

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS
UNIDADE FRUTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS**

**EFEITO DO BIOCARVÃO DE BAGAÇO DE CANA-DE-
AÇÚCAR NA GERMINAÇÃO E CRESCIMENTO INICIAL DE
SOJA (*Glycine max* L.)**

**Lorrana Zelia Martins de Souza
Engenheira Ambiental**

FRUTAL-MG

2023

LORRANA ZELIA MARTINS DE SOUZA

**EFEITO DO BIOCARVÃO DE BAGAÇO DE CANA-DE-
AÇÚCAR NA GERMINAÇÃO E CRESCIMENTO INICIAL DE
SOJA (*Glycine max* L.)**

Dissertação apresentada à Universidade do Estado de Minas Gerais, Unidade Acadêmica de Frutal, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, para obtenção do título de Mestre.

Orientador:

Dr. Alan Rodrigues Teixeira Machado

Coorientadora:

Dra. Osania Emerenciano Ferreira

FRUTAL-MG

2023

S726e Souza, Lorrana Zelia Martins de
Efeito do iocarvão de bagaço de cana-de-açúcar na
germinação e crescimento inicial de soja (*Glycine max* L.)
/ Lorrana Zelia Martins de Souza. - Frutal. – 2023.
67 f. : il., tab., gráf.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado
de Minas Gerais - Unidade Frutal, 2023.
Orientador: Alan Rodrigues Teixeira Machado.
Co-orientadora: Osania Emerenciano Ferreira.

1. Biocarvão. 2. Biomassa. 3. Germinação. 4. Microbiota.
5. Pirólise. I. Machado, Alan Rodrigues Teixeira. II.
Ferreira, Osania Emerenciano. III. Universidade do Estado
de Minas Gerais - Unidade Frutal. IV. Título.

CDU 631.4

Catálogo na fonte

Bibliotecária: Gesiane Patrícia de Souza CRB-6/1894



GOVERNO DO ESTADO DE MINAS GERAIS

LORRANA ZÉLIA MARTINS DE SOUZA

EFEITO DO BIOCARVÃO DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NA GERMINAÇÃO E CRESCIMENTO INICIAL DE SOJA (*Glycine max L.*)

Dissertação apresentada a Universidade do Estado de Minas Gerais, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, na área de concentração Ciências Ambientais, Linha de Pesquisa Tecnologia, Ambiente e Sociedade, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 25 de abril de 2023.

Profa. Dra. Mara Cristina Pessoa da Cruz UNESP Jaboticabal

Prof. Dr. Gustavo Henrique Gravatim Costa UEMG Frutal

PROF. DR. ALAN RODRIGUES TEIXEIRA MACHADO

ORIENTADOR



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Henrique Gravatim Costa**, **Professor de Educação Superior**, em 25/04/2023, às 17:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mara Cristina Pessoa da Cruz**, **Usuário Externo**, em 25/04/2023, às 17:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alan Rodrigues Teixeira Machado**, **Professor de Educação Superior**, em 28/04/2023, às 17:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.mg.gov.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **64690210** e o código CRC **2796C1A1**.

Aos meus pais, Maria Raquel e Antônio Gomes, aos meus amigos e aos meus professores.

Por terem sido alicerce, construído meu caráter, ensinado o respeito e provido a educação

Dedico

“O insucesso é apenas uma oportunidade para recomeçar de novo com mais inteligência.”

Henry Ford

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a uma força desconhecida e inexplicável pelos parâmetros humanos, porém existente, que orchestra o universo.

Aos meus pais, Maria Raquel e Antônio Gomes por fazerem de mim a pessoa que sou hoje. Por sempre incentivarem, apoiarem e serem meus exemplos de vida. Sem seus sacrifícios e dedicação eu não teria alcançado todos os meus objetivos e não seria a pessoa que sou hoje.

Também gostaria de agradecer aos amigos que conheci ao longo da vida e sempre estiveram ao meu lado, dando força e ajudando a superar todos os obstáculos.

Agradeço ao professor Magno André de Oliveira por acreditar no meu potencial e ter me dado a oportunidade de atuar no desenvolvimento de pesquisas durante a graduação, por ter se tornando meu mentor.

Aos meus amigos Vitor Cruz, Bruna Cristina, Giovani Uema e Adriana Carrillo por me apoiarem durante minha jornada, ajudando durante as pesquisas e por serem amigos excepcionais.

À toda a equipe de técnicos dos laboratórios da UEMG da Unidade Acadêmica de Frutal, por contribuírem de perto durante toda a realização das metodologias propostas. Em especial, à Larissa Amaral e Pedro Gomes.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais por compartilharem sua experiência e por mostrarem suas perspectivas diferentes e ricas.

Ao meu orientador, Alan Machado, que impulsionou o início da minha jornada acadêmica já em 2015, pela dedicação, confiança e por permitir o meu crescimento.

À Osania Ferreira, pela hospitalidade, dedicação e auxílio durante todas as etapas realizadas na Unidade Acadêmica de Frutal.

Aos servidores e colaboradores que atuam diariamente na instituição, aos atendentes, os vigias, as auxiliares de serviços gerais e todos que garantem a organização ideal para podermos estudar e desenvolver nossos projetos.

À FAPEMIG e a CAPES, pela concessão da bolsa e apoio financeiro durante o mestrado.

RESUMO

O biocarvão é um material carbonáceo que atrai a atenção da comunidade científica, pois possui inúmeras aplicações, com destaque para o uso como condicionador de solo. No entanto, ainda não está completamente claro o seu efeito no estágio inicial de crescimento das plantas. Dessa forma, para fornecer mais informações sobre esse produto, este trabalho teve como objetivo produzir e caracterizar o biocarvão a partir do bagaço de cana-de-açúcar para aplicação como condicionador de solo; observando os seus efeitos no crescimento inicial de mudas de soja (*Glycine max* L.) e na microbiota (bactérias e fungos) do solo. Para tanto, a pirólise do bagaço de cana-de-açúcar foi realizada num forno de duplo tambor e a fase sólida obtida (biocarvão) foi submetida à caracterização dos parâmetros de qualidade, pH, condutividade elétrica, teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. A composição e a morfologia do biocarvão foram avaliadas por Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada a um detector de Energia Dispersiva de Raios X, enquanto a composição do lixiviado foi investigada por Ressonância Magnética Nuclear de Hidrogênio. Ensaios de germinação em placa de Petri foram conduzidos para avaliar possíveis efeitos fitotóxicos e, assim, selecionar as doses mais promissoras para o ensaio em casa de vegetação, local onde as sementes de soja foram cultivadas em vasos plásticos contendo aproximadamente 3 kg de substrato (solo com adição de biocarvão, nas doses de 0, 1, 3 e 5% (m/m), que representam 0, 10, 30 e 50 t/ha, respectivamente). Os parâmetros de crescimento da soja, os indicadores de fertilidade do solo e o desenvolvimento da microbiota foram avaliados 30 dias após a semeadura. O biocarvão apresentou um rendimento de 31,6% na forma de um sólido escuro, com valores de pH, condutividade elétrica, teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo de 7,85, 94,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 17,8%, 9,7% e 72,4%, respectivamente. Os resultados mostraram que a sua superfície é irregular e porosa, com alto teor de carbono (87,6%). Não foi observada fitotoxicidade contra sementes de soja, para aplicações de doses de até 50 t/ha. A fertilidade do solo foi melhorada com a aplicação do biocarvão, observou-se, por exemplo, aumentos dos teores de fósforo e potássio. O biocarvão promoveu aumentos significativos para massa fresca do sistema radicular, números de nódulos, e de Unidades Formadoras de Colônias de bactérias e fungos com aplicações das doses de 30 t/ha e 50 t/ha.

Palavras-chave: Biocarvão. Biomassa. Germinação. Microbiota. Pirólise

EFFECT OF SUGARCANE BAGASSE BIOCHAR ON THE GERMINATION AND INITIAL GROWTH OF SOYBEANS (*Glycine max* L.)

ABSTRACT

Biochar is a carbonaceous material that attracts the attention of the scientific community, as it has numerous applications, with emphasis on its use as a soil conditioner. However, its effect on the initial stage of plant growth is still not completely clear. Thus, to provide more information about this product, this work aimed to produce and characterize biochar from sugarcane bagasse for application as a soil conditioner; observing its effects on the initial growth of soybean seedlings (*Glycine max* L.) and on the soil microbiota (bacteria and fungi). For this purpose, the pyrolysis of sugarcane bagasse was carried out in a double drum oven and the solid phase obtained (biochar) was subjected to the characterization of quality parameters, pH, electrical conductivity, volatile material, ash and carbon contents. fixed. The composition and morphology of the biochar were evaluated by Scanning Electron Microscopy coupled to an Energy Dispersive X-Ray detector, while the composition of the leachate was investigated by Hydrogen Nuclear Magnetic Resonance. Germination tests in Petri dishes were conducted to evaluate possible phytotoxic effects and, thus, select the most promising doses for the test in a greenhouse, where soybean seeds were grown in plastic pots containing approximately 3 kg of substrate (soil with the addition of biochar, at doses of 0, 1, 3 and 5% (m/m), which represent 0, 10, 30 and 50 t/ha, respectively). Soybean growth parameters, soil fertility indicators and microbiota development were evaluated 30 days after sowing. The biochar showed a yield of 31.6% in the form of a dark solid, with values for pH, electrical conductivity, volatile materials, ash and fixed carbon of 7.85, 94.1 mS/cm, 17.8%, 9.7% and 72.4%, respectively. The results showed that its surface is irregular and porous, with a high carbon content (87.6%). Phytotoxicity was not observed against soybean seeds, for applications of doses up to 50 t/ha. Soil fertility was improved with the application of biochar, for example, increases in phosphorus and potassium levels were observed. Biochar promoted significant increases in fresh mass of the root system, numbers of rhizobia, and Colony Forming Units of bacteria and fungi with applications of doses of 30 t/ha and 50 t/ha.

Keywords: Biochar. Biomass. Germination. Microbiota. Pyolysis.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	157
2. OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo Geral	20
2.2 Objetivos Específicos	20
3. REFERENCIAL TEÓRICO	219
3.1 A produção do biocarvão	251
3.1.1 Pirólise (lenta, rápida e instantânea)	23
3.2 Biocarvão como condicionador de solo	24
3.3 Efeitos fitotóxicos do biocarvão	21
3.4 A cultura da soja (<i>Glycine max</i> L.)	227
3.5 A geração do bagaço de cana-de-açúcar	24
4. METODOLOGIA	31
4.1 Coleta e preparação do bagaço de cana-de-açúcar (BCA)	31
4.2 Preparação do biocarvão a partir do bagaço de cana-de-açúcar	31
4.3 Caracterização das propriedades físico-químicas do biocarvão obtido a partir do bagaço de cana-de-açúcar	30
4.3.1 Determinação do pH e da condutividade elétrica	30
4.3.2 Quantificação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo	30
4.3.3 Caracterização morfológica e elemental da superfície do biocarvão	31
4.3.4 Análise do lixiviado por Ressonância Magnética Nuclear de Hidrogênio (RMN de ¹ H)	31
4.4 Ensaios de germinação de sementes de soja (<i>Glycine max</i> L.)	32
4.5 Ensaios em casa de vegetação com soja (<i>Glycine max</i> L.)	33
4.5.1 Coleta e caracterização do solo	33
4.5.2 Instalação do experimento em casa de vegetação	33
4.6 Avaliação da microbiota do solo (bactérias e fungos)	34
4.6.1 Bactérias totais	34
4.6.2 Fungos totais	35
4.7 Análise estatística	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1.1 Caracterização do biocarvão	36
5.1.2 Efeitos do biocarvão obtido do bagaço da cana-de-açúcar na germinação de soja	40

5.1.3	Efeitos do biocarvão obtido do bagaço da cana-de-açúcar sobre as propriedades físico-químicas do solo.....	44
5.1.4	Efeitos do biocarvão obtido do bagaço da cana-de-açúcar sobre o crescimento de mudas de soja	49
5.1.5	Efeitos do biocarvão obtido do bagaço da cana-de-açúcar sobre a microbiota do solo	51
6.	CONCLUSÃO.....	546
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Número de publicações na base Web of Science® com o termo “ <i>biochar</i> ”	12
Figura 2 – Bagaço de cana-de-açúcar após ser triturado	29
Figura 3 – Biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar em forno de duplo tambor (BBT)	36
Figura 4 – Espectro de Energia Dispersiva de Raios X do biocarvão preparado a partir do bagaço de cana-de-açúcar	38
Figura 5 – Micrografias eletrônicas obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar em forno de duplo tambor, com ampliações de (a) 500 vezes, (b) 1.000 vezes, (c) 2.500 vezes, (d) 3.000 vezes, (e) 5.000 vezes e (f) 10.000 vezes	39
Figura 6 – Espectro de Ressonância Magnética Nuclear de Hidrogênio (400 MHz, solução tampão de KH_2PO_4 em D_2O , pH 6,0, a 300 K do lixiviado do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar	42
Figura 7 – Germinação Relativa (GR, %) de sementes de soja, em função do período de incubação, expostas a diferentes doses do biocarvão obtido da cana-de-açúcar. Médias seguidas de mesma letra, em barras de mesma cor, não apresentam diferenças significativas, ao nível de significância de 5%, pelo Teste Scott-Knott. Os valores médios da GR do controle foram de 100 a, para os três períodos de incubação	41
Figura 8 – Crescimento Médio Relativo da Radícula (CRR, %) de sementes de soja, em função do período de incubação, expostas a diferentes doses do biocarvão obtido da cana-de-açúcar. Médias seguidas de mesma letra, em barras de mesma cor, não apresentam diferenças significativas, ao nível de significância de 5%, pelo Teste Scott-Knott. Os valores médios do CRR do controle foram de 100a, para os três períodos de incubação	42
Figura 9 – Índice de Germinação (IG, %) de sementes de soja, em função do período de incubação, expostas a diferentes doses do biocarvão obtido da cana-de-açúcar. Médias seguidas de mesma letra, em barras de mesma cor, não apresentam diferenças significativas, ao nível de significância de 5%, pelo Teste Scott-Knott. Os valores médios do IG do controle foram de 100a, para os três períodos de incubação	435

- Figura 10** – Acidez potencial ($H+Al$) e pH para amostras de solos condicionadas com diferentes doses do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar, após 30 dias sob cultivo com soja. Os valores da acidez potencial e do pH para amostra de solo antes da instalação do experimento foram de 2,42 ($cmol_c\ dm^{-3}$) e 6,2, respectivamente468
- Figura 11** – Bases trocáveis para amostras de solos condicionadas com diferentes doses do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar, após 30 dias sob cultivo com soja. Os valores da Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , SB, em $cmol_c\ dm^{-3}$, para amostra de solo antes da instalação do experimento foram de 0,04, 5,29, 2,26, 0,39 e 7,94, respectivamente. O valor para o fósforo dessa amostra foi de 9,5 $mg\ dm^{-3}$47
- Figura 12** – Valores para capacidade efetiva de troca de cátions (CTC_e) e matéria orgânica (MO) para amostras de solos condicionadas com diferentes doses do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar, após 30 dias sob cultivo com soja. Os valores da CTC_e e MO para amostra de solo antes da instalação do experimento foram de 7,98 $cmol_c\ dm^{-3}$ e 4,14 (%), respectivamente48
- Figura 13** – Teores de micronutrientes (Cu, Mn, Fe e Zn) para amostras de solos condicionadas com diferentes doses do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar, após 30 dias sob cultivo com soja. Os teores de Cu, Mn, Fe e Zn, em $mg\ dm^{-3}$, para amostra de solo antes da instalação do experimento foram de 10,10 mg/dm^3 , 88,50 mg/dm^3 , 21,90 mg/dm^3 e 2,30 mg/dm^3 , respectivamente51
- Figura 14** – Nódulos no sistema radicular de soja após 30 dias de cultivo em de solo, condicionado com 3 % m/m do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar .51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características químicas do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar em forno de duplo tambor (BBT).....	379
Tabela 2 – Umidade gravimétrica (UG, %) das amostras de solo condicionadas com diferentes doses do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar no dia da instalação do ensaio em casa de vegetação e aos 30 dias após a semeadura de soja.....	457
Tabela 3 - Altura da parte aérea (APA), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa fresca do sistema radicular (MFSR), número de folhas (NF) e número de rizóbios (NR) de mudas de soja aos 30 dias após o cultivo em solo condicionado com diferentes doses do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar	52
Tabela 4 – Unidades Formadoras de Colônias (UFC) dos fungos e bactérias em solo condicionado com diferentes doses do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar	524

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

APA – Altura da Parte Aérea

BBT – Biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar em forno de duplo tambor

BCA – Bagaço de cana-de-açúcar

BOD – Demanda Biológica de Oxigênio

CE – Condutividade Elétrica

CF – Carbono fixo

CRR – Crescimento Médio Relativo da Radícula

CSR – Comprimento do sistema radicular

CTC – Capacidade de troca de cátions

EDS – Energia Dispersiva de Raios X

FBN – Fixação Biológica de Nitrogênio

GR – Germinação Relativa

IG – Índice de Germinação

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MFPA – Massa Fresca da Parte Área

MFSR – Massa fresca do sistema radicular

MSPA – Massa seca da parte área

MSSR - Massa seca do sistema radicular

RMN de ^1H – Ressonância Magnética Nuclear de Hidrogênio

R, % – Rendimento gravimétrico

SB – Soma base

TV – Teores de materiais voláteis

TC – Teor de cinzas

UG – Umidade Gravimétrica

1. INTRODUÇÃO

As discussões sobre as mudanças nos sistemas de produção agrícola estão ganhando cada vez mais espaço e são muito importantes para a agenda global da sustentabilidade e saúde (Saath; Fachinello, 2018; Proença *et al.*, 2021). De acordo com as estimativas do Relatório Especial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2018), as atividades antropogênicas foram responsáveis por cerca de 1 °C de aquecimento global em relação aos níveis anteriores (1850-1900). De fato, durante o período industrial, houve um aumento de 278 para 400 partes por milhão (ppm) nos níveis de emissões de dióxido de carbono (CO₂), em concomitância com o aumento de outros gases de efeito estufa (Petrovic; Lobanov, 2020). O relatório do IPCC (2018) também indica um aquecimento global de 1,5 °C entre 2030 e 2052, caso não haja uma diminuição no ritmo atual.

Diante dos problemas ambientais e da emergência climática, os fatores que aumentam o consumo global e, conseqüentemente, o aumento no consumo de recursos naturais têm causado preocupação, principalmente, sobre a quantidade de resíduos sólidos produzidos e o crescimento do custo da matéria-prima (Januário *et al.*, 2019; Pereira *et al.*, 2020). Esses fatores, combinados com o avanço tecnológico, tornam cada vez mais possível o aproveitamento de resíduos, o que economiza recursos naturais, reduz a poluição ambiental, aumenta a renda e diminui a quantidade de material que precisa ser descartado (Mohan, 2018).

