



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

TIAGO DA COSTA DANTAS MONIZ

**BIOCARVÕES PIROLÍTICOS: EFEITOS EM ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E
NA CULTURA DO MILHO**

FORTALEZA

2024

TIAGO DA COSTA DANTAS MONIZ

BIOCARVÕES PIROLÍTICOS: EFEITOS EM ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E NA
CULTURA DO MILHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo. Área de concentração: Manejo Sustentável do Solo e da Água e Matéria Orgânica do Solo.

Orientador: Prof. Jaedson Cláudio Anunciato Mota.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M755b Moniz, Tiago da Costa Dantas.
Biocarvões pirolíticos : efeitos em atributos físicos do solo e na cultura do milho / Tiago da Costa Dantas
Moniz. – 2024.
77 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota.

1. Biocarvão. 2. Condicionadores do solo. 3. Material carbonáceo. 4. Áreas degradadas. 5. Solos - Qualidade. I. Título.

CDD 631.4

TIAGO DA COSTA DANTAS MONIZ

BIOCARVÕES PIROLÍTICOS: EFEITOS EM ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E NA
CULTURA DO MILHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo. Área de concentração: Manejo Sustentável do Solo e da Água e Matéria Orgânica do Solo.

Aprovada em: 25/08/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profª. Dra. Mirian Cristina Gomes Costa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Carlos Tadeu dos Santos Dias
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profª. Dra. Jeane Cruz Portela
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

Ao meu pai, Carlos Vitorino Dantas Moniz,
em sua memória.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas bênçãos concedidas e por colocar pessoas extraordinárias na minha vida.

À minha mãe, por me dar o dom da vida, por ter sido mãe e pai, por me criar com tanto amor e me transmitir todos os seus valores, por ter me apoiado em todas as fases da minha vida.

Ao meu pai, que mesmo não estando mais neste plano terrestre, me influenciou a seguir sua profissão. Tenho certeza de que, onde seu espírito estiver, estará orgulhoso de mim.

A toda minha família, que contribuiu para que eu seja quem sou hoje.

À minha namorada, Vitória Ricarte Gonçalves, pelo companheirismo, e pelo carinho e amor recíproco.

Ao Prof. Jaedson Cláudio Anunciato Mota, por sua receptividade, paciência e bondade, pelos ensinamentos passados de forma tão tranquila e por ser um excelente orientador, sempre disposto a ajudar.

À professora Jeanne Cruz Portela, por toda a sua luz, amorosidade e por despertar em mim o gosto pela ciência do solo.

Aos funcionários do MINISTÉRIO DE AGRICULTURA E AMBIENTE DE CABO VERDE (MAA), que me receberam tão bem e me apoiaram na difícil decisão de fazer o mestrado no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS). Em especial ao Ministro da Agricultura, Eng. Gilberto Correia Carvalho Silva, à Diretora Geral, Eng. Eneida Rodrigues, à Eng. Maria João do Rosário, à Eng. Ângela Maria Barreto da Veiga Moreno, à Laodice dos Santos Xavier Pinto e à Eng. Gilmara de Carvalho Rodrigues.

A todos os professores do Departamento de Ciências do Solo da UFC, pelos ensinamentos nas disciplinas, em especial à Profa. Mirian Cristina, ao Prof. Raimundo Nonato de Assis Júnior, ao Prof. Ricardo Espíndola Romero, ao Prof. Helon Hébano de Freitas Sousa e ao Prof. Dr. Arthur Prudêncio de Araujo Pereira.

Ao Prof. Dr. Carlos Tadeu dos Santos Dias, pelo apoio nas análises estatísticas, pela paciência e disponibilidade em participar da minha banca.

À Francisca Gleiciane da Silva, pelo apoio e por participar da minha qualificação.

Aos amigos Ícaro Vasconcelos do Nascimento, Alexandre dos Santos Queiroz e Angélica da Silva Lopes, que tanto me ajudaram ao longo desses dois anos.

Aos amigos que fiz no Departamento de Ciências do Solo, em especial a Francisco Luan Almeida Barbosa, Gilvanete da Silva Henrique e João Marcos, pela ajuda mútua e pelos

momentos que passamos juntos nos 90 dias de experimento.

Ao amigo João Ivo Rodrigues de Sousa, por me ajudar nas análises de solo.

Aos funcionários do Departamento de Ciências do Solo: Dona Helena, José Edilson Dote, Marilene Bezerra, sempre dispostos a ajudar.

Ao Franzé, pelo apoio nas análises no laboratório de física do solo.

À Universidade Federal do Ceará, pela oportunidade de realização deste curso.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudo que viabilizou minha permanência no curso e pelo apoio financeiro (Processo nº 303524/2022-7).

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo apoio financeiro à pesquisa (Código 001).

À Agência Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), pelo apoio financeiro à pesquisa (Processo nº 0122017200).

À Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará (CAGECE) e Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo apoio financeiro à pesquisa (Processo 06670855/2021).

Ao Programa Cientista-Chefe em Agricultura, do Governo do Estado do Ceará (Acordo 14/2022 SDE/ADECE/FUNCAP, Processo 08126425/2020/FUNCAP) pelo apoio financeiro para a realização da pesquisa.

RESUMO

A aplicação de materiais carbonáceos é estratégica para melhorar a qualidade do solo e a produtividade agrícola. No entanto, a depender da biomassa utilizada, são obtidos diferentes resultados nos aspectos químicos, físicos e biológicos do solo. Portanto, não se sabe como doses de biocarvões produzidos a partir de lodo de esgoto e resíduos de cajueiro influenciam os atributos físicos do solo. Com base nisso, foram testadas três hipóteses: (1) biocarvões oriundos da pirólise de lodo de esgoto adicionado de biomassa de poda de cajueiro (BLP) e de resíduos do processamento do caju (BC) melhoram a qualidade física do solo degradado e o desenvolvimento do milho; (2) o BLP, por ser mais rico em nutrientes, possibilita melhor desenvolvimento do milho comparado ao BC; (3) para cada biocarvão há uma dose mais efetiva para melhorar a qualidade física de solo em processo de degradação e o desenvolvimento da cultura do milho. Foram coletadas amostras de solo (Planossolo), na camada de 0-10 cm, no núcleo de desertificação do município de Irauçuba-CE. O experimento foi conduzido em casa de vegetação em delineamento inteiramente aleatorizado, em esquema fatorial $2 \times 4 + 1$, totalizando 36 unidades experimentais. O desenvolvimento das plantas foi monitorado por medições de altura, diâmetro do colmo, número de folhas, área foliar, e produção de matéria fresca e seca. Ao final do experimento, foram coletadas amostras com estrutura preservada e não preservada no centro da camada de 0-10 cm, a fim de avaliar a densidade do solo, resistência do solo à penetração de raízes, permeabilidade do solo ao ar, curva de retenção de água, resistência tênsil e estabilidade de agregados. Como resultado, o BC reduziu a necessidade de água em 40% na dose de 9 Mg ha^{-1} . O BLP reduziu a densidade do solo em 4% na dose de $22,6 \text{ Mg ha}^{-1}$, mas também reduziu a permeabilidade do solo ao ar. O BLP melhorou a resistência do solo à penetração e a estabilidade dos agregados, aumentando a resistência tênsil e o diâmetro médio ponderado. Ambos os biocarvões aumentaram a capacidade de retenção de água no solo e reduziram a umidade no ponto de murcha permanente. Em relação ao crescimento das plantas, houve aumento no diâmetro do colmo com ambos os biocarvões, sendo mais pronunciado com BLP na dose de $23,2 \text{ Mg ha}^{-1}$. O BLP também contribuiu com o aumento do diâmetro do colmo e redução da altura das plantas, aumentando a resistência ao tombamento. Conclui-se que o BLP melhora a qualidade física do solo em maior escala que o BC que, por sua vez, otimiza a eficiência do uso da água. As doses recomendadas são $20\text{-}25 \text{ Mg ha}^{-1}$ para o BLP e 9 Mg ha^{-1} para o BC.

Palavras-chave: condicionador de solos; material carbonáceo; áreas degradadas.

ABSTRACT

The application of carbonaceous materials is strategic for improving soil quality and agricultural productivity. However, depending on the biomass used, different outcomes are observed in the soil's chemical, physical, and biological properties. Therefore, it is not yet known how doses of biochars produced from sewage sludge and cashew residues influence the soil's physical attributes. (1) biochars derived from the pyrolysis of sewage sludge added with cashew pruning biomass (BLP) and cashew processing residues (BC) improve the physical quality of degraded soil and the development of maize; (2) BLP, being richer in nutrients, enables better maize development compared to BC; (3) for each biochar, there is a most effective dose to improve the physical quality of soil undergoing degradation and the development of maize. Soil samples (Planosol) were collected from the 0-10 cm layer in the desertification nucleus of Irauçuba-CE. The experiment was set up in a completely randomized design, in a 2 x 4 + 1 factorial scheme, totaling 36 experimental units. Plant development was monitored by measuring height, stem diameter, number of leaves, leaf area, and fresh and dry matter production. At the end of the experiment, and before soil removal, samples with preserved and unpreserved structures were collected from the center of the 0-10 cm layer to evaluate soil density, soil penetration resistance, soil air permeability, water retention curve, tensile strength, and aggregate stability. As a result, BC reduced water requirement by 40% at the dose of 9 Mg ha⁻¹. BLP reduced soil density by 4% at the dose of 22.6 Mg ha⁻¹ but also reduced soil air permeability. BLP improved soil penetration resistance and aggregate stability, increasing tensile strength and mean weight diameter. Both biochars increased soil water retention capacity and reduced moisture at the permanent wilting point. Regarding plant growth, there was an increase in stem diameter with both biochars, being more pronounced with BLP at the dose of 23.2 Mg ha⁻¹. BLP also contributed to an increase in stem diameter and a reduction in plant height, enhancing resistance to lodging. It is concluded that BLP improves the physical quality of the soil to a greater extent than BC, which, in turn, optimizes water use efficiency. The recommended doses are 20-25 Mg ha⁻¹ for BLP and 9 Mg ha⁻¹ for BC.

Keywords: soil conditioner; carbonaceous material; degraded areas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do ponto de coleta do solo	27
Figura 2 - Gráfico de colunas dos valores médios de lâmina de água requerida no período de incubação em função dos tratamentos controle e biocarvões de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro (BLP) e bagaço de caju (BC) para manter o solo entre a capacidade de campo e o consumo de até 30% da capacidade de água disponível (A). Curva de regressão entre lâminas de água requeridas no período de incubação e doses de BC (B).	39
Figura 3 - Gráfico de colunas dos valores médios de lâmina de água requerida no período de cultivo em função dos tratamentos controle e biocarvões de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro (BLP) e bagaço de caju (BC) para manter o solo entre a capacidade de campo e o consumo de até 30% da capacidade de água disponível.	41
Figura 4 - Gráfico de colunas dos valores médios de densidade do solo em função dos tratamentos controle e biocarvões de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro (BLP) e bagaço de caju (BC). Regressão entre densidade do solo e doses de BLP (B).	43
Figura 5 - Gráfico de colunas dos valores médios de permeabilidade do solo ao ar (K_{ar}) no potencial mátrico de -10 kPa em função dos tratamentos controle e biocarvões de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro (BLP) e bagaço de caju (BC). Regressão entre permeabilidade do solo ao ar e doses de BLP (B).	45
Figura 6 - Gráfico de colunas dos valores médios de resistência do solo à penetração (RP) em função dos tratamentos controle e biocarvões de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro (BLP) e bagaço de caju (BC) no potencial mátrico de -33 kPa (A). Regressão entre resistência do solo à penetração e doses de BLP (B).	47
Figura 7 - Gráfico de colunas dos valores médios de resistência tênsil dos agregados (RT) em função dos tratamentos controle e biocarvões de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro (BLP) e bagaço de caju (BC) (A). Regressão entre resistência tênsil e doses de BLP e BC (B).	49

Figura 8 - Gráfico de colunas dos valores médios de diâmetro médio ponderado (DMP) em função dos tratamentos controle e biocarvões de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro (BLP) e bagaço de caju (BC).	51
Figura 9 - Curvas de retenção de água no solo para os tratamentos controle e biocarvões de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro (BLP) e bagaço de caju (BC) nos períodos de pré-incubação (PI) e pós-cultivo (PC)	55
Figura 10 - Curva de regressão para os parâmetros de crescimento de plantas altura do colmo (AC), altura da planta (AP) e diâmetro do colmo (DC) referentes ao biocarvão de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Caracterização de biocarvões pirolíticos utilizados no estudo	29
Tabela 2	- Caracterização física e química do Planossolo coletado na profundidade de 0-10 cm, no município de Irauçuba-CE	30
Tabela 3	- Resultado da análise de variância (ANOVA) com valores de F e sua respectiva significância para os atributos de lâmina de água nos períodos de incubação (AGI) e de cultivo (AGC), densidade do solo (DS), permeabilidade do solo ao ar no potencial mátrico de -10 kPa (Kar), resistência do solo à penetração de raízes (RP), resistência tênsil de agregados (RT), diâmetro médio ponderado (DMP) e capacidade de água disponível nos períodos de incubação (CAD-PI) e de cultivo (CAD-PC)	37
Tabela 4	- Valores médios de lâmina de água no período de incubação (AGI), lâmina de água no período de cultivo (AGC), densidade do solo (DS), permeabilidade ao ar no potencial mátrico de -10 kPa (Kar), resistência do solo à penetração de raízes (RP), resistência tênsil de agregados (RT), diâmetro médio ponderado (DMP), capacidade de água disponível no período de incubação (CAD-PI), capacidade de água disponível no período de cultivo (CAD-PC)	38
Tabela 5	- Valores de F e a significância para os parâmetros da curva de retenção de água segundo o modelo de van Genuchten (1980), α , m, n, θ_r e θ_s em função das doses de biocarvões aplicadas ao solo nos períodos de pré-incubação (PI) e pós-cultivo (PC).....	53
Tabela 6	- Valores médios dos parâmetros da curva de retenção de água segundo o modelo de van Genuchten (1980) em função das doses de biocarvões aplicadas ao solo nos períodos de pré-incubação (PI) e pós-cultivo (PC)	54
Tabela 7	- Análise de variância (ANOVA) para os atributos de massa fresca de folha (MFF), massa fresca de raiz (MFR), massa fresca de colmo MFC (MFC), massa seca de folha (MSF), massa seca de raiz (MSR), massa seca de colmo (MSC), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA)	57
Tabela 8	- Análise de variância (ANOVA) para os atributos diâmetro do colmo (DC), altura do colmo (AC), altura da planta (AP), número de folha (NF), número de nós (Nós) e área foliar (AF)	58

Tabela 9	- Valores médios dos atributos de crescimento de plantas de milho (<i>Zea mays</i> L.) massa fresca de folha (MFF), massa fresca de raiz (MFR), massa fresca de colmo (MFC), massa seca de folha (MSF), massa seca de raiz (MSR massa seca de colmo (MSC), massa fresca de parte aérea (MFPA), massa seca de parte aérea (MSPA)	58
Tabela 10	- Valores médios para os atributos de crescimento de plantas de milho (<i>Zea mays</i> L.) diâmetro do colmo (DC), altura do último colmo (AC), altura da planta (AP), número de folha (NF), número de nós e área foliar (AF)	59
Tabela 11	- Valores médios dos atributos de crescimento de plantas de milho (<i>Zea mays</i> L.) massa fresca de folha (MFF), massa fresca de raiz (MFR), massa fresca de colmo (MFC), massa seca de folha (MSF), massa seca de raiz (MSR massa seca de colmo (MSC), massa fresca de parte aérea (MFPA), massa seca de parte aérea (MSPA), para uso no teste de Tukey a 1 e 5% de probabilidade	60
Tabela 12	- Valores médios para os atributos diâmetro do colmo (DC), altura do colmo (AC), altura da planta (AP), número de folha (NF), número de nós (NÓS), área foliar (AF) submetidos ao teste Tukey a 1 e 5% de significância	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	A importância da cultura do milho e das condições edáficas para seu cultiv.	16
2.2	Limitações de solos na região nordeste do Brasil	17
2.3	Biocarvões como condicionadores de solos	19
2.3.1	<i>Biocarvões no contexto da mitigação de problemas ambientais</i>	21
2.3.2	<i>Biocarvões no contexto da mitigação de problemas em solos</i>	23
2.3.3	<i>Biocarvões na mitigação de problemas em plantas cultivadas</i>	25
3	MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1	Localização, montagem e condução do experimento	27
3.2	Atributos analisados no solo	31
3.2.1	<i>Granulometria</i>	31
3.2.2	<i>Densidade de partículas</i>	32
3.2.3	<i>Densidade do solo</i>	32
3.2.4	<i>Porosidade total</i>	32
3.2.5	<i>Curva de retenção de água no solo</i>	32
3.2.6	<i>Permeabilidade do solo ao ar</i>	33
3.2.7	<i>Resistência do solo à penetração de raízes</i>	33
3.2.8	<i>Resistência tênsil de agregados</i>	33
3.2.9	<i>Estabilidade de agregados</i>	34
3.3	Variáveis analisadas nas plantas de milho	35
3.3.1	<i>Altura das plantas, diâmetro do colmo, número de folhas, área foliar, fitomassa fresca e seca</i>	35
3.4	Análise dos dados	35

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1	Atributos físicos do solo	36
4.2	Crescimento de plantas.....	57
5	CONCLUSÕES.....	65
	REFERÊNCIAS.....	66
	ANEXO A – TERMO DE AUTORIZAÇÃO	77

1 INTRODUÇÃO

O solo é formado do intemperismo das rochas, em função dos fatores e processos de formação cujas diferentes combinações e intensidades de atuação resultam na variabilidade de suas propriedades físicas e químicas. Como ente integrante da biosfera, o solo tem funções ecossistêmicas bem definidas, por exemplo: sustentação física das plantas, reservatório de nutriente, água e oxigênio – sendo essencial para o desenvolvimento das plantas e animais. Assim, a qualidade do solo está relacionada com sua capacidade de sustentar a produtividade das culturas, mantendo a qualidade ambiental e promovendo a sanidade animal e vegetal.

