) e carbonato de cálcio (CaCO_3), que tem efeito corretivo da acidez do solo, além de elevar os teores de bases trocáveis (K e Ca), atuando semelhante com os corretivos da acidez do solo (Domingues et al., 2017). O biocarvão utilizado no presente estudo apresentou pH 6,1 e 10% de cinzas (Tabela 2).

O biocarvão foi incorporado ao solo no plantio da cana-de-açúcar e considerando os fatores responsáveis pela acidificação do solo, como a lixiviação de bases trocáveis (Ca, Mg e K), a decomposição da matéria orgânica, a adição de fertilizantes nitrogenados e a própria absorção de nutrientes pelas plantas era de se esperar uma redução do pH do solo ao longo dos cinco anos de avaliação. Além do pH natural do solo da área experimental ser naturalmente alto (Tabela 1), uma hipótese é que houve um equilíbrio entre os fatores responsável pela acidificação do solo e os efeitos do biocarvão e da água de irrigação em manter o pH próximo a condição natural (acidez fraca) ao longo dos cinco anos de avaliação. A água utilizada na irrigação foi captada de poço tubular, que se encontra confinada no Aquífero Cárstico do Bambuí, que apresenta elevados teores de íons carbonatos (CO_3^-) e bicarbonatos (HCO_3^-) e de cálcio (Ca^{+2}) (Sampaio e Fernandes, 2021).

Em relação aos efeitos da aplicação de biocarvão sobre o pH do solo, Brtnicky et al. (2021), em revisão dos efeitos adversos sobre as propriedades do solo, citam o potencial de alcalinização do solo por alguns biocarvões. De modo geral, a aplicação de biocarvões alcalinos aumenta o pH dos solos ácidos e diminui a toxidez por alumínio, semelhantemente à calagem, porém, quando adicionados em solos alcalinos, não alteram significativamente o pH do solo.

O aumento dos teores de cálcio e magnésio podem ser atribuídos a adição desses nutrientes pelo biocarvão (Tabela 2). Considerando os teores de cálcio ($13,8 \text{ g kg}^{-1}$) e de

magnésio ($12,4 \text{ g kg}^{-1}$) no biocarvão (Tabela 2), foram aplicados, de forma concentrada no sulco de plantio, o equivalente a 552 kg ha^{-1} de cálcio e 496 kg ha^{-1} de magnésio na dose de 40 Mg ha^{-1} de biocarvão. Mesmo nos tratamentos controles, sem aplicação de biocarvão, os teores de cálcio e magnésio do solo foram classificados como muito alto e médio respectivamente (Alvarez V. et al., 1999). No presente estudo, como discutido anteriormente para o pH do solo, tanto o biocarvão quanto a água de irrigação contribuíram para a manutenção dos valores elevados de cálcio e de magnésio do solo ao longo dos cinco anos, mesmo considerando a exportação desses nutrientes pelas colheitas da cana-de-açúcar.

Fósforo e potássio

Os teores de fósforo disponível foram maiores nos tratamentos com fertilizante mineral NPK, haja vista que o fertilizante utilizado é fonte desse nutriente. Por outro lado, mesmo no tratamento sem aplicação de fertilizante NPK, os teores de fósforo aumentaram linearmente com as doses crescentes de biocarvão (Tabela 3). Além da adição de fósforo pelo fertilizante NPK e pelo biocarvão, deve-se considerar que o pH do solo próximo a neutralidade (Tabela 1) evitou ou minimizou as reações de fixação de fósforo pelo solo, contribuindo para a disponibilidade desse nutriente para as plantas.

Na maior dose de biocarvão (40 Mg ha^{-1}) foram aplicados 320 kg ha^{-1} de P ou 728 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Deve-se considerar que nem todo o fósforo do biocarvão está prontamente disponível para as plantas e que o solo, devido ao pH elevado, tem baixa capacidade de fixação de fósforo, além da possibilidade de precipitação do P com o cálcio do solo (Hossain, et al., 2020; Hartemink e Barrow, 2023).

As cinzas dos biocarvão contém sílica (Tabela 2), que são liberadas lentamente para o solo. A sílica compete pelos sítios de adsorção de fósforo das argilas, contribuindo para a maior disponibilidade desse elemento para as plantas (Torres et al., 2020). A sílica dos biocarvões pode ainda reagir com as formas trocáveis de alumínio, reduzindo os efeitos da acidez do solo sobre as plantas, além de contribuir para aumentar a estabilidade do carbono no solo (Wang et al., 2018).

Em relação aos efeitos dos coloides orgânicos, as cargas negativas são responsáveis pela capacidade de troca de cátions (CTC) dos biocarvões. Ao se adicionar biocarvões ao solo, além de aumentar a CTC do solo, os compostos orgânicos podem bloquear os sítios de fixação de fósforo nas argilas e formar complexos orgânicos com íons ferro e alumínio presentes na solução do solo (Torres et al., 2020; Brtnicky et al., 2021). A alta relação C/N do biocarvão contribui para a maior permanência do carbono não pirolisado no solo (compostos ou coloides orgânicos com cargas elétricas negativas de superfície). No presente estudo, a relação C/N do biocarvão foi de 113,4/1 (Tabela 2), valor suficientemente alto para retardar a mineralização dos compostos orgânicos do biocarvão. De acordo com Gao et al., (2018) de forma geral, a relação C/N está relacionada aos efeitos positivos dos biocarvão na disponibilidade de P do solo.

De acordo com as equações de regressão ajustadas para as doses de biocarvão, para cada megagrama de biocarvão adicionado ao solo, dentro da faixa de 10 a 40 Mg ha⁻¹, sem e com NPK, ocorreu um aumento médio 0,0629 e 0,1988 mg dm⁻³ de fósforo, respectivamente (Tabela 3). De acordo com as classes de interpretação do fósforo disponível (Alvarez V. et al., 1999), nos tratamentos sem NPK, os teores de fósforo, mesmo na maior dose de biocarvão (40 Mg ha⁻¹), foram classificados como muito baixos.

No tratamento Controle 2, onde foi aplicado NPK, o teor de fósforo foi classificado como baixo. Nos tratamentos com NPK e com biocarvão, os teores de P foram classificados como baixo (dose de 10 Mg ha⁻¹), médio (doses 20 e 30 Mg ha⁻¹) e bom (dose 40 Mg ha⁻¹). Gao et al., (2018), verificaram que, apenas acima de 10 Mg ha⁻¹ de biocarvão é que houve aumentos significativos do fósforo disponível para as plantas. Apesar dos efeitos positivos dos biocarvões para as propriedades do solo e para o estoque de carbono, as quantidades a serem aplicadas podem não ser viáveis, devido as grandes quantidades a serem aplicadas como fonte de nutrientes (Marousek et al., 2017; Brtnicky et al., 2021), principalmente de fósforo.

Para o potássio, embora tenham aumentado significativamente com a aplicação de biocarvão e do fertilizante mineral NPK, mesmo no tratamento Controle 1 os teores foram classificados como altos (Alvarez V. et al., 1999). Em função do teor inicial de potássio no solo já ser elevado (Tabela 1), a extração de potássio pela cana-de-açúcar e as possíveis

perdas por lixiviação não foram suficientes para mudar a classe de interpretação dos teores desse elemento. De acordo com Alvarez V. et al., (1999), teores de potássio entre 71 e 120 mg dm⁻³ são classificados como altos ou bons, enquanto acima de 120 mg dm⁻³ são considerados muito altos ou muito bons. Uma outra hipótese para a manutenção dos teores de potássio é a presença de moscovita (silicatos de alumínio e potássio) em solos de mineralogia mais jovem encontrados no município de Montes Claros (Sampaio e Fernandes, 2021).

Capacidade de troca de cátions e saturação por bases do solo

Os maiores valores de capacidade de troca de cátions do solo (CTC) nos tratamentos com biocarvão e com fertilizante NPK (Tabela 3) estão relacionados aos maiores teores de potássio, cálcio e magnésio nesses tratamentos, uma vez que, a CTC foi estimada pela soma de Ca, Mg, K, Al e H+Al. Dessa forma, a adição de bases trocáveis pelo biocarvão (Ca, Mg e K) e pelo fertilizante mineral (K), contribuíram para o aumento da CTC. Além disso, os biocarvões contêm cargas negativas na superfície das partículas, derivadas da dissociação de grupos funcionais, carboxílicos e fenólicos (Huff e Lee, 2016; Domingues et al., 2020) que contribuem para o aumento das cargas elétricas negativas do solo.

Devido a presença de cargas elétricas negativas nas partículas, os biocarvões têm sido utilizados para aumentar a CTC, principalmente de solos arenosos ou de solos muito intemperizados, ricos em óxidos de ferro e alumínio na fração argila, e para a remediação de solos contaminados por elementos potencialmente tóxicos, como cádmio e chumbo, por exemplo (Domingues et al., 2017). Por outro lado, a adição de doses muito elevadas de biocarvões com alta CTC pode diminuir a disponibilidade de micronutrientes catiônicos pela formação de complexos orgânicos com esses elementos (Brtnicky et al., 2021). Deve-se considerar que a CTC dos biocarvões está dada em função da matéria-prima e das condições de pirólise. Nesse estudo, a CTC do biocarvão utilizado foi de 9,5 cmol_c kg⁻¹ e, aparentemente, mesmo na maior dose (40 Mg ha⁻¹) não foram observados sintomas visuais de deficiência de micronutrientes catiônicos nas plantas de cana-de-açúcar pela formação de complexos orgânicos estáveis.

A redução dos valores de saturação por bases do solo com as doses crescentes de biocarvão (Tabela 3) se deve à metodologia utilizada para a estimativa dessa variável. A

saturação por bases foi calculada pela relação entre a soma de bases (Ca+Mg+K) e a CTC $[(Ca+Mg+K/T) \times 100]$. Como a CTC aumentou numa proporção maior que a soma de bases com as doses crescentes de biocarvão, os valores de saturação por bases diminuíram. Esses resultados se justificam, como discutido anteriormente, que os biocarvões, além da adição de bases trocáveis, adicionam cargas elétricas negativas ao solo (Domingues et al., 2017). Apesar das diferenças significativas, os valores de saturação por bases do solo, em todos os tratamentos, foram enquadrados como altos ou bons, segundo a classificação de Alvarez V. et al., (1999) para a interpretação dos resultados da análise de solo com fins de manejo da fertilidade.

Carbono orgânico do solo, fungos micorrízicos, glomalina e bactérias diazotróficas

O aumento dos teores de carbono orgânico do solo com as doses crescentes de biocarvão são justificados pela adição de carbono via biocarvão (Tabela 2). Zhang et al., (2022) também verificaram aumento dos teores de carbono do solo com doses variando de 0 a 40 Mg ha⁻¹ de biocarvão de palha de trigo. No entanto, constataram que ao longo dos três anos de avaliação houve uma redução das frações lábeis de carbono. Nesse sentido, Nessa et al., (2021), recomendam a utilização de biocarvões produzidos a partir de madeira quando o objetivo for aumentar o sequestro de carbono no solo, uma vez que esses biocarvões possuem menores teores de carbono orgânico lábil, facilmente oxidável.