A agroindústria brasileira é uma das maiores geradoras de biomassa. O setor sucroenergético do país, por exemplo, tem sido considerado o primeiro lugar na produção de açúcar e o segundo lugar na produção de etanol derivado da cana-de-açúcar, o que resulta em grandes quantidades de resíduos e subprodutos, como o bagaço de cana-de-açúcar – BCA - (CONAB, 2018; Santana *et al.*, 2019). Estima-se que, anualmente, sejam geradas 12 milhões de toneladas de BCA, sendo que cerca de 280 kg são provenientes de cada tonelada de cana processada (CONAB, 2017). A maior parte dessa quantidade é utilizada para a produção de calor e geração de energia elétrica (Xu *et al.*, 2019). No entanto, há um excedente que poderia ser usado como insumo para a elaboração de produtos de alto valor agregado (Seixas *et al.*, 2016; Martinez-Hernandez *et al.*, 2018).

Por isso, o aproveitamento de resíduos tem papel fundamental dentro do conceito de desenvolvimento sustentável e pode contribuir no gerenciamento dos resíduos sólidos, requerendo a integração entre políticas econômicas, sociais e ambientais (Gouveia, 2012). O aproveitamento de resíduos deve ser considerado como uma das soluções mais promissoras

para resolver esse problema (Silva *et al.*, 2017; Das *et al.*, 2020). Dessa forma, é possível alcançar a redução dos impactos ambientais, sociais e econômicos que norteiam a sua geração (Soares *et al.*, 2017). Para isso, várias tecnologias foram propostas, como a pirólise, que converte a biomassa em produtos para diversas aplicações, inclusive na agroindústria, como o biocarvão, biogás e bio-óleo (Paz *et al.*, 2017; Pires *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2019). O biocarvão feito do BCA, por exemplo, contribui para o estoque de carbono (Lefebvre *et al.*, 2020), correção do solo (Lima Júnior, 2017), retenção de água (Koji *et al.*, 2016) e desenvolvimento da cana-de-açúcar (Wang *et al.*, 2021).

O biocarvão é uma alternativa promissora para melhorar as propriedades do solo. Ele também é conhecido como carvão pirogênico, *biochar* e *black carbon* é um dos produtos da decomposição térmica da matéria orgânica na ausência ou em condições limitadas de oxigênio, isto é, por pirólise (Souchie *et al.*, 2011; Soares *et al.*, 2021; JUNIOR *et al.*, 2022). Ele pode ser utilizado para diversos fins, como, por exemplo, na diminuição da lixiviação de nutrientes, no aumento da eficiência do uso de nitrogênio (BU *et al.* 2019), na aplicação de formas de carbono mais estáveis (Paz-Ferreiro *et al.*, 2018) e no aumento da capacidade de troca catiônica de solos ácidos (Zelaya *et al.*, 2019). Devido à sua estrutura porosa, com elevada área superficial, o biocarvão pode contribuir para um aumento na aeração do solo e na sua capacidade de retenção de água (Zimmerman *et al.*, 2011; Liang *et al.*, 2014; Dong *et al.*, 2018).

Na literatura, vários trabalhos mostraram que a aplicação de biocarvão teve um efeito positivo no rendimento e na qualidade da colheita em solos agrícolas (Roz *et al.*, 2015; Woiciechowski *et al.*, 2018; Milian-Luperon *et al.*, 2020). Também vale mencionar que o biocarvão pode contribuir para supressão de doenças em plantas (Bonanomi; Ippolito; Scala, 2015). A aplicação do biocarvão também favorece a microbiota do solo, atuando como fonte de energia e nutrientes (Lima *et al.*, 2018), e, conseqüentemente, aumentando a abundância e as atividades microbianas (Liu *et al.*, 2020). Por isso, os estudos sobre os mecanismos de ação do biocarvão sobre a microbiota do solo são crescentes (Elzobair, *et al.*, 2016; De Medeiros *et al.*, 2020; Medeiros *et al.*, 2020).

No presente trabalho, a soja (*Glycine max* L.) foi escolhida como modelo de estudo, uma vez que ela tem se mostrado sensível a diversos fatores, como aos estresses bióticos e abióticos. Esses estresses são impactantes para a agricultura, com destaque em práticas de manejo inadequadas, como a baixa diversificação de espécies cultivadas e a nutrição desequilibrada das plantas (Harakuri, 2021). Além disso, o Brasil é o segundo maior produtor

mundial de grãos de soja, registrando um crescimento significativo nos últimos vinte anos (Figueiras; Galache, 2022). Isso ocorre porque a soja é usada como matéria-prima em diversos segmentos, como nas indústrias de alimento e química (Grandi *et al.*, 2020). Ela também está relacionada aos principais complexos industriais do país, incluindo desde pequenas empresas até transnacionais. Mais ainda, é a cultura com o maior consumo de sementes, fertilizantes e defensivos agrícolas (Hirakuri *et al.*, 2014). Por outro lado, mesmo com os avanços tecnológicos alcançados nos últimos anos, problemas como manejo de solo, doenças e de tolerância à seca podem limitar a produtividade da soja em lavouras brasileiras (Contini *et al.*, 2018). Assim, levanta-se a hipótese de que o biocarvão do bagaço de cana-de-açúcar pode contribuir para o crescimento e desenvolvimento inicial da soja.

Neste contexto, possíveis efeitos adversos do biocarvão devem ser investigados para um melhor aproveitamento no condicionamento de solos durante o desenvolvimento inicial da cultura (Zhang *et al.*, 2020), pois pesquisas recentes mostraram fitotoxicidade causada pela aplicação de biocarvão. Para exemplificar, a adição de biocarvão ao substrato comercial Germinar® reduziu a massa fresca radicular de *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus urophylla* (Petter *et al.*, 2012). O biocarvão produzido a partir da madeira de eucalipto e aplicado como condicionador de substrato para a produção de mudas de *Lactuca sativa*, acarretou uma redução do número de folhas dessa espécie (Petter *et al.*, 2012).

A toxicidade do biocarvão, geralmente, está relacionada à matéria-prima de origem e às condições de pirólise durante a sua produção. No que tange às características da matéria-prima são observadas variações significativas nas composições química e física dos biocarvões (Trazzi *et al.*, 2018). Já os parâmetros adotados durante a pirólise - temperatura, taxa de aquecimento, proporção de oxigênio e tipo de reator - também podem influenciar nessas composições (Joseph *et al.*, 2010; Rogovska *et al.*, 2012). Os compostos indesejáveis e encontrados no biocarvão são sílica, dioxina, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs) compostos fenólicos, metais, entre outros (Solaiman *et al.*, 2011). Por tanto, torna-se imprescindível a necessidade de desenvolver métodos para explorar a toxicidade do biocarvão, antes da sua aplicação em campo. Mas, como identificar essa fitotoxicidade em escala laboratorial para se evitar perdas econômicas? Ensaio de germinação e cultivo em casa de vegetação são caminhos para possíveis soluções dessa problemática.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Investigar como o biocarvão, feito a partir do bagaço de cana-de-açúcar, influencia o crescimento inicial da soja (*Glycine max* L.), a fertilidade e a microbiota do solo.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar as propriedades físico-químicas do biocarvão resultante da pirólise do bagaço de cana-de-açúcar.
- Verificar o efeito do biocarvão na germinação das sementes de soja e no seu crescimento inicial.
- Analisar os parâmetros de fertilidade do solo condicionado com biocarvão e sob cultivo de soja.
- Avaliar o desenvolvimento da microbiota de solo condicionado com biocarvão e sob cultivo de soja.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A produção do biocarvão

Os estudos sobre biocarvão já atingem proporções mundiais, abrangendo áreas como Ciências Ambientais, Energia, Ciência do Solo, Biotecnologia e Microbiologia, Engenharia Química, Engenharia Ambiental e Agronomia, dentre outras. Nos últimos anos, houve um crescimento exponencial (Figura 1) de trabalhos científicos com este tema, com a primeira publicação num congresso, em 1998, registrada na base de dados Web of Science®, e o primeiro artigo publicado em 2000. Em 2022, registou 5969 artigos na mesma base de dados. No Brasil, as pesquisas com o biocarvão começaram, aproximadamente, há 15 anos (Novotny *et al.*, 2015).

O termo biocarvão foi criado para descrever a aplicação de matéria orgânica carbonizada ao solo de forma intencional com o objetivo de melhorar as propriedades do solo (Woiciechowski *et al.*, 2018; Batista, 2018). Dessa forma, o uso do biocarvão é uma maneira de valorizar a biomassa residual, o que torna possível o aproveitamento de grandes quantidades de resíduos agrícolas. A obtenção de biocarvão é resultado da pirólise do material orgânico em condições limitada de oxigênio, e em temperaturas relativamente baixas (Trazzi *et al.*, 2018; Gao *et al.*, 2021; Pandey *et al.*, 2020). Devido à falta de oxigênio, não há combustão da biomassa e, entre os materiais resultantes, está o biocarvão, um material sólido, de cor preta, com alta porosidade, composto, principalmente, por carbono em forma estável (Cha *et al.*, 2016).

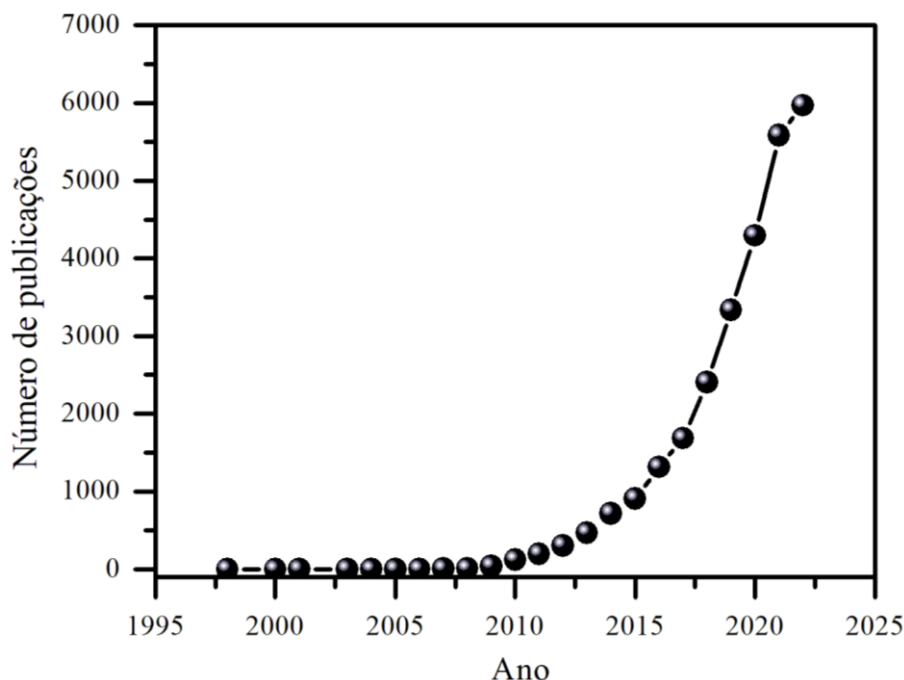


Figura 1 – Número de publicações na base Web of Science® com o termo “*biochar*”

Durante a pirólise, ocorrem modificações na composição da biomassa, formando estruturas de carbono, que resistem melhor à degradação pelos microrganismos do solo. De modo simplificado, as plantas transformam o carbono presente na atmosfera, sob a forma de dióxido de carbono (CO_2), em biomassa. Essa biomassa, posteriormente, pode ser convertida em carbono estável com a produção do biocarvão. Dessa forma, a matéria orgânica que seria decomposta rapidamente, permitindo a liberação de CO_2 , será degradada de forma lenta e, consequentemente, haverá um estoque de carbono a longo prazo (Mangrich *et al.*, 2011). Sendo assim, a utilização do biocarvão ajuda a mitigar os impactos ambientais, uma vez que é composto por estruturas carbonáceas de alta estabilidade química, sofrendo decomposição em taxas mais lentas no ambiente (Marques *et al.*, 2022).

De fato, a estrutura do biocarvão é extremamente estável e, por isso, pode permanecer no solo por centenas de anos (Das *et al.*, 2020). Por tanto, o biocarvão tem demonstrado ser um importante estoque de carbono estável e de lenta degradação, tornando-se eficiente para o armazenamento e sequestro de carbono no solo (Silva *et al.*, 2017). Outro ponto importante é a produção de energia alcançada por meio da produção de biocarvão. Dessa forma, a sua produção pode ser considerada uma estratégia com diversos benefícios ambientais integrados,

como a produção de energia limpa, a reciclagem de resíduos e o armazenamento de carbono no solo (Novotny *et al.*, 2015).

3.1.1 Pirólise (lenta, rápida e instantânea)

A pirólise é a decomposição térmica de uma matriz orgânica na ausência total ou parcial de oxigênio, resultando em produtos sólidos, líquidos e gasosos (Novotny *et al.*, 2015). Podem ser usadas matérias-primas orgânicas de qualquer procedência, como casca, madeira, sobras de colheitas ou outros subprodutos de origem agrícola (Miranda *et al.*, 2017). Esse processo é controlado pela temperatura de pirólise, pelo tempo de permanência no reator e pela taxa de aquecimento (Trazzi *et al.*, 2018).

De acordo com Novotny *et al.* (2015), os produtos da pirólise de biomassa podem ser maximizados da seguinte maneira: I) Produto sólido (biocarvão), é favorecido por baixas temperaturas e taxas de aquecimento e por longos períodos de residência. II) Produtos líquidos (bio-óleo), são otimizados em temperaturas baixas ou moderadas, altas taxas de aquecimento e curtos períodos de residência. III) Produtos gasosos (biogás), são favorecidos com altas temperaturas, baixas taxas de aquecimentos e longos tempos de residência.

A pirólise lenta, o processo de carbonização mais utilizado no Brasil, é a conversão de biomassa por aquecimento em baixas e médias temperaturas, cerca de 300 °C a 600 °C, e longo tempo de resistência (horas ou dias), na ausência de oxigênio. A sua utilização é recomendada para a produção de sólidos, alcançando rendimentos entre 20% e 40%, uma vez que suas condições operacionais favorecem a diminuição de outras frações, como biogás e bio-óleo. De modo geral, valores baixos para temperatura e tempo de residência proporcionam um biocarvão altamente funcional, mantendo um alto teor de grupos hidroxila e carboxila (Novotny *et al.*, 2015; Miranda *et al.*, 2017).

A pirólise rápida, muito utilizada para a produção de bio-óleo, trata-se do aquecimento rápido da biomassa e uso de tempo de resistência mais curto, quando comparada a pirólise lenta. É usada, em geral, em altas temperaturas (mais de 500 °C), resultando em uma maior aromatização do biocarvão. Esse tipo de processo é acompanhado pela produção de cerca de 10% a 15% de sólidos, que podem ser usados como biocarvão (Novotny *et al.*, 2015).

De acordo com Novotny *et al.* (2015), a pirólise instantânea ocorre num tempo de reação ainda menor, com o uso de tempo de resistência, também, mais curto (apenas alguns segundos) em comparação com a pirólise rápida. Assim, sua taxa de aquecimento é mais alta. As partículas

finas da matéria-prima são pirolisadas por incêndios instantâneos. A aplicação é feita, sobretudo, para produção de bio-óleo. As temperaturas empregadas variam de 400 °C a 950 °C, propiciando a despolimerização rápida e o craqueamento da matéria-prima, resultando em bio-óleo com viscosidade comparável ao óleo diesel.

Dada a grande variação da proporção dos componentes das diferentes matérias-primas, cada material apresenta uma característica particular quando é pirolisado (Maia, 2010). Dessa forma, é preciso que as frações obtidas da pirólise sejam caracterizadas para que possam ser aplicadas de forma mais eficiente.

3.2 Biocarvão como condicionador de solo

O biocarvão é um produto que promete ganhos agronômicos, além de vantagens ambientais e sanitárias. Ao converter os resíduos (biomassa) em biocarvão, é possível diminuir os riscos de agentes patogênicos, contaminantes farmacêuticos, pesticidas e metais pesados (Marcelino *et al.*, 2018). Ele pode ser usado como substituto aos fertilizantes químicos, ou então ser usado como condicionador de solos, sobretudo em solos intemperizados e de baixa fertilidade natural (Petter; Madari, 2012). A sua utilização foi inspirada nas técnicas amazônicas de aplicação da chamada Terra Preta de Índios: solos férteis, ricos em carvão e artefatos humanos (Rittl *et al.*, 2015). Devido a sua capacidade de diminuir a emissão de gases poluentes, melhorar a fertilidade do solo e adsorção de impurezas no ambiente, esse material alcançou grande popularidade nos últimos anos como um substituto para compostos de carbono fóssil em diversas aplicações (Smith, 2016; Weber; Quicker, 2018).

As pesquisas também mostraram que a estrutura porosa, área superficial, pH, teor de cinzas, condutividade elétrica e teores de nutrientes são características fundamentais do biocarvão (Marcelino *et al.*, 2020). Dessa forma, o condicionamento do solo com biocarvão pode melhorar os parâmetros de fertilidade, retenção de nutrientes e microbiota (El-Naggar *et al.*, 2019; Mohan *et al.*, 2018). Os resultados da aplicação desse produto são promissores no que diz respeito ao condicionamento do solo (Gascó *et al.*, 2016). Por exemplo, a pesquisa conduzida por Woiciechowski *et al.* (2018) revelou que a aplicação de 40 Mg ha⁻¹ de biocarvão aumentou os teores de bases trocáveis (K, Ca e Mg) e P no solo. Os autores explicaram que esse resultado é causado pelas cinzas presentes na composição desse produto. Além disso, o pH da solução do solo e a retenção de água aumentaram, enquanto o teor de Al e a acidez potencial

diminuíram. Outros resultados positivos foram alcançados com o uso do biocarvão em diversos trabalhos (Chang *et al.*, 2021; Jia *et al.*, 2021; Romero *et al.*, 2021; Yoo *et al.*, 2021).