Os solos da região Nordeste do Brasil apresentam naturalmente grande diversidade de atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicas, com estágios de formação desde os menos aos mais intemperizados. Em regiões semiáridas do Nordeste, onde ocorrem baixas precipitações e altas temperaturas, a maioria dos solos é menos intemperizada, sugerindo que podem possuir baixa profundidade efetiva, baixa capacidade de retenção de água, possuindo vegetação caducifólia, o que resulta na descontinuidade do aporte de matéria orgânica ao longo do ano. No entanto, esses solos menos desenvolvidos apresentam argilas ricas em cargas negativas, permitindo que os sítios de troca sejam abastecidos por cátions que melhoram significativamente a fertilidade química. Já solos mais desenvolvidos estão associados com a baixa fertilidade química natural, problemas com fixação de fósforo e, em alguns casos, susceptibilidade à erosão.

Uma estratégia que pode ser adotada para melhorar os atributos físico-hídricos do solo nessas regiões é a utilização de condicionadores de solo. Esses produtos têm a capacidade de promover a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Dentre as melhorias físicas, cita-se: formação de agregados estáveis, contribuindo para a melhoria da estrutura, aumento da porosidade e melhoria dos fluxos de água e ar. Além disso, pode ocorrer aumento da capacidade de retenção de água. Isso é particularmente importante em áreas com baixa precipitação pluvial ou durante períodos de seca, pois as plantas podem acessar a água armazenada nos poros do solo.

Um condicionador que vem ganhando destaque é o biocarvão, que é o produto da carbonização de biomassa sob atmosfera pobre em oxigênio; e pode ser produzido de duas formas: por carbonizações hidrotérmicas e pirolíticas. Há relatos de que o biocarvão pode melhorar a estrutura do solo, aumentando a porosidade e a permeabilidade, o que, por sua vez, contribui para melhorar os fluxos de ar e água no solo. Além disso, pode imobilizar contaminantes do solo, como metais pesados, tornando-os menos disponíveis para as plantas e

reduzindo seu impacto negativo no ambiente.

Outra vantagem do biocarvão é que ele pode ajudar a mitigar as mudanças climáticas, promovendo o sequestro de carbono no solo, pois é um material rico em carbono que pode permanecer no solo por séculos, capturando carbono atmosférico e ajudando a reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Existem várias biomassas que podem ser usadas como matéria-prima para produzir biocarvão. No estado do Ceará tem-se o lodo de esgoto em quantidades significativas, em que parte é depositada em aterros sanitários após tratamento de acordo com a legislação ambiental. De igual modo, no estado são produzidas grandes quantidades de resíduos da agroindústria do caju (bagaço) e da poda dos cajueiros que podem ser reaproveitadas para a produção de biocarvão.

Nesse contexto, há a possibilidade do beneficiamento para um destino mais nobre, com agregação de valor a ambos os materiais. A composição desses materiais orgânicos leva a uma ampla gama de atributos físicos e químicos no material carbonáceo. Algumas dessas características incluem a porosidade, superfície específica, pH, capacidade de troca iônica, entre outras. Portanto, não se sabe como doses de biocarvões produzidos a partir de lodo de esgoto e resíduos de cajueiro influenciam os atributos físicos do solo.

Com base nisso, foram testadas três hipóteses. Com base no exposto, foram estabelecidas as seguintes hipóteses: 1) a aplicação de biocarvões oriundos da pirólise de lodo de esgoto adicionado de biomassa de poda de cajueiro em proporção de 1:1 e de resíduos do processamento do caju, por apresentarem estrutura porosa capaz de armazenar água, serem quimicamente ativos para promover a agregação de partículas, melhoram a qualidade físico-hídrica do solo em processo de degradação e promovendo o melhor desenvolvimento da cultura do milho (*Zea mays* L.); 2) o biocarvão de lodo de esgoto adicionado da biomassa de poda de cajueiro em proporção de 1:1, por ser mais rico em nutrientes que o biocarvão de resíduos do processamento de caju, possibilita melhor desenvolvimento da cultura do milho; e 3) para cada biocarvão há uma dose mais efetiva para melhorar a qualidade física de solo em processo de degradação e contribuindo para o melhor desenvolvimento da cultura do milho.

Assim, objetivou-se avaliar atributos físicos do solo (densidade do solo e das partículas, resistência do solo à penetração de raízes, permeabilidade do solo ao ar, curva de retenção de água, resistência tênsil e estabilidade de agregados) e atributos morfométricos de plantas de milho (altura, diâmetro do colmo, número de folhas, massas fresca e seca da parte aérea e massa seca de raízes).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A importância da cultura do milho e das condições edáficas para seu cultivo

O milho (*Zea mays* L.), que pertence à família Poaceae, é uma planta C4 com alta taxa de atividade fotossintética. A espécie cultivada atualmente é geneticamente distinta de seus progenitores selvagens, ou seja, totalmente domesticada. É considerada uma das culturas mais produtivas entre as plantas alimentícias. Tem origem nos trópicos, porém, devido à sua adaptabilidade, é cultivada em ampla diversidade de ambientes (Paliwal *et al.* 2000).

De acordo com a Food and Agricultural Organization (FAO, 2018), o milho é um cereal de importância fundamental na segurança alimentar mundial, apontado como uma das principais fontes de energia na dieta das populações dos países em desenvolvimento, devido à sua disponibilidade e acessibilidade. Na alimentação humana, pode ser utilizado na forma de grãos secos ou verdes, sendo consumido normalmente no preparo de pães, bebidas, papas entre outros.

Historicamente, o milho no Brasil já era cultivado e consumido pelos povos indígenas, porém, foi a partir da chegada dos portugueses que a produção do cereal se intensificou e se tornou hábito alimentar da população brasileira, principalmente na região nordestina (Mariuzzo, 2019). A cultura, além da sua importância como alimentação humana, destaca-se pela versatilidade, sendo utilizada, sobretudo, na alimentação animal, bem como na produção de combustíveis, bebidas, polímeros etc. (Miranda, 2018).

É importante destacar que a cultura é sensível ao déficit hídrico, principalmente nas fases de floração e enchimento de grãos, o que faz com que a produção esteja estreitamente relacionada à disponibilidade hídrica (Berlato *et al.* 2005). O Brasil, mais especificamente na região Nordeste, possui sazonalidade de chuva e até mesmo períodos de seca, o que resulta em oscilações na produção do grão. As respostas da planta ao déficit hídrico que mais se destacam são: redução de área foliar, fechamento estomático, aceleração da senescência e abscisão foliar (Langner *et al.* 2019).

No Brasil, o milho se destaca como o segundo grão mais produzido e exportado, ficando atrás apenas da soja. Considerando as três safras anuais, a produção totalizou aproximadamente 125,7 milhões de toneladas, representando um aumento de 11,1% em relação à safra de 2021/2022 (Conab, 2023).

Outro fator importante que pode limitar a produção é a exigência nutricional da cultura do milho. Solos com baixa fertilidade ou degradados podem ser um gargalo para alcançar uma produção satisfatória. Com relação aos macronutrientes, a maior exigência do

milho refere-se à nitrogênio e potássio, seguindo-se de cálcio, magnésio e fósforo (EMBRAPA, 2006). Assim, para um bom manejo da fertilidade do solo e boa produtividade, é imprescindível a utilização de uma série de medidas, com destaque para análise de solo e histórico de calagem e adubação da área, e aporte da quantidade de N, P e K necessária na semeadura de acordo com a análise de solo. A adoção de práticas como rotação de culturas, plantio direto, calagem, gessagem e adubação verde são importantes para melhoria da fertilidade do solo (EMBRAPA, 2006).

Portanto, ao longo da história brasileira, desde seu início com os povos indígenas até os dias atuais, o milho possui importância tanto na produção de subsistência, agricultura familiar, ou no agronegócio, como *comodity* agrícola, mantendo-se como vital para a segurança alimentar, economia e a sustentabilidade global. Para entender a importância da cultura do milho no contexto da região nordeste do Brasil, onde será conduzido o estudo, é fundamental considerar a diversidade dos solos. Compreender essas variações é essencial para aprimorar o manejo agrícola e lidar eficazmente com as limitações dos solos na região.

2.2 Limitações de solos na região nordeste do Brasil

Cerca de 30% da população do país está concentrada no Nordeste, abrangendo aproximadamente 20% da extensão territorial do Brasil. A região possui cerca de 54,6 milhões de habitantes, correspondendo por 26,9% dos habitantes do país, distribuídos ao longo de uma área de 1,6 milhão de km² (IBGE, 2022).

A agricultura desempenha papel relevante na economia regional do Nordeste brasileiro. Cerca de 82,6% da força de trabalho rural está envolvida na agricultura familiar (Castro, 2012). A região se destaca como a principal produtora nacional de banana, contribuindo com aproximadamente 35,1% do total da produção do país. (IBGE, 2023) Além disso, a região Nordeste se destaca na produção de frutas, especialmente manga e melão, representando aproximadamente 28% da produção de frutas do país (IBGE, 2024). No entanto, a participação total da produção agrícola do Nordeste no cenário nacional continua sendo relativamente modesta em comparação com outras regiões, especialmente o Centro-Oeste e o Sul do Brasil (IBGE, 2023).

A região enfrenta desafios estruturais relacionados à sustentabilidade dos métodos de produção de alimentos. Práticas como queimadas, utilizadas por muitos agricultores para a limpeza e preparo do solo antes do plantio, a semeadura "morro acima, morro abaixo" e o sobrepastejo têm sido as principais causas da formação de enxurradas, da ocorrência de erosão

e da redução da fertilidade dos solos. Esses desafios, somados aos impactos recorrentes do clima, como as secas, resultam na degradação do solo e dos recursos hídricos, e têm impacto negativo no ambiente. (Drumond *et al.*, 2000).

Os solos na região Nordeste do Brasil há diversidade devido a fatores e processos de formação, o que resulta em variedade de atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos, proporcionado a formação desde solos mais intemperizados como os Latossolos e Argissolos que possuem ocorrência na região de 29,5% 16,7%, respectivamente, a solos menos intemperizados, por exemplo, Neossolos (24,0%) e Cambissolos (3,4%). Em regiões semiáridas do Nordeste onde ocorrem baixas precipitações e altas temperaturas os solos são menos intemperizados. Isso sugere algumas limitações, como: solos rasos, pedregosos, ausência de horizonte B diagnóstico e vegetação caducifólia – resultando na descontinuidade do aporte de matéria orgânica ao longo do ano. Contudo, solos menos desenvolvidos possibilitam a formação de argila do tipo 2:1, favorecendo a formação de cargas negativas por meio da substituição isomórfica, possibilitando que os sítios de trocas sejam abastecidos por cátions que favorecem a fertilidade natural (Marques, 2014).

Além das condições climáticas adversas, a degradação desses solos pode ser agravada ou acelerada pela intervenção humana. Essas ações podem levar à perda da cobertura vegetal e dos recursos hídricos do solo, comprometendo o potencial biológico da terra. Esse processo, por sua vez, pode levar à desertificação do ambiente, afetando significativamente a capacidade da região em sustentar a população que dela depende (Castro, 2012).

A desertificação representa um dos problemas ambientais mais sérios que impactam a região Nordeste do Brasil. A Convenção das Nações Unidas para Luta Contra a Desertificação (UNCCD) conceitua desertificação como o processo de degradação das terras das regiões áridas, semiáridas e subúmidas secas, resultante de vários processos ou fatores; dentre esses, destacam-se alterações climáticas e atividades antrópicas (PAN BRASIL, 2005). Os processos de desertificação na região semiárida do Brasil não ocorrem apenas devido à sensibilidade climática natural do ambiente, mas, também, devido ao uso da terra. Entre as causas diretas que acentuam a desertificação destacam-se o uso intensivo do solo, o sobrepastejo, a supressão da vegetação nativa e a salinização dos solos (Riché *et al.*, 1994).

Uma parcela significativa da população do Nordeste vive nos Tabuleiros Costeiros, formações terciárias/quaternárias que se estendem desde o Amapá até o Rio de Janeiro e são mais comuns nas costas do litoral nordestino (Jacomine, 1996), abrangendo aproximadamente dez milhões de hectares apenas na região do nordeste brasileiro (Lima Neto *et al.*, 2009). Cerca de 50% da população da região Nordeste vive nessas áreas e utilizam esses solos para cultivo

de cana-de-açúcar, pecuária e fruticultura (Fonsêca *et al.*, 2007). Apesar das vantagens dos Tabuleiros Costeiros do nordeste brasileiro para a agricultura, como topografia favorável à mecanização e solos profundos, podem ter sua profundidade efetiva reduzida devido à presença de horizontes com caráter coeso que, associados à distribuição irregular das chuvas, ao ficarem secos tornam-se endurecidos e resultam em sérias limitações ao crescimento de raízes (Lima Neto *et al.*, 2009).

Outra limitação desses solos se deve à salinização que ocorre quando há acúmulo gradual de sais na superfície do solo e na zona radicular, trazendo toxicidade às plantas e efeitos negativos ao solo e ao ambiente (Barreto *et al.*, 2023). Nos solos do Nordeste, especialmente em regiões semiáridas, a salinização é uma limitação importante que afeta a produção de alimentos. Isso ocorre devido às baixas precipitações pluviais e altas temperaturas, o que resulta em altas taxas de evapotranspiração e ascensão desses sais para a região das raízes ou superfície dos solos, prejudicando as plantas e reduzindo a produtividade agrícola e o desenvolvimento sustentável (Mesquita *et al.*, 2015). Portanto, se faz necessária a geração de tecnologias capazes de mitigar as limitações dos solos na região Nordeste do Brasil e, nesse contexto, há possibilidade da utilização de biocarvões como condicionadores de solo.

2.3 Biocarvões como condicionadores de solos

O termo *biocarvão* refere-se ao produto da carbonização de resíduos orgânicos, possuindo potencial para ser utilizado como condicionador de solo na agricultura (Teixeira *et al.*, 2015). O interesse pelo biocarvão tem origem a partir de estudos da matéria orgânica em paleossolos antrópicos amazônicos, denominados como 'Terras Pretas de Índio' (TPI) (Hanke *et al.*, 2022). Esses solos são caracterizados por possuírem coloração mais escura, maior teor de matéria orgânica e maior fertilidade do que o solo típico da Amazônia. A origem da TPI pressupõe que esses povos, que praticavam agricultura há milhares de anos, preservavam no solo restos culturais, artefatos e alimentos que contribuíram para sua formação. No entanto, não há consenso na comunidade científica se essa prática foi intencional, com o objetivo de superar a baixa fertilidade dos solos (Hanke *et al.*, 2022).

Estudo realizado por Teixeira *et al.* (2015) nesses solos revelou que a capacidade de reter nutrientes é oriunda de substâncias orgânicas chamadas de carbono pirogênico (*black carbon*). Isso se deve à presença de estruturas aromáticas na matriz carbonácea desse material, que possuem alta estabilidade química (recalcitrância), permanecendo por longos períodos no solo, fator que contribui para a manutenção do carbono no solo, auxiliando na mitigação do

avanço do efeito estufa. Com base nesses estudos, iniciaram-se pesquisas com técnicas de carbonização e diferentes biomassas e tipos de solo.

Com isso, pesquisas acerca da pirólise de biomassa têm constatado que a produção de biocarvão é influenciada por múltiplos fatores, como o tipo de biomassa, nível de umidade, dimensão das partículas e as condições de reação, como a temperatura, duração e velocidade de aquecimento, e outras variáveis como catalisador e tipo de reator, gerando produtos com diferentes características físicas e químicas (Kumar *et al.*, 2020).