No presente estudo, além do biocarvão ser uma fonte de carbono mais estável, os resíduos da cana-de-açúcar, mantidos na superfície do solo ao longo dos cinco anos, são ricos em compostos recalcitrantes como lignina, celulose e hemicelulose. Em função das formas de carbono mais estáveis e razões carbono/nutrientes mais elevadas, no presente estudo ocorreu efeito *priming* negativo (Kuzyakov et al., 2000) na ciclagem da matéria orgânica do solo causada pela adição de material orgânico, principalmente nas doses elevadas de biocarvão, ou seja, a adição de biocarvão retardou a mineralização da matéria orgânica do solo. Deve-se ainda considerar que os resíduos das colheitas da cana-de-açúcar são ricos em compostos de decomposição relativamente lenta pelos microrganismos do solo. Apesar do efeito *priming* negativo, houve um incremento de 56,7% com o aumento das doses de biocarvão. Assim, os teores de carbono orgânico do solo foram classificados como altos ou

bons, não alcançando valores muito altos, de acordo com a classificação de Alvarez V. et al., (1999).

O biocarvão utilizado apresentou relação H/C de 0,04 e O/C de 0,40 (Tabela 2). Biocarvões com H/C < 0,7 possuem maior aromaticidade e O/C entre 0,2 e 0,6 são moderadamente estáveis, com meia-vida entre 100 e 1000 anos (Ipolito et al., 2020). Esses resultados indicam que o biocarvão utilizado, devido às formas aromáticas estáveis do carbono orgânico contribuíram para o estoque de carbono do solo, evitando as perdas para a atmosfera na forma gás carbônico, mesmo em condições ambientais (altas temperaturas, umidade, boa fertilidade do solo) e biológicas favoráveis.

O biocarvão, conforme discutido anteriormente, é um condicionador das propriedades do solo, além de ser fonte de carbono e de nutrientes. Assim correlações positivas foram obtidas entre o COS e os teores de nutrientes, exceto fósforo, e entre o COS e a CTC. Por outro lado, em função da contribuição do biocarvão para o aumento da CTC ser maior que para a soma de bases (Ca, Mg e K), o COS correlacionou-se negativamente com a saturação por bases (Figura 4).

De acordo com a equação de regressão obtida para a densidade de esporos de FMAs em função das doses de biocarvão, independentemente da adubação com NPK, o maior valor de densidade de esporos (100,43 esporos/50 g de solo) foi obtido na dose 31,31 Mg ha⁻¹ de biocarvão (Tabela 3). No presente estudo não houve efeito da aplicação de fertilizante mineral NPK no plantio sobre a densidade de esporos ao longo dos cinco anos de avaliação.

Os biocarvões além de alterar os atributos do solo que beneficiam as interações planta – fungo, alteram a população de microrganismos do solo que favorecem os FMAs (Figueira-Galán et al., 2023). Entre outros efeitos, os poros das partículas de biocarvão funcionam como habitat para microrganismos. Uma maneira de estimar a porosidade é a determinação do iodo (NI), possui uma relação direta com a porosidade dos biocarvões, isto é, quanto maior o valor de NI, maior a quantidade de microsporos nos biocarvões (Zhang et al., 2020).

No presente estudo, a densidade de esporos aumentou 28,3% comparando o tratamento Controle 1 (78.3 esporos/50 g de solo), onde se obteve a menor densidade de esporos, e a dose 31,31 Mg ha⁻¹ de biocarvão (100,43 esporos/50 g de solo), onde se obteve

a maior densidade de esporos (Tabela 3). Corroborando com os dados obtidos, outros autores também verificaram influência significativa dos biocarvões na ocorrência de fungos micorrízicos (Curaqueo et al., 2021; Herawati et al., 2021).

A menor densidade de esporos de FMAs nas doses acima de 31,31 Mg ha⁻¹ de biocarvão podem estar ainda relacionados aos efeitos do biocarvão sobre os microrganismos do solo. Embora a aplicação de biocarvões, de modo geral, favoreçam o aumento da população de microrganismos do solo, podem reduzir a diversidade microbiana pelo favorecimento de certos grupos de microrganismos em detrimento de outros. Além disso, os biocarvões podem ser fonte de contaminantes orgânicos, incluindo hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, compostos orgânicos voláteis, dioxinas e de elementos potencialmente tóxicos, presentes na matéria prima ou produzidos durante a pirólise (Brtnicky et al., 2021). Dessa forma, ressalta a importância de estudos de longo prazo em que se analisem diversas doses e tipos de biocarvão aplicados ao solo.

Em relação a glomalina, semelhantemente ao verificado para a densidade de esporos de FMAs, não houve efeito da aplicação de fertilizante NPK, enquanto que essa glicoproteína aumentou linearmente com as doses de biocarvão (Tabela 3). Em um estudo de longa duração (seis anos), Sun et al., (2021) verificaram que o biocarvão aumentou os valores de glomalina, de carbono na biomassa microbiana e de carbono orgânico total do solo, uma vez que a glomalina é uma glicoproteína produzida por FMAs, associada à dinâmica do carbono. No presente estudo, verificou-se correlação positiva entre o COS e a Glomalina e entre o COS e os esporos de FMAs (Figura 4). Por outro lado, Šimansky (2016) verificou valores menores de glomalina com a aplicação de biocarvão. Os resultados divergentes são explicados pelos vários fatores que influenciam os FMAs e, conseqüentemente a glomalina, além de problemas metodológicos para a sua determinação (Oladele et al., 2022). Nesse sentido, a matéria prima utilizada para a produção de biocarvão, as condições de pirolise e as doses de biocarvão podem afetar significativamente os teores dessa glicoproteína no solo.

O aumento da disponibilidade de nutrientes e do COS pelo biocarvão, de modo geral, melhora o ambiente para as plantas e para os microrganismos associados, como os FMAs. Corroborando com essa hipótese, obteve-se correlações positivas para COS com a densidade de esporos e com a glomalina (Figura 4).

Estudos com bactérias diazotróficas endofíticas, como *Gluconacetobacter*, *Herbaspirillum*, e *Azospirillum*, indicam seu papel na promoção do crescimento e proteção de plantas incluindo a cana-de-açúcar (Döbereiner et al., 1992a,b). No entanto, a eficiência da fixação biológica de nitrogênio varia entre os genótipos (Reis Junior et al., 2000). As informações sobre a eficiência na fixação biológica de nitrogênio são limitadas para o genótipo de cana-de-açúcar utilizado em nosso estudo. Saranya et al. (2011) trabalhando com milho relata que a aplicação de biocarvão com a inoculação de *Azospirillum* pode aumentar a atividade microbiana e a fertilidade do solo, favorecendo em um melhor desenvolvimento da cultura. De acordo com uma revisão realizada por Zhao et al. (2023), diferentes resultados têm sido obtidos em relação aos efeitos dos biocarvões sobre as bactérias diazotróficas em função dos teores de nitrogênio dos biocarvões e dos atributos do solo, principalmente CTC, carbono orgânico dissolvido e pH. Segundo os autores, os resultados positivos têm sido verificados principalmente com bactérias simbióticas. Em nosso estudo, a falta de resposta dos tratamentos no número de células de *Azospirillum* spp., *Herbaspirillum* spp, e *Gluconacetobacter* spp pode estar associado a fatores como condições ambientais, predação e competição entre a diversidade de microorganismos nativos mais adaptados do solo, os quais, podem ter apresentado impedimentos para o sucesso e viabilidade dos microrganismos inoculados (Bashan et al., 2014; Tao et al., 2018)

Produtividade da cana-de-açúcar

Para a produtividade média da cana-de-açúcar, verificou-se que a máxima produção ocorreu com a aplicação de 37,71 Mg ha⁻¹ e de 31,00 Mg ha⁻¹ de biocarvão, nos tratamentos sem e com aplicação de fertilizante NPK (Tabela 3). Com as doses crescentes de biocarvão ocorreu aumento da disponibilidade de nutrientes, da CTC, do COS e dos FMAs. Na dose correspondente a produtividade máxima de cana-de-açúcar o pH do solo estava próximo a neutralidade e os valores de cálcio, magnésio e potássio estavam altos, a CTC, a V e o COS variaram de alto a muito alto, enquanto os teores de fósforo estavam médios (Tabela 4).

Correlações positivas foram obtidas entre a produção de colmos de cana de açúcar com os teores de nutrientes, CTC, COS, esporos de FMAs e glomalina (Figura 4). Apesar dos efeitos positivos da adubação com biocarvão para as propriedades do solo e para a

produção de cana de açúcar, as doses a serem aplicadas, acima de 31 Mg ha⁻¹, são relativamente elevadas, podendo inviabilizar o uso dessa tecnologia para grandes áreas. Uma alternativa seria o enriquecimento dos biocarvões com fertilizantes minerais, produzindo fertilizantes organominerais. Dessa forma, teria os benefícios de formas mais estáveis de carbono, provenientes do biocarvão, e dos nutrientes dos fertilizantes minerais.

CONCLUSÕES

Ao longo do tempo o biocarvão melhora as propriedades do solo e a produtividade da cana-de-açúcar. Independentemente da aplicação de fertilizante mineral, o biocarvão contribuiu para o aumento da capacidade de troca de cátions, do carbono orgânico do solo, do número de esporos de fungos micorrízicos arbusculares e da glomalina. No entanto, não alterou o número de bactérias diazotróficas (*Azospirillum* spp., *Herbaspirillum* spp. e *Gluconacetobacter* spp.).

As máximas produtividades de cana-de-açúcar ocorreram com a aplicação de 37,71 Mg ha⁻¹ e de 31,00 Mg ha⁻¹ de biocarvão, nos tratamentos sem e com aplicação de fertilizante NPK, respectivamente.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Carvão ativado pulverizado - Determinação do número de iodo - MB-3410. Rio de Janeiro, 1991.

Alvares, C. A.; Stape J. L.; Sentelhas, P. C. Gonçalves, J. L. de M.; Sparovek, G. Koppens climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

Alvarez V VH, Novais RF, Barros NF, Cantarutti RB, Lopes AS. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: Ribeiro AC, Guimarães PTG, Alvarez V VH. *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, 1999. p. 25-32.

ASTM. ASTM D1762-84: Standard test method for chemical analysis of wood charcoal.

American Society for Testing and Materials.2013;84: 1–2.

Bashan, Y., de Bashan, L.E., Prabhu, S.R., Hernandez, J.P. Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: Formulations and practical perspectives. 2014, (1998-2013). *Plant Soil* <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-013-1956-x>.