Em função das alterações na disponibilidade de nutrientes, comunidades microbianas, sinalização planta-micróbio e formação de habitat, o biocarvão pode também afetar a atividade microbiana do solo, modificando os ciclos dos nutrientes e o crescimento das plantas (Ding *et al.*, 2016). Assim, o biocarvão também causa alterações na população microbiana, o que pode interferir na atividade enzimática dos microrganismos no solo, no crescimento de plantas e na ciclagem de nutrientes (Ferreira *et al.*, 2017), uma vez que a sua utilização pode diminuir a lixiviação de nutrientes, o que favorece a vivência dos seres microbianos no solo (Júnior *et al.*, 2022). Além disso, a aplicação do biocarvão também oferece ambientes de proteção para a comunidade microbiológica (Guimarães, 2017; Filho, 2017) e sua composição abundante em C também favorece o crescimento e a reprodução dos microrganismos (Tan *et al.*, 2017). Ainda é importante destacar que a estrutura porosa e a grande área superficial melhora a aeração do solo, bem como a capacidade de retenção de água, o que também favorece a atividade microbiana (Zimmerman *et al.*, 2011; Liang *et al.*, 2014; Dong *et al.*, 2018).

A literatura também mostra resultados positivos ao condicionar o solo com biocarvão para o desenvolvimento na cultura da soja. Zhu *et al.* (2018) mostraram que a aplicação de biocarvão aumentou o crescimento da raiz da soja na fase de muda, o que foi particularmente observado nas raízes de 0,0 mm a 0,5 mm de diâmetro. Ainda de acordo com os autores, o biocarvão pode aumentar a vitalidade da raiz, mantendo a capacidade adequada de absorção de nutrientes. Dessa forma, o aumento da biomassa no período inicial de crescimento das plantas, sob aplicação de biocarvão, estabelece as bases para o crescimento subsequente cultura. Segundo Egamberdieva *et al.* (2016), que avaliaram o crescimento da soja após a aplicação de biocarvões do milho e da madeira, o uso do biocarvão no solo aumenta o crescimento das plantas, sequestra carbono e melhora a fertilidade do solo, além de proteger as plantas de patógenos que podem ser transmitidos pelo solo.

O biocarvão pode ser usado ainda em conjunto com fertilizantes. De acordo com Rafael (2019), é possível melhorar a aplicação de fertilizantes minerais se houver a formulação de fertilizantes NPK com biocarvão, o que trará benefícios na química do solo e enzimática. Dessa maneira, é possível que haja uma redução nos custos com a produção de alimentos. Por outro lado, os efeitos do biocarvão nos solos e ao ambiente ainda não foram avaliados de forma ampla, sobretudo no que diz respeito ao seu uso em grandes áreas (Madari *et al.*, 2012; Silva *et al.*,

2017). Além disso, é preciso ter cautela com a composição do biocarvão, uma vez que a microbiota do solo e o desenvolvimento das culturas podem ser prejudicados caso o biocarvão contenha substâncias como fenóis e polifenóis, metais pesados e outras substâncias ecotoxicológicas (Ding *et al.*, 2016).

3.3 Efeitos fitotóxicos do biocarvão

Para entender os possíveis efeitos ecotoxicológicos do biocarvão, pesquisas recentes têm buscado investigar as toxicidades dos lixiviados de diferentes biocarvões, principalmente, frente à germinação e ao crescimento de diferentes espécies vegetais (Oh *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2020). Para exemplificar, a investigação dos lixiviados obtidos do biocarvão preparado a partir das palhas de milho revelou que doses elevadas causam sérios danos para mudas de tomate (*Solanum lycopersicum*) (Li *et al.*, 2015). Outra pesquisa revelou que o lixiviado de biocarvão produzido a partir da casca de laranja (*Citrus sinensis*) inibiu o crescimento de plântulas de alface (*Lactuca sativa*). Esse efeito inibitório aumentou à medida que a concentração do extrato aumentou (Oh *et al.*, 2012). Os lixiviados de amostras de biocarvão de sementes de girassol (*Helianthus annuus*) e de algas *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) também inibiram o crescimento de alface (Silva *et al.*, 2020). Outro exemplo pode ser encontrado no trabalho de Gale *et al.* (2016). Os autores mostraram que o lixiviado do biocarvão obtido de resíduos florestais inibiu os crescimentos de azevém (*Lolium multiflorum*) e de trevo branco (*Trifolium repens*).

Por outro lado, Gezahegn *et al.* (2021) mostraram que os lixiviados de biocarvões obtidos a partir da pirólise lenta de diferentes espécies de madeira aumentaram o crescimento das radículas de alface e de rabanete (*Raphanus sativus*). Resultado semelhante foi encontrado por Lou *et al.* (2016). Eles mostraram que os lixiviados de biocarvão das palhas de trigo e milho aumentaram o rendimento de repolho chinês (*Brassica rapa*). Outros exemplos de efeitos positivos foram registrados para os lixiviados de biocarvões obtidos da casca do coco (*Cocos nucifera*) e de plantas de milho (*Zea mays*). Esses lixiviados melhoraram as germinações de milho e rabanete (Sujeeun; Thomas, 2017).

Os exemplos apresentados anteriormente demonstram que as diferenças nas respostas das plantas aos lixiviados de diferentes biocarvões requerem mais estudos que possam fornecer dados para a melhoria dos métodos de produção do biocarvão, bem como para o desenvolvimento de novos indicadores de qualidade desse produto (Gezahegn *et al.*,

2021). Nesse sentido, a compreensão da composição química dos lixiviados de biocarvão pode fornecer informações valiosas. Essa composição é diretamente influenciada pela presença de compostos orgânicos voláteis (COVs) produzidos durante o processo de pirólise e que ficam adsorvidos na superfície do biocarvão (Gale *et al.*, 2016; Gezahegn *et al.*, 2021). Sabe-se ainda que os COVS, após a adição do biocarvão no solo, podem ser lixiviados com rapidez por meio da água nos poros do solo, irrigação ou chuva (Lin *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2019, Liu *et al.*, 2022).

3.4 A cultura da soja (*Glycine max* L.)

A soja é uma planta que tem sua origem no nordeste da Ásia (China e regiões adjacentes). Por causa dos níveis de óleo e proteínas presentes no grão, a soja começou a ser transportada em grandes embarcações na metade do século XX, período em que as indústrias de todo o mundo começaram a se concentrar no seu potencial econômico (EMBRAPA, 2005; Freitas, 2011; CONAB 2020). De acordo Zalles *et al.* (2019), o primeiro relato do surgimento da soja no Brasil foi em 1882. Os grãos de soja foram levados para São Paulo por imigrantes japoneses e, somente em 1914, o cultivo de soja no Rio Grande do Sul começou, onde as diversas cultivares trazidas dos Estados Unidos se adaptaram melhor às condições edafoclimáticas (Bonetti, 1981). A expansão foi lenta, com cultivos pequenos até a década de 1960, quando ficou restrita à região Sul do país, devido ao clima subtropical. Posteriormente, com o desenvolvimento de cultivares que se adaptariam melhor às condições de baixa latitude, houve uma expansão do cultivo da soja na região Centro-Oeste (tropical) (Cattelan *et al.*, 2017).

A soja é uma das mais importantes culturas para a economia mundial (Zalles *et al.*, 2019). Ela é usada na agroindústria, indústria química, alimentos e como fonte alternativa de biocombustível, o que a faz ser amplamente difundida em diversos segmentos, tornando-se um importante insumo para a economia brasileira (CARDOSO *et al.*, 2014; CONAB, 2017). Além disso, é considerada um precursor do desenvolvimento socioeconômico e a commodity agrícola mais relevante do país.

Atualmente, a soja é considerada a principal cultura do Brasil, tanto em termos de escala quanto de valor (Cattelan *et al.*, 2017). Com uma produção na safra de 2021/22 de cerca 124 milhões de toneladas, o Brasil se sobressaiu no cenário agrícola mundial como um dos maiores produtores de soja (Bessa *et al.*, 2020; CONAB, 2022). A sua produção está presente em grandes áreas e em todo o território nacional, abrangendo desde os estados do sul até a região

Amazônica (Martinelli *et al.*, 2017). De acordo com o censo agropecuário brasileiro do IBGE (2017), o Brasil tem 236.245 estabelecimentos rurais, totalizando 30.722.657 hectares para o seu cultivo.

A FAO (2017) estima que, até 2025, a produção de soja no Brasil será de 136 milhões de toneladas, enquanto, para o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Brasil, 2019), a projeção é de 151,9 milhões de toneladas para safra de 2028/29. Isso significa um aumento de 32,9% em relação ao que foi produzido em 2018/19. Contudo, toda essa extensão tem um impacto negativo na segurança alimentar e no uso do solo no território nacional (Martinelli *et al.*, 2017). Além disso, existem aspectos em seu processo de produção que podem comprometer o seu desenvolvimento por encarecerem os custos para o produtor e representarem riscos ao ambiente.

Em um estudo de caso, Agüero (2021) mostrou que os custos com insumos na produção de soja podem chegar a 67,26% do total de produção, tornando-os mais onerosos por serem itens de valor elevado, como sementes, fertilizantes, corretivos e defensivos. Uma análise realizada em 2021, usando a safra 2020/21 como base, Hirakuri *et al.* (2021) mostraram que os custos com fertilizantes, calcário e inoculantes podem variar entre 42% e 43% com a aquisição de insumos para a produção de soja em uma microrregião de Januária, município situado no estado de Minas Gerais.

O trabalho de Harakuri *et al.* (2021) demonstrou que os estresses abióticos pelos quais a cultura pode ser exposta, como períodos de estiagem na fase produtiva, são agentes responsáveis pelas quebras produtivas de soja que ocorreram nos períodos 2015/2016 e 2019/2020. Ainda segundo o autor, a perda econômica para o agronegócio da soja, ocasionada pela combinação de estresses bióticos e abióticos, alcançou cerca de R\$ 19,3 bilhões, em cinco safras, ressaltando a ocorrência de perda expressiva em duas safras (2015/2016 e 2019/2020) e de perda moderada em uma safra (2018/2019). São inúmeras as pragas e doenças que podem atingir a cultura da soja, tais fatores bióticos causam prejuízos desde o momento em que emergem até o período de colheita e armazenagem dos grãos (Freitas, 2011). Dentre os fatores abióticos, pode-se destacar o déficit hídrico, as concentrações de sais presentes no solo, as baixas temperaturas, inundações, calor, estresse oxidativo e metais pesados. Porém, do ponto de vista econômico, a seca é o estresse abiótico mais importante, afetando de modo direto a produtividade das culturas (Mohammadi *et al.*, 2012).

Quando ocorre uma má disponibilidade de nutrientes e os solos são limitados, processos, como transporte de água e solutos, fotossíntese, produção de proteína, óleo e carboidratos não ocorrem em taxas adequadas, impactando diretamente a produtividade. Para evitar tais problemas e garantir uma boa produtividade, torna-se necessário suprir as exigências nutricionais da cultura, atendendo à demanda da planta em relação à absorção e extração de nutrientes do solo (Saryoko *et al.*, 2017).

A cultura da soja também tem sido questionada pelos impactos sociais e ambientais que causa (Contini *et al.*, 2018). Dentre as principais preocupações que surgem dessa atividade agrícola estão aquelas ligadas à interferência intensa em ecossistemas locais, tais como: contaminação do ar, poluição de cursos d'água, erosão do solo (Alcantara; Leite, 2018), desmatamento e queimadas, ampliação de área para produção, gestão inadequada das áreas de proteção permanente e ineficiência no controle dos resíduos tóxicos (Ramos; Santos; Neto, 2015).

3.5 A geração do bagaço de cana-de-açúcar

O Brasil é o principal produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido pela Índia, China, Tailândia, Paquistão e México (FOA, 2020). São aproximadamente 404 usinas que atuam no território brasileiro para produção de açúcar e etanol, tendo um impacto direto nas vidas de cerca de 70 mil produtores (Cursi *et al.*, 2021). A Companhia Nacional de Abastecimento estimou que, na safra de 2022/23, haverá 598,3 milhões de toneladas de cana-de-açúcar no Brasil, em uma área de colheita de 8,8 milhões de hectares. Ainda é importante salientar que os 20 maiores produtores mundiais, juntos, produzem 1,75 bilhão de toneladas anuais, ocupando uma área de aproximadamente 24.250.000 hectares (Kaab *et al.*, 2019; Nunes *et al.*, 2020). Sendo assim, é relevante analisar as consequências causadas pela intensificação desse segmento, uma vez que, anualmente, milhões de toneladas de resíduos agroindustriais são gerados. Esses resíduos, quando descartados inadequadamente, causam danos econômicos e ambientais, como o aumento das emissões de gases de efeito estufa e a diminuição da fertilidade do solo (IPCC, 2019; GTSC, 2020; GTSC 2021). Deve-se destacar que a cultura da cana-de-açúcar contribuiu com, aproximadamente, 69% dos resíduos produzidos pela agroindústria brasileira (Cruz *et al.*, 2021). De fato, ao longo dos anos, essa cultura causou um considerável

dano ao ambiente, uma vez que os resíduos eram descartados sem qualquer tipo de controle, sobretudo em rios (Cruz *et al.*, 2021).

A cana-de-açúcar, composta por cerca de 50% de celulose, 27% hemicelulose e 23% lignina (Mendes *et al.*, 2015), é formada por duas partes: uma que inclui os rizomas e as raízes, enquanto a outra é caracterizada pelas folhas e flores. Após o processo de beneficiamento e moagem da planta, é gerado o bagaço de cana-de-açúcar (BCA). Dessa forma, visando prevenir o descarte inadequado e aproveitar os resíduos agrícolas produzidos pela agroindústria, diversos estudos têm sido conduzidos para encontrar soluções para sua utilização em diferentes segmentos (Buss *et al.*, 2020; Das *et al.*, 2020; Cruz *et al.*, 2021). Dentre essas possibilidades, o biocarvão tem sido apontado como uma alternativa para diversos resíduos agrícolas (Deng *et al.*, 2017; Nie *et al.*, 2018; Pires *et al.*, 2018; Varanda *et al.*, 2019; Cabrini; Cardi, 2020; Souza *et al.*, 2021).

4. METODOLOGIA

4.1 Coleta e preparação do bagaço de cana-de-açúcar (BCA)

A coleta do bagaço de cana-de-açúcar (BCA) foi realizada na Usina Cerradão, situada no município de Frutal-MG. O BCA foi secado a temperatura ambiente por, aproximadamente, 72 h. Em seguida, o produto foi triturado num Triturador Forrageiro (TRF 90, TRAPP, Jaraguá do Sul, Brasil) e passado por uma peneira com abertura de 2 mm (Figura 2).



Figura 2 – Bagaço de cana-de-açúcar após ser triturado

Fonte: Arquivo pessoal.

4.2 Preparação do biocarvão a partir do bagaço de cana-de-açúcar

O biocarvão foi obtido a partir de pirólise do BCA em um sistema de forno de duplo tambor (O'Toole *et al.*, 2013; Konaka *et al.*, 2019; Ighalo *et al.*, 2022). Para tanto, no tambor interno foram colocados 5 kg do BCA, enquanto o espaço entre os tambores (interno e externo) foi preenchido com lenha, que serviu como fonte de energia para pirólise. Durante a carbonização, a temperatura foi monitorada com termômetro digital infravermelho com mira laser e apresentou valor médio de 305 °C. Após 3 h do início da pirólise, o material foi retirado do forno, imediatamente molhado com água para interromper o processo de aquecimento e evitar a combustão do material ao entrar em contato com o oxigênio. Em seguida, o biocarvão

foi seco em estufa a 70 °C por 72 h (Trazzi, 2014). O biocarvão obtido foi codificado como BBT e o rendimento gravimétrico (RG, %) foi determinado por meio da divisão da massa obtida pela massa seca do BCA (Equação 1).

$$RG(\%) = \frac{m_f}{m_i} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que: m_f e m_i indicam as massas do biocarvão (g) e do bagaço de cana-de-açúcar (g), respectivamente.

4.3 Caracterização das propriedades físico-químicas do biocarvão obtido a partir do bagaço de cana-de-açúcar

4.3.1 Determinação do pH e da condutividade elétrica

O pH do BBT foi obtido, em triplicata, a partir da combinação de 1 g do biocarvão com 5 mL de CaCl_2 (0,01 mol L^{-1}). A mistura foi agitada em mesa agitadora por 10 min a 220 rpm. Após 30 min em repouso o valor do pH em suspensão foi medido com pHmetro (DM22, Digimed, São Paulo, Brasil). Também foi mensurada a condutividade elétrica (CE) do BBT, em triplicata, utilizando a mistura de 0,5 g do biocarvão com 5 mL de água deionizada. A mistura foi agitada em mesa agitadora por 30 s a 220 rpm. Após 30 min em repouso o valor da CE foi registrado com condutivímetro de bancada (W12D, BEL Engineering, Monza, Itália).

4.3.2 Quantificação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo

Para determinação dos teores de materiais voláteis (TV), cinzas (TC) e carbono fixo (CF) adotou a metodologia descrita por Figueiredo *et al.* (2018). Inicialmente, 1,00 g do BBT, em triplicata, foi colocado em cadinho tampado e levado à porta do forno tipo mufla por 2 min, a 950 °C. Posteriormente, o cadinho foi inserido no interior do forno por 9 min e após esse período, a amostra foi colocada em dessecador por 30 min. A massa obtida foi registrada e o TV foi calculado usando a Equação 2.

$$TV(\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que: TV, m_i e m_f indicam o teor de materiais voláteis (%), a massa inicial do BBT (g) e a massa final (g) obtida após o aquecimento em forno tipo mufla, respectivamente.

O TC foi o obtido aquecendo 1,00 g do BBT, em triplicata, num forno tipo mufla a 600 °C, por 6 h. Em seguida, a amostra foi colocada em dessecador por 30 min e após esse período determinou-se a massa. O TC foi calculado usando a Equação 3.

$$TC (\%) = \frac{m_f}{m_i} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que: TC, m_i e m_f indicam o teor de cinzas (%), a massa inicial do BBT (g) e a massa final (g) obtida após o aquecimento em forno tipo mufla, respectivamente.

O CF foi determinado de modo indireto usando a Equação 4.

$$CF (\%) = 100 - (TC + TV) \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que: CF, TC e TV indicam os teores de carbono fixo, cinzas e materiais voláteis, respectivamente.

4.3.3 Caracterização morfológica e elemental da superfície do biocarvão

A característica morfológica da superfície do BBT foi avaliada por Microscopia Eletrônica de Varredura (Vega 3 LMU, TESCAN, Brno-Kohoutovice, República Checa) acoplado a um detector de Energia Dispersiva de Raios X (X-MaxN, Oxford, Oxford, Reino Unido) para análises elementares qualitativas.