Na agricultura, o uso de biocarvões como condicionadores tem como objetivo aumentar a produtividade das culturas por meio de melhorias nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, trazendo aumento na disponibilidade de nutrientes, melhorias na estrutura do solo e disponibilidade de água às culturas. Atua também na remediação de solos contaminados, reduzindo teores de contaminantes a níveis seguros e compatíveis com a proteção à saúde humana (Lehmann *et al.*, 2015).

O biocarvão é rico em carbono e pode conter elementos como fósforo, cálcio e magnésio. Para ser utilizado como condicionador de solo deve possuir teores de metais pesados e contaminantes orgânicos dentro dos limites exigidos pela legislação. As propriedades do biocarvão variam muito e devem ser consideradas cuidadosamente. As características químicas da estrutura de carbono orgânico são diferentes daquelas do material original, enquanto as características macroscópicas normalmente são preservadas (Lehmann *et al.*, 2015).

Essas características fazem com que o biocarvão seja uma opção promissora para mitigar os efeitos negativos que diversos problemas, como a elevação da temperatura global, impõem à produção agrícola e, conseqüentemente, à ampliação da produção de alimentos. As mudanças climáticas acarretam efeitos como a emissão de gases de efeito estufa, a elevação do nível dos oceanos, a degradação do solo, a ocorrência de secas, inundações e o aumento da frequência de eventos climáticos extremos (Duarte *et al.*, 2015).

No presente estudo, serão utilizadas duas fontes de biomassa. A primeira é o biocarvão derivado da pirólise do lodo de esgoto, material obtido após o tratamento de esgoto doméstico. A segunda fonte é o resíduo proveniente da agroindústria de beneficiamento do caju, conforme será detalhado mais adiante. O lodo de esgoto é um resíduo sólido resultante do processo de tratamento biológico de águas residuais (Ge *et al.*, 2022).

Estima-se que a produção global deste resíduo esteja em torno de 45 milhões de toneladas por ano (Jellali *et al.*, 2021). A produção diária de esgoto no Brasil alcança 9,1 mil toneladas, mas somente 43% da população têm acesso à coleta e tratamento adequados (ANA, 2017). Considerando o atual nível de atendimento e a expansão prevista, existe uma

preocupação com o destino adequado dos lodos biológicos produzidos. De acordo USEPA (2007), o lodo de esgoto é uma fonte rica em matéria orgânica, nutrientes e biomassa contendo oligoelementos, o que o torna reutilizável. No entanto, ele também contém patógenos, metais pesados e produtos químicos orgânicos tóxicos de difícil biodegradabilidade, que podem ser prejudiciais ao ambiente e à saúde humana. Se não for tratado corretamente, pode causar graves problemas de poluição ambiental.

Com a copirólise do lodo de esgoto em biocarvão, tem-se alternativa promissora para se obter um condicionador com aplicação segura e vantajosa ao solo, pois há redução nos teores de metais pesados e produtos químicos que eventualmente possam estar presentes no lodo de esgoto. O lodo seco é constituído majoritariamente por matéria orgânica, composta por cerca de 55 a 70% de carbono, e a pirólise se mostra eficaz na redução de carbono ao imobilizar o elemento no biocarvão (Chen *et al.*, 2019). As propriedades do biocarvão derivado de lodo são geralmente afetadas por fatores como umidade, temperatura de pirólise, tempo de residência e taxa de aquecimento (Gaur *et al.*, 2020).

A cajucultura é uma atividade econômica importante para a região Nordeste do país, que representa e 99,7% da área plantada do país (Brainer *et al.*, 2022). A produção do suco de caju ocorre a partir da prensagem dos pedúnculos, o que gera como subproduto o bagaço, que normalmente é descartado devido ao seu alto custo de transporte. Esse bagaço representa aproximadamente 20% do peso do pedúnculo, resultando em cerca de 300.000 toneladas de resíduo por ano. A aplicação do biocarvão oriundo da pirólise de resíduos do processamento do caju favorece a floculação e agregação das partículas do solo, trazendo a melhoria da qualidade física de solos com caráter coeso (Nascimento *et al.*, 2024).

2.3.1 Biocarvões no contexto da mitigação de problemas ambientais

As mudanças climáticas são definidas pela CEPAL (2020) como uma variação global do clima da terra devido a causas naturais e, também, às ações humanas. As atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis, a destruição de florestas, as atividades agrícolas, industriais e de transporte, têm afetado profundamente a vida no planeta e seus recursos naturais, resultando em contaminação dos recursos hídricos e do solo, na retenção do calor do sol na atmosfera e escassez de alimentos. Essas atividades também produzem gases como dióxido de carbono, óxido nitroso e metano, conhecidos como gases do efeito estufa.

Apesar do consenso na comunidade científica sobre as mudanças climáticas globais ser forte, as opiniões públicas sobre a existência e causas antropogênicas divergem (Cook *et*

al., 2013). Acreditar na mudança climática, ou seja, aceitar o consenso científico de que o aquecimento global causado pelo homem está acontecendo é essencial para estimular atitudes pró-ambientais e é uma condição fundamental para que haja apoio às estratégias públicas e privadas de mitigação e adaptação (van Valkengoed; Steg, 2019).

Conforme o relatório do IPCC (2019), para mitigar as mudanças climáticas é necessário limitar ou evitar as emissões de gases de efeito estufa (GEEs) e melhorar as atividades que removem esses gases da atmosfera. A maioria das espécies agrícolas convencionais é afetada por extremos climáticos, levando a perdas elevadas com alta frequência de ondas de calor e frio (FAO, 2020). Logo, os efeitos das mudanças climáticas globais estão provocando alteração no ambiente, incluindo o solo, a uma velocidade mais alta do que a capacidade das práticas agrícolas em se adaptarem (IPCC, 2014).

A ONU (2018), por meio da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável é um compromisso assumido por líderes de 193 países, incluindo o Brasil, que visa alcançar uma lista de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas até 2030. Seu propósito é efetivar os direitos humanos e promover o desenvolvimento sustentável, abrangendo de forma equilibrada as três dimensões do desenvolvimento: econômica, social e ambiental. Com foco na implementação do desenvolvimento sustentável, foi sugerida a necessidade de consumo eficiente de recursos naturais, energia barata e limpa, água potável e saneamento e mitigação das mudanças climáticas.

O biocarvão é considerado uma tecnologia promissora para o sequestro de carbono e a mitigação de GEEs, pois, na biomassa pirolisada, o carbono orgânico é convertido em produtos carbonados recalcitrantes, apresentando elevada quantidade de carbono estável em sua estrutura e, portanto, permanecendo por mais tempo no solo. Devido à sua capacidade de melhorar a produção de alimentos, bem como de adsorver de maneira eficiente contaminantes presentes em águas residuais e transformar biorresíduos em bioenergia, o uso de biocarvão se tornou altamente promissor e atrativo no combate às mudanças climáticas (Yin, 2021).

Portanto, a incorporação do biocarvão ao solo apresenta diversas vantagens ambientais, como o sequestro de carbono, a redução da emissão de gases de efeito estufa (GEEs), a remoção de poluentes orgânicos e metais pesados e a produção de biocombustíveis. Assim, biocarvões podem potencialmente ajudar a mitigar as emissões de gases de efeito estufa ao ambiente (Yin, 2021), contribuindo diretamente para o alcance de diversas metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), incluindo acesso à água limpa e saneamento (ODS6), energia limpa e acessível (ODS7), produção e consumo responsáveis (ODS12) e

mitigação das mudanças climáticas (ODS13) (Neogi, 2022).

É importante notar que as características do biocarvão, como área superficial, porosidade e grupos funcionais, variam de acordo com o tipo de biomassa usada na pirólise e os parâmetros controlados durante o processo. Essa variabilidade nas propriedades do biocarvão permite uma ampla gama de aplicações ambientais e contribui para a eficiência em objetivos de sustentabilidade. Dessa forma, os principais mecanismos de adsorção ao biocarvão envolvem interações físicas, de troca iônica, eletrostáticas, complexação da superfície e precipitação (Yin, 2021).

O uso do lodo de esgoto como fonte de biomassa é uma opção promissora para promover a remediação do solo e diminuir a emissão dos gases de efeito estufa, contribuindo para a melhoria ambiental. Nesse contexto, a pirólise é eficaz para reduzir o teor de carbono, por meio da imobilização desse elemento no biocarvão. Além disso, o biocarvão tem a capacidade de promover a remoção de contaminantes (Zhao, 2023).

O gerenciamento de lodo de esgoto deve considerar o descarte adequado de resíduos e o controle da poluição secundária por emissão de gases de efeito estufa e metais pesados. O método tradicional de aterro sanitário produz grande quantidade de gases de efeito estufa, que têm um impacto significativo no aquecimento global e na mudança climática (Awasthi, 2016). O relatório do IPCC (2007) afirma que o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), produzidos pela decomposição da matéria orgânica em aterros sanitários e lixões, são os segundos componentes antropogênicos mais poluentes para o efeito estufa, tendo um impacto de 30 e 210 vezes maior, respectivamente, no aquecimento global do que o dióxido de carbono.

2.3.2 Biocarvões no contexto da mitigação de problemas em solos

A qualidade dos solos está enfrentando desafios crescentes e constantes. Segundo relatório da FAO (2015), aproximadamente um terço dos solos do mundo encontra-se em estado degradado, tendo como principais causas a erosão, salinização, compactação, acidificação e contaminação, resultando na redução da cobertura vegetal, na diminuição da fertilidade, na contaminação do solo e da água, e conseqüentemente, na redução da produtividade das culturas.

A agricultura intensiva causa interferências no habitat natural do solo, modificando a distribuição e composição de água e nutrientes, impactando negativamente a estrutura do solo e prejudicando a vida do solo, levando à degradação do solo (Köhl *et al.*, 2014). Como consequência, os solos apresentam propriedades físicas e/ou químicas e/ou biológicas comprometidas, as quais dificultam ou impedem o crescimento das plantas. Nas últimas quatro

décadas o mundo perdeu cerca de um terço de suas terras aráveis em razão da erosão e poluição, evidenciando a urgência em aprimorar e remediar solos com problemas físicos e/ou químicos (Yu *et al.*, 2019).

A estrutura do solo desempenha papel fundamental na qualidade do solo e tem a matéria orgânica do solo (MOS) como importante componente para a sua gênese. Na literatura, há inúmeras técnicas para aumentar a MOS, tais como: plantio direto, rotação de culturas, adubação verde, culturas de cobertura, entre outras (Bettiol *et al.*, 2023). Recentemente, o biocarvão tem ganhado notoriedade entre a comunidade científica no uso como condicionador de solo para melhorar estrutura e agregação do solo e, conseqüentemente, melhorar a produtividade das culturas, além de aportar carbono ao solo (Zhang *et al.*, 2020).

Além do seu potencial no sequestro de carbono, o biocarvão também melhora as propriedades físicas e químicas do solo. Diversos estudos já comprovaram que a incorporação do biocarvão ao solo pode reduzir a densidade, aumentar a porosidade e melhorar a estrutura do solo, além de ter a capacidade de reter água e elevar a CTC devido à sua alta superfície específica. Isso aumenta a disponibilidade de nutrientes no solo, por meio do aporte de matéria orgânica e da redução da perda de nutrientes causada pela lixiviação no solo (Kamali *et al.*, 2022).

Pesquisas realizadas em solos franco-argilosos e franco-arenosos, comparando as modificações nas propriedades físicas proporcionadas por dois tipos de biocarvão, o primeiro recém produzido (fresco) e outro envelhecido, produzidos a partir da pirólise da madeira de pinheiro (*Picea abies*), mostraram que a aplicação do biocarvão fresco diminuiu a densidade do solo em 16,8% e aumentou o conteúdo de água em 16,0%, além da macroporosidade em 78,8%. Esses efeitos foram atribuídos à melhoria da estrutura do solo e não à porosidade do biocarvão (Zanutel *et al.*, 2023).

Blanco-Canqui, em seu artigo de revisão no qual avaliou a utilização de biocarvão como condicionador de solo e suas implicações nas propriedades físicas e hidráulicas do solo, conclui que o biocarvão tende a melhorar essas propriedades. Ele reduz a densidade do solo em 3 a 31%, aumenta a porosidade em 14 a 64% e tem pouco ou nenhum efeito na resistência do solo à penetração. O biocarvão também aumenta a estabilidade dos agregados em água em 3 a 226% e melhora a consistência do solo. Além disso, o biocarvão aumenta a água disponível no solo em 4 a 130%. A eficácia do biocarvão tende a aumentar com a quantidade aplicada. A redução do tamanho das partículas de biocarvão pode aumentar a retenção de água, mas pode diminuir o fluxo saturado. Ao final, o autor conclui que a aplicação de biocarvão contribui para a melhoria das condições físicas do solo. No entanto, estudos de longo prazo e em campo são

essenciais para compreender plenamente suas implicações sob diversas condições de manejo.

2.3.3 *Biocarvões na mitigação de problemas em plantas cultivadas*

Estudos realizados pela Organização das Nações Unidas (ONU) apontam que a população mundial alcançará a marca de 9,8 bilhões de indivíduos em 2050 e se estabilizará em torno de 11,2 bilhões em 2100. Isso significa que será necessário aumentar em cerca de 70% a produção global de alimentos para suprir a demanda populacional (FAO, 2021).

Evidências de que a aplicação do biocarvão como condicionador melhora as propriedades do solo e promove o crescimento das plantas estão relatadas na literatura. Um estudo realizado por Zheng *et al.* (2018), com plantas halófitas em solos costeiros da China, mostrou que o uso do biocarvão oriundo da pirólise de casca de amendoim pode promover o crescimento dessas plantas, melhorando a qualidade do solo, aumentando a disponibilidade de nutrientes e elevando as atividades e abundâncias bacterianas relacionadas às transformações de nutrientes. Conforme os autores supracitados, a co-aplicação de biochar com fertilizante pode ser uma opção para maximizar seus benefícios potenciais na recuperação de solo costeiro degradado.

As raízes têm papel fundamental no crescimento das plantas, permitindo a fixação da planta ao solo e possuindo ainda as funções de absorção, condução e reserva de nutrientes. Uma das principais dificuldades enfrentadas pelas plantas é a resistência do solo à penetração das raízes, o que ocorre em solos com elevada densidade, compactados ou adensados. A aplicação de biocarvão diminui a densidade dos solos, aumenta a porosidade e a capacidade de retenção de água, aliviando assim a compactação ou adensamento do solo e melhorando o crescimento das plantas (Nascimento *et al.*, 2024).

Foi realizado estudo em arrozal na China que demonstrou que a adição de biocarvão oriundo da pirólise de palha de trigo, em quantidade de 40 t ha⁻¹, resultou em redução significativa na densidade do solo de 0,06 g cm⁻³ a 0,1 g cm⁻³, em relação ao controle. Além disso, foi observado aumento na produção de arroz de 9% a 12% no primeiro ciclo e de 9% a 28% no segundo ciclo. No mesmo estudo, os resultados evidenciaram que a aplicação de biocarvão aumentou o pH do solo, carbono orgânico do solo e nitrogênio total (Zhang *et al.*, 2012).

Um estudo realizado na província de Jilin, na China, investigou a absorção de nitrogênio pela planta de milho durante a fase de plântula, após a aplicação de biocarvão produzido a partir da pirólise da palha de milho em solos com alta e baixa fertilidade. Os

resultados indicaram que a absorção de N pela planta de milho aumentou em 30,58% em solos com alta fertilidade, corrigidos com biocarvão, e em 41,53% em solos com baixa fertilidade, corrigidos com biocarvão, em comparação com o solo não corrigido. Portanto, concluiu-se que a aplicação de biocarvão derivado da pirólise da palha de milho reduz significativamente as perdas de nitrogênio no solo e melhora a eficiência com que a planta de milho utiliza o nitrogênio, especialmente em solos pouco férteis (Liu *et al.*, 2021).

A utilização do biocarvão como condicionador do solo apresenta potencial para melhorar ou corrigir as qualidades químicas, físicas e biológicas do solo, conseqüentemente auxiliando no combate aos problemas que afetam as plantas cultivadas e elevando a produtividade, contribuindo para a garantia da segurança alimentar.