Brtnicky M, Datta R, Holatko J, Bielska L, Gusiatin Z M, Kucerik J, Hammerschmiedt T, Danish S, Radziemska M, Mravcova L, Fahad S, Kintl A, Sudoma M, Ahmed N, Pecina V. A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment. *Sci Total Environ.* 2021;796:e 148756. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148756>

Curaqueo G, Roldan A, Mutis A, Panichini M, Pérez-San Martín A, Meier S, Mella R. Effects of biochar amendment on wheat production, mycorrhizal status, soil microbial community, and properties of an Andisol in southern Chile. *Field Crops Res.* 2021;273:e108306. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108306>

DIAS, Henrique Boriolo; SENTELHAS, Paulo Cesar. Sugarcane yield gap analysis in Brazil—A multi-model approach for determining magnitudes and causes. *Science of the total environment*, v. 637, p. 1127-1136, 2018.

Döbereiner J B,aldani VLD, Baldani JI. Como isolar e identificar bactérias diazotróficas de plantas não leguminosas. Brasília, EMBRAPA-SPI e Seropédica, EMBRAPA-CNPAB, 1995. 60p.

Döbereiner J. History and new perspectives of diazotrophs in association with non-leguminous plants. *Symbiosis*, 13:1-13, 1992b.

Döbereiner J. Recent changes in concepts of plant bacteria interactions: Endophytic N₂ fixing bacteria. *Ci. Cult.*, 44:310-313, 1992a.

Domingues RR, Sánchez-Monedero MA, Spokas KA, Melo LC, Trugilho PF, Valenciano, MN, Silva, CA. Enhancing cation exchange capacity of weathered soils using biochar: Feedstock, pyrolysis conditions and addition rate. *Agronomy.* 2020;10:e824. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060824>

Domingues RR, Trugilho P F, Silva CA, Melo LCND, Melo LCA., Magriotis, ZM, Sanchez-Monedero MA. Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. *PloS one.* 2017;12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176884>

Fidel RB, Laird DA, Thompson ML, Lawrinenko M. Characterization and quantification of biochar alkalinity. *Chemosphere*. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.151>

Figueira-Galán D, Heupel S, Duelli G, Morgano MT, Stapf D, Requena N. Exploring the synergistic effects of biochar and arbuscular mycorrhizal fungi on phosphorus acquisition in tomato plants by using gene expression analyses. *Sci Total Environ*. 2023;884:e163506, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163506>

Gao S, Deluca, T, Cleveland C. Biochar additions alter phosphorus and nitrogen availability in agricultural ecosystems: A meta-analysis. *Sci Total Environ*. 2018;654. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.124>.

Gerdemann J W, Nicolson TW. Spores of mycorrhizal endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society, London*. 1963. p. 235-244.

Guillot E, Bertrand I, Rumpel C, Gomez C, Arnal D, Abadie., Hinsinger P. Spatial heterogeneity of soil quality within a Mediterranean alley cropping agroforestry system: comparison with a monocropping system. *Eur J Soil Biol*. 2021;105:e103330. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2021.103330>

Hartemink AE., Barrow NJ. Soil pH - nutrient relationships: the diagram. *Plant Soil*. 2023;486:209–215. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>

Herawati A, Syamsiyah J, Mujiyo M, Rochmادتulloh M, Susila A, Romadhon M. Mycorrhizae and a soil ameliorant on improving the characteristics of sandy soil. *ST - J Soil Sci Agroc*. 2021;18:73. <https://doi.org/10.20961/stjssa.v18i1.43697>

Hossain MZ, Bahar MM, Sarkar B, Donne SW, Ok YS, Palansooriya KN, Kirkham S, Chowdhury MB, Bolan N. Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant. *Biochar*. 2020;2:379–420. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00065-z>

Huff MD, Lee JW. Biochar-surface oxygenation with hydrogen peroxide. *J Environ Manage*. 2016;165:17–21, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.08.046>

Ippolito, J, Cui L, Kammann C, Wrage-Mönnig N, Estavillo J, Fuertes-Mendizábal T, Cayuela ML, Sigua G, Novak J, Spokas K, Borchard N. Feedstock choice, pyrolysis

temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. *Biochar*. 2020;2:421-438. 10.1007/s42773-020-00067-x.

Kern DC, Lima HP, Costa JÁ, Lima HV, Ribeiro AB, Moraes BM, Kampf N. Terras pretas: approaches to formation processes in a new paradigm. *Geoarchaeology*. 2017;32:694–706. <https://doi.org/10.1002/gea.21647>

Kuzyakov, Y; Friedel, J. K; Stahr, K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biology and Biochemistry*. 32, 1485–1498, 2000.

Lal R. Biochar and soil carbon sequestration. agricultural and environmental applications of biochar: advances and barriers. In: Guo M, He Z, Uchimiya SM. Madison, WI, Soil Science Society of America, Inc.; 2016. P.175-198.

Li. C, Bair DA, Parikh SJ. Estimating potential dust emissions from biochar amended soils under simulated tillage. *Sci Total Environ*. 2018;625:1093-1101. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.249>

[Lombardo H](#), [Arroyo-Kalin M](#), [Schmidt M](#), [Huisman H](#), [Lima HP](#), [Moraes CP](#), [Neves EG](#), [Clement CR](#), [Fonseca JA](#), [Almeida FO](#), [Alho CFB](#), [Ramsey CB](#), [Brown GG](#), [Cavallini MS](#), [Costa ML](#), [Cunha L](#), [Anjos LHC](#), [Denevan WM](#), [Fausto C](#), [Caromano CF](#), [Fontana A](#), [Franchetto B](#), [Glaser B](#), [Heckenberger MJ](#), [Hecht S](#), [Honorato V](#), [Jarosch KA](#), [Junqueira AB](#), [Kater T](#), [Tamanaha K](#), [Kuyper TW](#), [Lehmann J](#), [Madella M](#), [Maezumi SY](#), [Cascon LYM](#), [Mayle FE](#), [McKey D](#), [Moraes B](#), [Morcote-Ríos G](#), [Barbosa CAP](#), [Magalhães MP](#), [Prestes-Carneiro G](#), [Pugliese F](#), [Pupim FN](#), [Raczka MG](#), [Py-Daniel AR](#), [Riris P](#), [Rocha BC](#), [Rodrigues L](#), [Rostain S](#), [Macedo RS](#), [Shock MP](#), [Sprafke T](#), [Bassi FS](#), [Valle R](#), [Vidal-Torrado P](#), [Villagrán XS](#), [Watling J](#), [Weber SL](#), [Teixeira WG](#). Evidence confirms an anthropic origin of Amazonian Dark Earths. *Nat Commun*. 2022;13:e3444. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31064-2>.

Lu HL, Li KW, Nkoh JN, He X, Hong ZN, Xu, RK. Effects of the increases in soil pH and pH buffering capacity induced by crop residue biochars on available Cd contents in acidic paddy soils. *Chemosphere*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134674>.

Maroušek J, Vochozka M, Plachý J, Zak J. Glory and misery of biochar. *Clean Techn Environ Policy* . 2017;19:311–317. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1284-y>

Nessa A, Bai Sh, Wang D, Karim Z, Omidvar N, Zhan J, Xu Z. Soil nitrification and nitrogen mineralization responded non-linearly to the addition of wood biochar produced under different pyrolysis temperatures. *J Soils Sediments*. 2021;21:3813–3824. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-03077-9>

Oladele SO, Ojo J, Curaqueo G, Ajayi AE. Does pyrolysis temperature determine soil phosphorus bioavailability and uptake on peri-urban cropland amended with poultry litter biochar? *Biomass Conv Bioref*. 2022;12:1-14. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03505-x>

Pokovai K, Tóth E, Horel Á. Growth and Photosynthetic Response of *Capsicum annum* L. in Biochar Amended Soil. *Appl. Sci*. 2020;10:e4111. <https://doi.org/10.3390/app10124111>

R Development Core Team, R: A language and environment for statistical computing, reference index version 4.2.1, 2022.

Rajkovich S, Enders A, Hanley K, Hyland C, Zimmerman AR, Lehmann J. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biol Fertil Soils.*, 2012;48:271–284. <https://doi.org/10.1007/s00374-011-0624-7>

Reis Junior FBD, Silva LGD, Reis VM, Döbereiner J. Ocorrência de bactérias diazotróficas em diferentes genótipos de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 2000, 35(5), 985–994.

Sampaio R A, Fernandes LA. Aspectos geológicos e pedológicos dos solos do município de Montes Claros - MG. *Cad Ciênc Agrár*. 2021;13:1-18. <https://doi.org/10.35699/2447-6218.2021.33964>

Saranya K, Kumutha K, Krishnan P, Santhana. Influence of biochar and *Azospirillum* application on the growth of maize. *Madras Agricultural Journal*, 2011, vol. 98, no apr-jun, p. 1.

Silva LCR, Correa RS, Wright JL, Bomfim B, Hendricks L, Gavin DG, Santos RV. A new hypothesis for the origin of Amazonian Dark Earths. *Nat Commun*.2021;12:e127. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20184-2>

Šimansky V. Effects of biochar and biochar with nitrogen on soil organic matter and soil structure in haplic Luvisol. *Acta Fytotech Zootech*. 2016;19:129–138. <https://doi.org/10.15414/afz.2016.19.04.129-138>

Sun Q, Meng J, Lan Y, Shi G, Yang X, Cao D, Chen W, Han X. Long-term effects of biochar amendment on soil aggregate stability and biological binding agents in brown earth. *Catena*. 2021;205:e105460. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105460>.

Tao, S., Wu, Z., He, X., Ye, B.C., Li, C. Characterization of biochar prepared from cotton stalks as efficient inoculum carriers for *Bacillus subtilis* SL-13. *BioResources*. 2018. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.13.1.1773-1786>.

Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Teixeira WG. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev e ampl. Brasília, DF: Embrapa; 2017.

Torres WGA, Colen F, Pandey SD, Frazao LA, Sampaio RA, Fernandes LA. Phosphorus availability in soil amended with biochar from rice rusk and cattle manure and cultivated with common bean. *Ciênc Agrotec*. 2020;44: e014620. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202044014620>

USEPA. United States Environmental Protection Agency - USEPA. Method 3051 - Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. Washington, DC: 1994.

Wang Y, Xiao X, Chen B. Biochar impacts on soil silicon dissolution kinetics and their interaction mechanisms. *Sci Rep*. 2018;8:1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26396-3>

Wright SF, Franke-Snyder M, Morton JB, Upadhyaya A. Time-course study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots. *Plant soil*. 1996; 181:193-203. <https://www.jstor.org/stable/42946484>

Ye S, Zeng G, Wu H, Liang J, Zhang C, Dai J, Xiong W, Song B, Wu S, Yu J. The effects of activated biochar addition on remediation efficiency of co-composting with contaminated wetland soil. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019;140:278–285. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.004>.