4.3.4 Análise do lixiviado por Ressonância Magnética Nuclear de Hidrogênio (RMN de ^1H)

100 mg do BBT foi submetido à extração com 1,0 mL de solução tampão de KH_2PO_4 em D_2O (pH 6,0), contendo 0,01 % (m/v) de 3-trimetilsilil-2,2,3,3-propionato- d_4 de sódio (TSP- d_4) como referência interna. Após a combinação com o solvente a amostra foi agitada por 1 min em vortex, colocada em banho de ultrassom por 20 min e centrifugada a 17.000 g. 600 μL do sobrenadante foi transferido para tubo de RMN com diâmetro de 5 mm. O espectro de RMN de ^1H foi obtido em espectrômetro Bruker AVANCE DRX400 a 300 K, com janela espectral de 16 ppm, número de pontos 32k, tempos de aquisição (AQ) e recuperação (d1) de 2,0 s. Para o processamento foi utilizado o alargamento de linha de 0,3 Hz, anterior à transformada de Fourier. A fase e linha de base foram corrigidas automaticamente utilizando

o programa TopSpin 4.0.9 e, por fim, o espectro foi calibrado pelo sinal do TSP- d_4 em 0.00 ppm. As identificações dos compostos foram realizadas pelo emprego do programa Chenomx NMR Suite 10.0 (Chenomx Inc., Edmonton, Canadá), que comparou os espectros obtidos com aqueles de substâncias puras que estavam no banco de dados do programa.

4.4 Ensaios de germinação de sementes de soja (*Glycine max* L.)

O bioensaio em placa de Petri sem solo é recomendado para identificar a fitotoxicidade do biocarvão sobre a germinação de sementes e o crescimento inicial de plântulas antes do uso desse produto em campo porque é um ensaio simples, rápido e não exige o uso de solo padronizado (Solaiman *et al.*, 2012; Das *et al.*, 2020a; Das 2020b). Para este estudo, ele foi usado para analisar a germinação de sementes de soja em água destilada e em diferentes doses de BBT. Assim, o efeito do BBT sobre a germinação de soja (*Glycine max* L.) foi investigado em placas de Petri (8,5 cm de diâmetro) com as seguintes doses: 0,00 (referente ao controle, na qual se utilizou água destilada); 0,50; 1,00; 2,50 e 5,00 g por placa, correspondendo aos seguintes valores em t/ha, com base no volume a 10 cm de profundidade do solo, 0, 10, 20, 50, 100, respectivamente (Solaiman *et al.*, 2012). Os ensaios de germinação foram conduzidos em câmaras de germinação do tipo "biochemical oxygen demand" (BOD), com fotoperíodo de 12 horas, a 25 °C. Para tanto, vinte e cinco sementes de soja (*Glycine max*) foram distribuídas em placas de Petri, em triplicata, sobre uma camada de papel de filtro, umedecido com 20 mL água destilada. Esse procedimento foi repetido adicionando as diferentes doses de BBT sobre as sementes. Todas as placas de Petri foram tampadas e incubadas e, aos 4, 5 e 8 dias após o início do experimento, determinaram-se o número de sementes germinadas e o comprimento médio da radícula por placa. Esses dados foram aplicados para os cálculos da Germinação Relativa (GR), Crescimento Médio Relativo da Radícula (CRR) e Índice de Germinação (IG) usando as Equações 5, 6 e 7, respectivamente, propostas por Emino e Warman (2004) e Gascó *et al.* (2016).

$$GR (\%) = \frac{N_B}{N_C} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

Em que: GR, N_B e N_C indicam a germinação relativa (%), o número de sementes germinadas no tratamento com o biocarvão e o número médio de sementes germinadas no controle, respectivamente.

$$CRR (\%) = \frac{L_B}{L_C} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 6})$$

Em que: CRR, L_B e L_C indicam o Crescimento Médio Relativo da Radícula (%), o comprimento médio da radícula no tratamento com o biocarvão e o comprimento médio da radícula no controle, respectivamente.

$$IG (\%) = \frac{GR \cdot CRR}{100} \quad (\text{Eq. 7})$$

Em que: IG, GR e CRR, indicam o Índice de Germinação (%), a germinação relativa (%) e o Crescimento Médio Relativo da Radícula (%), respectivamente.

4.5 Ensaios em casa de vegetação com soja (*Glycine max* L.)

4.5.1 Coleta e caracterização do solo

O solo usado nesse experimento foi coletado em uma área de canavial, com uma profundidade de 0 a 25 cm, na cidade de Frutal-MG, Estado de Minas Gerais, Brasil (19°59'04.8" S; 49°10'31,1" O). A Umidade Gravimétrica (UG, %) foi calculada, em triplicata, colocando 10 g do solo em um cadinho de porcelana, que foi aquecido em estufa a 105 °C por 24 h (EMBRAPA, 1997). Após registrar a massa depois do aquecimento e usando a Equação 8, calculou-se a UG (%).

$$UG (\%) = \left(\frac{m_i - m_s}{m_s} \right) \quad (\text{Eq. 8})$$

Em que: UG, m_i e m_s indicam Umidade Gravimétrica (%), a massa inicial do solo e massa seca do solo (g), respectivamente.

Uma sub-amostra do material coletado foi encaminhada ao Laboratório de Química Agropecuária do Instituto Mineiro de Agropecuária (IMA) para análises químicas do solo, incluindo pH (H_2O), acidez potencial ($H + Al$, $cmol_c \, dm^{-3}$), potássio (K, $cmol_c \, dm^{-3}$), fósforo (P, $mg \, dm^{-3}$), cálcio (Ca, $cmol_c \, dm^{-3}$), magnésio (Mg, $cmol_c \, dm^{-3}$), soma de base (SB, $cmol_c \, dm^{-3}$), capacidade efetiva de troca de catiônica (CTC_e, $cmol_c \, dm^{-3}$), matéria orgânica (MO, %), ferro (Fe, $mg \, dm^{-3}$), cobre (Cu, $mg \, dm^{-3}$), zinco (Zn, $mg \, dm^{-3}$), e manganês (Mn, $mg \, dm^{-3}$).

4.5.2 Instalação do experimento em casa de vegetação

A partir dos resultados do ensaio de germinação (item 3.4), selecionaram-se as doses de 0, 1, 3 e 5 (% m/m) equivalentes a 0, 10, 30 e 50 t/ha do BBT para avaliar o efeito sobre o

crescimento inicial de mudas de soja. As sementes dessa leguminosa foram plantadas em sacos de polietileno com dimensões de aproximadamente 18 cm x 15 cm x 15 cm para cultivo de plantas, contendo o solo condicionado com as doses crescentes do BBT. O experimento foi montado em casa de vegetação com delineamento experimental inteiramente casualizado. Os tratamentos foram obtidos a partir da combinação das 4 doses de BBT (0, 10, 30 e 50 t/ha) com avaliação após 30 dias da semeadura. Após esse período, a parte aérea foi cortada e o sistema radicular removido cuidadosamente do solo em água parada contida em um balde de 10 L. Em seguida, foram feitas as quantificações da altura da Altura da parte aérea (APA), número de folhas (NF), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa fresca do sistema radicular (MFSR) e número de nódulos (NN) de cada planta. As UG (%) das amostras de solo também foram determinadas. Além disso, uma sub-amostra do solo de cada tratamento foi secada ao ar, destorrada e encaminhada ao Laboratório de Química Agropecuária do Instituto Mineiro de Agropecuária (IMA) para realização das análises químicas do solo (item 3.5).

4.6 Avaliação da microbiota do solo (bactérias e fungos)

Sub-amostras do solo coletado foram separadas e misturadas com doses crescentes do BBT (0, 10, 30 e 50 t/ha). 300 g de cada mistura foram acondicionadas dentro de béqueres, em temperatura ambiente, por 6 dias. Após esse período, 5 g de cada mistura foram submetidos a extração com 45 mL de solução de pirofosfato de sódio 0,1% (m/v) sob agitação por 30 min, em mesa agitadora com velocidade de 150 rpm. Em seguida, diluições decimais em série de 10^{-1} a 10^{-9} foram feitas com solução aquosa de cloreto de sódio 0,9% (m/v). Alíquotas de 0,1 mL de cada diluição foram transferidas pelo método “pour plate” para placas de Petri contendo meio de cultura e acondicionadas em saco plástico com o objetivo de evitar o ressecamento do meio (Olsen; Bakken, 1987; Sorheim; Torsvik; Goksoyr, 1989) e incubadas na temperatura indicada para cada microrganismo. Esses procedimentos também foram aplicados para sub-amostras de solo coletadas aos 30 dias da semeadura de soja (item 3.5). As análises de bactérias e fungos totais foram realizadas conforme metodologias descritas a seguir:

4.6.1 Bactérias totais

O meio de cultura Ágar Nutriente da marca Biolog foi preparado conforme as instruções do fabricante, para contagem do número total de microrganismos. As placas de Petri foram

incubadas em estufas BOD, com temperatura a 30 °C, em ausência de luz. As contagens foram feitas a cada 48 h em um contador de colônias com 6x de aumento, até não se constatar nenhum aumento de número de colônias (Olsen; Bakken, 1987; Sorheim; Torsvik; Goksoyr, 1989).

4.6.2 Fungos totais

O meio Martin (1950) foi usado para contagem do número total de fungos, sendo constituído por 1.000 mL de água, 10 g de ágar, 1,0 g de KH_2PO_4 , 1,0 g de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 5,0 g de peptona e 10,0 g dextrose. O pH foi ajustado para 5,5, acrescido de 70 mg/mL de rosa de bengala. O meio foi autoclavado por 15 min e a incubação das culturas foi realizada a 30 °C por dois dias. A contagem foi realizada a olho nu, com o auxílio de uma mesa contadora de colônias.

4.7 Análise estatística

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância, sendo as médias comparadas pelo Teste Scott-Knott ao nível de 5% de significância, utilizando-se o programa SISVAR (Ferreira, 2000).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização do biocarvão

O biocarvão apresentado na Figura 3, produzido a partir do BCA, apresentou uma coloração escura e inodoro, indicando que ocorreu a carbonização da biomassa por meio da pirólise (Bueno, 2017). Esse processo de decomposição térmica provoca a perda gradativa de massa, devido à liberação de diferentes compostos, como monóxido de carbono, dióxido de carbono e ácido acético. A perda de massa aumenta proporcionalmente à temperatura de pirólise (Roz *et al.*, 2015). Dessa forma, o rendimento gravimétrico (RG) é influenciado pelas condições de pirólise e pelo tipo de matéria-prima. Neste estudo, o RG (%) obtido com a pirólise do BCA em forno de duplo tambor foi de 31,6% (Tabela 1). Figueredo *et al.* (2017) obtiveram um rendimento de 24% ao produzir biocarvão a partir do BCA na temperatura de 500 °C.

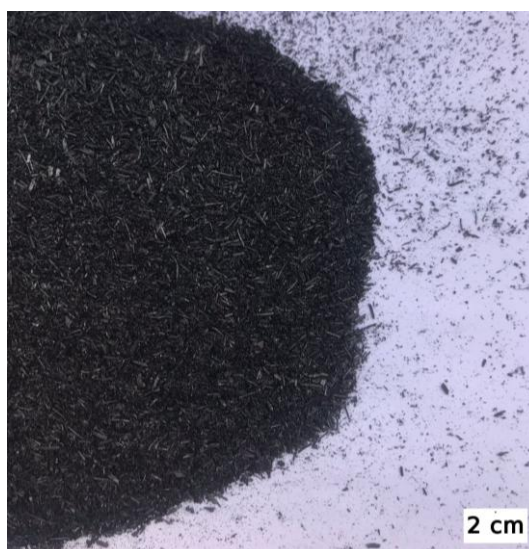


Figura 3 – Biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar em forno de duplo tambor (BBT)
Fonte: Arquivo pessoal.

Para se ter uma melhor compreensão das características do BBT, também foram determinados os teores de materiais voláteis (TV), cinzas (TC) e carbono fixo (CF) (Tabela 1). A fração menos estável do biocarvão é composta por materiais voláteis, sendo que grande parte é formada por compostos oxigenados (Conti *et al.*, 2016). As cinzas são resíduos que sobram da volatilização dos compostos orgânicos (Andrade *et al.*, 2017; Boer *et al.*, 2021) e seus teores dependem da biomassa. Em estudo realizado por Figueredo *et al.* (2017), constatou-se que biocarvões oriundos do BCA apresentaram teores de cinzas de 7,04% e 12,70%, quando

preparados com temperaturas de pirólises de 300 °C e 500 °C, respectivamente. Esses resultados são semelhantes ao teor de cinza encontrado para o BBT (Tabela 1).

Tabela 1 – Características químicas do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar em forno de duplo tambor (BBT)

Biocarvão	RG	TV	TC	CF	C	O	Si	K	Fe	Al	Ca	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
	% m/m												
BBT	31,6	17,8	9,7	72,5	82,9	13,6	1,1	0,9	0,6	0,5	0,4	7,85	94,1

Os termos e símbolos RG, TV, TC, CF, C, O, Si, K, Fe, Al, Ca, CE, significam, respectivamente, rendimento gravimétrico, teor de materiais voláteis, teor de cinza, teor de carbono fixo, carbono, oxigênio, silício, potássio, ferro, alumínio, cálcio e condutividade elétrica.

O CF é a fração mais resistente do material, a que permanece após a perda de água e compostos voláteis, eliminados durante a pirólise (Roz *et al.*, 2015; Andrade *et al.*, 2017). O TF encontrado para BBT foi de 72,4%, valor similar aos encontrados por Boer *et al.* (2021), que relataram teores de carbono fixo para biocarvões variando entre 73,5% e 75,7%. Lehman e Joseph (2009) definem materiais com teores de carbono iguais ou superiores a 80% como de alto teor de carbono. Os autores ainda relatam que os biocarvões de madeira produzido em temperaturas entre 400 °C e 500 °C, assim como outros biocarvões de outras biomassas, como os feitos de talos de milho, que têm uma quantidade de cinzas relativamente maior do que a de muitas madeiras (frequentemente entre 2 a 8 %), apresentam teores de carbono entre 60% a 80%.

Na Tabela 1, verifica-se também que o pH do BBT foi de 7,85, ou seja, ligeiramente alcalino. Valores de pH > 7 são associados a presença de cinzas de carbonatos, sais alcalinos e cátions básicos do biocarvão (Feitosa *et al.*, 2020). De fato, a análise por MEV/EDS revelou que o potássio é um dos principais elementos do BBT (Tabela 1 e Figura 4). Assim, o pH alcalino é uma característica de interesse agrônomo do biocarvão, pois contribui para redução da acidez do solo, proporcionando benefícios econômicos, além de refletir nos teores de nutrientes e aumento da produtividade das culturas (Shenider, 2015). Por outro lado, a CE do BBT, foi de 94,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$, é considerada alta. Isso significa um elevado teor de sais solúveis, que pode ser prejudicial às plantas sensíveis à salinidade, como algumas variedades de algodão (Jácome *et al.*, 2005).

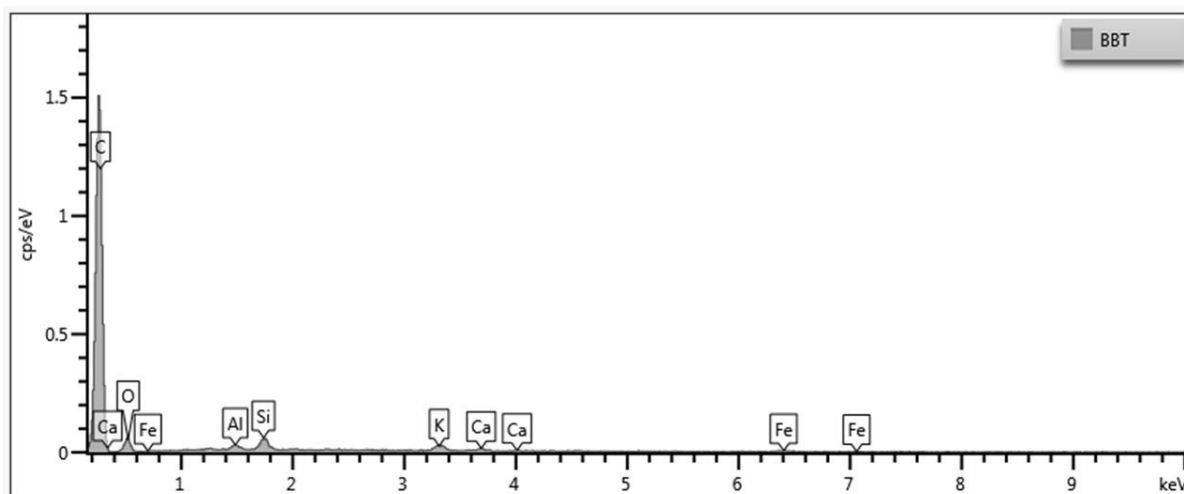


Figura 4 – Espectro de Energia Dispersiva de Raios X do biocarvão preparado a partir do bagaço de cana-de-açúcar

Outra propriedade importante do biocarvão é a porosidade, uma vez que os poros são fundamentais para a retenção de água, o crescimento de raízes, além de fornecerem abrigos para os microrganismos e auxiliarem na aeração do solo (Ogawa, 1994; Saito; MURAMOTO, 2002; Warnock *et al.*, 2007; Conz *et al.*, 2015). A porosidade do biocarvão é influenciada, principalmente, pela biomassa precursora, mas a temperatura de pirólise também interfere nesse aspecto. Por isso, a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi aplicada para investigação da morfologia e porosidade do BBT. Na Figura 5 são apresentadas as micrografias com ampliações variando de 500 vezes a 10.000 vezes. Uma estrutura porosa, com partículas heterogêneas e irregulares, semelhante à de um favo de mel, é observada. Também vale destacar que essa estrutura porosa pode contribuir para retenção de umidade de solos, pois é sabido que a água é retida por tempos maiores quando ela é retida em poros menores ($>10\ \mu\text{m}$) (Thies; Rilig, 2009). De fato, o BBT é rico em poros com diâmetros inferiores a $10\ \mu\text{m}$ (Figura 5f).

A estrutura macroporosa e ordenada, semelhante a um favo de mel, já foi relatada em outros trabalhos (Ma *et al.*, 2018, Boss *et al.*, 2021; Bataillou *et al.*, 2022). Por exemplo, Bataillou *et al.* (2022), encontraram que o aumento da temperatura de pirólise de $400\ ^\circ\text{C}$ para $700\ ^\circ\text{C}$ promove o aumento na área superficial do biocarvão de $310\ \text{m}^2/\text{g}$ para $484\ \text{m}^2/\text{g}$, sendo que as superfícies desses materiais apresentaram com macroporos em forma de favo de mel. Por outro lado, a produção de biocarvão a $900\ ^\circ\text{C}$ reduziu a área de superfície específica para $136\ \text{m}^2/\text{g}$ e causou a perda dessa organização.