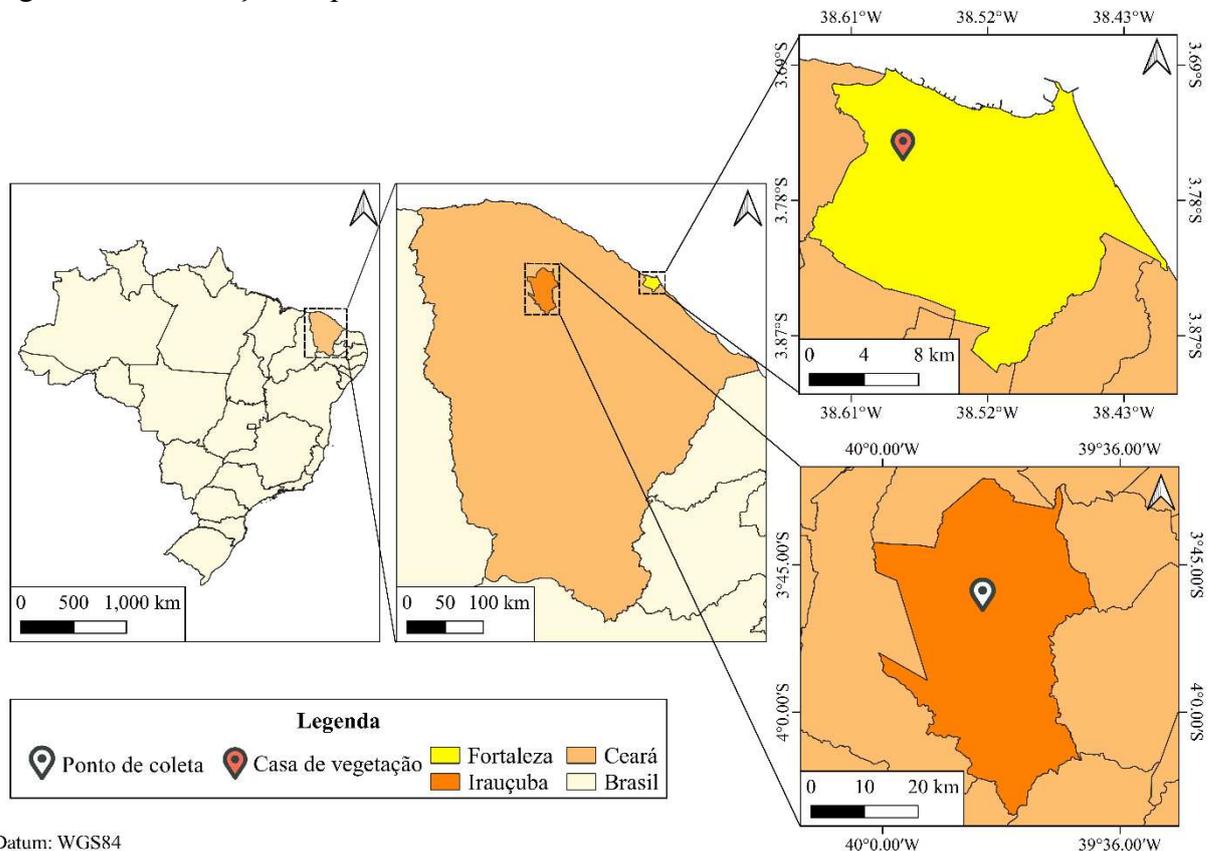
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização, montagem e condução do experimento

O experimento foi conduzido em Fortaleza-CE, em casa-de-vegetação do Departamento de Ciências do Solo, Campus do Pici, na Universidade Federal do Ceará – Latitude $3^{\circ}44'38,87''$ (S) e Longitude $38^{\circ}34'31,34''$ (W). O estudo foi desenvolvido com controle de temperatura, mantida a 27°C (chegando a 35°C nos horários mais quentes), e de umidade, mantida em 80%. O solo utilizado foi coletado na camada de 0-10 cm, no município de Irauçuba/CE, Figura 1, na Fazenda Aroeira, que está inclusa no projeto “Estudos dos processos de Degradação/Desertificação e suas relações com o uso da terra em sistemas de produção do semiárido cearense”. Conforme Ferreira (2015), o solo é classificado como Planossolo (Santos *et al.*, 2018).

O ensaio foi conduzido em delineamento estatístico inteiramente aleatorizado, em arranjo fatorial 2×4 (dois biocarvões: de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro e de bagaço de caju, produzidos por meio de pirólise; quatro doses: 5, 10, 20 e 40 Mg ha^{-1}) e um tratamento controle, com quatro repetições, totalizando 36 unidades experimentais.

Figura 1 - Localização do ponto de coleta do solo.



Datum: WGS84

Autor: Ícaro Vasconcelos do Nascimento (2024).

As doses foram determinadas com base em Major (2010), que relatou diversos estudos na literatura demonstrando efeitos positivos do uso de biocarvão no solo, resultando em aumentos na produtividade das culturas com doses entre 5 e 50 Mg ha⁻¹. Com base nesses resultados, o experimento foi iniciado com dose de 5 Mg ha⁻¹, dobrando progressivamente para 10, 20 e, finalmente, 40 Mg ha⁻¹, mantendo as doses abaixo do limite superior de 50 t ha⁻¹ mencionado na literatura.

O bagaço de caju utilizado como fonte de biomassa neste estudo foi proveniente de resíduos da agroindústria do caju (*Anacardium occidentale* L.). Inicialmente, foi secado ao ar livre, ensacado e pesado. Na sequência, o material passou por triagem para remoção de resíduos indesejáveis, como areia, galhos, folhas, castanhas etc., inicialmente por peneiramento e, depois, manualmente. Após a triagem, o bagaço foi triturado e passado em peneira com aberturas de malha de 3 mm de diâmetro, e estocado em freezer para as etapas subsequentes. Amostras foram enviadas para produção escalonada de biocarvão.

O lodo de esgoto foi proveniente do processo de tratamento de reator anaeróbico UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), uma vez que diferentes tecnologias de tratamento produzem lodos com caracterizações distintas. No setor de saneamento, especialmente no Ceará, a tecnologia de UASB seguida por filtro submerso aerado está substituindo as lagoas de estabilização, pois demanda menor área e possui eficiência compatível com a legislação. O lodo de esgoto constitui subproduto que tem sido estudado para fins de valorização, redução de custos e alinhamento às práticas sustentáveis. Para minimizar possíveis riscos de contaminação por metais pesados no lodo de esgoto, por ocasião da carbonização foi adicionada mistura deste com outra biomassa (obtida da poda de cajueiros no entorno de Estação de Tratamento de Esgoto – ETE).

As diferentes matérias-primas de ambos os biocarvões foram submetidas ao processo de pirólise a uma temperatura de 500 °C durante 1 hora e 37 minutos. Os dados referentes à caracterização dos biocarvões estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização de biocarvões pirolíticos utilizados no estudo.

Atributos	Biocarvão de lodo de esgoto adicionado de resíduo de poda de	Biocarvão de bagaço de caju
Granulometria (malhas)		
> 1,0 a 2,0 mm (%)	52,50	31,46
> 0,5 a 1,0 mm (%)	21,50	38,38
> 0,25 a 0,5 mm (%)	13,75	19,12
> 0,105 a 0,25 mm (%)	8,37	8,54
> 0,053 a 0,105 mm (%)	2,24	1,95
< 0,053 mm (%)	1,64	0,55
Densidade (g cm ⁻³)	0,55	0,28
CE (mS cm ⁻¹)	0,8	2016,6
pH	9,1	9,61
Umidade (%)	1,9	1,74
Sólidos voláteis (%)	31,2	43,27
Cinzas (%)	51,2	22,65
Carbono fixo (%)	15,6	32,27
C (g/kg)	348	480,10
N (g/kg)	24,45	27,09
C/N	17,72	14,20
P (g kg ⁻¹)	17,1	11,62
K (g kg ⁻¹)	6,1	7,708
Ca (g kg ⁻¹)	19,3	1,948
Mg (g kg ⁻¹)	7,3	4,538
Cu (g kg ⁻¹)	0,17	0,051
Fe (g kg ⁻¹)	15,3	0,768
Mn (g kg ⁻¹)	0,39	0,045
Mo (g kg ⁻¹)	0,01	0,001
Zn (g kg ⁻¹)	1,39	0,059
Na (g kg ⁻¹)	4,09	0,353
Al (g kg ⁻¹)	26,8	1,353
Cd (g kg ⁻¹)	0,001	ND
Pb (g kg ⁻¹)	0,016	0,001
Cr (g kg ⁻¹)	0,040	0,002
Ni (g kg ⁻¹)	0,023	0,004
Ba (g kg ⁻¹)	0,221	0,011

⁽¹⁾ Não determinado (ND), pois os teores no lodo de esgoto precursor estavam abaixo do limite de detecção. Para a quantificação dos teores de nutrientes nos biocarvões os extratos foram obtidos conforme sugerido em Lehmann e Enders (2012) - (Modified dry ash). Após extração, o teor de P foi determinado pelo método colorimétrico do ácido olibdovanadofosfórico (MAPA). O teor de P foi estimado em espectrofotômetro a 400 nm. Os teores de Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn, Al, Cd, Pb e Cr foram analisados por ICP-OES, e K e Na por fotometria de Chama. CE e pH foram obtidos de acordo com os protocolos descritos em Rajkovic *et al.*, 2011. A determinação da análise imediata: umidade, sólidos voláteis, cinzas e carbono fixo seguiu a metodologia descrita em ASTM D '1762-8. ND – Não detectado. A granulometria dos biocarvões foi classificada de acordo com International Biochar Initiative (2015).

Fonte: o próprio autor (2024).

Conforme a Resolução nº 498 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2020), que define critérios e procedimentos para a produção e aplicação de

biossólidos em solos, a quantidade dos elementos Zn, Cd, Pb, Cr e Ni presentes nos biocarvões (Tabela 1) define a Classe 1, qual seja, para uso irrestrito, com níveis baixos de metais pesados.

Com relação ao experimento, cada unidade experimental foi constituída por coluna de PVC (diâmetro de 20 cm, altura de 50 cm), considerando a montagem do corpo de prova na densidade do solo de $1,55 \text{ g cm}^{-3}$. De acordo com Lima (2022), a densidade do solo em áreas de sobrepastejo no ambiente em que o solo foi coletado atinge valor de $1,85 \text{ g cm}^{-3}$; porém, considerando a situação em que há a incorporação do biocarvão com aração e posterior gradagem, a densidade é reduzida, de modo que o valor considerado foi de $1,55 \text{ g cm}^{-3}$. Cada coluna foi preenchida com solo do núcleo de desertificação com o biocarvão já incorporado (para a montagem das colunas se utilizou terra passada em peneira com aberturas da malha de 4 mm de diâmetro).

O solo foi caracterizado quanto aos atributos químicos e físicos, em quatro repetições, incluindo para cada tratamento a curva de retenção de água dada a necessidade de seu uso para o manejo da irrigação nos períodos de incubação e cultivo, conforme será detalhado posteriormente.

Com base nos dados químicos do solo (Tabela 2), constatou-se a necessidade de adubação mineral conforme as exigências da cultura do milho. Foi realizada a adubação fosfatada (superfosfato simples), potássica (cloreto de potássio) e nitrogenada (ureia). O pH do solo foi corrigido com sulfato de magnésio, devido à elevada concentração de cálcio e sua correlação com o magnésio, seguindo os critérios do manual de adubação e correção do solo para o estado do Ceará (Fernandes *et al.*, 1993). A adubação em cada coluna de solo ocorreu nas seguintes quantidades: na etapa de plantio, 865,6 mg de ureia, 4582,8 mg de superfosfato simples (SS) e 432,8 mg de cloreto de potássio (KCl); na etapa de cobertura, 865,6 mg de ureia e 216,4 mg de KCl, parcelada em duas vezes (aos 25 e 45 dias após a emergência das plantas).

Tabela 2 - Caracterização física e química do Planossolo coletado na profundidade de 0-10 cm, no município de Irauçuba-CE.

Granulometria do solo												
Camada	Areia (%)			Silte (%)			Argila (%)					
0-10 cm	76			17			7					
Análise química do solo												
pH	CE	P	Ca	Mg	K	Na	Al	H+Al	SB	T	V	C
H ₂ O	dS/m	mg/kg	-----				cmol _c kg ⁻¹	-----			%	g kg ⁻¹
5,1	0,03	8,44	6,97	0,46	0,09	0,08	0,54	2,52	7,52	10,04	74,90	6,07

Fonte: o próprio autor (2024).

Após a montagem das colunas, o solo foi mantido por 30 dias para a incubação do biocarvão com umidade entre a capacidade de campo e até no máximo quando houvesse sido consumida 30% da CAD – capacidade de água disponível à planta. A CAD foi calculada considerando a capacidade de campo (potencial mátrico de -10 kPa) e o ponto de murcha permanente (potencial mátrico de -1500 kPa). O monitoramento do potencial mátrico da água no solo, para fins de manejo da irrigação, se deu por tensiômetro com manômetro de mercúrio (foi instalado um tensiômetro em cada coluna, na profundidade de 20 cm); utilizou-se água destilada para o suprimento da demanda hídrica.

Decorridos os 30 dias da incubação do biocarvão no solo, fez-se a semeadura com milho (variedade BRS 2022), inicialmente com três sementes, com desbaste para manter apenas a planta mais vigorosa por coluna. O manejo da irrigação no período do cultivo foi o mesmo descrito para o período de incubação. Para monitorar o desenvolvimento das plantas, foram considerados os estádios de desenvolvimento, por meio da contagem do número de folhas totalmente desenvolvidas, e realização de análises morfométricas por meio das medições da altura das plantas, do diâmetro do colmo, e de produção de matérias fresca e seca da parte aérea e de matéria seca de raízes.

Ao final do experimento, e antes da remoção do solo, foi coletada no centro da camada de 0-10 cm (na profundidade de 2,5-7,5 cm), em cada coluna, amostra não preservada (para a realização de análise de densidade de partículas) e preservada (por meio da inserção de anel volumétrico com dimensões nominais de 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro) para a obtenção da densidade do solo, permeabilidade do solo ao ar, curva de retenção de água e resistência do solo à penetração. Também foram coletados agregados com o objetivo de realizar as análises de resistência tênsil e de estabilidade de agregados.

3.2 Atributos analisados no solo

3.2.1 Granulometria

A fração argila foi quantificada pelo método da pipeta, a areia por peneiramento, e a fração silte considerando a massa total da amostra de solo utilizada para a análise menos o somatório das frações areia e argila. O hidróxido de sódio (NaOH) 1 Mol L⁻¹ foi utilizado para a dispersão química das partículas (Gee; Balder, 1986).

3.2.2 Densidade de partículas

Foi determinada pelo método do balão volumétrico, utilizando-se terra fina seca em estufa (TFSE) a 105°C e álcool etílico, no qual, o princípio é determinar o volume de álcool gasto para completar um balão volumétrico de 50 mL contendo 20 g de TFSE (Teixeira *et al.*, 2017).

3.2.3 Densidade do solo

Foi mensurada pelo método do anel volumétrico, calculando-se a razão entre massa de solo seco a 105 °C e volume do anel (Blake; Hartge, 1986b).

3.2.4 Porosidade total

A porosidade total (α) foi calculada utilizando os dados de densidade do solo (ρ_s) e das partículas (ρ_p), por meio da equação $\alpha = 1 - \rho_s/\rho_p$.

3.2.5 Curva de retenção de água no solo

No procedimento, o conteúdo de água na saturação (potencial mátrico igual a 0 kPa) foi considerado igual à porosidade total do solo (α , m³ m⁻³); além do ponto de saturação, considerou-se o conteúdo de água no solo em equilíbrio com os seguintes potenciais mátricos: -2, -4, -6, -8, -10, -33, -100, -700 e -1500 kPa. Depois de obter os valores de umidade do solo em todos os pontos, foi feito o ajuste dos dados ao modelo matemático proposto por van Genuchten (1980), Equação 1,

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\phi_m|)^n]^m}, \quad (1)$$

em que: θ é o conteúdo de água (m³ m⁻³); θ_r e θ_s são, respectivamente, os teores de água residual e de saturação (m³ m⁻³); ϕ_m é o potencial mátrico da água no solo (kPa); α é o inverso do potencial mátrico de entrada de ar no solo (kPa⁻¹); m e n são parâmetros de ajuste do modelo, relacionados ao formato da curva. Os dados foram ajustados utilizando o programa SWRC (Soil Water Retention Curve), seguindo o método iterativo de Newton-Raphson, com dependência do parâmetro m com o n (Dourado Neto *et al.*, 2001).

Este procedimento foi realizado em dois momentos ao longo do experimento: o primeiro, no período de pré-incubação, com as doses dos biocarvões incorporadas ao solo, portanto, utilizando material com estrutura não preservada; e o segundo, ao final do

experimento, após 90 dias (30 de incubação e 60 de cultivo), quando foram coletadas amostras em anéis volumétricos, portanto, mantendo a estrutura preservada.