Zhang H, Tu YJ, Duan YP, Liu J, Zhi W, Tang Y, Xiao LS, Meng L. Production of biochar from waste sludge/leaf for fast and efficient removal of diclofenac. *J Mol Liq*. 2020;299:112193. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.112193>

Zhang J, Zhang X, Sun H, Wang C, Zhou, S. Carbon sequestration and nutrients improvement mediated by biochar in a 3-year vegetable rotation system. *J Soils Sediments*. 2022;22, 1385–1396. <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03175-2>

Zhao Y, Li X, Li Y, Bao H, Xing J, Zhu Y, Nan J, Xu G. Biochar Acts as an Emerging Soil Amendment and Its Potential Ecological Risks: A Review. *Energies*. 2023; 16:e410. <https://doi.org/10.3390/en16010410>

3.2 ARTIGO 2 - Fertilizante organomineral à base de biocarvão para produção de mudas de cana-de-açúcar

RESUMO

A utilização de fertilizantes organominerais de liberação lenta contribui para o aumento da eficiência agrônômica dos adubos, assim como para o aumento da produtividade das culturas e a redução dos impactos ambientais. O objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades do solo, o crescimento e a nutrição de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar adubadas com fertilizantes organominerais granulados, produzidos a partir de biocarvão. Foram conduzidos, simultaneamente, dois experimentos por um período de 60 dias, em casa-de-vegetação. No experimento I, em vasos de 0,5 dm³, foi incubado o solo misturado com diferentes fertilizantes organominerais (tratamentos). O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado com cinco tratamentos e cinco repetições. Os tratamentos foram: Controle – sem fertilizante (C), biocarvão (B), adubação mineral com NPK (M), biocarvão com adubação mineral NPK (BM), organomineral produzido a partir de biocarvão e fertilizante mineral NPK (OM). No experimento II, conduzido da mesma forma que o experimento I foram produzidas mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). Os resultados obtidos permitiram identificar que os tratamentos M e BM acidificaram o solo, enquanto o tratamento OM apresentou efeito intermediário sobre a acidez do solo quando comparado aos tratamentos C e M. A liberação dos nutrientes dos tratamentos M e BM foi rápida, enquanto a liberação dos nutrientes pelo tratamento OM foi relativamente lenta. O maior acúmulo de nutrientes na parte aérea das plantas de cana-de-açúcar apresentou-se nos tratamentos M e BM, seguido do OM, C e B, nessa ordem. Independentemente dos tratamentos, os dois macronutrientes acumulados em maiores quantidades pelas plantas foram nitrogênio e potássio, enquanto os micronutrientes foram ferro e manganês. Conclui-se que OM pode oferecer benefícios significativos para a nutrição e crescimento de mudas de cana-de-açúcar, equilibrando a liberação de nutrientes e a acidez do solo. Desse modo, representa uma opção sustentável para aumentar a produtividade agrícola, reduzir o impacto ambiental, e preservar a saúde do solo.

Palavras-chave: *Saccharum officinarum* L., biochar de eucalipto, mudas pré-brotadas, fertilidade do solo, nutrição de plantas.

Biochar-based organomineral fertilizer for the production of sugarcane seedlings

ABSTRACT

The use of slow-release organomineral fertilizers contributes to increasing the agronomic efficiency of fertilizers, as well as the increasing crop productivity and reducing environmental impacts. The objective of this work was to evaluate the soil properties, growth and nutrition of pre-sprouted sugarcane seedlings fertilized with granulated organomineral fertilizers, produced from biochar. Two experiments were conducted simultaneously for a period of 60 days, in a greenhouse. In experiment I, in 0.5 dm³ pots, it was incubated the soil mixed with different organomineral fertilizers (treatments). The experiment was carried out in a completely randomized design with five treatments and five replications. The treatments were: Control – without fertilizer (C), biochar (B), mineral fertilizer with NPK (M), biochar with NPK mineral fertilizer (BM), organomineral produced from biochar and NPK mineral fertilizer (OM). In experiment II, carried out in the same way as experiment I, pre-sprouted sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) seedlings were produced. The results obtained allowed us to identify that the M and BM treatments acidified the soil, while the OM treatment presented an intermediate effect on soil acidity when compared to the C and M treatments. The release of nutrients from the M and BM treatments was rapid, while the release of nutrients by the OM treatment was relatively slow. The greatest accumulation of nutrients in the aerial part of sugarcane plants presented in treatments M and BM, followed by OM, C and B, in that order. Regardless of the treatments, the two macronutrients accumulated in greatest quantities by plants were nitrogen and potassium, while the micronutrients were iron and manganese. It is concluded that OM can offer significant benefits for the nutrition and growth of sugarcane seedlings, balancing the release of nutrients and soil acidity. Therefore, it represents a sustainable option to increase agricultural productivity, reduce environmental impact, and preserve soil health.

Keywords: *Saccharum officinarum* L., *Eucalyptus* charcoal, pre-sprouted seedlings, soil fertility, plant nutrition.

INTRODUÇÃO

O esgotamento dos recursos naturais e a baixa eficiência agrônômica dos fertilizantes devido ao manejo inadequado das adubações, tem contribuído para pesquisa com aproveitamentos de resíduos na agricultura e para o desenvolvimento de tecnologias para aumentar o aproveitamento dos nutrientes pelas plantas, provenientes dos fertilizantes. A manutenção adequada da fertilidade do solo é fundamental, tanto para ganhos em produtividade das culturas, quanto para a qualidade dos produtos agrícolas. A nível global, enormes quantidades, superiores a 50%, dos nutrientes presentes nos fertilizantes são perdidos anualmente ou deixam de ser aproveitados pelas culturas, por meio de lixiviação, fotodegradação, hidrólise química e decomposição microbiana (RAHMAN *et al.*, 2021). Além do comprometimento do futuro da produção agrícola mundial pela escassez ou pelo aumento dos custos dos fertilizantes, as perdas de nutrientes causam impactos ambientais negativos aos ecossistemas.

Diante dos desafios, tecnologias de aproveitamento de resíduos na agricultura, assim como a produção de fertilizantes mais eficientes devem ser incentivados. Em relação aos resíduos orgânicos como fonte de nutrientes e condicionadores das propriedades do solo, tanto no Brasil quanto em outros países, há grande disponibilidade de biomassa com potencial para a produção de fertilizantes (NÓBREGA., 2011). Uma alternativa tecnológica é a conversão térmica da biomassa em biocarvão, pelo processo de pirólise. Os biocarvões apresentam propriedades físicas e químicas que podem variar consideravelmente, dependendo do material utilizado na produção e das condições específicas do processo de pirólise (CHI *et al.*, 2021; CHA *et al.*, 2016).

De modo geral, os biocarvões se decompõem em uma taxa de 10 a 100 vezes mais lento do que a matéria orgânica não pirolisada (PAUSTIAN *et al.*, 2016). A aplicação de biocarvão ao solo oferece uma série de benefícios, como a redução da emissão dos gases de efeito estufa para a atmosfera decorrentes do sequestro do dióxido de carbono no solo, melhorias nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, estimulando o crescimento das plantas e a maximização da eficiência dos fertilizantes minerais (STPOPA *et al.*, 2023; EL-NAGGAR *et al.*, 2019; LEHMANN; JOSEPH, 2015).

Em relação aos fertilizantes, nos últimos anos tem-se verificado significativos progressos na pesquisa e no desenvolvimento de processos tecnológicos de produção de

fertilizantes de liberação lenta, gradual ou controlada, (AZEEM *et al.*, 2014; IRFAN *et al.*, 2018). Esses avanços têm possibilitado não apenas a otimização da eficiência agrônômica dos fertilizantes, mas também, em melhorias relacionadas ao manejo das culturas, devido à redução na frequência das operações de adubação (AZEEM *et al.*, 2014).

Algumas tecnologias para a produção de fertilizantes de liberação lenta combinam matéria primas de origem orgânica e de origem mineral. Dependendo das características dos fertilizantes produzidos são denominados organominerais. Os fertilizantes organominerais têm ganhado destaque como uma alternativa promissora para melhorar as propriedades do solo e aumentar a produtividade das culturas, principalmente pela liberação gradual de nutrientes. Fachini *et al.* (2022) trabalhando com fertilizantes organominerais peletizados e granulados, a base de biocarvões enriquecidos com potássio, verificaram que os fertilizantes organominerais proporcionaram uma liberação mais lenta de K e outros nutrientes às plantas. Num outro estudo, Banik *et al.* (2023) observaram liberação mais lenta de nitrogênio e maior absorção desse elemento pelas plantas quando utilizaram fertilizantes organominerais produzidos a partir de biocarvões enriquecidos com nitrogênio.

Quanto ao consumo de fertilizantes, a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) se destaca por ser uma das culturas mais importantes em termos econômicos e agrícolas, principalmente em regiões tropicais e subtropicais do mundo. No Brasil, grandes áreas são cultivadas com cana-de-açúcar para a produção de açúcar e etanol, o que consome anualmente, significativas quantidades de fertilizantes, sendo a maior parte exportados de outros continentes. Com o objetivo de minimizar os custos e aumentar a produtividade da cana-de-açúcar, novas tecnologias têm sido incentivadas e implementadas, desde os estágios iniciais de produção, na fase de mudas. O método de propagação de cana-de-açúcar por meio de mudas pré-brotadas, desenvolvido por pesquisadores do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), permite uma rápida produção de cana-de-açúcar, aumento do vigor das plantas, qualidade fitossanitária e uniformidade de plantio e redução de até 90% no número de colmos necessários por área (LANDELL., 2012; TEIXEIRA *et al.*, 2020).

Diante do exposto, considerando a necessidade de aproveitamento de resíduos na agricultura, da produção de fertilizantes mais eficientes e da expansão dos cultivos da cana-de-açúcar para a produção de energia, a nossa hipótese é que a utilização de fertilizantes organominerais melhora as propriedades do solo, o crescimento e a nutrição de mudas pré-

brotadas de cana-de-açúcar. Desse modo, este estudo teve como objetivo avaliar as propriedades do solo, o crescimento e nutrição de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar adubadas com fertilizantes organominerais granulados produzidos a partir de biocarvão.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no período de abril a junho de 2023, 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 realizado em vasos de 0,5 dm³ de capacidade, em casa de vegetação, em delineamento inteiramente casualizado, com cinco tratamentos e cinco repetições. O solo utilizado foi coletado na camada superficial de uma área do Bioma Cerrado, classificado como Latossolo Vermelho Amarelo (Tabela 1). Os atributos químicos e físicos foram determinados conforme Teixeira *et al.*, (2017).

Tabela 1. Atributos químicos e físicos do Latossolo Vermelho Amarelo utilizado no experimento.

pH-H ₂ O	P	K	P-rem	Ca	Mg	Al
	----- mg dm ⁻³ -----		--mg L ⁻¹ --	----- cmol _c dm ⁻³ -----		
5,0	1,8	17,0	28	0,25	0,12	0,42
SB	T	V	COS	Argila	Silte	Areia
----- cmol _c dm ⁻³ -----	--- % ---		----- g kg ⁻¹ -----			
0,41	3,25	12,7	10,6	120	100	780

P: fósforo disponível método resina, P-rem: fósforo remanescente, K: potássio, Ca: cálcio, Mg: magnésio, Al: alumínio, SB: soma de bases, T: ctc potencial, V: saturação de bases, COS: carbono orgânico do solo

Os tratamentos foram controle (C), adubação mineral (M), biocarvão (B), biocarvão com adubação mineral (BM) e organomineral (OM). Em todos os tratamentos foram aplicados 200 mg dm⁻³ de cálcio na forma de carbonato de cálcio (CaCO₃) e 50 mg dm⁻³ de magnésio na forma de carbonato de magnésio (MgCO₃).