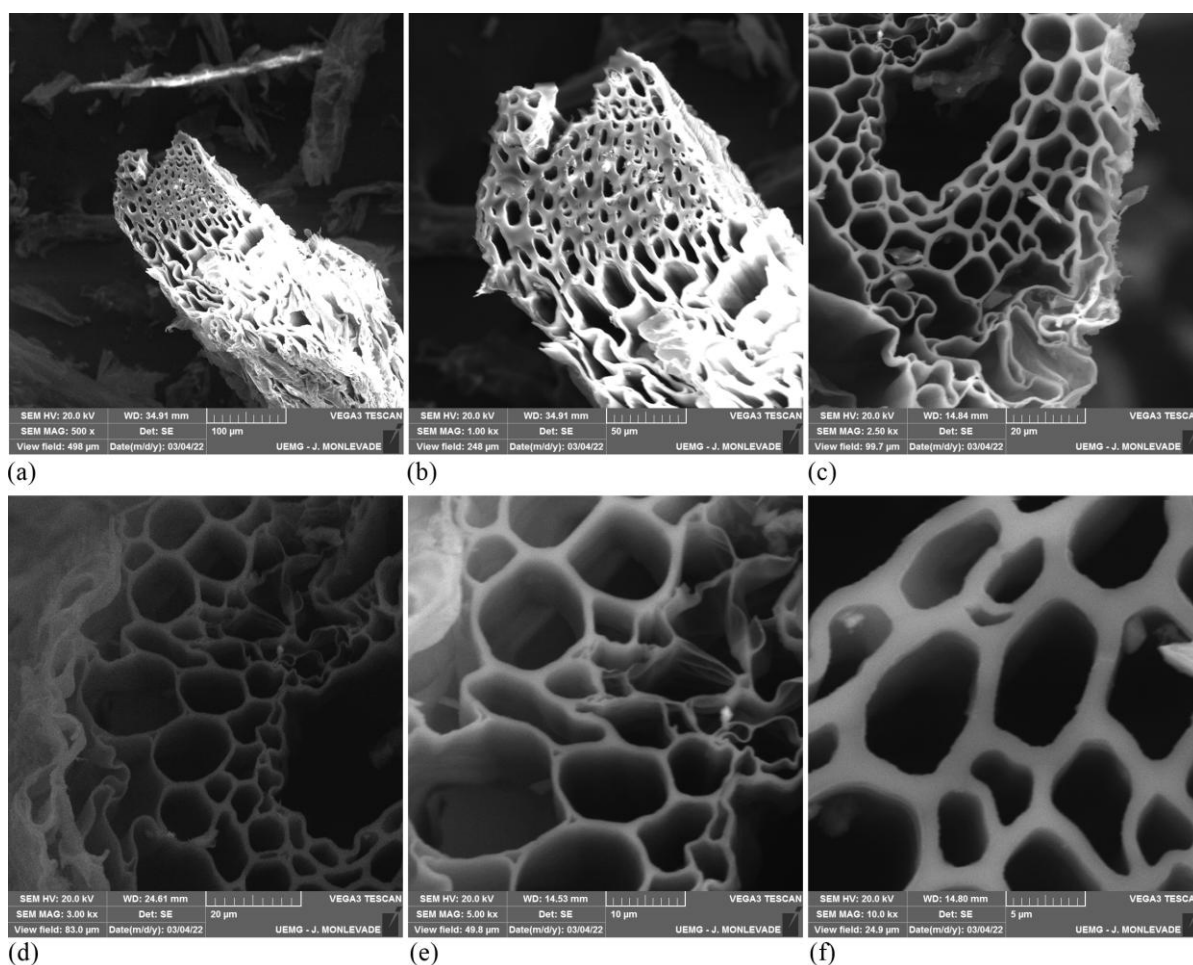


Figura 5 – Micrografias eletrônicas obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar em forno de duplo tambor, com ampliações de (a) 500 vezes, (b) 1.000 vezes, (c) 2.500 vezes, (d) 3.000 vezes, (e) 5.000 vezes e (f) 10.000 vezes

A Figura 6 mostra o espectro de RMN de ^1H do lixiviado do BBT. Observam-se sinais nítidos que possibilitaram a identificação de diferentes compostos de baixa massa molecular.

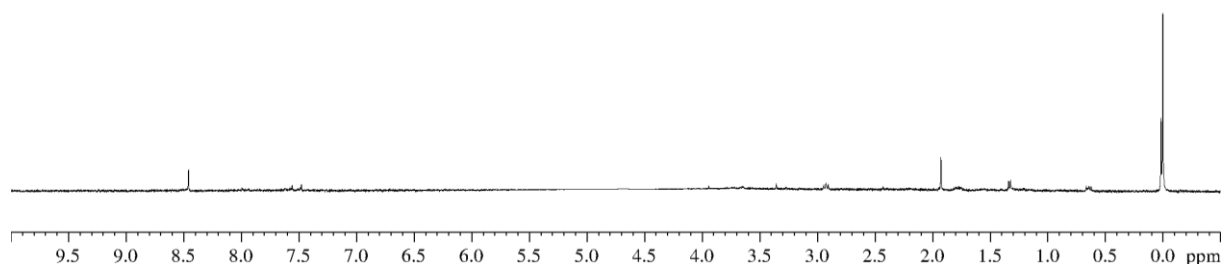


Figura 6 – Espectro de Ressonância Magnética Nuclear de Hidrogênio (400 MHz, solução tampão de KH_2PO_4 em D_2O , pH 6,0, a 300 K do lixiviado do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar

Os compostos comuns e identificados por meio da comparação do espectro obtido com aqueles de substâncias puras que estavam no banco de dados do programa computacional Chenomx NMR Suite 10.0 foram ácido lático, ácido acético, metanol e ácido fórmico. A presença desses compostos corrobora com outros resultados descritos na literatura (Mitchell *et al.*, 2015) e pode ser um dos motivos para a fitotoxicidade registrada em trabalhos com outros biocarvões (Himanen *et al.*, 2012; Gale *et al.*, 2016; Intani *et al.*, 2019). Contudo, é importante salientar que estudos sobre os teores desses compostos e testes *in vivo* também são necessários para compreender os efeitos da aplicação do BBT no crescimento das culturas agrícolas, bem como os outros possíveis efeitos ecotoxicológicos decorrentes dessa prática.

5.2. Efeitos do biocarvão obtido do bagaço da cana-de-açúcar na germinação de soja

Os resultados obtidos com os ensaios de germinação mostraram que o BBT apresentou efeitos significativos ($p < 0,05$) sobre a GR, CRR e IG de plântulas de soja (Figuras 7, 8 e 9). Esses parâmetros foram influenciados pelos períodos de incubação (4, 5 e 8 dias) e doses aplicadas do BBT (0 a 100 t/ha). A GR máxima (203 %) foi obtida aos 8 dias de incubação para a aplicação da dose de 20 t/ha, enquanto a GR mínima (55 %) foi observada com aplicação da dose de 100 t/ha, aos 4 dias de incubação (Figura 7). Além disso, é possível observar que, em todas as doses e períodos avaliados, os valores médios para GR (%) foram superiores aos observados para o controle, com exceção para o período de incubação de 4 dias na dose de 100 t/ha.

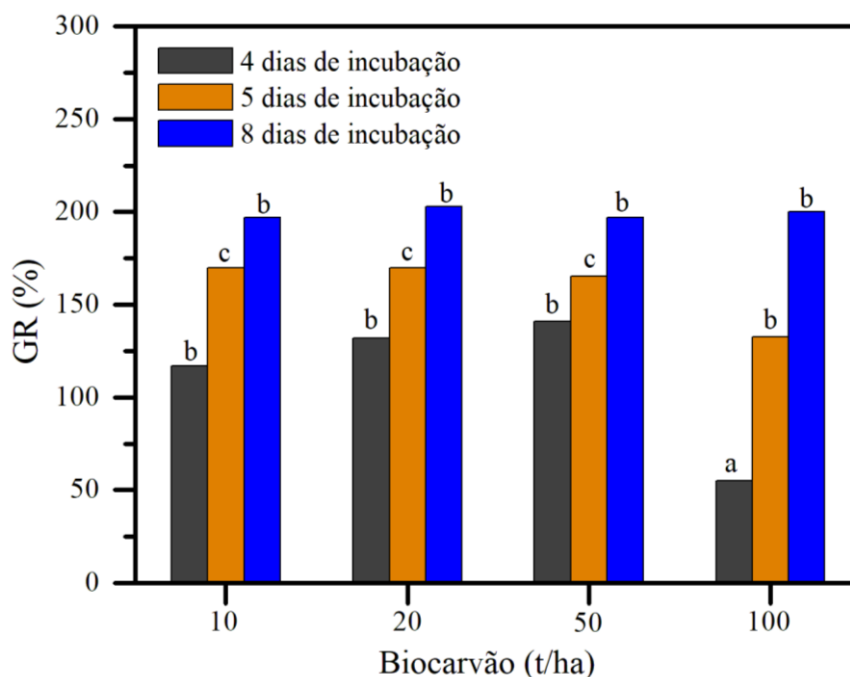


Figura 7 – Germinação Relativa (GR, %) de sementes de soja, em função do período de incubação, expostas a diferentes doses do biocarvão obtido da cana-de-açúcar. Médias seguidas de mesma letra, em barras de mesma cor, não apresentam diferenças significativas, ao nível de significância de 5%, pelo Teste Scott-Knott. Os valores médios da GR do controle foram de 100 a, para os três períodos de incubação

Quanto a avaliação do CRR (Figura 8), aos 8 dias de incubação, o valor máximo de 447% foi registrado com a aplicação da dose de 50 t/ha, enquanto o valor mínimo de 61% foi registrado com a aplicação da dose de 100 t/ha, aos 4 dias de incubação. Como ocorreu com a GR, é possível observar que, em todas as doses e períodos analisados, os valores médios para CRR foram superiores aos observados para o controle, com a exceção do período de incubação de 4 dias na dose de 100 t/ha. Esses resultados, mostram que o BBT tem potencial para acelerar a germinação e a emergência de plântulas de soja. Dessa maneira, é esperado o desenvolvimento de plantas de alto desempenho e com um maior potencial produtivo. Isso pode estar associado ao desenvolvimento de sistema radicular mais profundo (França-Neto *et al.*, 2016).

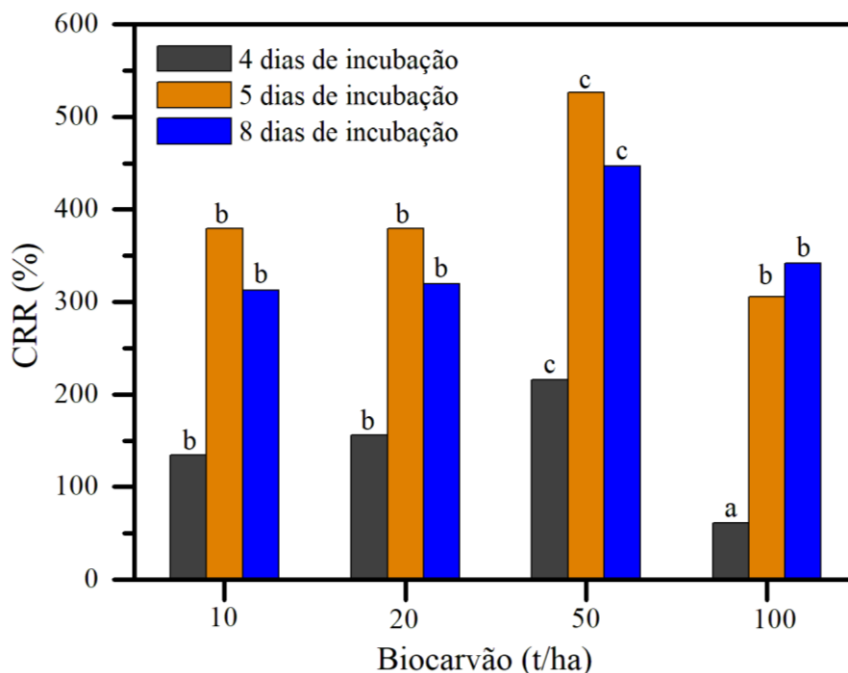


Figura 8 – Crescimento Médio Relativo da Radícula (CRR, %) de sementes de soja, em função do período de incubação, expostas a diferentes doses do biocarvão obtido da cana-de-açúcar. Médias seguidas de mesma letra, em barras de mesma cor, não apresentam diferenças significativas, ao nível de significância de 5%, pelo Teste Scott-Knott. Os valores médios do CRR do controle foram de 100a, para os três períodos de incubação

Os valores para os IG são mostrados na Figura 9, observa-se uma variação entre 45% e 882%, com valores máximo e mínimo registrados aos 4 dias e 8 dias de incubação, respectivamente. Deve-se ainda destacar que nos períodos de 4 dias e 5 dias de incubação todos os parâmetros avaliados foram estimulados com a aplicação das doses entre 10 e 50 t/ha de BBT, mas aos 8 dias de incubação não foram observadas diferenças significativas ($p > 0,05$) entre as doses de BBT.

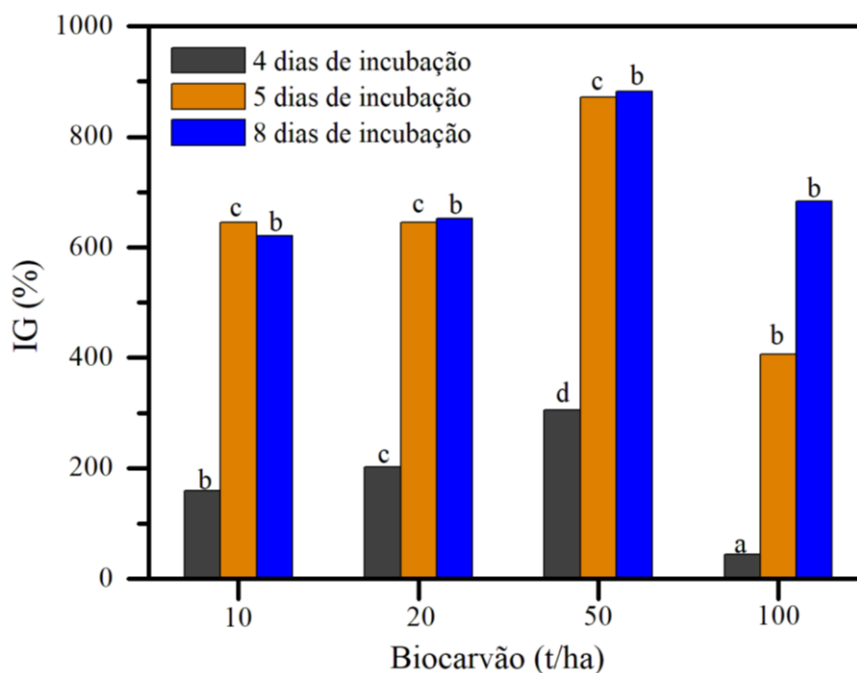


Figura 9 – Índice de Germinação (IG, %) de sementes de soja, em função do período de incubação, expostas a diferentes doses do biocarvão obtido da cana-de-açúcar. Médias seguidas de mesma letra, em barras de mesma cor, não apresentam diferenças significativas, ao nível de significância de 5%, pelo Teste Scott-Knott. Os valores médios do IG do controle foram de 100a, para os três períodos de incubação

Na literatura, é possível encontrar diversos trabalhos com resultados semelhantes aos encontrados neste estudo. Por exemplo, Solaiman *et al.* (2012) descobriram que as taxas de germinação de sementes de trigo (*Triticum aestivum*) foram afetadas pela aplicação de biocarvão. Os autores mostraram também que as taxas de germinação aumentaram quando as doses de aplicação do biocarvão variaram entre 10 e 50 t/ha e diminuíram ou não tiveram efeitos quando as doses foram superiores a 50 t/ha. Também vale mencionar o estudo de Zhu *et al.* (2018), pois revelou que, ao adicionar 1,5% (m/v) de biocarvão à areia, houve um aumento de 52% no tamanho das raízes das plântulas de soja. Em outra investigação, Uslu *et al.* (2020) demonstraram que a taxa de germinação de diversas espécies de forrageiras variaram entre 69% e 97% depois da aplicação de biocarvão com doses que variavam de 0 a 120 t/ha. A taxa máxima de germinação foi registrada com as doses de 40 e 80 t/ha, enquanto a taxa mínima foi observada na dose de 120 t/ha.

Assim, os resultados alcançados no bioensaio em placa de Petri sem solo apontam para a caracterização do BBT como composto fitoestimulante, uma vez que os valores de IG (Figura 8) foram superiores a 100 % (Emino; Warman, 2004; Gascó *et al.*, 2016). Esse resultado é apoiado pela composição do BBT (Tabela 1), que pode aumentar a disponibilidade de nutrientes

e proporcionar melhores condições de germinação (Uslu *et al.*, 2020). Além disso, as doses de 50 t/ha ou menores parecem ser a melhor opção para a germinação e crescimento de plântulas de soja.

5.3. Efeitos do biocarvão obtido do bagaço da cana-de-açúcar sobre as propriedades físico-químicas do solo

Os efeitos da adição de diferentes doses do BBT (0, 1, 3 e 5 % m/m) sobre a UG (%) do solo sob cultivo de soja foram avaliados. Esse parâmetro físico foi escolhido, pois é sabido que armazenamento de água no solo apresenta uma relação positiva com a sua umidade (Zhang *et al.*, 2021). Para fins de comparação também foi determinada, no dia da semeadura das sementes de soja, a UG (%) para cada amostra de solo condicionada com BBT. Os resultados mostraram que a aplicação das diferentes doses de BBT influenciaram significativamente ($p < 0,05$) a UG (%) (Tabela 2). No dia da semeadura das sementes de soja, a UG (%) variou de 14,1% a 15,1%, enquanto aos 30 dias a variação foi de 24,2% a 32,6%. Também foi possível observar uma redução significativa ($p < 0,05$) da UG (%) com a adição do BBT, exceto com a aplicação da dose de 30 t/ha que não diferiu significativamente ($p > 0,05$) do controle (0 t/ha), no dia do semeio. Por outro lado, com a aplicação da maior dose (50 t/ha) do BBT, verificou-se que houve um aumento significativo ($p < 0,05$) de aproximadamente 20 % para UG (%), aos 30 dias após o semeio. Esse aumento da UG (%) do solo com a maior dose de BBT pode ser atribuído à natureza porosa do material (Figura 5) e, provavelmente, à área de superfície que permite a retenção de água (Adekiya *et al.*, 2020; Riziki *et al.*, 2021).

De acordo com os resultados da UG (%), o BBT apresenta propriedades físico-químicas que podem aumentar a retenção da água. Isso é importante porque solos com capacidades de retenções de água aumentam o rendimento das culturas e diminuem a necessidade de irrigação (Sohi *et al.*, 2009). De fato, essa é uma propriedade reconhecida para outros biocarvões (Yu *et al.*, 2013; Pandian *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2021) que pode contribuir para que as plantas terem condições adequadas de crescimento, uma vez que é necessário que o solo possua porosidade - local de circulação do ar e da água, de crescimento das raízes e sobrevivência dos seres microscópicos - com frações de ar e água, variando entre 20-30% para ambos (Brady; Weil; 2013).