3.2.6 Permeabilidade do solo ao ar

Foi determinada pelo método da pressão decrescente, utilizando corpos de prova com a umidade equilibrada no potencial mátrico de -10 kPa. No processo analítico, aplicou-se uma quantidade de ar correspondente à pressão de 1 kPa à amostra de solo; concomitantemente, o decaimento da pressão ao longo do tempo foi medido eletronicamente até que a pressão dentro da amostra alcançasse o equilíbrio com a pressão atmosférica. A medição do decaimento da pressão se dá com o uso do *software* PermeAr v.1.0, conforme descrito por Silveira *et al.* (2011). O coeficiente de permeabilidade ao ar (K_{ar}) foi calculado utilizando a Equação 2,

$$K_{ar} = \frac{L\eta V}{AP_{atm}} \times |S|, \quad (2)$$

sendo K_{ar} o coeficiente de permeabilidade ao ar (m^2), V o volume de ar que passa pelo cilindro (m^3), η a viscosidade dinâmica do ar (Pa s), L a altura do anel volumétrico (m), A seção transversal da amostra de solo (m^2), P_{atm} a pressão do ar atmosférico (Pa) e S o coeficiente angular da regressão linear da pressão (ln da pressão) em função do tempo.

3.2.7 Resistência do solo à penetração de raízes

A determinação foi realizada usando corpos de prova que apresentam umidade equilibrada no potencial mátrico de -33 kPa. Para isso, foi utilizado um penetrômetro eletrônico estático de laboratório que possui um sistema atuador linear, com velocidade de 1 cm min^{-1} , uma célula de carga de 20 kgf, uma haste com um cone de base com diâmetro de 0,4 cm, ângulo de 60° e área de $12,566 \text{ mm}^2$. Esse equipamento tem a capacidade de registrar uma leitura por segundo. O penetrômetro é conectado a um computador para coleta de dados por meio do software próprio do equipamento (Tormena *et al.*, 1988). O procedimento consiste em obter a informação média que representa a resistência à penetração para cada amostra de solo analisada.

3.2.8 Resistência tênsil de agregados

Para realização da análise de resistência tênsil dos agregados (RT), foi utilizado equipamento com atuador eletrônico linear a uma velocidade constante de $0,03 \text{ mm s}^{-1}$

(Tormena *et al.*, 2008). Foram utilizados agregados com diâmetro entre 19 mm e 25 mm; em seguida, os torrões tiveram sua massa aferida em balança eletrônica e, após essa etapa, o torrão foi posicionado da forma mais estável possível entre as duas placas metálicas (inferior e superior) do equipamento, que possui uma capacidade de carga de 20 kgf. O valor de carga utilizado para romper o agregado foi registrado por meio por um sistema eletrônico de aquisição de dados. Em seguida uma porção desse agregado foi coletada e levada à estufa a 105 °C para a aferição da umidade residual da amostra.

A resistência tênsil (RT) foi estimada, segundo Dexter e Kroesbergen (1985), considerando a Equação 3,

$$RT = \frac{(0,576P)}{D^2 10^3}, \quad (3)$$

em que RT é a resistência tênsil do torrão (kPa), $0,576$ a constante de proporcionalidade da relação entre o estresse compressivo aplicado e o estresse tênsil gerado no interior do torrão, P a força aplicada (N), e D o diâmetro efetivo do torrão (m); 10^3 é o fator de conversão de Pa para kPa.

O diâmetro efetivo do torrão foi mensurado pela Equação 4 (Watts; Dexter, 1998),

$$D = D_m \left(\frac{M}{M_o} \right)^{0.333}, \quad (4)$$

sendo D_m o diâmetro médio dos torrões $\{[(19 + 25)/2]/10^3, \text{ em m}\}$, explicado pela média dos tamanhos da abertura das peneiras, M a massa do torrão individual seco a 105 °C (g), e M_o a massa média dos torrões secos a 105 °C (g).

3.2.9 Estabilidade de agregados

Foi determinada seguindo o método por via úmida para determinar a quantidade e distribuição do tamanho dos agregados que são estáveis em água, em relação aos que se desintegraram no processo de tamisação (Kemper; Rosenau, 1986). O equipamento utilizado para fazer a tamisação foi um oscilador elétrico vertical, que possui dois conjuntos de peneiras com as respectivas malhas de abertura 4,76; 2,0; 1,0; 0,5 e 0,25 mm. A massa de agregados que fica retida em cada peneira foi expressa em cinco classes de diâmetro: (7,93-4,76 mm, 4,76-2,00 mm, 2,00-1,00 mm, 1,00-0,50 mm e 0,50-0,25 mm), permitindo assim estimar a percentagem de agregados estáveis em cada classe, de acordo com a Equação 5,

$$\% \text{ de agregados estáveis por classe} = \left(\frac{Ma - Mp}{Ms - Mw - \sum Mp} \right) \times 100, \quad (5)$$

em que Ma é a massa dos agregados aparentes na classe, Mp é a massa das partículas primárias na classe, Ms é a massa de agregados da amostra inicial (25 g) e Mw é a massa de água na amostra inicial.

O diâmetro médio ponderado (DMP), considerado um índice de agregação do solo (VAN BAVEL, 1949), foi calculado considerando o somatório dos produtos entre o diâmetro médio (X_i) e a fração (W_i) de agregados estáveis em cada classe, Equação 6,

$$\text{DMP} = \sum (X_i \cdot W_i). \quad (6)$$

3.3 Variáveis analisadas nas plantas de milho

3.3.1 *Altura das plantas, diâmetro do colmo, número de folhas, área foliar, fitomassa fresca e seca*

Ao término do experimento, quando as plantas atingiram o período de polinização, estágio R1 – embonecamento, caracterizado pela presença de estigmas visíveis, algumas variáveis de crescimento foram avaliadas: a altura das plantas foi medida com fita métrica, considerando da superfície do solo até o ápice da última folha emitida. As medições do diâmetro do colmo se deram com uso de paquímetro digital com o valor médio resultando de três medições no colmo. Para a contagem do número de folhas se levou em consideração aquelas que estavam totalmente expandidas. A área foliar foi medida com todas as folhas, as quais foram destacadas do colmo e levadas de imediato, para evitar o murchamento, ao integrador de área foliar (Area meter, LI-3100, Li-Cor, Inc. Lincoln, NE, USA).

Para a biomassa fresca, as plantas foram divididas em colmo e folhas e, na sequência, pesadas. Após pesagem do material, as diferentes partes das plantas foram colocadas em sacos de papel e transportadas para secagem em estufa a 65 °C até atingir massa constante para, então, se obter a biomassa seca das diferentes partes. Para obter a biomassa seca de raízes, se procedeu a separação delas do solo com lavagem cuidadosa e peneiramento.

3.4 Análise dos dados

Verificou-se a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk e a homogeneidade das variâncias pelo teste Bartlett. A independência dos resíduos pelo teste de Durbin-Watson, a não existência de observação discrepante pelo teste de t-Student. Quando necessário, procedeu-se a transformação das variáveis pelo procedimento de Box e Cox (1964), em que se busca encontrar uma potência ótima (λ) de modo que os dados transformados assumam distribuição o mais próximo possível da normal.

Procedeu-se, inicialmente, a análise de variância pelo teste F; a comparação de médias se deu pelos testes de Dunnett (em que cada tratamento foi comparado exclusivamente com o controle) e de Tukey (todos os tratamentos foram comparados entre si), ambos a 5% de significância. Os dados foram analisados considerando o experimento em delineamento inteiramente aleatorizado, em fatorial 2 x 4 (dois biocarvões: de lodo de esgoto adicionado da biomassa de poda de cajueiro em proporção de 1:1, e de bagaço de caju, produzidos por meio de pirólise; quatro doses: 5, 10, 20 e 40 Mg ha⁻¹) mais uma testemunha, com quatro repetições.

Para os dados da curva de retenção de água, considerou-se o delineamento inteiramente aleatorizado em fatorial 2 x 2 x 4 (dois biocarvões: de lodo de esgoto adicionado da biomassa de poda de cajueiro em proporção de 1:1, e de bagaço de caju, produzidos por meio de pirólise; dois períodos: pré-incubação e pós-cultivo; quatro doses: 5, 10, 20 e 40 Mg ha⁻¹) mais uma testemunha, com quatro repetições.

No caso das regressões, os dados dos biocarvões foram analisados separadamente, considerando as relações entre as doses de biocarvões aplicadas (0, 5, 10, 20 e 40 Mg ha⁻¹) e atributos físicos do solo e de plantas de milho. Foram realizadas análise de componentes principais (ACP) para caracterizar tratamentos e uma análise de agrupamento para formar grupos com os tratamentos de maior similaridade. Todas as análises foram realizadas utilizando a plataforma SAS[®] OnDemand for Academics.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Atributos físicos do solo

A análise de variância (Tabela 3) evidenciou efeito significativo de biocarvões para os atributos lâmina de água e capacidade de água disponível nos períodos de incubação e de cultivo (AGI e AGC, CAD-PI e CAD-PC), e resistência tênsil de agregados (RT), que foi o único atributo a ser alterado significativamente por pelo menos uma das doses de biocarvões aplicadas no solo. Com relação à interação dos tratamentos biocarvões e doses, foram verificados efeitos significativos apenas para os atributos RT, CAD-PI e CAD-PC.

Tabela 3 - Resultado da análise de variância (ANOVA) com valores de F e sua respectiva significância para os atributos de lâmina de água nos períodos de incubação (AGI) e de cultivo (AGC), densidade do solo (DS), permeabilidade do solo ao ar no potencial mátrico de -10 kPa (Kar), resistência do solo à penetração de raízes (RP), resistência tênsil de agregados (RT), diâmetro médio ponderado (DMP) e capacidade de água disponível nos períodos de incubação (CAD-PI) e de cultivo (CAD-PC).

Fontes de variação	GL	AGI	AGC	DS	Kar	RP	RT	DMP	CAD-PI	CAD-PC
		----- Valor F -----								
Biocarvões (B)	1	56,77**	4,44*	0,29 ^{ns}	0,53 ^{ns}	0,77 ^{ns}	21,96**	0,29 ^{ns}	340,66**	12,09**
Doses (D)	3	1,42 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,78 ^{ns}	1,54 ^{ns}	1,82 ^{ns}	53,89**	0,78 ^{ns}	0,85 ^{ns}	1,69 ^{ns}
B x D	3	1,85 ^{ns}	0,27 ^{ns}	2,83 ^{ns}	2,52 ^{ns}	2,98 ^{ns}	28,94**	2,83 ^{ns}	10,11**	4,94**
CV (%)		17,49	11,16	4,25	7,79	18,11	15,78	4,25	7,20	10,80

^{ns}, ** e *: não significativo e significativo a 1% e a 5% de significância, respectivamente, pelo teste F. CV: Coeficiente de variação.

Fonte: o próprio autor (2024).

O teste de Dunnett a 5% de probabilidade (Tabela 4), detectou diferença significativa para os atributos lâmina de água consumida no período de incubação (AGI), resistência tênsil (RT) e capacidade de água disponível no período de incubação (CAD-PI), em relação ao tratamento controle. Para os demais parâmetros (lâmina de água no período de cultivo - AGC, densidade do solo - DS, permeabilidade do solo ao ar - Kar, resistência do solo à penetração - RP, diâmetro médio ponderado - DMP e capacidade de água disponível no período de cultivo - CAD-PC), os tratamentos não diferiram do tratamento controle.

Tabela 4 - Valores médios de lâmina de água no período de incubação (AGI), lâmina de água no período de cultivo (AGC), densidade do solo (DS), permeabilidade ao ar no potencial mátrico de -10 kPa (Kar), resistência do solo à penetração de raízes (RP), resistência tênsil de agregados (RT), diâmetro médio ponderado (DMP), capacidade de água disponível no período de incubação (CAD-PI), capacidade de água disponível no período de cultivo (CAD-PC).

Tratamentos	Médias dos tratamentos								
	AGI	AGC	DS	Kar	RP	RT	DMP	CAD-PI	CAD-PC
	--- mm ---	---	g cm ⁻³	μm ²	MPa	kPa	mm	--- cm ³ cm ⁻³ ---	---
Controle	56,75	733,85	1,60	68,67	1,81	33,76	5,56	0,12	0,19
BLP5	64,75	774,52	1,58	46,48	2,04	32,81	5,80	0,09*	0,20
BLP10	61,50	782,80	1,56	39,48	2,09	66,89*	5,97	0,09*	0,21
BLP20	63,75	772,25	1,46	36,41	1,59	17,97*	5,44	0,10*	0,18
BLP40	59,25	741,04	1,57	59,20	2,30	24,12*	5,52	0,10*	0,19
BC5	28,50*	687,69	1,54	56,25	1,77	21,31	4,88	0,17*	0,16
BC10	39,75	710,86	1,54	69,39	1,62	34,28	4,40	0,16*	0,16
BC20	47,25	703,32	1,60	35,18	2,10	30,23	4,47	0,14*	0,17
BC40	38,50*	723,70	1,55	48,09	2,10	22,93*	4,57	0,14*	0,20

BLP5, BLP10, BLP20 e BLP40 – Biocarvão de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro nas doses de 5, 10, 20 e 40 Mg ha⁻¹, respectivamente; BC5, BC10, BC20 e BC40 – Biocarvão de bagaço de caju nas doses de 5, 10, 20 e 40 Mg ha⁻¹, respectivamente; *Representa a diferença significativa da média do tratamento em relação à média do tratamento controle pelo teste de Dunnett a 5% de significância.

Fonte: o próprio autor (2024).

Com relação à água evaporada no período de incubação (AGI), constatou-se que o biocarvão de bagaço de caju, nas doses de 5 e 40 Mg ha⁻¹, reduziu significativamente a lâmina necessária para manter o solo com umidade entre a capacidade de campo e a umidade de reinício de irrigação, em valores respectivos de 49,8% e 32,2%. Assim, sob o aspecto econômico, menores doses de biocarvão de bagaço de caju devem ser preferidas para otimizar a eficiência do uso da água.

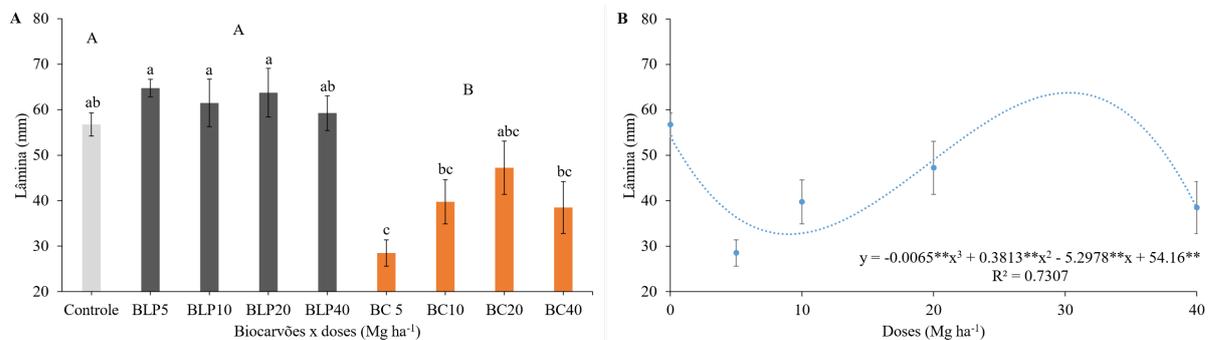
No caso da resistência tênsil (Tabela 4), os tratamentos que diferiram do controle foram biocarvões de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro nas doses de 10, 20 e 40 Mg ha⁻¹ (BLP10, BLP20, BLP40) e de bagaço de caju na dose de 40 Mg ha⁻¹ (BC40). Ao avaliar o valor de RT no solo sem biocarvão, o valor de 33,76 kPa corresponde à consistência *ligeiramente dura* para solo seco (Oliveira *et al.*, 2020). Com a adição de biocarvões nas doses supracitadas, exceto para o solo tratado com BLP10 (cujo valor de RT = 66,89 kPa corresponde à consistência *muito dura*), os valores de RT foram diminuídos significativamente, com os agregados se mantendo *ligeiramente duros* em BLP40 e BC40 e *macios* em BLP10.

Quanto ao parâmetro CAD-PI, os tratamentos que apresentaram diferença significativa foram biocarvões de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro nas doses de

5, 10 e 20 Mg ha⁻¹ (BLP5, BLP10, BLP20) e de bagaço de caju em todas as doses aplicadas (BC5, BC10, BC20 e BC40). No caso dos biocarvões de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro, os efeitos foram negativos, pois resultaram na diminuição da CAD, em média, em 21%. Por outro lado, os biocarvões de bagaço de caju ampliaram a disponibilidade de água às plantas, em média, em cerca de 27%. Para os demais parâmetros (AGC, DS, Kar, RP, DMP e CAD-PC) os tratamentos com biocarvões não diferiram do controle.

No teste de comparação de médias de lâminas de água consumidas no período de incubação, (Figura 2), os maiores valores foram observados nos tratamentos contendo biocarvão de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro: BLP5, BLP10 e BLP20, com médias de 64,75 mm, 61,50 mm e 63,75 mm, nessa ordem. Os tratamentos BLP40 e controle corresponderam à médias menores (respectivamente, 59,25 mm e 56,75 mm), porém, não diferentes estatisticamente das citadas anteriormente.