A adubação mineral (M), foi realizada com fontes minerais puras para análise e constituiu da aplicação de 300 mg dm⁻³ de fósforo e 135,6635 mg dm⁻³ de nitrogênio, na forma de fosfato de amônio monobásico (1,1141 g dm⁻³ de (NH₄) H₂PO₄), 200 mg de potássio e 50 mg dm⁻³ de enxofre na forma de sulfato de potássio anidro (0,2717 g dm⁻³ de K₂SO₄) e

cloreto de potássio ($0,1489 \text{ g dm}^{-3}$ de KCl). A soma dos fertilizantes minerais ($1,1141 \text{ g dm}^{-3}$ de $(\text{NH}_4) \text{H}_2\text{PO}_4$ + $0,2717 \text{ g dm}^{-3}$ de K_2SO_4 , + $0,1489 \text{ g dm}^{-3}$ de KCl) foi de $1,5347 \text{ g dm}^{-3}$ de solo (Tabela 2).

Tabela 2. Quantidades de corretivos da acidez do solo, biocarvão e fontes minerais de nutrientes adicionadas aos tratamentos controle (C), biocarvão (B), fontes minerais de nutrientes (M), biocarvão e fontes minerais (BM), e organomineral (OM): granulado de BM.

Tratamentos	Corretivo da acidez	Fontes minerais	Biocarvão
C	$0,5 \text{ g dm}^{-3}$ CaCO_3 e $0,175 \text{ g dm}^{-3}$ de MgCO_3	-	-
B	$0,5 \text{ g dm}^{-3}$ CaCO_3 e $0,175 \text{ g dm}^{-3}$ de MgCO_3	-	$1,5347 \text{ g dm}^{-3}$ de biocarvão
M	$0,5 \text{ g dm}^{-3}$ CaCO_3 e $0,175 \text{ g dm}^{-3}$ de MgCO_3	$1,1141 \text{ g dm}^{-3}$ de $(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$; $0,2717 \text{ g dm}^{-3}$ de K_2SO_4 e $0,1489 \text{ g dm}^{-3}$ de KCl	-
BM	$0,5 \text{ g dm}^{-3}$ CaCO_3 e $0,175 \text{ g dm}^{-3}$ de MgCO_3	$1,1141 \text{ g dm}^{-3}$ de $(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$; $0,2717 \text{ g dm}^{-3}$ de K_2SO_4 e $0,1489 \text{ g dm}^{-3}$ de KCl	$1,5347 \text{ g dm}^{-3}$ de biocarvão
OM	$0,5 \text{ g dm}^{-3}$ CaCO_3 e $0,175 \text{ g dm}^{-3}$ de MgCO_3	$1,1141 \text{ g dm}^{-3}$ de $(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$; $0,2717 \text{ g dm}^{-3}$ de K_2SO_4 e $0,1489 \text{ g dm}^{-3}$ de KCl	$1,5347 \text{ g dm}^{-3}$ de biocarvão

Nos tratamentos com biocarvão (B), foram adicionados $1,5347 \text{ g dm}^{-3}$ de um biocarvão produzido a partir de madeira de eucalipto, em forno tipo fornalha com temperatura de pirólise de $350 \text{ }^\circ\text{C}$, e tempo de residência entre 48 a 72 horas (Tabela 3). A dose do biocarvão corresponde à soma do fosfato de amônio monobásico, sulfato de potássio anidro e cloreto de potássio utilizados no tratamento com adubação mineral. A quantidade de biocarvão ($1,5347 \text{ g dm}^{-3}$ de solo) corresponde a incorporação de $3069,437 \text{ kg ha}^{-1}$ na camada de 0 a 20 cm de profundidade.

No tratamento fertilizante mineral com biocarvão (BM), foram adicionadas as mesmas quantidades de fosfato de amônio monobásico, sulfato de potássio anidro e cloreto de potássio do tratamento com fertilizante mineral e a mesma quantidade de biocarvão do tratamento com biocarvão.

Tabela 3. Caracterização química e física do biocarvão de resíduos de madeira de eucalipto.

Rend.	Ds	Cinzas	H	O	C	N	H/C	O/C	C/N	
%	g cm ⁻³		-----		%	-----		-----	Relação atômica -----	
31,4	0,45	10	2,46	22,6	56,7	0,50	0,04	0,4	113,4	
P	Ca	Mg	K	S	CTC	PN	NI	pH	CE	
-----		g kg ⁻¹	-----		cmol _c kg ⁻¹	mL HCl/ud.	pH	mg I ₂ g ⁻¹	-	dS m ⁻¹
8,00	13,8	12,4	1,0	2,60	9,5	0,64	204	6,10	0,36	
Cu	Zn	Fe	Mn	Si	Ni	Pb	Cd	C fixado		
-----				mg kg ⁻¹	-----				%	
51,5	270,0	1,43	56,9	798,6	5,20	3,03	4,50	69,5		

Rend = rendimento; Ds = densidade; PN = poder de neutralização; NI = número de iodo.

No tratamento organomineral (OM), foram adicionados grânulos de biocarvão enriquecidos com os fertilizantes minerais. O organomineral foi produzido a partir da mistura dos adubos minerais e do biocarvão, na proporção 1:1, respectivamente, de modo a aplicar as mesmas quantidades de fosfato de amônio monobásico, sulfato de potássio anidro e cloreto de potássio do tratamento com fertilizante mineral e a mesma quantidade de biocarvão do tratamento com biocarvão, na forma granulada. O aglutinante utilizado para a produção dos grânulos foi o extrato pirolenhoso, resultante da produção do biocarvão.

O experimento foi conduzido em duplicata, sendo 25 vasos, com os respectivos tratamentos, para as análises químicas do solo (experimento de incubação) e 25 vasos para a produção de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (experimento com cana-de-açúcar). No experimento de incubação do solo, a umidade do solo foi mantida próxima a capacidade de campo por meio da adição de água purificada por osmose reversa. Para a análise química dos solos incubados, após 60 dias de incubação, o solo de cada vaso foi seco ao ar e passado em peneira com malha de 2 mm, obtendo-se assim a terra fina seca ao ar (TFSA). As análises foram realizadas conforme Teixeira *et al.*, (2017).

No experimento com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) foram produzidas mudas a partir de gemas. Os colmos de cana-de-açúcar com as gemas foram cortados uniformemente a 2,5 cm de comprimento e plantadas diretamente nos vasos na posição horizontal, a 2,5 cm de profundidade. Durante todo o período experimental a umidade do solo foi mantida próxima a capacidade de campo por meio de irrigação com água purificada por osmose reversa.

As avaliações da emergência de plântula foram realizadas diariamente, a partir do plantio. Foram consideradas emergidas aquelas que apresentaram ruptura da superfície do solo. O índice de velocidade de germinação, conforme descrito por Maguire (1962), e aqui chamado de índice de velocidade de brotação (IVB), foi calculado pela seguinte 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.

Para a avaliação de massa seca de parte aérea (MSPA), as mudas foram retiradas dos vasos e seccionadas na altura do colo, separando as partes aéreas das raízes, e secas em estufa de circulação forçada de ar a 60°C, até a obtenção de massa constante. Após secas, as amostras foram pesadas para a determinação da MSPA e, em seguida foram analisadas quanto aos teores de nutrientes. O acúmulo de nutrientes foi calculado pela multiplicação do teor de nutrientes e MSPA.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (teste F), e as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). As análises estatísticas foram realizadas usando o software R versão 4.2.1 (R Development Core Team, 2022).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Propriedades do solo

De acordo com as análises químicas do solo, verificaram-se diferenças entre os tratamentos - controle (C), Biocarvão (B), fontes minerais de nutrientes (M), Biocarvão e fontes minerais de nutrientes (BM) e organomineral (OM) (Tabela 4). Os menores valores de pH (acidez ativa) foram obtidos nos tratamentos com fontes minerais de nutrientes. Nesses tratamentos, a ordem decrescente de pH foi: OM (6,08), BM (5,02) e M (4,70). Por outro lado, não houve diferença entre os tratamentos C (6,78) e B (6,84) (Tabela 4). De acordo com as classes de interpretação para a acidez ativa do solo (ALVAREZ V. *et al*, 1999),

os tratamentos C e B apresentaram acidez fraca, os tratamentos OM e BM, acidez média e o tratamento M acidez elevada.

Tabela 4: Atributos químicos do solo após 60 dias de incubação nos tratamentos controle (C), biocarvão (B), fontes minerais de nutrientes (M), biocarvão e fontes minerais (BM) e organomineral (OM).

Variável	CV	Tratamentos				
		C	B	M	BM	OM
pH	1,5	6,78a	6,84a	4,7d	5,02c	6,08b
P (mg dm ⁻³)	9,92	0,8c	1,2c	157,24a	159,06a	58,82b
P-rem (mg L ⁻¹)	2,11	36,36d	38,24c	47,56ab	48,86a	46,00b
K (mg dm ⁻³)	22,1	10,7c	14,98c	132,68ab	154,08a	102,72b
Ca (cmol _c m ⁻³)	6,54	1,35bc	1,36bc	1,43b	1,64a	1,26c
Mg (cmol _c dm ⁻³)	15,3	0,45b	0,43b	0,62a	0,63a	0,50ab
Al (cmol _c dm ⁻³)	22,76	0,00c	0,00c	0,12a	0,072b	0,00c
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	15,32	0,78b	0,82b	2,18a	1,99a	1,12b
SB (cmol _c dm ⁻³)	4,24	1,84d	1,82d	2,40b	2,66a	2,02c
t (cmol _c dm ⁻³)	4,15	1,84d	1,82d	2,52b	2,74a	2,02c
m %	22,23	0,00c	0,00c	4,84a	2,62b	0,00c
T (cmol _c dm ⁻³)	6,92	2,62c	2,64c	4,58a	4,66a	3,15b
V %	5,25	70,17a	68,99a	52,75b	57,40b	64,49a
COS (dag kg ⁻¹)	11,28	0,55a	0,43b	0,40b	0,43ab	0,49ab

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Corroborando com os valores de acidez ativa, o tratamento M apresentou os maiores valores de acidez potencial trocável (Al) e de acidez potencial (H+Al), seguido pelo tratamento BM, enquanto os menores valores foram obtidos nos tratamentos C e B (Tabela 4).