Tabela 2 – Umidade gravimétrica (UG, %) das amostras de solo condicionadas com de diferentes doses do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar no dia da instalação do ensaio em casa de vegetação e aos 30 dias após a semeadura de soja

Doses do biocarvão (t/ha)	UG (%)	
	No dia da semeadura de soja	30 dias após a semeadura de soja
0	15,1 b	27,3 a
10	14,1 a	24,2 a
30	15,1 b	25,0 a
50	14,1 a	32,6 b
CV (%)	2,3	6,6

Médias seguidas de mesma letra, em uma mesma coluna, não apresentam diferenças significantes, ao nível de significância de 5%, pelo Teste Scott-Knott.

Como já foi mostrado anteriormente, é sabido que o condicionamento do solo com o biocarvão afeta as propriedades químicas do solo. De fato, a adição do BBT provocou várias alterações nas propriedades químicas do solo aos 30 dias sob cultivo de soja. Na Figura 10, é possível observar que o condicionamento com BBT provocou uma pequena variação do pH da solução do solo com a menor dose, mas promoveu um aumento de 0,4 unidade com as doses de 3 % m/m (30 t/ha) e 5 % m/m (50 t/ha) de BBT. Essa ligeira variação no pH do solo provavelmente ocorreu devido à capacidade tamponante do mesmo, característica de solos argilosos e/ou ricos em matéria orgânica, que evitou grandes variações desse atributo.

Por outro lado, a acidez potencial (Al+H) reduziu linearmente com o aumento da dose de BBT de 0 % m/m para 5 % m/m. Esse resultado foi um dos principais benefícios encontrados da aplicação do biocarvão no solo. Como exemplo, pode-se citar a redução desse atributo em cerca de 30%, com a aplicação da taxa de 5 % m/m do biocarvão.

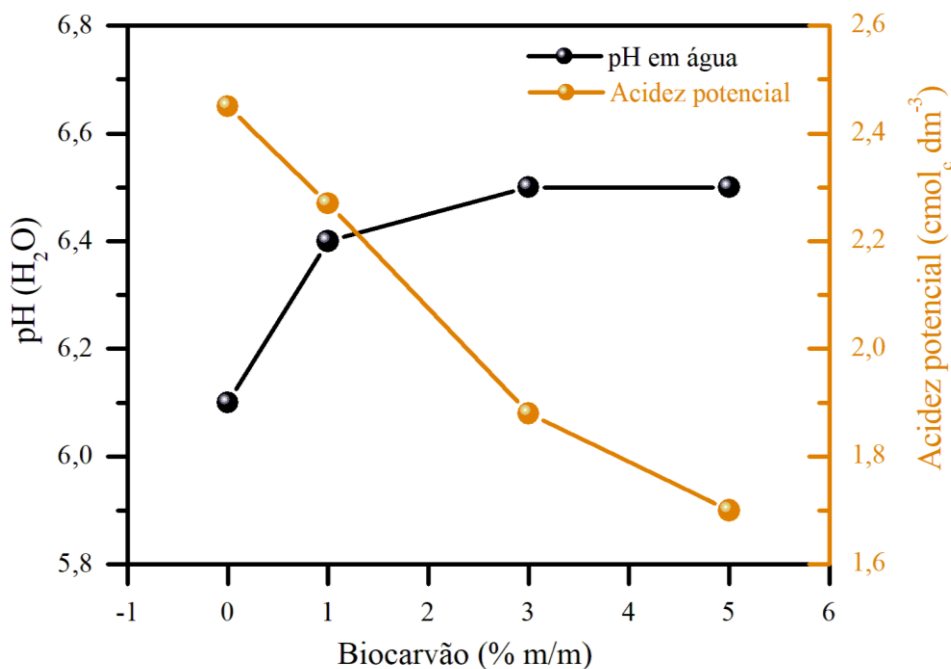


Figura 10 – Acidez potencial (H+Al) e pH para amostras de solos condicionadas com diferentes doses do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar, após 30 dias sob cultivo com soja. Os valores da acidez potencial e do pH para amostra de solo antes da instalação do experimento foram de 2,42 (cmol_c dm⁻³) e 6,2, respectivamente

O tratamento do solo com BBT também causou variações nas quantidades de bases trocáveis (Figura 11). O teor de K aumentou em todas as doses de aplicação do biocarvão (Figura 11). Isso ocorre porque a cinza do biocarvão é, majoritariamente, composta por óxidos de metais alcalinos (e.g. MgO, CaO, K₂O). Por outro lado, as altas taxas de aplicação do BBT (3 e 5 % m/m) causaram reduções nos teores de Ca e Mg. Observou-se também que a mistura de BBT com solo promoveu o aumento de P em todas as doses de aplicação (Figura 11). Deve-se ainda destacar, uma ligeira redução no teor de alumínio com a aplicação da dose de 3% m/m (30 t/ha) em 0,02 cmol_c dm⁻³, em relação ao controle (0 % m/m).

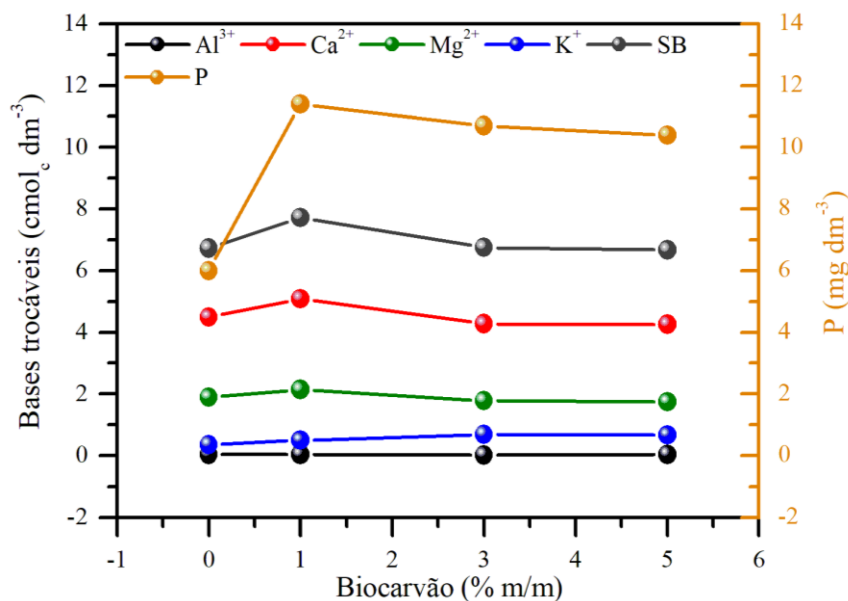


Figura 11 – Bases trocáveis para amostras de solos condicionadas com diferentes doses do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar, após 30 dias sob cultivo com soja. Os valores da Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , SB, em $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, para amostra de solo antes da instalação do experimento foram de 0,04, 5,29, 2,26, 0,39 e 7,94, respectivamente. O valor para o fósforo dessa amostra foi de $9,5 \text{mg dm}^{-3}$.

O potássio é um elemento indispensável para o crescimento das plantas, atuando em processos ligados à fotossíntese e respiração da planta, na manutenção de água nas plantas por meio da abertura e fechamento estomático, na regulação osmótica e na resistência da planta à ocorrência de pragas. O potássio é o nutriente mais requisitado pelas plantas, após o nitrogênio. Contudo, sua disponibilidade está diretamente associada à aplicação de fertilizantes e às reservas do solo (Ernani *et al.*, 2007; Martins, 2018). Dessa forma, o BBT pode ser benéfico para nutrição da planta, contribuindo para redução de custos com fertilizantes. É sabido que milhares de toneladas de fertilizantes são aplicadas anualmente nos solos brasileiros para que se possa atingir um nível de produtividade satisfatório. Além disso, o Brasil é o segundo maior consumidor mundial de potássio para a agricultura e o maior importador internacional do insumo, alcançando cerca de 9,3 milhões de toneladas todos os anos (Pinto, 2019).

Outros estudos também mostraram resultados semelhantes para bases trocáveis ao condicionar o solo com biocarvão (Vendruscolo *et al.*, 2016; Pinto *et al.*, 2023). Por exemplo, Vendruscolo *et al.* (2016), que analisaram os atributos químicos de um solo degradado em função da adição de biocarvão, constataram que as características químicas das amostras foram influenciadas positivamente, a curto prazo, pela incorporação do biocarvão, o que aumentou a disponibilidade de nutrientes como o fósforo e o potássio. A disponibilidade de fósforo,

segundo Crusciol *et al.* (2013), estimula o crescimento radicular das plantas. Dessa forma, ao aumentar o fósforo no solo com a adição de BBT, espera-se que ocorra uma melhoria no sistema radicular das plantas de soja, em relação ao controle. De fato, isso foi observado no ensaio de germinação (Figura 9) e na análise da Massa Fresca do Sistema Radicular (MFSR) (Tabela 3).

Os valores para a CTC_e também foram obtidos (Figura 12), sendo que o melhor resultado foi obtido com a aplicação da menor dose de BBT, ou seja, 1 % m/m, em comparação ao controle (Figura 12). Assim, a aplicação de BBT no solo pode contribuir para retenção de nutrientes (Guimarães, 2017). Curiosamente, nas maiores doses de BBT os valores obtidos para CTC_e foram próximos àquele registrado para o controle. Já os teores de MO no solo aumentaram com a adição do BBT. Isso é importante para a agricultura, pois proporciona a retenção de nutrientes e água, além de disponibilizar estruturas favoráveis para o desenvolvimento de microrganismos (Oni; Oziegbe; Olawole, 2019).

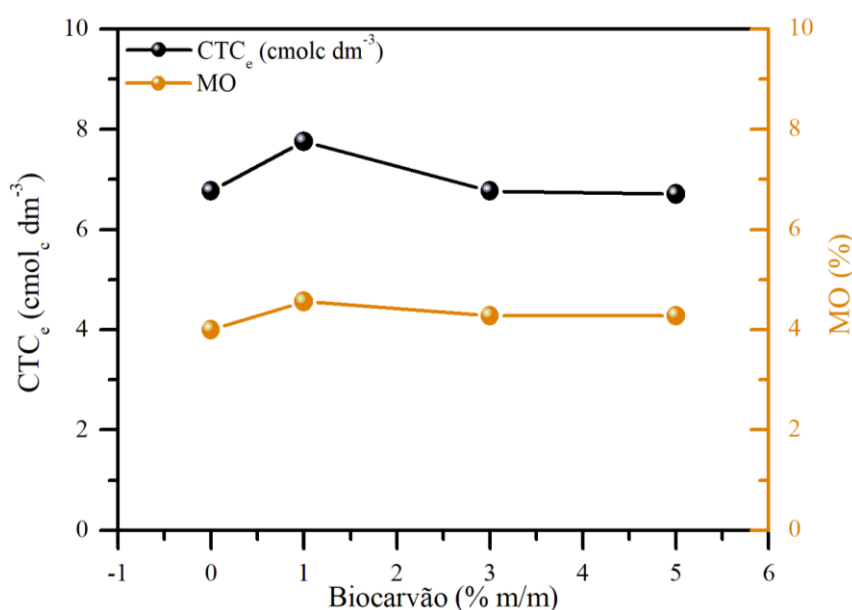


Figura 12 – Valores para capacidade efetiva de troca de cátions (CTC_e) e matéria orgânica (MO) para amostras de solos condicionadas com diferentes doses do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar, após 30 dias sob cultivo com soja. Os valores da CTC_e e MO para amostra de solo antes da instalação do experimento foram de 7,98 cmol_c dm⁻³ e 4,14 (%), respectivamente

A análise dos teores de micronutrientes revelou um aumento da concentração de ferro à medida que aumentava a dose de BBT (Figura 13). Além disso, outro dado relevante foi o aumento abrupto de manganês (Mn) com a adição do BBT. Ainda não está bem definida essa variação, mas o Mn, provavelmente, deve fazer parte do BBT. De qualquer forma, os

micronutrientes são considerados fundamentais para o crescimento das plantas (Santos *et al.*, 2021). O ferro é importante na síntese de complexo proteína-clorofila nos cloroplastos, enquanto o manganês atua na evolução do O_2 no processo fotossintético, sinalização de hormônios etc. A disponibilidade desses elementos está diretamente ligada ao meio em que a planta está sendo cultivada, resultando na quantidade absorvida por ela durante o seu desenvolvimento. A deficiência destes elementos prejudica o crescimento e a produtividade das plantas (Cremonesi *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2021).

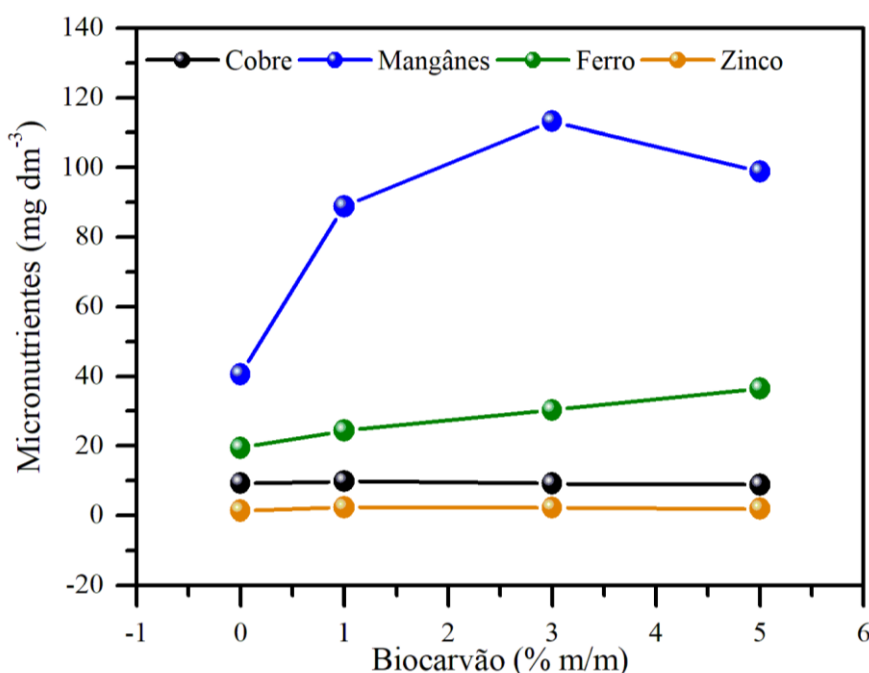


Figura 13 – Teores de micronutrientes (Cu, Mn, Fe e Zn) para amostras de solos condicionadas com diferentes doses do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar, após 30 dias sob cultivo com soja. Os teores de Cu, Mn, Fe e Zn, em $mg\ dm^{-3}$, para amostra de solo antes da instalação do experimento foram de 10,10 mg/dm^3 , 88,50 mg/dm^3 , 21,90 mg/dm^3 e 2,30 mg/dm^3 , respectivamente

5.4. Efeitos do biocarvão obtido do bagaço da cana-de-açúcar sobre o crescimento de mudas de soja

Para compreender os aspectos relativos à relação biocarvão-solo-planta, realizaram-se análises quanto à altura da parte aérea (APA), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa fresca do sistema radicular (MFSR), número de folhas (NF) e número de nódulos de rizóbios (NR) de mudas de soja aos 30 dias após o cultivo (Tabela 3). Observa-se que não foram registradas diferenças significativas para a APA, NF e MFPA. Por outro lado, MFRS aumentou

significativamente ($p > 0,05$) com a aplicação da dose de 5% m/m (50 t/ha) do BBT. O número de NR também foi influenciado positivamente com a aplicação das doses de 3 % m/m e 5 % m/m. Esses resultados apontam para um maior desenvolvimento agrônômico obtido com as maiores doses de BBT.

Tabela 3 – Altura da parte aérea (APA), número de folhas (NF), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa fresca do sistema radicular (MFSR) e número de nódulos de rizóbios (NR) de mudas de soja aos 30 dias após o cultivo em solo condicionado com diferentes doses do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar

Doses do biocarvão (% m/m)	APA (cm)	NF	MFPA (g)	MFSR (g)	NR
0	15,9 a	7,0 a	1,03 a	0,13 a	0,00 c
1	22,3 a	9,7 a	1,03 a	0,31 a	8,67 c
3	25,5 a	11,3 a	1,69 b	0,16 b	27,67 b
5	22,5 a	11,3 a	1,92 c	0,55 a	33,33 b
CV (%)	17,5	16,3	5,3	31,6	44,9

Médias seguidas de mesma letra, em uma mesma coluna, não apresentam diferenças significantes, ao nível de significância de 5%, pelo Teste Scott-Knott

Ao examinar os sistemas radiculares, foi possível observar a formação de nódulos nas plantas que receberam doses entre 1 e 5 % m/m do BBT (Figura 14), indicando a presença de rizóbios. De acordo com Parveen *et al.* (2016), as bactérias do grupo rizóbios são foco de interesse científico e econômico devido à sua capacidade de fixar o nitrogênio atmosférico nas plantas. Os rizóbios estimulam a formação de nódulos radiculares nas plantas leguminosas para que sejam produzidas moléculas sinalizadoras chamadas de Nod. De acordo com os autores, os nódulos permitem a conversão de nitrogênio em amônia para a absorção por plantas hospedeiras, o que reduz a necessidade de aplicação de fertilizantes químicos. Além disso, os rizóbios também têm um bom potencial de uso como agente de controle biológico contra patógenos de plantas do solo (Noreen *et al.*, 2016).



Figura 14 – Nódulos no sistema radicular de soja após 30 dias de cultivo em de solo, condicionado com 3 % m/m do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar
Fonte: Arquivo pessoal.