Figura 2 - Gráfico de colunas dos valores médios de lâmina de água requerida no período de incubação em função dos tratamentos controle e biocarvões de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro (BLP) e bagaço de caju (BC) para manter o solo entre a capacidade de campo e o consumo de até 30% da capacidade de água disponível (A). Curva de regressão entre lâminas de água requeridas no período de incubação e doses de BC (B).



Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância; letras maiúsculas comparam os grupos de tratamentos (controle, BLP, BC), de modo que a mesma letra maiúscula não difere pelo teste de Tukey a 5% de significância. As barras representam o erro-padrão da média. **significativo a 1% de probabilidade.

As menores lâminas de água aplicadas no período de incubação (AGI) foram observadas nos tratamentos contendo biocarvão de bagaço de caju. O tratamento BC5 apresentou o menor consumo de água para manter o solo entre a capacidade de campo e a umidade de reinício da irrigação, 28,50 mm, não diferindo estatisticamente dos tratamentos BC10, BC20 e BC40, que apresentaram médias mais elevadas, 39,75 mm, 47,30 mm e 38,50 mm, respectivamente. O tratamento BC20 foi o único que não diferiu estatisticamente dos

demais.

Considerando os tratamentos controle e grupos de biocarvões, o teste de Tukey evidenciou menor consumo de água no período de incubação, em média 38,50 mm, quando o solo foi tratado com biocarvão de bagaço de caju. As lâminas de água consumidas no controle e no solo tratado com biocarvão de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro (médias de 56,75 e 62,31 mm, respectivamente) não diferiram significativamente, mas são estatisticamente superior àquela verificada em solo tratado com biocarvão de bagaço de caju.

Aplicada a análise de regressão, (Figura 2B), constatou-se correlação significativa apenas para os tratamentos com biocarvão de bagaço de caju, apresentando ajuste a um polinômio de terceiro grau (cúbico), modelo que possibilita identificar as doses em que as lâminas de água são máxima e mínima. No entanto, o que interessa ao agricultor é identificar a dose que proporciona a menor lâmina de água para manter o solo na capacidade de campo. Nesse caso, sob a perspectiva do modelo de predição, a dose de biocarvão de 9 Mg ha⁻¹ corresponde ao ponto de mínimo da função matemática e à lâmina de água de 32,63 mm, implicando redução de cerca de 40% na lâmina requerida em comparação ao solo tratado sem biocarvão.

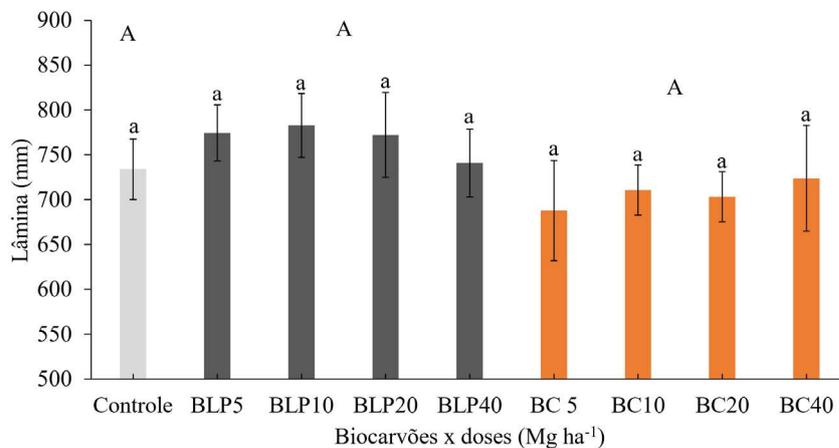
Há algumas possibilidades para explicar os achados neste estudo. Sob o aspecto da granulometria do BLP, mais da metade das partículas está concentrada nas malhas cujas aberturas estão entre 2,00 a > 1,0 mm (Tabela 2), o que contribui para reduzir significativamente a sua superfície específica. Assim, a adsorção de água em biocarvões é favorecida naqueles com maior área exposta por unidade de massa ou de volume. Outro ponto a ser observado é que alguns biocarvões podem apresentar características hidrofóbicas ou hidrofílicas, dependendo de seus grupos funcionais e da matéria-prima utilizada para sua produção, influenciando a interação do biocarvão com a água (Eibisch *et al.*, 2015). Considerando o estudo realizado por Fregolente *et al.* (2023), o biocarvão de bagaço de caju apresenta propriedades hidrofílicas, ou seja, afinidade pela água. Também contém grupos funcionais com oxigênio em sua superfície, como hidroxila, carbonila e carboxila, que são capazes de formar ligações de hidrogênio com moléculas de água, facilitando a interação.

É importante destacar que biocarvões com propriedades hidrofílicas ou hidrofóbicas podem ter esse atributo modificado com o seu “envelhecimento no solo” por meio de reações químicas, físicas e ações de microrganismos, de modo que, devido à fragmentação das partículas e à oxidação da sua superfície, a tendência é que haja aumento nas cargas de superfície desses carvões e maiores interações com os componentes organo-minerais do solo (Zornoza *et al.*, 2016).

A interação dos biocarvões com a estrutura pode levar ao preenchimento de vazios entre os grãos minerais, especialmente em solos de textura arenosa (Zanutel *et al.*, 2023). Estudos em solos de textura arenosa demonstram que as partículas de biocarvão preencheram os espaços entre as partículas do solo, produzindo poros menores no interior dos agregados, resultando em diminuição da densidade do solo e aumento da porosidade total – por isso o aumento na lâmina de água requerida para manter o solo na capacidade de campo com as maiores doses do BC.

Na comparação de médias entre as doses e entre os biocarvões, a lâmina de irrigação no período de cultivo (AGC), Figura 3, não diferiu significativamente, evidenciando mudanças na interação dos biocarvões com o solo e/ou a água na presença de plantas em relação à situação observada para o período de incubação.

Figura 3 - Gráfico de colunas dos valores médios de lâmina de água requerida no período de cultivo em função dos tratamentos controle e biocarvões de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro (BLP) e bagaço de caju (BC) para manter o solo entre a capacidade de campo e o consumo de até 30% da capacidade de água disponível.



Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância; letras maiúsculas comparam os grupos de tratamentos (controle, BLP, BC), de modo que a mesma letra maiúscula não difere pelo teste de Tukey a 5% de significância. As barras representam o erro-padrão da média.

Fonte: o próprio autor (2024)

Naturalmente, houve necessidade de maior lâmina de água para manter o solo entre a capacidade de campo a umidade de reinício da irrigação, quando se faz a comparação com a lâmina requerida no período de incubação. Uma das razões foi o consumo de água pelas plantas. Em solos não cultivados, a perda de água se deve principalmente à evaporação, que ocorre

diretamente na superfície do solo. No entanto, em solos cultivados, a evapotranspiração desempenha papel significativo. A água absorvida pelas raízes pode vir de camadas subsuperficiais e é liberada na transpiração pelos tecidos da planta, ultrapassando as taxas de evaporação da água em solo desnudo (Brady; Weil, 2013).

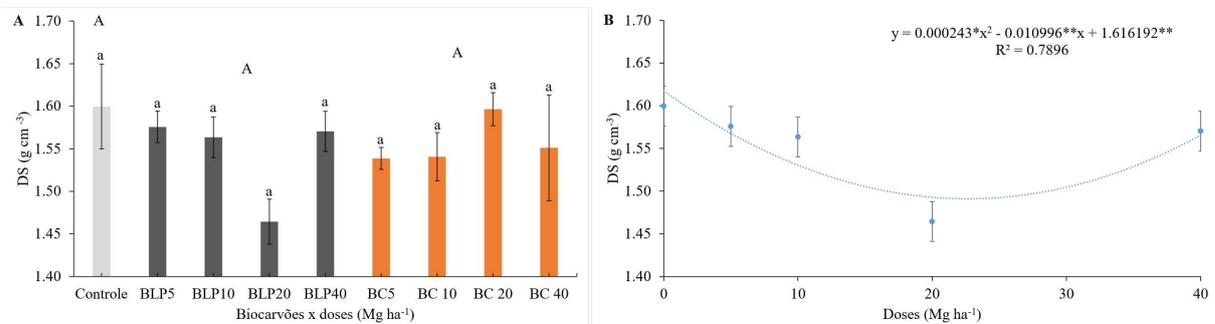
Durante as fases iniciais de crescimento do milho, a evaporação domina o processo de evapotranspiração, mas à medida que a cultura se desenvolve, a transpiração torna-se o componente principal. Em estudo realizado por Kimball *et al.* (2016), constatou-se que desde o plantio até o estágio V6 do milho, a evaporação foi responsável por 70% da evapotranspiração. Porém, do estágio V6 até a maturação fisiológica, a transpiração foi responsável por 70% da evapotranspiração. Essa mudança indica que, na medida em que as culturas crescem, o processo de transpiração provoca cada vez mais a retirada de água do solo.

Quando o biocarvão é incorporado ao solo, espera-se melhoria na agregação das partículas, na formação de agregados e, por consequência, na sua estrutura. Isso resulta em maior capacidade de armazenamento da água no solo e, com isso, espera-se que a lâmina de irrigação para atender a necessidade das culturas seja reduzida (Zhang *et al.*, 2020). No entanto, pelo menos durante o período em que o carvão esteve interagindo com o solo (90 dias do experimento), os efeitos não foram suficientes para reduzir o consumo de água pela cultura do milho em solos tratados com biocarvões em relação ao controle.

Adicionalmente, em solo sob cultivo, o aumento da evapotranspiração devido ao crescimento das plantas pode neutralizar os benefícios de retenção de água proporcionados pelo biocarvão, visto que a maior absorção de água pelas raízes e/ou a formação de possíveis caminhos preferenciais da água no solo resulta(m) em distribuição não uniforme da água, o que pode reduzir a armazenagem de água no solo. Vale destacar que no manejo da água não ocorreram perdas de água por drenagem na base das colunas, de modo que, nessa perspectiva, esse fator deve ter contribuído para não haver diferença significativa entre as doses e biocarvões em comparação ao controle quanto à lâmina de água aplicada no período de cultivo.

Para o atributo densidade do solo (DS), Figura 4A, não houve diferença estatística entre os tratamentos. Contudo, ao realizar a análise de regressão, Figura 4B, constatou-se correlação significativa apenas para os tratamentos referentes ao biocarvão de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro (BLP), apresentando ajuste dos dados a um polinômio de segundo grau (equação quadrática), que estima redução da densidade do solo para $1,49 \text{ g cm}^{-3}$ com a dose de $22,6 \text{ Mg ha}^{-1}$. Considerando a densidade do solo por ocasião do início do experimento, $1,55 \text{ g cm}^{-3}$, houve redução da densidade do solo em cerca de 4%.

Figura 4 - Gráfico de colunas dos valores médios de densidade do solo em função dos tratamentos controle e biocarvões de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro (BLP) e bagaço de caju (BC). Regressão entre densidade do solo e doses de BLP (B).



Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância; letras maiúsculas comparam os grupos de tratamentos (controle, BLP, BC), de modo que a mesma letra maiúscula não difere pelo teste de Tukey a 5% de significância. As barras representam o erro-padrão da média. **, * significativo a 1% e a 5% de probabilidade, respectivamente. Fonte: o próprio autor (2024)

Esse resultado evidenciado na análise de regressão, Figura 4B demonstra o potencial do BLP na recuperação de solos degradados por compactação/adensamento, em concordância com a literatura, que cita que é esperado que a incorporação de biocarvão ao solo proporcione redução da densidade do solo de forma direta, pois a maioria dos biocarvões possui densidade que varia entre 0,3 - 0,6 g cm⁻³, que é menor quando comparada com a das partículas minerais do solo. Além disso, sua aplicação contribui para o aumento da porosidade total, pois favorece a agregação, fazendo com que se formem poros inter e intra agregados, trazendo melhoria na estrutura do solo e contribuindo para menor densidade (Verheijen *et al.*, 2019).

A diminuição da densidade do solo proporcionada pela aplicação do biocarvão de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro pode ter influência em atributos físicos como porosidade total, resistência mecânica do solo à penetração de raízes, permeabilidade do solo ao ar, e retenção de água, sendo importante indicador para a aferição de efeitos do manejo da água e do solo.

Um estudo realizado por Nascimento *et al.* (2024), aplicando biocarvão de bagaço de caju em horizonte com caráter coeso de um Argissolo (textura argilo-arenosa), indicou redução significativa da densidade do solo com aumento da dose de biocarvão – naquela situação a dose máxima foi de 40 Mg ha⁻¹. No presente trabalho, em que foram aplicadas as mesmas doses e o mesmo biocarvão, a redução máxima da densidade do solo ocorreu com a dose de 22,6 Mg ha⁻¹ visto se tratar de classe de solo diferente e, também, com textura diferente (um Planossolo com textura franco-arenosa).

Em solos arenosos a aplicação de biocarvão reduz a densidade do solo de forma

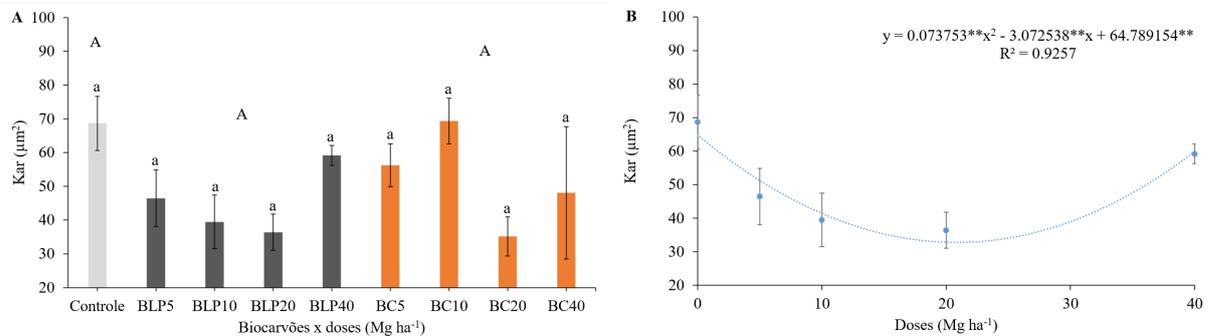
menos pronunciada que em solos argilosos; neste a sua adição contribui para a formação de mais espaços porosos e melhora a aeração. Solos arenosos já possuem estrutura naturalmente mais porosa, de modo que a adição de biocarvão pode não alterar significativamente essa estrutura (Bekchanova *et al.*, 2024).

Por outro lado, o efeito da redução na densidade em solos arenosos pode estar relacionado ao tamanho das partículas de biocarvão aplicadas (Chen *et al.*, 2018). Uma pesquisa realizada com solo arenoso, utilizando biocarvões produzidos a partir de biomassa de salgueiro sueco (*Salix alba* L.), demonstrou que a maior diminuição na densidade do solo ocorreu nos tratamentos com tamanho de partículas de biocarvão superior a 2 mm, resultando em redução de cerca de 6% em relação à densidade inicial.

Lim *et al.* (2016), em seu estudo aplicando biocarvão proveniente de mistura de madeiras em solos arenosos, compararam tratamentos com biocarvões possuindo partículas contendo mais de 88% de partículas maiores que 1 mm e tratamentos com partículas contendo mais de 57% de partículas menores que 0,5 mm. O tratamento com partículas menores aumentou significativamente a densidade do solo com a mesma dose de biocarvão (2% e 5%), possivelmente em decorrência do preenchimento dos poros maiores pelas partículas do biocarvão. Do mesmo modo, na presente pesquisa houve redução da densidade do solo com o biocarvão de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro (Figura 4B), que apresentou as maiores partículas, com 52,50% delas com tamanhos de 2,00 a >1,0 mm, em comparação com 31,46% do biocarvão de bagaço de caju.

Não houve diferenças estatísticas entre as doses de biocarvão, tampouco entre o controle e os biocarvões, para o atributo permeabilidade do solo ao ar (Kar, Figura 5A). De forma parecida ao que ocorreu com o atributo densidade do solo, houve correlação significativa entre Kar e doses de BLP, apresentando ajuste a um polinômio de segundo grau (quadrático), com redução de Kar ao menor valor ($32,79 \mu\text{m}^2$), correspondendo a cerca de 49% na dose de $20,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Figura 5B).

Figura 5 - Gráfico de colunas dos valores médios de permeabilidade do solo ao ar (Kar) no potencial mátrico de -10 kPa em função dos tratamentos controle e biocarvões de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro (BLP) e bagaço de caju (BC). Regressão entre permeabilidade do solo ao ar e doses de BLP (B).



Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância; letras maiúsculas comparam os grupos de tratamentos (controle, BLP, BC), de modo que a mesma letra maiúscula não difere pelo teste de Tukey a 5% de significância. As barras representam o erro-padrão da média. **significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: o próprio autor (2024)

Como visto, o comportamento dos atributos densidade do solo e permeabilidade do solo ar foi semelhante, com redução de Kar seguindo a redução da densidade do solo até a dose de 20,8 Mg ha⁻¹ do BLP (Figura 5B). Esse comportamento não era esperado, pois na literatura há relatos de que a aplicação de biocarvão em solo tende a aumentar a permeabilidade deste aos gases devido à estrutura porosa do biocarvão, resultando na diminuição da densidade do solo e no aumento da porosidade total (Sun *et al.*, 2013; Verheijen *et al.*, 2019).

O fato de não haver diferença de Kar para os biocarvões de bagaço de caju está relacionado com a presença de grupos funcionais hidrofílicos de superfície (Fregolente *et al.*, 2023), que melhoram a retenção de água em solos arenosos. Isso significa que o teor de água nos poros aumenta, reduzindo a permeabilidade ao ar através desses poros (Garg *et al.*, 2019).

Nascimento *et al.* (2024), em seu estudo incorporando biocarvão de bagaço de caju a um Argissolo com caráter coeso, verificaram aumento da permeabilidade do solo ao ar com o aumento da dose de biocarvão na umidade equilibrada no potencial mátrico de -10 kPa, aumento explicado pela maior macroporosidade proporcionada pelo biocarvão. No presente trabalho, esse comportamento não se verificou provavelmente devido ao solo ser de textura mais arenosa e, portanto, menos reativo às interações com o material carbonáceo. Os solos arenosos já possuem alta macroporosidade e maior proporção de partículas grandes (o que leva à menor superfície específica) e apresentam baixa capacidade de troca catiônica (CTC), aspectos que resultam em impacto menor quando interagem com biocarvões em comparação

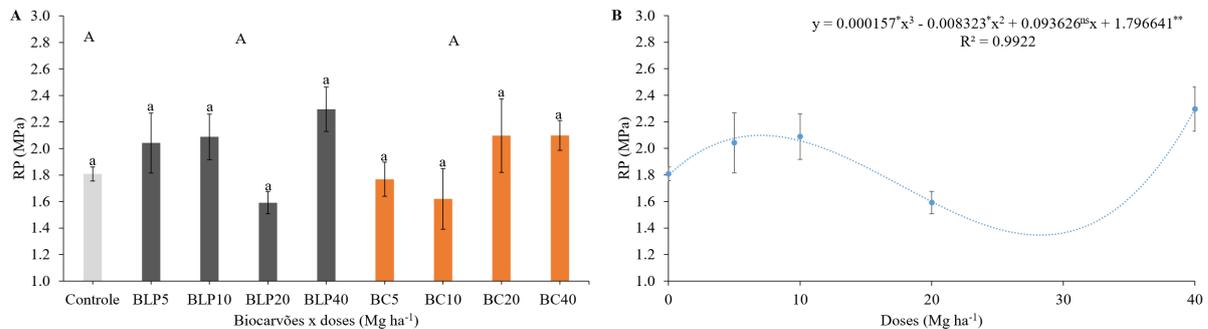
ao que ocorreria em solos mais reativos (no caso, os mais argilosos).

Em relação ao biocarvão BLP de forma isolada, apesar de possuir 52,50% de partículas com tamanhos de 2,00 a >1,0 mm, que em tese aumentariam a macroporosidade e melhorariam o fluxo de gases no solo, é importante considerar que altos teores de cinzas em biocarvões podem causar a formação de composições minerais inorgânicas nas partículas, resultando no entupimento de poros e influenciando negativamente a permeabilidade do solo ao ar (Jing Li *et al.*, 2017).

O comportamento do Kar no BLP em relação à densidade do solo apresentou tendências similares, ou seja, à medida que a densidade reduz, a permeabilidade do solo também diminui (até próximo à dose de 20 Mg ha⁻¹). Isso ocorre possivelmente porque o solo em estudo já apresenta naturalmente macroporos para o fluxo de ar e, no primeiro momento, o aumento progressivo das doses de biocarvão causa a obstrução ou preenchimento de parte desses macroporos – o que leva ao aumento de microporos (Duarte *et al.*, 2019) – e consequente redução de Kar até a dose em que os efeitos benéficos do biocarvão invertem esse comportamento e, então, há aumento de Kar com o aumento da dose de biocarvão.

Na Figura 6A é possível observar que não houve diferenças estatísticas entre doses, bem como entre o controle e os biocarvões para a resistência do solo à penetração (RP). A correlação foi significativa para o BLP, apresentando ajuste a um polinômio de terceiro grau (cúbica), modelo que possibilita identificar as doses em que as RPs são máxima e mínima (Figura 6B). O solo em estudo, como relatado, tem sido degradado por meio de sobrepastejo, com compactação, sendo interessante para o agricultor a redução da RP para valor abaixo do qual não haja restrição ao crescimento de raízes das plantas – nesse caso, a estimativa pelo modelo matemático resulta na RP = 1,34 MPa quando BLP é incorporado ao solo na dose de 28,3 Mg ha⁻¹, correspondendo à redução de 36,2% em relação àquela estimada para o solo submetido ao tratamento controle.

Figura 6 - Gráfico de colunas dos valores médios de resistência do solo à penetração (RP) em função dos tratamentos controle e biocarvões de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro (BLP) e bagaço de caju (BC) no potencial mátrico de -33 kPa (A). Regressão entre resistência do solo à penetração e doses de BLP (B).



Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância; letras maiúsculas comparam os grupos de tratamentos (controle, BLP, BC), de modo que a mesma letra maiúscula não difere pelo teste de Tukey a 5% de significância. As barras representam o erro-padrão da média. **significativo a 1% de significância.

Fonte: o Próprio autor (2024)

O resultado observado é relevante visto que a aplicação de biocarvão reduziu a resistência mecânica do solo à penetração de raízes para valores em que não há restrição ao seu crescimento. Como se pode verificar, no tratamento a controle a RP atingiu valor médio de 1,8 MPa, muito próximo àquele considerado crítico para o desenvolvimento radicular das culturas – 2 MPa (Silva *et al.*, 1994; Tormena *et al.*, 1999).

É importante destacar que o resultado está coerente com a redução da densidade do solo (DS), efeito que se justifica pela granulometria do biocarvão, que reduz o número de pontos de contato entre as partículas minerais do solo. Isso, além de resultar na diminuição da DS, se reflete na redução da RP e da resistência tênsil dos agregados (RT), como será visto adiante (Zong; Chen; Lu, 2014).

Em seu artigo de revisão bibliográfica, Blanco-Canqui (2017) menciona que para a maioria dos trabalhos envolvendo resistência do solo à penetração não há efeitos significativos sobre o atributo após a adição de biocarvão. No entanto, a pesquisa de Busscher *et al.* (2010), utilizando biocarvão produzido com cascas de noz-pecã (*Carya illinoensis*), identificou que a resistência do solo à penetração diminuiu com a aplicação de biocarvão somente na dose de 44 Mg ha⁻¹, e não em doses menores. Isso sugere que doses elevadas de biocarvão são provavelmente necessárias para alterar significativamente a resistência do solo à penetração. Outro aspecto é que o biocarvão pode exigir longos períodos para interagir com as partículas

inorgânicas do solo até promover reduções significativas em sua compactação/adensamento.

Como relatado anteriormente, o fato de o BLP apresentar maior quantidade de partículas grandes proporciona estrutura naturalmente com maiores poros, menos pontos de contato entre este e as partículas minerais do solo, o que reduz a coesão entre as partículas, tornando a estrutura menos resistentes à penetração das raízes.

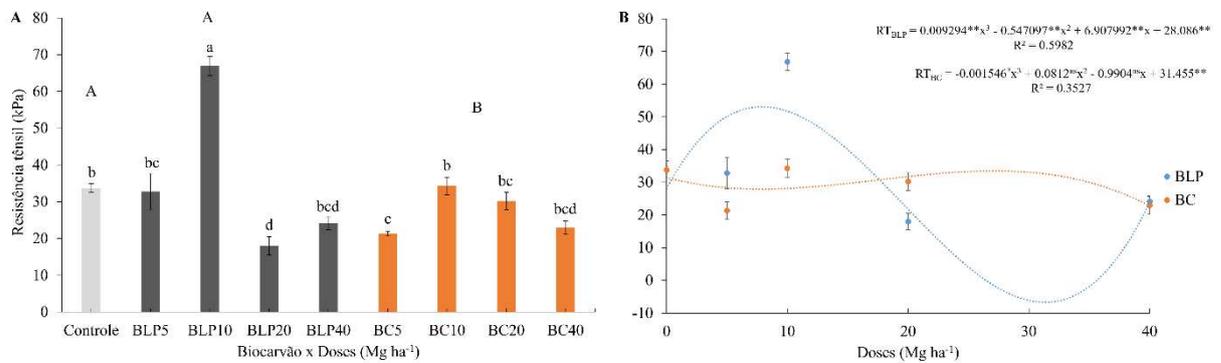
Outra questão importante é que o BLP possui maiores teores de cátions (macronutrientes e micronutrientes) considerados flocculantes, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} e Mn^{2+} (Tabela 1). Esses cátions promovem a flocculação das partículas, resultando em menor densidade do solo, menor resistência à penetração de raízes e maior estabilidade dos agregados (De Melo *et al.*, 2015).

Por outro lado, o BLP possui maiores teores de Na^+ (Tabela 1), que, além de não ser um nutriente essencial, causa efeitos adversos, como a dispersão das partículas. À medida que a planta consome os nutrientes, os teores de Na^+ se concentram, causando a dispersão das argilas. Argilas dispersas preenchem poros, reduzindo a porosidade e aumentando a densidade do solo (Stavi *et al.*, 2021) – o que pode justificar o aumento da RP em doses maiores (acima de 30 Mg ha^{-1}).

Nascimento *et al.* (2024), aplicando biocarvão pirolítico de bagaço de caju em Argissolo com caráter coeso, observaram redução nas médias, com menores valores de RP associados às doses de 10, 20 e 40 Mg ha^{-1} , comportamento que não se repetiu nesse trabalho, particularmente pelo fato da alteração do tipo de solo, que foi um Planossolo com textura arenosa, sendo menos reativo às interações com materiais carbonáceos.

No teste de comparação de médias de resistência tênsil de agregados (RT), Figura 7A, foram observadas diferenças estatísticas para as doses e entre o controle e os biocarvões. O tratamento BLP10 apresentou o maior valor de RP, com média de 66,89 kPa, seguido dos tratamentos BC10, controle, BLP5, BC20 e BC40, que não diferiram entre si, com médias de 34,28, 33,76, 32,81, 30,23 e 22,93 kPa, respectivamente. Na sequência, o tratamento BC5 apresentou média de 21,31 kPa, com a menor média sendo observada no tratamento BLP20, com valor de 17,97 kPa. Entre os biocarvões, o BLP e o controle apresentaram as maiores médias, 33,76 e 35,45 kPa, respectivamente, não diferindo estatisticamente; o BLP apresentou a menor média, 27,19 kPa. A correlação foi significativa para o BLP e BC, com ajuste polinomial de terceiro grau, Figuras 7B e 7C.

Figura 7 - Gráfico de colunas dos valores médios de resistência tênsil dos agregados (RT) em função dos tratamentos controle e biocarvões de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro (BLP) e bagaço de caju (BC) (A). Regressão entre resistência tênsil e doses de BLP e BC (B).



Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância; letras maiúsculas comparam os grupos de tratamentos (controle, BLP, BC), de modo que a mesma letra maiúscula não difere pelo teste de Tukey a 5% de significância. As barras representam o erro-padrão da média. ns, **, * não significativo e significativo a 1% e a 5% de probabilidade, respectivamente, para regressão.

Fonte: o próprio autor

Os resultados do teste de comparação de médias entre os biocarvões e o tratamento controle demonstram claramente que o BLP e o controle apresentaram maiores valores médios de RT em comparação ao BC. Considerando as doses, a de 10 Mg ha⁻¹ para o BLP resultou em maior valor de RP, enquanto a de 20 Mg ha⁻¹ do mesmo biocarvão levou ao menor valor, indicando que há aumento da RP antes de ocorrer sua redução.

Na regressão referente ao BLP, biocarvão na dose de 7,91 Mg ha⁻¹ resulta no máximo valor de RT, 53,1 kPa, levando a que os agregados secos sejam classificados com consistência *dura* (Oliveira *et al.*, 2020). É necessário realçar que os parâmetros do modelo cúbico nesta regressão levam à estimativa de RT com valor negativo para o mínimo da função matemática; no entanto, o fazem com a prerrogativa de minimizar o erro dos dados estimados em relação aos medidos experimentalmente, porém, neste caso, sem possibilidade real de ocorrência, pois não existe valor negativo de RT. Essas situações são comuns, por exemplo, na estimativa dos parâmetros do modelo de van Genuchten (van Genuchten, 1980), quando a estimativa resulta em valores negativos de umidade residual (Ottoni; Ottoni Filho, 2011), algo também sem possibilidade real de ocorrência física.

Neste contexto, é importante focar na faixa em que há aplicação prática sob a perspectiva do uso do solo para fins agrícolas. Assim, a recomendação da incorporação de biocarvão de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro se faz necessária, pois a consistência dos agregados é alterada, de consistência classificada como *ligeiramente dura* (RT

= 28,09 kPa) no tratamento controle, para, no máximo, a consistência *dura* (RT = 53,1 kPa) quando há a incorporação do biochar na dose de 7,91 Mg ha⁻¹, alteração considerada importante, haja vista que os agregados têm de resistir ao revolvimento do solo, por exemplo, via mecanização, sem se romper facilmente; ou seja, solos que possuem agregados com maior RT são mais resistentes à dispersão mecânica quando submetidos ao preparo do solo (REIS *et al.*, 2014).

Nessa perspectiva, o valor de 53,1 kPa para a RT está bem afastado do limiar para a consistência *muito dura* – segundo Oliveira *et al.* (2020), ocorre em RT = 65 kPa – o que configuraria coesão muito elevada, com implicações negativas ao solo como ambiente ao desenvolvimento de plantas. Além disso, embora *duros* quando secos, os agregados nas condições experimentais desta pesquisa apresentaram consistência *friável* em solo úmido, portanto, não restringindo crescimento de raízes nesse estado de umidade.

A regressão observada entre RT e doses de biocarvão de bagaço de caju (BC) estima que os valores mínimo e máximo para a RT, 27,94 e 33,49 kPa, classificam a consistência como *ligeiramente dura* e devem ocorrer, respectivamente, nas doses de 7,86 e 27,16 Mg ha⁻¹; neste caso não se faz necessária nenhuma recomendação da aplicação do BC pois as alterações na RT são mínimas, aumentando significativamente a razão custos/benefícios advindos da incorporação do biocarvão para modificar exclusivamente a RT de agregados do solo.

Agregados com elevados valores de RT refletem estrutura com maior resistência à ruptura face a agentes externos, como a pressão exercida pelos rodados de implementos e máquinas agrícolas (Santos *et al.*, 2015). Solos compactados e com alto teor de argila tendem a apresentar altos valores de RT – normalmente levando à classificação de agregados *muito duros*, ou até *extremamente duros* – com efeitos negativos sobre a lavoura, com impedimentos à germinação e emergência de plântulas, crescimento das raízes, além de outros processos no solo. A aplicação de materiais enriquecidos com carbono, como os biocarvões, pode modificar o comportamento do solo em termos da RT, já que essa variável está correlacionada com outras como densidade do solo, resistência à penetração e diâmetro médio ponderado de agregados (Blanco-Canqui, 2017).

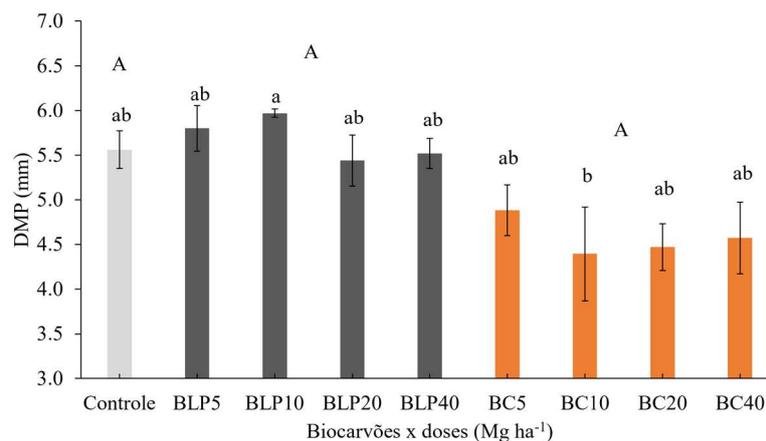
A aplicação de biocarvão de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro resultou no aumento da resistência tênsil em doses mais baixas, fato decorrente do aumento na coesão entre as partículas do solo (Goldan *et al.*, 2022), resultando no aumento da estabilização inicial dos agregados. Adicionalmente, à medida que a dose aumenta, esses efeitos estruturais se intensificam, aumentando a porosidade, com conseqüente diminuição da resistência tênsil.