Embora o corretivo da acidez tenha aumentado o pH do solo, como verificado nos tratamentos C e B, nos tratamentos com fertilizantes minerais ocorreu uma redução do pH (Tabela 4). O pH do solo é um dos fatores que mais afeta a disponibilidade de nutrientes no solo e sensível as práticas de manejo (SPARKS, 2003), como por exemplo, a utilização dos fertilizantes minerais. Nossa hipótese é que os fertilizantes químicos utilizados ((NH₄)H₂PO₄, K₂SO₄ e KCl), durante a solubilização no solo aumentaram a acidez. Ainda de acordo com a nossa hipótese, apesar de no tratamento OM ter fertilizantes minerais, ocorreu uma solubilização mais lenta dos compostos químicos devido as interações com a matriz orgânica. A nitrificação do amônio do fosfato de amônio ((NH₄)H₂PO₄) e a hidrólise do sulfato de

potássio (K_2SO_4) e do cloreto de potássio (KCl) são responsáveis pela maior acidificação do solo nos tratamentos com esses fertilizantes.

A nitrificação é a transformação do amônio (NH_4^+) em nitrato (NO_3^-) pelos microrganismos e como consequência acidifica o solo ($NH_4^+ + 2O_2 \rightarrow NO_3^- + H^+$). Assim como os fertilizantes nitrogenados orgânicos e amoniacais, os biocarvões apresentam nitrogênio com potencial para nitrificação, além de estimular a nitrificação, uma vez que favorecem a atividades dos microrganismos do solo (DING, 2023). No entanto, no balanço, as bases presentes nos biocarvões contribuem para o aumento do pH do solo (DOMINGUES et al., 2017).

Os fertilizantes sulfato de potássio (K_2SO_4) e cloreto de potássio (KCl), também podem acidificar do solo. Sais solúveis com caráter ácido ao reagirem com água dissociam-se totalmente, promovendo a hidrólise do cátion e produz íons de H_3O^+ (aq), tornando a solução ácida ($pH < 7$), uma vez que o K^+ (aq) em solução aquosa se comporta como ácido de Lewis (WULFSBERG, 1987), espécie capaz de receber par de elétrons. O cátion potássio (K^+) pode deslocar hidrogênio dos coloides do solo e causar um aumento da acidez livre (CATANI, 1954).

Os ânions sulfato (SO_4^{2-}) e cloreto (Cl^-) em soluções aquosas tendem a permanecer inalterados, uma vez que originalmente são oriundos ácidos fortes, ácido sulfúrico (H_2SO_4) e ácido clorídrico (HCl), respectivamente (WULFSBERG, 1987). O enxofre do sulfato de potássio também pode contribuir para reduzir o pH pela formação de ácido sulfúrico, por meio dos microrganismos do solo, como *Thiobacillus* (STAMFORD et al., 2002) e *Acidithiobacillus* (STAMFORD et al., 2007).

Os resultados referentes a acidez do solo indicam que o fosfato de amônio, acidificou o solo, provavelmente pela transformação do amônio em nitrato ($NH_4^+ \rightarrow NO_3^- + 2H^+$) decorrente do processo de nitrificação. Por outro lado, os biocarvões podem reduzir a nitrificação pela adsorção do amônio (NH_4^+) em sua matriz (LIU et al., 2019).

Para o fósforo disponível, verificou diferenças entre os tratamentos, sendo a ordem decrescente dos valores $BM=M > OM > B=C$ (Tabela 4). De acordo com as classes de interpretação da disponibilidade de fósforo, os valores obtidos nos tratamentos que receberam fertilizante mineral com fósforo (M, BM e OM) foram classificados como muito altos, embora os valores obtidos nos tratamentos M e BM tenham sido aproximadamente três

vezes maiores que no tratamento OM. Já nos tratamentos, os valores foram classificados como muito baixos. Em relação ao fósforo remanescente, que representa um ponto da curva de adsorção de fósforo pelo solo, observou a seguinte ordem decrescente de valores: $BM=M > OM > B > C$ (Tabela 1). A adição de fósforo pelo fertilizante mineral contribui para o bloqueio dos sítios de adsorção de fósforo das argilas, diminuindo a capacidade do solo em fixar fósforo. Da mesma forma o biocarvão pode diminuir a fixação de fósforo pelo solo (TORRES *et al.*, 2020)

De acordo com os resultados obtidos, os baixos valores de P disponível nos tratamentos C e B são explicados pela não adição de fontes minerais solúveis. Por outro, os maiores valores nos tratamentos BM e M foram devidos à adição do fosfato de amônio. Importante destacar os teores de fósforo no tratamento OM em relação aos demais tratamentos. Nossa hipótese é que ocorreu uma solubilização mais lenta do fósforo do fosfato de amônio devido a maior interação com as partículas de biocarvão.

Embora no presente estudo o biocarvão isoladamente não tenha aumentado significativamente os teores de fósforo, os biocarvões podem alterar tanto os valores de fósforo disponível quanto a capacidade de adsorção de fósforo pelo solo (P remanescente), uma vez que, podem bloquear os sítios de adsorção de P das argilas por meio da adição de ligantes orgânicos e aumento do pH do solo (SILVA *et al.*, 2017). Também a sílica solúvel presentes nas cinzas do biocarvão pode contribuir para redução da fixação dos íons fosfatos pelas argilas do solo (TORRES *et al.*, 2020). No presente estudo, o biocarvão utilizado apresentou 10% de cinzas, 798,6 mg kg⁻¹ de sílica e pH próximo a neutralidade (Tabela 3). Além da sílica, as cinzas são ricas em bases que contribuem para a correção da acidez do solo (SILVA *et al.*, 2017). Estudos similares de incubação de fósforo com biocarvões verificaram o aumento significativo dos teores de fósforo disponível do solo, evidenciando efeitos sinérgicos entre os biocarvões e as adubações fosfatadas (SAFRAZ *et al.*, 2024, NAEEM *et al.*, 2017; NELSON *et al.*, 2011).

Os teores de potássio trocável diferiram entre os tratamentos, sendo os maiores valores observados nos tratamentos com fertilizante mineral, na seguinte ordem decrescente: $BM=M > OM > B=C$ (Tabela 4). De acordo Alvarez V. *et al.* (1999), os teores de potássio foram classificados como muito bom para BM e M, bom para OM e muito baixo para C e B. Os resultados obtidos são explicados pela adição de potássio, na forma de cloreto de potássio

e sulfato de potássio, nos tratamentos com fertilizante mineral. Entretanto, observou-se que o teor de potássio no tratamento OM foi 22,6% menor que o obtido no tratamento M (Tabela 4). O menor teor no tratamento OM, semelhantemente ao discutido para o fósforo disponível, pode estar relacionado à disponibilização mais lenta do potássio das fontes minerais, devido à maior interação entre esse elemento e as partículas de biocarvão. Corroborando com o presente estudo, outros autores também verificaram liberação mais lenta de potássio de fertilizantes organominerais a base de biocarvões (FACHINI *et al.*, 2022; NDOUNG *et al.*, 2023).

Para cálcio e magnésio, embora tenha sido aplicado esses nutrientes em todos os tratamentos na forma de carbonato de cálcio e carbonato de magnésio, houve diferença entre os tratamentos (Tabela 4). No entanto, enquanto às classes de interpretação para fins de avaliação da fertilidade do solo (ALVAREZ V. *et al.*, 1999), independentemente do tratamento, os teores de cálcio foram classificados como médio e os de magnésio variaram de médio a baixo (Tabela 4). Importante destacar que em todos os tratamentos, os teores obtidos foram analisados após a incubação do solo com os corretivos de acidez, os teores foram maiores do que o do solo original, C (Tabela 1).

Para os valores de soma de bases (SB) e capacidade de troca de cátions (CTC), tanto para a CTC efetiva (t) quanto para a CTC potencial (T), os maiores valores foram observados nos tratamentos com fertilizante mineral (Tabela 4). Esses resultados são explicados pelos maiores valores de potássio nos tratamentos com fertilizante mineral, uma vez que para calcular os valores de soma de bases e de CTC são considerados os valores de potássio, cálcio e magnésio. Por outro lado, os valores de saturação por bases (V), não seguiram a mesma tendência da SB e CTC, já que não aumentaram na mesma proporção com a aplicação do fertilizante mineral, uma vez que, apesar dos fertilizantes minerais aumentarem os teores de potássio, aumentou também a acidez potencial (H+Al), como discutido anteriormente. Adicionalmente, o biocarvão tem potencial para reduzir a acidez do solo, como discutido anteriormente, devido à presença sais inorgânicos, como carbonato de cálcio e carbonato de potássio nas cinzas (SILVA *et al.*, 2017; DOMINGUES *et al.*, 2020).

Embora no presente trabalho, em função da pequena quantidade de biocarvão adicionada, não ter ocorrido diferenças significativas entre os tratamentos C e B quanto a CTC (Tabela 4), estudos relatam que quando adicionados em maiores quantidades, os

biocarvões aumentam significativamente a CTC do solo (ANDRADE et al., 2015). Além da quantidade, os diferentes biocarvões podem ter efeitos variáveis na CTC do solo, uma vez que tanto a matéria-prima quanto a temperatura pirólise influencia na CTC dos biocarvões (SINGH *et al.*, 2010; SONG; GUO, 2012).

Em relação ao carbono orgânico do solo (COS), os maiores valores foram obtidos no tratamento C (Tabela 4). Esses resultados podem ser explicados pelo favorecimento do carbono orgânico do solo pela adição de fertilizante mineral e do biocarvão. Embora o biocarvão seja uma fonte de carbono mais estável, pode contribuir para a atividade biológica do solo e, conseqüentemente para a maior taxa de mineralização do COS. Essa possível hipótese pode ser explicada pelo efeito *priming* decorrente da adição de biocarvão ao solo. O efeito *priming* é decorrente de alterações de curto prazo sobre o carbono orgânico do solo (KUZYAKOV *et al.*, 2000).

O efeito *priming* positivo refere-se à aceleração da mineralização do COS, enquanto o efeito *priming* negativo está associado ao retardamento da mineralização do COS quando se adiciona novas fontes de carbono ao solo. Zhang *et al.* (2023), em experimento de incubação por 80 dias de solo sem e com adição de nitrogênio, fósforo e biocarvão verificaram aumento significativo da taxa de mineralização do COS nos tratamentos com N e P (*priming* positivo), enquanto que nos tratamentos com biocarvão a taxa de mineralização foi menor. Da mesma forma, Kalu *et al.* (2024) observaram que o biocarvão (30 Mg ha⁻¹) reduziu a mineralização do COS em 12–15%. Segundo os autores, a adição de carbono estável pelo biocarvão de madeira, diminui a mineralização do COS (*priming* negativo), pela estabilização do carbono lábil do solo. De acordo com Bednik *et al.* (2023), os efeitos dos biocarvões sobre as emissões de gás carbônico (CO₂) estão relacionados ao tipo de biomassa utilizada. No presente estudo, o biocarvão pode ter contribuído para a aceleração da mineralização COS, efeito *priming* positivo, uma vez que, provavelmente adicionou compostos orgânicos solúveis ao solo que favorecem a mineralização do COS (KUZYAKOV *et al.*, 2000; LOPES *et al.*, 2021).