5.5. Efeitos do biocarvão obtido do bagaço da cana-de-açúcar sobre a microbiota do solo

Os microrganismos são importantes para agricultura, pois regulam a fertilidade do solo e contribuem para saúde vegetal e na ciclagem de elementos essenciais (Yin *et al.*, 2021). Eles também são utilizados como indicadores para avaliação da qualidade do solo, uma vez que alterações causadas por práticas agrícolas, por exemplo, afetam suas propriedades microbiológicas (Barbosa Brito *et al.*, 2016). Neste contexto, as alterações na microbiota do solo por meio da adição da biocarvão é uma preocupação que exige atenção para a aplicação eficaz desse condicionador. E, para avaliar essas alterações, as Unidades Formadoras de Colônias (UFC) de bactérias e fungos têm sido aplicadas, pois refletem a abundância da microbiota (Caniato *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020). Por isso, os efeitos do condicionamento do solo com o BBT sobre os microrganismos foram investigados em dois experimentos: i) Os números de UFC de bactérias e fungos foram quantificados após 6 dias de incubação para avaliar possíveis efeitos tóxicos de compostos lixiviados do BBT. ii) Os números de UFC de bactérias e fungos foram quantificados aos 30 dias de incubação em solo sob cultivo de soja, para avaliar os efeitos do BBT sobre o desenvolvimento da microbiota.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4, observa-se que o número de UFC de bactérias variou de 187 (UFC g⁻¹ solo seco) a 2840 (UFC g⁻¹ solo seco) aos 6 dias de incubação. Também foi possível observar que o condicionamento do solo com o BBT

promoveu o crescimento bacteriano até a dose de 3 % m/m e, uma tendência de redução foi observada para dose de 5 % m/m. Diferentemente do desenvolvimento aos 6 dias de incubação, aos 30 dias e sob cultivo de soja, os valores para as UFC de bactérias não deferiram significativamente ($p < 0,05$) do controle (Tabela 4), mas o maior valor de UFC de bactérias foi obtido com a aplicação da dose de 3% m/m do BBT.

Tabela 4 – Unidades Formadoras de Colônias (UFC) dos fungos e bactérias em solo condicionado com diferentes doses do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar

Doses do biocarvão (% m/m)	Fungos	Bactérias	Fungos	Bactérias
	UFC. g ⁻¹ solo seco aos 6 dias de incubação		UFC.g ⁻¹ solo seco aos 30 dias de incubação sob cultivo de soja	
0	240 b	187 a	1413 a	1346 b
1	123 a	683 b	1673 b	936 a
3	83 a	2840 c	1700 b	1736 c
5	193 b	1800 d	1866 d	926 a
CV (%)	27,5	14,8	4,9	14,8

Médias seguidas de mesma letra, em uma mesma coluna, não apresentam diferenças significantes, ao nível de significância de 5%, pelo Teste Scott-Knott

A avaliação das UFC de fungos, aos 6 dias de incubação, mostrou que o número de UFC de fungo variou de 83 (UFC g⁻¹ solo seco) a 240 (UFC g⁻¹ solo seco) e uma redução significativa ($p < 0,05$) foi encontrada com a aplicação da dose de 30 t/ha. Por outro lado, aos 30 dias após a semeadura de soja, o BBT aumentou significativamente ($p < 0,05$) os números de UFC de fungos (Tabela 6) em relação ao controle negativo (0 % m/m). Além disso, o condicionamento do solo com a dose de 50 t/ha promoveu o maior número de UFC de fungos, mas não foi observada diferença significativa ($p < 0,05$) em relação as outras doses (1 e 3 % m/m).

A abundância dos principais microrganismos do solo (bactérias e fungos) variou com a aplicação das doses do BBT e com o período de avaliação (Tabela 4). Inicialmente, os resultados indicaram que a adição do BBT provoca uma redução da comunidade fúngica que pode estar associada ao pH desse condicionador (pH 7,85; Tabela 1), uma vez que são esperados aumentos no pH da solução do solo, que desfavorecem o crescimento de fungos (Dai *et al.*, 2021). Deve-se ainda destacar que sais e outros compostos do BBT também podem ter contribuído para a inibição encontrada (Rath *et al.*, 2016). Outra observação importante é que

a redução da comunidade fúngica, aos 6 dias de incubação, também pode ter contribuído para o aumento do número de UFC de bactérias.

Por outro lado, aos 30 dias de avaliação, a adição do biocarvão favoreceu o desenvolvimento dos fungos, com o valor de UFC variando linearmente ($R^2 = 0,83$) com a dose aplicada do BBT. Esses resultados são coerentes com os valores para o pH da solução do solo aos 30 dias (Figura 9), pois em todas as doses investigadas os valores de pH foram ligeiramente ácidos, com variação máxima de apenas 0,4 unidade em relação ao controle. De fato, Rousk *et al.* (2009) encontraram um aumento no crescimento fúngico com a redução do pH da solução do solo na faixa de pH de 4,0 a 8,3, enquanto um comportamento oposto foi observado para o crescimento bacteriano.

O condicionamento do solo com BBT aumentou significativamente ($p < 0,05$) o número de UFC de bactérias, mas apenas aos 6 dias de incubação. Provavelmente, isso ocorreu porque nos primeiros dias de incubação do solo com o biocarvão é esperado o aumento de carbono lábil, isto é, aquele constituinte de compostos orgânicos facilmente mineralizado pelos microrganismos do solo (Andrade *et al.*, 2015; Rangel *et al.*, 2008). No entanto, outras propriedades do BBT também podem promover o desenvolvimento da microbiota, por exemplo, a retenção da umidade do solo (Tabela 2), o fornecimento de outros nutrientes (Tabela 1 e Figuras 10 e 12), e o aumento do teor de matéria orgânica (Figura 10). Além disso, o BBT possui uma estrutura porosa (Figura 5) e, por isso, a sua adição ao solo aumenta a área superficial, a distribuição do tamanho dos poros e promove refúgios para a microbiota.

Diversos autores têm demonstrado que os poros do biocarvão agem como refúgios para os microrganismos, que ficam protegidos da predação e beneficiam aqueles menos competitivos (Ogawa, 1994; Saito; Warnock *et al.*, 2007; Muramoto, 2002). Soma-se a isso o fato do biocarvão contribuir com a umidade e disponibilidade de nutrientes, vários estudos mostram efeitos positivos do biocarvão sobre a microbiota do solo (Corrêa *et al.*, 2020). Para exemplificar, pode-se citar o trabalho de García-Delgado *et al.* (2015), que analisaram a aplicação combinada de biocarvão e *Pleurotus ostreatus* para remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs). Os resultados mostraram que o biocarvão favoreceu a atividade de enzimas ligninolíticas. Outro exemplo pode ser encontrado no trabalho de Prendergast-Miller *et al.* (2014), que demonstraram que o biocarvão estimula o desenvolvimento da rizosfera e solos sob cultivo da cevada (*Hordeum vulgare* L.).

6. CONCLUSÃO

O BBT foi obtido com um rendimento satisfatório e características físico-químicas que corroboram com as descritas para outros biocarvões na literatura. O BBT apresentou-se sob a forma de um sólido escuro, com uma superfície irregular e porosa, com alto teor de carbono. Não foi encontrado efeito fitotóxico frente à germinação e o crescimento inicial de plântulas de soja, com aplicações de doses até 50 t/ha. Além disso, o BBT contribuiu com o aumento de alguns atributos de fertilidade do solo, como fósforo e potássio. Com isso, os parâmetros de crescimento inicial de plantas de soja foram influenciados positivamente com a adição do BBT ao solo, como a massa fresca do sistema radicular. Além disso, houve aumentos de Unidades Formadoras de Colônias (UFC) de bactérias e fungos no solo. Em relação às dosagens avaliadas para o condicionamento do solo, registrou-se para a maior dose (5 % m/m) resultados positivos na germinação de sementes, na umidade gravimétrica do solo, na microbiota do solo e no desenvolvimento das plântulas de soja. Contudo, a dose intermediária (3 % m/m) também acarretou ganhos para o desenvolvimento da microbiota do solo. Portanto, é possível concluir que o biocarvão feito do bagaço de cana-de-açúcar pode contribuir para o desenvolvimento inicial de plantas de soja, influenciando positivamente a germinação, bem como a fertilidade e microbiota do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABUJABHAH, I. S.; BOUND, S. A.; DOYLE, R.; BOWMAN, J. P. Effects of biochar and compost amendments on soil physico-chemical properties and the total community within a temperate agricultural soil. **Applied Soil Ecology**, v. 98, p. 243-253, 2016.
- ADEKIYA, A. O. *et al.* Effect of biochar on soil properties, soil loss, and cocoyam yield on a tropical sandy loam alfisol. **Scientific World Journal**, v, 2020, 9391630, 2020.
- AGUERO, V. M. **Viabilidade econômica da produção de milho e soja influenciada por doses de calcário e gesso**. 2021. 26 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Chapadão do Sul, 2021.
- ANDRADE, C. A. *et al.* Mineralização e efeitos de biocarvão de cama de frango sobre a capacidade e de troca catiônica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 5, p. 407-416, 2015.
- ANTERO, R. V. P. *et al.* Obtenção de hydrochar a partir de carbonização de cascas do fruto *Magonia pubescens* A. ST. Hil. Sapindaceae: Caracterização e avaliação em processo de adsorção. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, 2019.
- ARAÚJO, D. F. C.; SOBRINHO, F. L. A. A cultura agrícola da cana-de-açúcar no Brasil: contribuição ao estudo dos territórios rurais e suas contradições e conflitos. **Geopauta**, Vitória da Conquista, v. 4., n. 1, p. 162-183, 2020.
- ARATANI, R. G.; LAZARINI, E.; MARQUES, R. R.; BACKES, C. Adubação nitrogenada em soja na implantação do sistema plantio direto. **Bioscience Journal**, Umuarama, v. 24, n. 3, p. 31-38, 2008.
- BARBOSA BRITO, C. F. *et al.* Alterações físicas e biológicas de um eutruxox (latossolo) sob plantio direto e preparo convencional no semiárido brasileiro. **Ciencia del Suelo**, v. 36, n. 2, p. 148-155, 2018.
- BATAILLOU, G. *et al.* Cedar wood-based biochar: properties, characterization, and applications as anodes in microbial fuel cell. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 194, p. 4169-4186, 2022.
- BOER, F. D. *et al.* Slow Pyrolysis of Sugarcane Bagasse for the Production of Char and the Potential of Its By-Product for Wood Protection. **Journal of Renewable Materials**, v. 9, n. 1, p. 97-117, 2021.
- BONANOMI, G.; IPPOLITO, F.; SCALA, F. A “black” future for plant pathology? Biochar as a new soil amendment for controlling plant diseases. **Journal of Plant Pathology**, v. 97, n. 2, p. 223-234, 2015.

BOSS, A. F. N. *et al.* Investigation of sustainable porous carbon as radar absorbing material. **Matéria**, v. 26, n. 2, e12963, 2021.

BUENO, C. C. **Biochar**: Caracterização estrutural e interações com nutrientes e microorganismos pedológicos. 2017. 158 p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Instituto de Ciência e Tecnologia (Câmpus de Sorocaba), Sorocaba, SP, 2017.

BOUQBIS, L. *et al.* Phytotoxic effects of argan shell biochar on salad and barley germination. **Agriculture and Natural Resources**, v. 51, n. 4, p. 247–252, 2017.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos**. Porto Alegre: Bookman Editora, 2013.

BRASIL. **Projeções do Agronegócio: Brasil 2018/19 a 2028/29 projeções de longo prazo**. Secretaria de Política Agrícola. Brasília, p. 126, 2019. Disponível em: http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/informe_estatistico/Projecao_do_Agronegoci_o_2018_2019_a_2028_29_cafe.pdf.

CABRINI, M. P.; NARDI, M. C. C. Produção de biocarvão de resíduos de laranja aplicado como adsorvente no tratamento de águas contaminadas com o corante fucsina básica. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 12, p. 101028-101035, 2020.

CANIATO, M. M. *et al.* Diversity of bacterial strains in biochar-enhanced Amazon soil and their potential for growth promotion and biological disease control in tomato. **Acta Amazonica**, v. 50, n. 4, p. 278-288, 2020.

CARDOSO JÚNIOR, C. D. *et al.* Biochar improves soil physical characteristics and strengthens root architecture in Muscadine grape (*Vitis rotundifolia* L.). **Chemical And Biological Technologies in Agriculture**, v. 8, n. 1, 2021.

CHEN, Z. *et al.* Biochar decreased rhizodeposits stabilization via opposite effects on bacteria and fungi: diminished fungi-promoted aggregation and enhanced bacterial mineralization. **Biology and Fertility of Soils**, v. 57, n. 4, p. 533-546, 2021.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira – cana-de-açúcar**: Safra 2017/18. Brasília, 2017.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Série Histórica de Produção**, Brasília, 2020.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira – cana-de-açúcar**: Safra 2021/22. Brasília, 2022.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, safra 2022/23**, 2023.

CONTI, R.; FABBRI, D.; VASSURA, I.; FERRONI, L. Comparison of chemical and physical indices of thermal stability of biochars from different biomass by analytical pyrolysis and thermogravimetry. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 122, 160–168, 2016.

CONTINI, E. *et al.* Série desafios do agronegócio brasileiro (NT1). **EMBRAPA**, 2018.

CONZ, R. F.; ABBRUZZINI, T. F.; CERRI, C. E. P. **Caracterização de matérias-primas e biochars para aplicação na agricultura**. 2015. 132 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2015.

CARDOSO, S. *et al.* A chemometrics approach for nuclear magnetic resonance data to characterize the partial metabolome banana peels from southern Brazil. **Journal of Integrative Bioinformatics**, v. 14, n. 1, 2017.

CORRÊA, L. F. *et al.* Avaliação da qualidade de biochar por meio de índice de germinação. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 3, n. 3, p. 2710-2718, 2020.

CREMONESI, M. V. *et al.* Marcha de absorção, taxa de acúmulo e exportação de micronutrientes e alumínio pelo tabaco (*Nicotiana tabacum* L.). **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 18, n. 1, p. 13-23, 2019.

CRISPIM J. F. *et al.* Aspecto nutricional do biocarvão na produção de mudas de rúcula em condições semiáridas. **Colloquium Agrariae**, Presidente Prudente, v. 16, n. 3, p. 12-17, 2020.

CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A. S.; MAUAD, M.; SILVA, A. C. L. Desenvolvimento radicular e aéreo, nutrição e eficiência de absorção de macronutrientes e zinco por cultivares de arroz de terras altas afetadas pela adubação fosfatada. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 5, p. 2061-2076, 2013.

CURSI, D. E. *et al.* History and Current Status of Sugarcane Breeding, Germplasm Development and Molecular Genetics in Brazil. **Sugar Tech**, n. 24, 2021.

DAI, Z. *et al.* Association of biochar properties with changes in soil bacterial, fungal and fauna communities and nutrient cycling processes. **Biochar**, v. 3, p. 239–254, 2021.

DARCH, T. *et al.* Assessment of bioavailable organic phosphorus in tropical forest soils by organic acid extraction and phosphatase hydrolysis. **Geoderma**, v. 284, p. 93-102, 2016.

DAS, S. K.; GOSH, G. K.; AVASTHE, R. Evaluating biomass-derived biochar on seed germination and early seedling growth of maize and black gram. **Biomass Conversion Biorefinery**, v. 12, p. 5663-5676, 2020.

DAS, S. K.; GOSH, G. K.; AVASTHE, R. Ecotoxicological responses of weed biochar on seed germination and seedling growth in acidic soil. **Environmental Technology & Innovation**, v. 20, 2020.

DENG, W. *et al.* Sugarcane bagasse biochars impact respiration and greenhouse gas emissions from a latosol. **Journal of Soils and Sediments**, v. 17, p. 632-640, 2017.

DING, Y. *et al.* Biochar to improve soil fertility. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 36, n. 36, 2016.

DÖBEREINER, J.; BALDANI, V. L. D.; BALDANI, J. I. **Como isolar e identificar bactérias diazotróficas de plantas não-leguminosas**. Embrapa, Brasília, 1995.

DONG, L. *et al.* Irrigation with sediment-laden river water affects the soil texture and composition of organic matter fractions in arid and semi-arid areas of Northwest China, **Geoderma**, v. 328, p. 10-19, 2018.

EGAMBERDIEVA, D. *et al.* Biochar treatment resulted in a combined effect on soybean growth promotion and a shift in plant growth promoting rhizobacteria. **Frontiers Microbiology**, v. 7, p. 209, 2016.

EL-NAGGAR, A. *et al.* Biochar composition-dependent impacts on soil nutrient release, carbon mineralization, and potential environmental risk: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 241, p. 458–467, 2019.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. e. 2, Rio de Janeiro, 1997.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2018. Disponível em <http://www.fao.org/3/ca0239en/CA0239EN.pdf>. Acesso em: fevereiro 2023.

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; SANTOS, F. C. **Potássio**. In: Novais R. F. *et al.* (eds.). Fertilidade do Solo, Viçosa, Minas Gerais, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 2134-198, 2007.

ESTEVAM, C. G. *et al.* Potencial de mitigação de gases de efeito estufa das ações de descarbonização de soja até 2030. **Observatório de Bioeconomia**, 2022.

FEITOSA, A. A. *et al.* Caracterização química de amostras de biocarvão de casca de banana e bagaço de laranja carbonizados a 400 e 600° C. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 4, p. 901-912, 2020.

FERREIRA, D. M. Wastewater use in agriculture: Analytical limits of sewage for impact control in Brazil. **Revista Caatinga**, v. 32, n. 4, p.1048-1059, 2020.

FERREIRA, D. F. **Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0.** In: Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria, XLV, São Carlos, p. 255-258, 2000.

FERREIRA, E. P. B.; STONE, L. F.; MARTINS-DIDONET, C. C. G. População e atividade microbiana do solo em sistema agroecológico de produção. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 1, p. 22-31, 2017.

FERREIRA, J. C.; FINZER, J. R. D. Carvão ativado de bagaço da cana-de-açúcar: adsorção de íons de chumbo. **XXXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**, 2017.

FIGUEREDO, N. *et al.* Characterization of biochars from different sources and evaluation of release of nutrients and contaminants. **Soil Science**, v. 48, n. 3, p. 395-403, 2017.

FILHO, A. P. M. **Impacto do biochar de café sobre as atividades enzimáticas e biomassa microbiana em neossolo cultivados com milho e feijão.** 2017. 82 p. Dissertação (Pós-Graduação em Produção Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Garanhuns, Pernambuco, 2017.

GALE, N. V.; SACKETT, T. E.; THOMAS, S. C. Thermal treatment and leaching of biochar alleviates plant growth inhibition from mobile organic compounds. **Peer J**, v. 4, 2016.

GARCÍA-DELGADO, C.; ALFARO-BARTA, I.; EYMAR, E. Combination of biochar amendment and mycoremediation for polycyclic aromatic hydrocarbons immobilization and biodegradation in creosote-contaminated soil. **Journal of Hazardous Materials**, v. 285, p. 259-266, 2015.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de Pesquisa.** Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIL, A. C.; GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 6. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

GOUVEIA, N. Solid urban waste: socio-environmental impacts and prospects for sustainable management with social inclusion. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 17, n. 6, 2012.

GROTTO, C. G. L. Caracterização da biomassa de bagaço de cana-de-açúcar com vistas energéticas. **For Science**, v. 9, n. 1, 2021.

GÜEREÑA, D. T. *et al.* Partitioning the contributions of biochar properties to enhanced biological nitrogen fixation in common bean (*Phaseolus vulgaris*). **Biology Fertility of Soils**, v. 51, p. 479-491, 2015.

GUIMARÃES, R. S. **Efeito do biocarvão e pó de serra na disponibilidade de nutrientes, crescimento e na produção de milho (*Zea mays* L.) em Latossolo Amarelo distrófico na Amazônia Central**. 2017. Dissertação (Mestrado em Agricultura no Tópico Úmido). Instituto Nacional de Pesquisas Amazônicas, Manaus, 2017.

GUIO, H. Hacia la medicina personalizada: implicancias de las ciencias básicas y las “ómicas” en la práctica clínica. **Revista Peruana Medicina Experimental y Salud Publica**, v. 32, n. 4, p. 629-32, 2015.

HALMI, M. F. A.; SIMARANI, K. Effect of two contrasting biochars on soil microbiota in the humid tropics of Peninsular Malaysia. **Geoderma**, v. 395, 2021.

HARAKURI, M. H. **Perdas Econômicas geradas por estresses bióticos e abióticos na produção brasileira de soja no período de 2016-2020**. Circular Técnica Embrapa, e. 1, Londrina, 2021.

HIMANEN, M. *et al.* Phytotoxicity of low-weight carboxylic acids. **Chemo**, v. 88, n. 4, p. 426-431, 2012.

HIRAJURI, M. H. *et al.* Diagnóstico da produção de soja nas microrregiões sojícolas 2 e 3. **Embrapa**, e.1, p 124, Londrina, 2020.

HOLFORD, I. C. R. Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. **Australian Journal of Soil Research**, v. 35, p. 227-240, 1997.

HUNG, C. Y. *et al.* Characterization of biochar prepared from biogas digestate. **Waste Management**, v. 66, p. 53-60, 2017.

INTANI, K. *et al.* Phytotoxicity of Corn cob Biochar before and after Heat Treatment and Washing. **Sustainability**, v. 11, n. 1, 2018.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate: **First Joint Session of IPCC Working Groups I, II and III, and accepted by the 48th IPCC Session**, in Incheon, Republic of Korea, on October 6, 2018.

JÁCOME, A. G. *et al.* Avaliação de genótipos de algodoeiro sob níveis de salinidade da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 1, p. 365-369, 2005.

JIANG, L. *et al.* Corn cob biochar increases soil culturable bacterial abundance without enhancing their capacities in utilizing carbon sources in Biolog Eco-plates. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 16, n. 3, p. 713–724, 2017.

JOSEPH, S. D. *et al.* An investigation into the reactions of biochar in soil. **Australian Journal of Soil Research**, v. 48, p. 501–515, 2010.

JÚNIOR, A. F. Uso agrícola e florestal de biochar: estado da arte e futura pesquisa. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 11, n. 2, e55711225999, 2022.

JUNIOR, S. A. C. *et al.* Efeito de diferentes inseticidas aplicados no tratamento de sementes de soja (*Glycine max*). **Enciclopédia Biosfera**, v. 13, n. 23, p. 521-529, 2016.

JUNIOR, M. A. S. *et al.* Preparação e caracterização de carvão ativado quimicamente a partir da casca de arroz. **Química Nova**, v. 30, n. 7, p. 1663-1668, 2007.

KASCHUK, G.; NOGUEIRA, M. A.; DE LUCA, M. J. Response of determinate and indeterminate soybean cultivars to basal and topdressing N fertilization compared to sole inoculation with *Bradyrhizobium*. **Field Crops Research**, v. 195, p. 21-27, 2016.

KIM, H. K.; CHOI, Y. A.; VERPOORTE, R. NMR-based metabolomic analysis of plants. **Nature Protocols**, v. 5, p. 36-49, 2010.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de Metodologia Científica**. São Paulo: Atlas, 2011.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management, science and technology**. London, p. 449, 2009.

LI, L. *et al.* Role of Biochar in Improving Sandy Soil Water Retention and Resilience to Drought. **Water**, v. 13, 407, 2021.

LIANG, F.; LI, G.; LIN, Q.; ZHAO, X. Crop yield and soil properties in the first 3 years after biochar application to a calcareous soil. **Journal of Integrative Agriculture**, Beijing, v. 13, p. 525-532, 2014.

LIMA, J. R. S. *et al.* Effect of biochar on physicochemical properties of a sandy soil and maize growth in a greenhouse experiment. **Geoderma**, v. 319, p. 14-23, 2018.

LIMA, S. L. *et al.* Biochar como substituto da matéria orgânica na composição de substratos para mudas. **Acta Scientiarum, Agronomy**, Maringá, v. 35, n. 3, p. 333-341, 2013.

LOMAGLIO, T. *et al.* Effect of biochar amendments on the mobility and (bio) availability of As, Sb and Pb in a contaminated mine technosol. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 182, p. 138–148, 2017.

MA, C. *et al.* Honeycomb tubular biochar from fargesia leaves as an effective adsorbent for tetracyclines pollutants. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 91, p. 299-308, 2018.

MAIA, C. M. B. F. Biochar: Uma nova ferramenta no manejo de solos. **Anais do 11º Seminário de Atualização Florestal e XI Semana de Estudos Florestais**. Colombo, 2010.

MANGRICH, A. S. *et al.* Biocarvão: As terras pretas de índios e o sequestro de carbono. **Ciência Hoje**, v. 47, n. 281, p. 50-51, 2011.

MARQUES, C. A. *et al.* Produção de biochar com palha de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.). **Research, Society and Development**, v. 11, n. 1, 2022.

MARTIN, J. P. Use of acid, rose bengal, and streptomycin in the plate method for estimating soil fungi. **Soil Science, Baltimore**, v. 69, n. 3, p.215-232, 1950.

MARTINS, C. C. **Biochar, composto orgânico e potássio nas características químicas e lixiviação de nutrientes em espodossolo e no cultivo de mucuna preta e moringa**. 2018. Tese (Doutorado em Produção Vegetal). Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2018.

MARTINEZ-HERNANDEZ, E.; AMEZCUA-ALIERI, M. A., J.; ANELL, J. A. A. Sugarcane **Bagasse Valorization Strategies for Bioethanol and Energy Production**. InTech Ebooks, 2017.

MATOS, W. E. C. *et al.* Utilização de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como material de preenchimento estrutural ou pozolânico para a produção de argamassas cimentícias: uma revisão. **Matéria**, v. 26, n. 04, 2021.

MIRANDA, A. A. C.; MELO, L. F.; ARAÚJO, A. D. Impactos dos agrotóxicos na saúde do solo e humana: Uma revisão. **II Congresso Internacional das Ciências Agrárias**, 2017.

MIRANDA, N. O. *et al.* Carvão vegetal como condicionador de solo na sucessão de arroz e feijão-caupi adubados com nitrogênio. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 2, p. 313 - 323, 2017.

MILAN-LUPERON, L. *et al.* Obtaining bioproducts by slow pyrolysis of coffee and cocoa husks as suitable candidates for being used as soil amendment and source of energy. **Revista Colombiana de Química**, v. 49, n. 2, p. 23-29, 2020.

MITCHELL, P. J. *et al.* Shifts in microbial community and water-extractable organic matter composition with biochar amendment in a temperate forest soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 81, p. 244–254, 2015.

MOHAN, D. *et al.* Biochar production and applications in soil fertility and carbon sequestration – a sustainable solution to crop-residue burning in India. **RSC Advances**. v. 8, p. 508-520, 2018.

MUKHERJEE, A.; ZIMMERMAN, A. R. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar–soil mixtures. **Geoderma** v. 193, p. 122-130, 2013.

NETO, J. C. R. *et al.* Análise de metabólitos em folhas de dendê (*Elaeis Guineensis*) com uso de imprinting maldi imaging MS. **59º Congresso Brasileiro de Química**, Rio de Janeiro, 2019.

NIE, C. *et al.* Impact of sugarcane bagasse-derived biochar on heavy metal availability and microbial activity: A field study. **Chemosphere**, v. 200, p. 274-282, 2018.

NOAA. **National Oceanic and Atmospheric Administration**. Base de dados. Global Monitoring Laboratory, 2021.

NUNES, L. J. R. *et al.* Sugarcane industry waste recovery: a case study using thermochemical conversion technologies to increase sustainability. **Applied Sciences**, v. 10, n. 10, 6481, 2020.

OGAWA, M. **Symbiosis of people and nature in the tropics, Farming Japan**, v. 28, p. 10–34, 1994.

OKAZAKI, Y.; SAITO, K. Recent advance of metabolomics in plant biotechnology. **Plant biotechnology Reports**, v. 6, n. 1, p. 1–15, 2012.

OLIVEIRA, E. V. M., MORAES, M. C. H. S., SILVA, J. S. A. Effect of the application of biochar on microbial biomass carbon in soil cultivated with melon. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 4, n. 1, p. 368-377, 2021.

OLSEN, R. A.; BAKKEN, L. R. Viability of soil bacteria: optimization of plate counting technique and comparison between total counts and plate counts within different size groups. **Microbial Ecology**, v. 13, p. 59-74, 1987.

PADIAN, K. *et al.* Effect of biochar amendment on soil physical, chemical and biological properties and groundnut yield in rainfed Alfisol of semi-arid tropics. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 62, n. 9, p. 1293-1310, 2016.

PETTER, F. A.; MADARI, B. E. Biochar: Potencial ambiental e agrônômico em solos de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 7, p. 761-768, 2012.

PETTER, F. A. *et al.* Biochar como condicionador de substrato para a produção de mudas de alface. **Agrarian**. v. 5, n. 17, p. 243-250, 2012.

PETTER, F. A. *et al.* Biocarvão no solo: aspectos agrônômicos e ambientais. **Embrapa**, 2016.

PINTO, L. E. V. **Vinhaça como biofertilizante para fornecimento de potássio a soja como sucessão de milho e capim e impactos sobre o solo**. 2019. 123 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, 2019.

PEREIRA, L. L. *et al.* Produção de biochar a partir da pirólise de resíduos agroindustriais. **Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe**, 2016.

PRENDERGAST-MILLER, M. T.; DUVALL, M.; SOHI, S. P. Biochar-root interactions are mediated by biochar nutrient content and impacts on soil nutrient availability. **European Journal Soil Science**, v. 65, p. 173–185, 2014.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. Novo Hamburgo: FEEVALE, 2013.

PROENÇA, R. P. C. *et al.* Cenário e perspectiva do sistema alimentar brasileiro frente à pandemia de Covid-19. **Demetra, Alimentação, Nutrição & Saúde**, v. 16, e55953, 2021.

QUEIROZ, M. C. A. **Eficiência agrônômica de fertilizantes nitrogenados formulados a partir de biocarvão e fonte mineral**. 2018. 88 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agrônômico, Campinas, 2018.

RAFAEL, R. B. A. *et al.* Benefits of Biochars and NPK Fertilizers for Soil Quality and Growth of Cowpea (*Vigna Unguiculata* L. Walp.) in an Acid Arenosol. **Pedosphere**, v. 3, n. 29, p. 33-311, 2019.

RANGEL, O. J. P.; FERRARI, J. L.; MOULIN, M. M. **Tópicos em Agroecologia**. 2019. Monografia (Pós-Graduação em Agroecologia). Instituto Federal do Espírito Santo, Alegre, 2019.

RATH, K. M.; MAHESHWARI, P.; ROUSK, J. Comparative toxicities of salts on microbial processes in soil. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 82, p. 2012–2020, 2016.

RAWAT, J.; SAXENA, J.; SANWAL P. Biochar: a sustainable approach for improving plant growth and soil properties. In **Biochar-An Imperative Amendment for Soil and the Environment**, 2019.

RIZIKI, M.; BENSON, M.; BENJAMIN, D. Assessing the Potential of Biochar for Improving Soil Physical Properties and Tree Growth. **International Journal of Agronomy**, 2021.

ROMERO, C. M. *et al.* Nutrient retention, availability and greenhouse gas emissions from biochar-fertilized Chernozems. **Catena**, v. 198, 2021.

ROZ, A. L. *et al.* Maximization of fixed carbon in biochar applied to carbon sequestration. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 8, p. 810, 2015.

SAATH, K. C. O.; FACHINELLO, A. L. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 56, n. 2, Piracicaba, 2018.

SAITO, M.; MARUMOTO, T. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi: The status quo in Japan and the future prospects', **Plant and Soil**, v. 244, p. 273-279, 2002.

SANTANA, A. M. *et al.* Disponibilidade de nutrientes e carbono orgânico em solos contendo carvão hidrotérmico lavado e não lavado e comparação com solos antropogênicos. **Química Nova**, v. 42, n. 3, p. 262-272, 2019.

SANTOS; F. D. *et al.* Fatores que afetam a disponibilidade de micronutrientes no solo. **Revista Tecno-lógica**, v. 25, n. 2, p. 272-278, 2021.

SOUCHIE, F. F. *et al.* Carvão pirogênico como condicionante para substrato de mudas de *Tachigali vulgaris* L.G. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 4, p. 811-821, 2011.

FREITAS, M. C. M. A cultura da soja no Brasil: O crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 12, 2011.

SAXENA, J., RANA, G; PANDEY, M. Impact of addition of biochar along with *Bacillus* sp. on growth and yield of French beans. **Scientia Horticulturae**, v. 162, p. 351-356, 2013.

SEDIYAMA, T. Adubação nitrogenada na soja inibe a nodulação e não melhora o crescimento inicial das plantas. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 12, n. 2, p. 333-349, 2019.

SEIXAS, F.; GIMENES, M. L.; FERNANDES-MACHADO, N. R. C. Treatment of vinasse by adsorption on carbon from sugar cane bagasse. **Química Nova**, v. 39, n. 2, 2016.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. EMBRAPA Informação Tecnológica, 2009.

SILVA, I. C. B. *et al.* Growth and production of common bean fertilized with biochar. **Ciência Rural**. v. 47, n. 11, 2017.

SILVA, M. S. A. **Biochar de casca de pequi como condicionador de solo no desempenho agrônomo de feijoeiro**. 2017. 89 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2017.

SILVA, R. F. S.; QUEIROZ, M. E. L. R.; NEVES, A. A. Efeito da lixiviação e biodisponibilidade do clomazone no solo. **Journal Brazilian Chemical Society**, v. 30, n. 11, p. 2386-2394, 2019.

MOHAMMADI, P. P. *et al.* Organ-specific proteomic analysis of drought-stressed soybean seedlings. **Journal of Proteomics**. v. 75, p. 1906-1923, 2012.

SCNEIDER, J. K. **Utilização de biomassas brasileiras para produção de carvão ativado de alta qualidade: caracterização e aplicação como adsorvente**. 2018. 148 p. Tese. (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SOARES, D. C. O. *et al.* Uso do biocarvão e de bioestimulantes na produção e qualidade de mudas de *Sapindus saponari* L. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 1, p. 106 - 122, 2021.

SOHI, S. *et al.* Biochar, climate change and soil: a review to guide future research. **CSIRO Land and Water Science Report**, v. 5, n. 9, p. 17-31, 2009.

SOLAIMAN, Z. M.; MURPHY, D. V.; ABBOTT, L. K. Biochars influence seed germination and early growth of seedlings. **Plant and Soil**, v. 353, p. 273–287, 2011.

SORHEIM, R.; TORSVIK, V.L.; GOKSOYR, J. Phenotypical divergences between populations of soil bacteria isolated on different media. **Microbial Ecology**, v. 17, p. 181-192, 1989.

SOUZA, C. C. *et al.* Study of physico-chemical properties in the evaluation of adsorption in biochar produced from leaves of amendoeira-da-praia. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 1, p. 171-179, 2021.

SOUZA, E. **Pesquisas em Temas, Temas de Ciências Agrárias** Belém: RFB Editora, 2023.

TAN, Z. *et al.* Returning biochar to fields: A review. **Applied Soil Ecology**, v. 116, p. 1-11, 2017.

TOLLENAAR, M.; WU, J. Yield improvement in temperate maize is attributable to greater stress tolerance. **Crop Science**, Madison, v. 39, n.6, p.1597-1604, 1999.

TRAZZI, P. A.; HIGA, A. R.; DIECKOW, J. Biochar: Reality and potential use in forestry. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 875-887, 2018.

UDOP-União Nacional da Bioenergia. 2020. **Usinas/Destilarias no mundo**. Disponível em: https://www.udop.com.br/in_dex.php?item=unidades&cn=am&id_pais=1#topo . Acesso em: 17 mar. 2023.

USLU, O. S. *et al.* Walnut shell biochar increases seed germination and early growth of seedlings of fodder crops. **Agriculture**, v. 10, n. 10, 2020.

VARANDA, L. D. *et al.* Caracterização da biomassa de cama de frango para fabricação de biochar. **Revista Virtual de Química**, v. 11, n. 4, 2019.

VENDRUSCOLO, E. P. *et al.* Atributos químicos de solo degradado em função da adoção de biochar, culturas de cobertura e residual da aplicação de lodo de esgoto. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 59, n. 3, p. 235-242, 2016.

WANG, C. *et al.* Biochar alters soil microbial communities and potential functions 3–4 years after amendment in a double rice cropping system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 311, 2021.

WOICIECHOWSKI, T. *et al.* Nutrientes e umidade do solo após a incorporação de biocarvão em um plantio de *Eucalyptus benthamii*. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 4, p. 1455-1464, 2018.

XU, Q. *et al.* Characteristics and Applications of Sugar Cane Bagasse Ash Waste in Cementitious Materials. **Materials**, v. 1, n. 12, p. 39, 2018.

YIN, D. *et al.* Impact of Different Biochars on Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of Rice Grown in Albic Soil. **Molecules**, v. 26, 2021.

YOO, J. H. *et al.* Effects of brewer's spent grain biochar on the growth and quality of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *crispa*). **Applied Biological Chemistry**, v. 64, n. 1, 2021.

YU, O. Y.; RAICHLE, B.; SINK, S. Impact of biochar on the water holding capacity of loamy sand soil. **International Journal of Energy Environmental Engineering**, v. 4, n. 44, 2013.

ZHANG, Q. Z. *et al.* Effects of biochar on soil microbial biomass after four years of consecutive application in the north China plain. **Plos One**, 2014.

ZHANG, X. *et al.* Effects of pyrolysis temperature on biochar's characteristics and speciation and environmental risks of heavy metals in sewage sludge biochars. **Environmental Technology & Innovation**, v. 26, 2022.

ZHANG, Y. *et al.* Changes in soil water holding capacity and water availability following vegetation restoration on the Chinese Loess Plateau. **Scientific Report**, v. 11, 2021.

ZHU, Q. *et al.* Effects of biochar on seedling root growth of soybeans. **Chilean Journal Agricultural Research**, v. 78, n. 4, p. 549-558, 2018.

ZIMMERMAN, A. R.; BIN, G. A. O.; MI-YOUN, A. H. N. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 6, p. 1169-1179, 2011.