Considerando que as quantidades de nutrientes aplicadas via fontes minerais nos tratamentos M, BM e OM, a menor disponibilidade desses foi no tratamento OM. O que indica que a granulação contribuiu para uma liberação mais lenta de nutrientes. A liberação mais lenta pode aumentar a eficiência dos fertilizantes, uma vez que diminui a fixação de fósforo e a lixiviação de potássio. SANTOS JÚNIOR (2024), verificaram que no tratamento

com fertilizante organomineral peletizado, produzido a partir de biocarvão e fosfato de potássio, a liberação de fósforo e potássio foi mais lenta que nos fertilizantes não peletizados. De acordo com alguns autores (KIM *et al.*, 2014; LUO *et al.*, 2021), a adsorção de potássio na matriz do biocarvão e a formação de pontes de cátions entre a matriz do biocarvão e o fósforo explicam a liberação mais lenta de nutrientes pelos fertilizantes organominerais a base de biocarvão.

Produção de mudas de cana-de-açúcar

Em todos os tratamentos 100% das gemas brotaram, sendo que a emergência ocorreu entre o quinto e o nono dia após o plantio. A partir da contagem diária do número de gemas brotadas, estimou-se o índice de velocidade de brotação os quais foram 0,96; 0,69; 0,66; 0,71 e 0,68 para C, B, M, BM e OM, respectivamente. Apesar de todas as gemas brotarem em um intervalo de tempo relativamente pequeno, cinco a nove dias, as plantas do tratamento testemunha apresentaram maiores valores Índice de Velocidade de Brotamento (IVB), que representa a média diária de brotos emergentes.

Para o crescimento em altura, produtividade de matéria seca da parte aérea, raiz total, os maiores valores foram obtidos nos tratamentos com fertilizante mineral (Tabela 5). Esses resultados podem ser explicados pela maior quantidade de nutrientes disponibilizados pelas fontes minerais. Essa hipótese é corroborada pela maior disponibilidade de nutrientes no solo (Tabela 4) e com acúmulo de nutrientes nos tratamentos com fontes minerais (Tabela 6).

Tabela 5. Crescimento em altura e produtividade de matéria seca (MS) da parte aérea, raiz e total das mudas de cana-de-açúcar nos tratamentos controle (C), biocarvão (B), fontes minerais de nutrientes (M), biocarvão e fontes minerais (BM) e organomineral (OM).

Tratamento	Altura	MS parte aérea	MS raiz	MS Total
	----- cm -----	----- g/planta -----		
C	38,80c (55%)*	0,91c (25%)	1,63c (28%)	2,54c (27%)
B	37,60c (53%)	0,75c (21%)	1,54c (27%)	2,29c (24%)
M	71,00a (100%)	3,62a (100%)	5,78a (100%)	9,41a (100%)
BM	73,00a (103%)	3,82a (105%)	3,88ab (67%)	7,7ab (81%)
OM	58,20b (82%)	2,35b (35%)	3,06bc (53%)	5,40b (57%)
CV	8,13	14,6	32,92	23,07

*Número entre parêntese representa o crescimento relativo em relação ao tratamento com fontes minerais de nutrientes (M). Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para o tratamento OM, o crescimento em altura e a produção de matéria seca foram menores que nos tratamentos M e MB (Tabela 5). Esses resultados podem ser explicados pela liberação mais lenta dos nutrientes no tratamento OM, como discutido anteriormente. A curto prazo, a liberação mais lenta de nutrientes pelos organominerais pode ser uma desvantagem para o crescimento inicial das plantas, mas a médio e longo prazo, pode ser uma característica positiva, pois evita as perdas de potássio por lixiviação e as reações de fixação de fósforo pelo solo.

Considerando o tratamento M como referência (100%), calculou-se o crescimento relativo obtido nos demais tratamentos (Tabela 5). De acordo com o crescimento relativo, observou que a altura das plantas nos tratamentos C e B corresponderam a menos de 50% do valor de altura obtida no tratamento M. Da mesma forma, para MS da parte aérea, raiz e total, os valores obtidos corresponderam a menos de 50% dos obtidos no tratamento M (Tabela 5). Esses resultados indicam, que na fase de produção de mudas pré-brotadas, as plantas de cana-de-açúcar são muito exigentes em nutrientes. Nessa condição, a disponibilização mais lenta de nutrientes das fontes minerais nos tratamentos com biocarvão prejudicou o crescimento das mudas, uma vez que nessa fase apresentam rápido crescimento e, portanto, alta demanda por nutrientes. Cabe destacar que a combinação do biocarvão + fonte mineral (BM) mostrou uma porcentagem ligeiramente superior a referência (M) na altura e MSPA em 3 e 5% respectivamente (Tabela 5), o que sugere um possível efeito positivo do biocarvão quando combinado a fonte mineral.

O acúmulo de nutrientes na parte aérea das mudas de cana-de-açúcar diferiu entre os tratamentos (Tabela 6). De modo geral, a ordem decrescente de acúmulo de nutrientes pelos tratamentos foi: BM>M>OM>C=B (Tabela 6).

De acordo com a Tabela 7, para os macronutrientes, em todos os tratamentos, o N e o K foram os nutrientes mais acumulados pelas plantas. Destaca-se que, apenas no tratamento C, o N foi acumulado em maiores quantidades que o K. Para o micronutrientes a ordem decrescente de acúmulo foi a mesma para todos os elementos (Mn>Fe>Zn>B>Cu).

Tabela 6: Médias do acúmulo de macronutrientes e micronutrientes na parte aérea de mudas de cana-de-açúcar após 60 dias de cultivo em vaso nos tratamentos controle (C), biocarvão (B), fontes minerais de nutrientes (M), biocarvão e fontes minerais (BM) e organomineral (OM).

Nutriente	CV	Tratamento				
		C	B	M	BM	OM
N (mg planta ⁻¹)	13,54	10,64c	5,35d	36,94a	35,05a	22,7b
P (mg planta ⁻¹)	15,5	0,65d	0,65d	11,97b	16,09a	6,38c
K (mg planta ⁻¹)	15,28	6,03d	6,12d	39,99b	57,1 ^a	26,79c
Ca (mg planta ⁻¹)	17,71	6,24c	5,24c	12,29ab	15,4 ^a	10,37b
Mg (mg planta ⁻¹)	17,29	3,11c	2,48c	6,78a	7,95 ^a	4,83b
S (mg planta ⁻¹)	13,99	0,87c	0,79c	4,93b	6,61 ^a	4,53b
B (µg planta ⁻¹)	16,63	10,44c	8,63c	23,56b	32,49a	21,11b
Zn (µg planta ⁻¹)	19,15	22,69c	17,25c	39,88b	57,34a	23,46b
Fe (µg planta ⁻¹)	16,9	59,90c	41,26c	126,89b	290,51a	140,75b
Mn (µg planta ⁻¹)	14,81	90,75d	58,52d	373,42b	451,06a	208,78c
Cu (µg planta ⁻¹)	16,43	3,88c	2,86c	9,5a	11,16a	6,27b

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 7. Ordem de acúmulo de nutrientes pelas plantas de cana-de-açúcar.

	Macronutrientes						Micronutrientes				
	→ Ordem decrescente →						→ Ordem decrescente →				
C	N	Ca	K	Mg	S	P	Mn	Fe	Zn	B	Cu
B	K	N	Ca	Mg	S	P	Mn	Fe	Zn	B	Cu
M	K	N	Ca	P	Mg	S	Mn	Fe	Zn	B	Cu
BM	K	N	P	Ca	Mg	S	Mn	Fe	Zn	B	Cu
OM	K	N	Ca	P	Mg	S	Mn	Fe	Zn	B	Cu

Os resultados de acúmulo de nutrientes corroboram com os resultados obtidos para o crescimento das plantas, como discutido anteriormente. Em função da liberação mais lenta dos nutrientes das fontes minerais nos tratamentos com biocarvão, principalmente no OM, o maior crescimento e maiores acúmulos de nutrientes foram obtidos no tratamento M. Em função do rápido crescimento e da alta exigência por nutrientes, fertilizantes organominerais a base de biocarvão apresentam desvantagens em relação a adubação exclusiva com fertilizantes minerais solúveis. No entanto, para o cultivo em campo, os fertilizantes organominerais granulados a base de biocarvão podem apresentar vantagens para o

armazenamento, aplicação e eficiência das fontes minerais ou mesmo da aplicação de biocarvões isoladamente.

Considerando que a cana-de-açúcar é uma cultura perene ou semi-perene, a utilização de fertilizantes de liberação lenta teria maior eficiência que os fertilizantes minerais solúveis. Os fertilizantes de liberação lenta em culturas de ciclo longo proporcionam melhores condições de absorção dos nutrientes pelas plantas, criando uma vantagem competitiva no crescimento das plantas, uma vez que ao retardar a disponibilização de nutrientes reduz suas perdas para o ambiente e aumenta o sincronismo com as quantidades demandadas pelas plantas (SERRANO *et al.*, 2010; ROSA *et al.*, 2013; CUNHA *et al.*, 2021).

Em relação a aplicação de biocarvão, o enriquecimento com fontes minerais de nutrientes e a granulação é uma alternativa para viabilizar o seu uso na agricultura, uma vez que, à baixa disponibilidade de nutrientes, deve-se utilizar grandes quantidades quando não são combinados com fontes minerais (MAROUSEK *et al.*, 2017; BRTNICKY, *et al.*, 2021), além do risco potencial de inalação de partículas de biocarvão pelos aplicadores, em função do seu pequeno tamanho e baixa densidade (LI *et al.*, 2018).

CONCLUSÕES

- O fertilizante mineral NPK, isolado ou em mistura com o biocarvão, acidificou o solo, enquanto o fertilizante organomineral apresentou efeito intermediário sobre a acidez do solo, quando comparado ao tratamento controle e ao tratamento mineral.
- A liberação de nutrientes do fertilizante mineral NPK, isolado ou em mistura com o biocarvão foi rápida, enquanto a do fertilizante organomineral foi relativamente lenta.
- Os maiores acúmulos de nutrientes na parte aérea das plantas de cana-de-açúcar foram nos tratamentos com fertilizante mineral NPK, isolado ou em mistura com o biocarvão, seguido do fertilizante organomineral, controle e biocarvão, nessa ordem.
- Independentemente dos tratamentos, os dois macronutrientes acumulados em maiores quantidades pelas plantas foram nitrogênio e potássio, enquanto para micronutrientes foram ferro e manganês.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ V, V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H., eds. *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. 25-32, 1999.
- ANDRADE, C. A.; DE BIBAR, M. P. S.; COSCIONE, A. R.; PIRES, A. M. M.; SOARES, Á. G. Mineralização e efeitos de biocarvão de cama de frango sobre a capacidade de troca catiônica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 50(5), 407–416. doi:10.1590/s0100-204x2015000500008, 2015.
- AZEEM, B.; KUSHAARI, K.; MAN, Z. B.; BASIT, A.; THANH, T. H. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. **Journal of controlled release**, 181, 11-21, 2014.
- BANIK, C.; BAKSHI, S.; LAIRD, D. A.; SMITH, R. G.; BROWN, R. C. Impact of biochar-based slow-release N-fertilizers on maize growth and nitrogen recovery efficiency (Vol. 52, No. 3, pp. 630-640), 2023.
- BEDNIK, M.; MEDYŃSKA-JURASZEK, A.; ĆWIELAĞ-PIASECKA, I. Biochar and organic fertilizer co-application enhances soil carbon priming, increasing CO₂ fluxes in two contrasting arable soils. **Materials**, v. 16, n. 21, p. 6950, 2023.
- BRTNICKY, M.; DATTA, R.; HOLATKO, J.; BIELSKA, L.; GUSIATIN, Z. M.; KUCERIK, J.; HAMMERSCHMIEDT, T.; DANISH, S.; RADZIEMSKA, M.; MRAVCOVA, L.; FAHAD, S.; KINTL, A.; SUDOMA, M.; AHMED, N.; PECINA, V. A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment. **Science of the Total Environment**, 796, p.2-14, 2021.
- CATANI, R.A.; GALLO, J. R. Efeitos determinados no solo pelo uso contínuo de fertilizantes. **Bragantia**, v.13, n.6, p. 75-83, 1954.
- CHA, J.S.; PARK, S.H.; JUNG, S.C.; RYU, C.; JEON, J.K.; SHIN, M.C.; PARK, Y.K. Production and utilization of biochar: A review. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, 40, 1–15, 2016.
- CHI, N.T.L.; ANTO, S.; AHAMED, T.S.; KUMAR, S.S.; SHANMUGAM, S.; SAMUEL, M.S.; PUGAZHENDHI, A. A review on biochar production techniques and biochar based catalyst for biofuel production from algae. **Fuel**, 287, 119411, 2021.

CUNHA, F. L.; NIERI, E. M.; SANTOS, J. A. dos; ALMEIDA, R. S. de; MELO, L. A. de; VENTURIN, N. Uso dos adubos de liberação lenta no setor florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 41. DOI: 10.4336/2021.pfb.41e201902063, 2021.

DING, J. Soil nitrogen transformation and functional microbial abundance in an agricultural soil amended with biochar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2023;47:e0220156. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20220156>, 2023.

DOMINGUES, R. R. et al. Enhancing cation exchange capacity of weathered soils using biochar: feedstock, pyrolysis conditions and addition rate. **Agronomy**, v. 10, p. 824-841, 2020.

EL-NAGGAR, A.; LEE, S. S.; RINKLEBE, J.; FAROOQ, M.; SONG, H.; SARMAH, A. K.; ZIMMERMAN, A. R.; AHMAD, M.; SHAHEEN, S. M.; OK, Y. S. Biochar application to low fertility soils: A review of current status, and future prospects. **Geoderma**, 337, 536–554. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.034>, 2019.

FACHINI, J.; FIGUEIREDO, C.C.; VALE, A.T. Assessing potassium release in natural silica sand from K-enriched sewage sludge biochar fertilizers. **Journal of Environmental Management** 314:115080. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115080>, 2022.

IRFAN, S. A.; RAZALI, R.; KUSHAARI, K.; MANSOR, N.; AZEEM, B.; VERSYPT, A. N. F. A review of mathematical modeling and simulation of controlled-release fertilizers. **Journal of Controlled Release**, 271, 45-54, 2018.

KALU, S., SEPPANEN, A., MGANGA, K. Z., SIETIO, O. M., GLASER, B., & KARHU, K. Biochar reduced the mineralization of native and added soil organic carbon: evidence of negative priming and enhanced microbial carbon use efficiency. **Biochar**, 6(1), 7, 2024.

KIM, P.; HENSLEY, D.; LABBÉ, N. Nutrient release from switchgrass-derived biochar pellets embedded with fertilizers. *Geoderma*, v. 232-234, p. 341-351, 2014.

KUZYAKOV, Y; FRIEDEL, J. K; STAHR, K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. **Soil Biology and Biochemistry**. 32, 1485–1498, 2000.

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, 1st ed.; Instituto Agrônomo: Campinas, Brazil, 16p, 2012.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management: Science, technology and implementation. **Routledge**, 2015.

LI, C.; BAIR, D. A.; PARIKH, S. J. Estimating potential dust emissions from biochar amended soils under simulated tillage. **Science of The Total Environment**, Volume 625, 2018, Pages 1093-1101, 2018.

LIU, C., WANG, H., LI, P., XIAN, Q., TANG, X. Biochar's impact on dissolved organic matter (DOM) export from a cropland soil during natural rainfalls. **Science of The Total Environment**. 650, 1988–1995. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.356, 2019.

LOPES, É.M.G., REIS, M. M., FRAZAO, L. A., DA MATA TERRA, L. E., LOPES, E. F., dos Santos, M. M., et al. Biochar increases enzyme activity and total microbial quality of soil grown with sugarcane. **Environmental Technology & Innovation**. 21, 101270. 2021. doi: 10.1016/j.eti.2020.101270, 2021.

LUO, W. et al. A potential Mg-enriched biochar fertilizer: excellent slow-release performance and release mechanism of nutrients. **Science of the Total Environment**, v. 768, e144454, 2021.

MAROUSEK, J.; VOCHOZKA, M.; PLACHY, J. ZAK, J. Glory and misery of biochar. **Clean Technology Environmental Policy**. 19, p. 311–317, 2017.

NAEEM, M. A., KHALID, M., AON, M., ABBAS, G., TAHIR, M., AMJAD, M., ... & AKHTAR, S. S. Effect of wheat and rice straw biochar produced at different temperatures on maize growth and nutrient dynamics of a calcareous soil. **Archives of Agronomy and Soil Science**, 63(14), 2048-2061, 2017.

NDOUNG, O. C. N., DE SOUZA, L. R., FACHINI, J., LEO, T. P., SANDRI, D., & DE FIGUEIREDO, C. C. Dynamics of potassium released from sewage sludge biochar fertilizers in soil. **Journal of Environmental Management**, 346, 119057, 2023.

NELSON, N. O., AGUDELO, S. C., YUAN, W., & GAN, J. Nitrogen and Phosphorus Availability in Biochar-Amended Soils. **Soil Science**, doi:10.1097/ss.0b013e3182171eac, 2011.

NÓBREGA, Í. P. C. Efeitos do biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: Sequestro de carbono no solo. Tese de Doutorado. Universidade Tecnica de Lisboa (Portugal), 2011.

PAUSTIAN, K.; LEHMANN, J.; OGLE, S.; REAY, D.; ROBERTSON, G.P.; SMITH, P. Climate-smart soils. **Nature**, 532, 49–57, 2016.

R Development Core Team, R: A language and environment for statistical computing, reference index version 4.2.1, 2022.

RAHMAN, M. H.; HAQUE, K. S.; KHAN, M. Z. H. A review on application of controlled released fertilizers influencing the sustainable agricultural production: A Cleaner production process. **Environmental Technology & Innovation**, 23, 101697, 2021.

ROSSA, U. B., ANGELO, A. C., NOGUEIRA, A. C., WESTPHALEN, D. J., BASSACO, M. V. M., MILANI, J. D. F., & BIANCHIN, J. E. Fertilizante de liberação lenta no desenvolvimento de mudas de *Schinus terebinthifolius* e *Sebastiania commersoniana*. **Floresta**. 43 (1), 93-104, 2013.

SANTOS JUNIOR, J. M.; COLEN, F.; PEGORANO, R. F.; HEINRICH, R.; FRAZAO, L. A.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A. Biochar pellets as soil conditioner on the growth of *Urochloa brizantha* BRS Paiaguás. **Revista Ciência Agronômica**, v. 55, e20238690, 2024.

SARFRAZ, R.; NADEEM, F.; YANG, W.; TAYYAB, M.; KHAN, M.I.; MAHMOOD, R.; GUO, X.; XING, S.; KIM, G.W. Evaluation of Biochar and Inorganic Fertilizer on Soil Available Phosphorus and Bacterial Community Dynamics in Acidic Paddy Soils for Different Incubation Temperatures. **Agronomy**, 14, 26. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010026>, 2024.

SERRANO, L. A. L. et al. Adubo de liberação lenta na produção de mudas de mamoeiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452010005000084>, 2010.

SILVA, I.C.B et al. Growth and production of common bean fertilized with biochar. **Ciência rural**, 47: 1-8, 2017.

SINGH, B.; SINGH, B.P.; COWIE, A.L. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. **Soil Research**, v.48, p.516 525. DOI: 10.1071/SR10058, 2010.

SONG, W.; GUO, M. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.94, p.138 145, 2012.

SPARKS DL. Environmental soil chemistry, 2nd edn. Academic, Amsterdam, 2003.

STAMFORD, N. P. et al. Effect of sulphur inoculated with *Thiobacillus* on saline soils amendment and growth of cowpea and yam bean legumes. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 139, n. 2, p. 275-281, 2002.

STAMFORD, N. P. et al. Effectiveness of sulfur with *Acidithiobacillus* and gypsum in chemical attributes of a Brazilian sodic soil. **World Journal of Microbiology Biotechnology**, Amsterdam, v. 23, n. 10, p. 1433-1439, 2007.

STOPA, W.; WRÓBEL, B.; PASZKIEWICZ-JASIŃSKA, A.; STRZELCZYK, M. Effect of Biochar Application and Mineral Fertilization on Biomass Production and Structural Carbohydrate Content in Forage Plant Mixture. **Sustainability**, 15, 14333. <https://doi.org/10.3390/su151914333>, 2023.

TEIXEIRA, G.C.M.; PRADO, R.M.; ROCHA, A.M.S.R.; DOS SANTOS, L.C.N.; SARAH, M.M.S.; GRATAO, P.L.; FERNANDES, C. Silicon in pre-sprouted sugarcane seedlings mitigates the effects of water deficit after transplanting. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 20, 849–859, 2020.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa; 2017. 574p.

TORRES, W. G. A., COLEN, F., PANDEY, S. D., FRAZAO, L. A., SAMPAIO, R. A., & FERNANDES, L. A. Phosphorus availability in soil amended with biochar from rice rusk and cattle manure and cultivated with common bean. **Ciência e Agrotecnologia**, 2020.

WULFSBERG, G. Principles of descriptive inorganic chemistry, USB, California, USA, 1987.

ZHANG, S., FANG, Y., KAWASAKI, A., TAVAKKOLI, E., CAI, Y., WANG, H., ... & Li, Y. Biochar significantly reduced nutrient-induced positive priming in a subtropical forest soil. **Biology and Fertility of Soils**, 59(6), 589-607, 2023.