Na revisão bibliográfica feita por Blanco-Canqui (2017) foram encontradas

reduções mais significativas na resistência tênsil (RT) e poucas diferenças na resistência à penetração (RP), sugerindo que a RT parece ser mais sensível na percepção dos efeitos da aplicação de biocarvão no solo. O autor relata que a aplicação de biocarvão em solos pode, em geral, reduzir a resistência tênsil dos agregados entre 42% e 242%.

O teste de comparação de médias para o diâmetro médio ponderado (DMP), Figura 8, possibilitou constatar que houve diferenças significativas entre doses, porém não entre o controle e os biocarvões. Os tratamentos BLP10 e BC10 resultaram na maior e menor média de DMP, com valores de 5,97 e 4,40 mm, respectivamente. Os tratamentos controle, BLP5, BLP20, BLP40, BC5, BC20, BC40 não diferiram entre si, com médias de 5,80, 5,44, 5,52, 4,88, 4,47, 4,47 mm, respectivamente.

Figura 8 - Gráfico de colunas dos valores médios de diâmetro médio ponderado (DMP) em função dos tratamentos controle e biocarvões de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro (BLP) e bagaço de caju (BC).



Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância; letras maiúsculas comparam os grupos de tratamentos (controle, BLP, BC), de modo que a mesma letra maiúscula não difere pelo teste de Tukey a 5% de significância. As barras representam o erro-padrão da média.

Fonte: o próprio autor

O aumento significativo no DMP, observado notadamente no tratamento BLP10, é indicativo positivo sobre a agregação e estabilidade de agregados do solo em água. Esse índice reflete a distribuição do tamanho dos agregados no solo, aumentando à medida que a porcentagem de maiores agregados estáveis aumenta (Kemper; Rosenau, 1986).

Valores mais altos de DMP sugerem maior proporção de macroagregados em comparação com microagregados (Rui *et al.*, 2022), o que traz implicações benéficas para a infiltração de água, aeração e resistência à erosão hídrica (Six *et al.*, 2000). A presença de

macroagregados favorece maior fluxo de gases, calor e de água, enquanto a de microagregados influencia a retenção de água. Agregados de maior tamanho, principalmente no solo contendo BLP na dose de 10 Mg ha⁻¹, sugere maior estabilidade de agregados, permitindo inferir que houve melhoria na qualidade estrutural do solo (Six *et al.*, 2000). Esse resultado está em consonância com o estudo realizado por Junior e Guo (2023), que confirmaram que tratamentos com 2% de biocarvão de lodo de esgoto resultaram em diferenças significativas em comparação ao controle e com 1% de biocarvão, aumentando a estabilidade dos agregados do solo. No caso deste estudo, as doses testadas variaram 5 a 40 Mg ha⁻¹ – o que corresponde a 0,17 a 1,33% (m/m), respectivamente.

De forma semelhante ao que ocorreu com a RP, a maior estabilidade de agregados observada na dose de 10 Mg ha⁻¹ está relacionada com a maior presença de cátions flocculantes (Ca²⁺, Mg²⁺, Zn²⁺, Ni²⁺, Fe²⁺, Fe³⁺, Cu²⁺ e Mn²⁺) no biocarvão BLP em comparação ao BC (Tabela 1). Esses cátions, especialmente os bivalentes, desempenham papel fundamental no processo de agregação, favorecendo a aproximação das partículas por meio da atração eletrostática (floculação), neutralizando cargas negativas de superfície presentes nas partículas de argila e nos grupos funcionais no biocarvão presentes no solo e facilitando a formação de agregados estáveis (De Melo *et al.*, 2015).

De forma geral, todos os tratamentos apresentaram valores de DMP acima de 0,5 mm, que é considerado o limite inferior para agregados mais resistentes ao esboroamento e dispersão (Kieh, 1979). Esse resultado não era esperado para um solo tão arenoso quanto o deste experimento. Isso leva a destacar o papel das raízes das plantas, principalmente gramíneas, na formação de agregados estáveis. Bronick e Lal (2005) destacaram os efeitos da rizosfera na formação de agregados estáveis, principalmente pela liberação de exsudados (compostos químicos com efeito cimentante). A rizosfera hospeda microrganismos que se associam a ela, contribuindo para a estabilidade dos agregados, que é maior do que no solo não rizosférico. Ressalta-se que os agregados estudados nesta pesquisa foram coletados na camada de 0-10 cm da coluna de solo, região sob forte influência das raízes do milho. Portanto, é difícil, nesse contexto, isolar os efeitos dos biocarvões dos efeitos da rizosfera, cabendo considerar o efeito conjunto na agregação das partículas do solo e na estabilização dos agregados em água.

A análise de variância dos parâmetros da equação de van Genuchten e CAD estudados (Tabela 5) constatou diferenças estatísticas significativas para todas as variáveis a 1% de significância, evidenciando efeitos entre doses, períodos e interação de ambas as fontes de variação sobre as curvas de retenção de água no solo.

Tabela 5 - Valores de F e a significância para os parâmetros da curva de retenção de água segundo o modelo de van Genuchten (1980), α , m, n, θ_r e θ_s em função das doses de biocarvões aplicadas ao solo nos períodos de pré-incubação (PI) e pós-cultivo (PC).

Fontes de variação	GL	Valor F					
		α	m	n	θ_r	θ_s	CAD
Tratamentos (T)	8	2,81**	9,70**	10,70**	6,74**	4,21**	3,32**
Períodos (P)	1	9,54**	267,89**	234,67**	1370,77**	151,32**	283,17**
T x P	8	3,87**	6,91**	8,08**	9,54**	1,50**	18,93**
CV (%)		31,70	10,28	6,15	15,74	4,47	

CV: Coeficiente de variação; ns, **, * não significativo e significativo a 1% e 5% de significância, respectivamente, pelo teste F. Os atributos α_{PC} e θ_{rPC} não apresentaram distribuição normal e foram submetidos à transformação Box-Cox para α_{PC}^2 θ_{rPC}^2 .

Fonte: o próprio autor (2024)

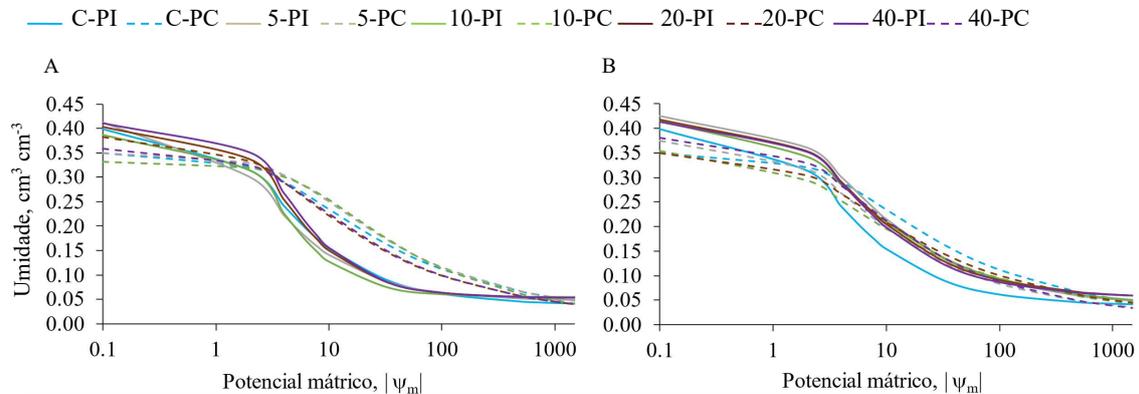
Com base nos dados da Tabela 6, observaram-se diferenças significativas para as médias dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980), entre os períodos (pré-cultivo e pós-cultivo) e entre os biocarvões. É importante mencionar que uma curva de retenção de água no solo (Figura 9) só pode ser considerada igual a outra se não houver diferença estatística entre os parâmetros da equação de van Genuchten (Jorge; Corá; Barbosa, 2010); portanto, pode-se afirmar que, em todos os tratamentos, as curvas diferiram entre si

Tabela 6 - Valores médios dos parâmetros da curva de retenção de água segundo o modelo de van Genuchten (1980) em função das doses de biocarvões aplicadas ao solo nos períodos de pré-incubação (PI) e pós-cultivo (PC).

Doses	α -PI	α -PC	m-PI	m-PC	n-PI	n-PC	θ_r -PI	θ_r -PC	θ_s -PI	θ_s -PC	CAD-PI	CAD-PC
Mg ha ⁻¹	-----kPa ⁻¹ -----		-	-	-	-	-----cm ³ cm ⁻³ -----					
Controle												
0	0,476 Aa	0,258 Bbc	0,414 Acd	0,269 Ba	1,709 Ac	1,369 Ba	0,038 Abc	0,009 Ba	0,400 Aab	0,350 Bab	0,118 Bc	0,189 Aab
Biocarvão de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro												
5	0,598 Aa	0,186 Bbc	0,427 Abcd	0,287 Ba	1,750 Abc	1,402 Ba	0,047 Aab	0,011 Ba	0,414 Aab	0,350 Bab	0,088 Bd	0,240 Aa
10	0,383 Aa	0,132 Bc	0,541 Aa	0,302 Ba	2,044 Aa	1,434 Ba	0,054 Aa	0,008 Ba	0,387 Ab	0,332 Bb	0,090 Bd	0,213 Aa
20	0,365 Aa	0,387 Aabc	0,488 Aabc	0,276 Ba	1,967 Aab	1,416 Ba	0,052 Aa	0,008 Ba	0,403 Aab	0,383 Ba	0,100 Bcd	0,180 Aabc
40	0,334 Aa	0,281 Aabc	0,498 Aab	0,291 Ba	2,000 Aa	1,410 Ba	0,053 Aa	0,010 Ba	0,411 Aab	0,360 Bab	0,103 Bcd	0,190 Aabc
Biocarvão de bagaço de caju												
5	0,598 Aa	0,306 Aa	0,350 Ade	0,306 Aa	1,540 Acd	1,445 Aa	0,037 Ac	0,014 Ba	0,426 Aa	0,376 Ba	0,168 Aa	0,162 Ac
10	0,383 Aa	0,259 Ba	0,327 Ae	0,259 Ba	1,466 Ad	1,350 Aa	0,034 Ac	0,009 Ba	0,416 Aab	0,356 Bab	0,161 Ab	0,156 Ac
20	0,365 Aa	0,263 Ba	0,372 Ade	0,263 Ba	1,625 Acd	1,358 Ba	0,051 Aa	0,011 Ba	0,419 Aab	0,351 Bab	0,143 Bb	0,168 Abc
40	0,334 Aa	0,298 Ba	0,397 Ade	0,298 Ba	1,668 Acd	1,430 Ba	0,054 Aa	0,009 Ba	0,414 Aab	0,382 Ba	0,142 Bb	0,203 Aab

Médias seguidas de mesma letra, em pares no sentido vertical não diferem entre si, médias seguidas da mesma letra em cada coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. BC: Biocarvão de bagaço de caju; BLP: Biocarvão de lodo de esgoto + resíduo de poda de cajueiro.

Figura 9 - Curvas de retenção de água no solo para os tratamentos controle e biocarvões de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro (BLP) e bagaço de caju (BC) nos períodos de pré-incubação (PI) e pós-cultivo (PC).



A - Curva de retenção de água no solo para tratamentos com BLP; B - curva de retenção de água para tratamentos com BC; C - Controle; BLP5, BLP10, BLP20 e BLP40 - Biocarvão de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro nas doses de 5, 10, 20 e 40 Mg ha⁻¹, respectivamente; BC5, BC10, BC20 e BC40 – Biocarvão de bagaço de caju nas doses de 5, 10, 20 e 40 Mg ha⁻¹, respectivamente.

É importante destacar que o parâmetro θ_s , que equivale à porosidade total, foi maior no período de pré-incubação em ambos os biocarvões, redução associada à acomodação das partículas ao longo dos 90 dias de experimento. No entanto, levando em consideração apenas a situação de pré-incubação, incluindo a comparação entre os biocarvões, verifica-se que tratamento que se destacou com a maior média foi o BC5 (0,426 cm³ cm⁻³), enquanto BLP10 apresentou a menor média (0,387 cm³ cm⁻³), embora esses tratamentos não tenham diferido entre si. Em relação ao controle, no tratamento BC5 houve aumento de 6,5% no parâmetro θ_s .

No período de cultivo, destaca-se que o biocarvão BC nas doses de 5 e 40 Mg ha⁻¹, e BLP na dose de 20 Mg ha⁻¹, apresentaram os maiores valores de θ_s , com incrementos de 7,4%, 9,1% e 9,4%, respectivamente. Desse modo, os benefícios da aplicação dos biocarvões testados sobre a porosidade total do solo no período de cultivo são notórios, haja visto os maiores valores de θ_s nos tratamentos citados. Isso se deve aos efeitos benéficos do biocarvão sobre a agregação e estrutura do solo, com reflexos no aumento da porosidade total e na redução da densidade do solo (Blanco-Canqui, 2017). Chen *et al.* (2018), em experimento utilizando solo de textura arenosa e biocarvão de palha de trigo (*Triticum aestivum* L.), constataram que a aplicação do condicionador (5% m/m) resultou em aumento de 51,4% da porosidade total em relação ao controle, fato que atribuíram à diminuição da densidade do solo e ao aumento da macroporosidade, o que resultou na redução da compactação.

A respeito do parâmetro α , escalonador do potencial mátrico (van Lier; Pinheiro, 2018), e dos parâmetros m e n , relacionados à forma da curva (Nascimento *et al.*, 2018a), houve diferença estatística entre os períodos e entre os biocarvões, salientando o fato de que as curvas apresentam formato distinto. A curva de retenção de água no solo é um indicador da distribuição de poros por tamanho, sendo sensível a alterações estruturais (Nascimento *et al.*, 2018b). Nesse sentido, observando a Figura 9, para as maiores doses de ambos os biocarvões é notório que houve incremento da umidade do solo desde a saturação até $\Psi_m = -6$ kPa, faixa que corresponde à macroporosidade do solo (Reichardt; Tim, 2022). Desse modo, pode-se afirmar que houve ganhos em termos de macroporosidade – com reflexos no aumento da porosidade total do solo, especialmente no período de cultivo, em decorrência de o maior tempo de residência dos carvões no solo ter implicado em alterações estruturais mais perceptíveis.

O parâmetro θ_r , definido por van Genhuchten (1980) como a umidade em que $d\theta/d\Psi_m$ se iguala a zero, pode ser convenientemente relacionado com a umidade no ponto de murcha permanente (PMP). Considerando ambos os biocarvões, os valores de θ_r foram significativamente mais altos no período de pré-incubação. Portanto, houve redução de θ_r e, conseqüentemente, de θ_{PMP} , após os 90 dias de experimento. Menor valor de θ_{PMP} significa que o solo retém menos água em condições de alta tensão, permitindo que maior quantidade de água esteja disponível para as plantas antes que elas atinjam o estado de murcha permanente. Isso indica que o solo se tornou mais eficiente em liberar água para as plantas (Zusevics, 1980). Wei *et al.* (2023) em estudo de revisão sistemática e metanálise, concluíram que o PMP diminuiu em solos de textura média (-4,2%) após a aplicação de biocarvão, acompanhado com o aumento da porosidade do solo – como também foi observado neste estudo.

Também se ressalta que houve diferença significativa entre os períodos e biocarvões avaliados para o atributo CAD-PI, que representa a água disponível para as plantas. Os maiores valores de CAD foram relacionados ao período pós-cultivo e estão associados aos menores valores de θ_{PMP} nessa situação. Dessa forma, o ambiente do solo se tornou mais favorável para a retenção e disponibilização de água, contribuindo para o crescimento das plantas (Sun *et al.*, 2013; Garg *et al.*, 2019; Verheijen *et al.*, 2019).

Já os tratamentos referentes ao BC obtiveram as maiores médias de CAD em relação ao BLP. A dose que se destacou em relação às demais foi BC5, com média de 0,168 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, seguido das doses de 10, 20 e 40 Mg ha^{-1} do mesmo biocarvão, com médias de 0,161 0,143 0,142 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente. Aqui ressalta-se que o biocarvão proveniente da biomassa do bagaço de caju possui caráter hidrofílico (Fregolente *et al.*, 2023), contribuindo com o armazenamento e disponibilização de água para as plantas.

Por fim, é importante destacar a correlação entre a CAD e a lâmina de água aplicada ao solo no período de incubação. O tratamento BC5 se destacou por apresentar o menor consumo de água durante o período de incubação. Adicionalmente, a aplicação do condicionador a essa taxa é viável do ponto de vista técnico e operacional, acarretando em benefícios em termos de disponibilização e eficiência no uso da água.

4.2 Crescimento de plantas

Com relação aos atributos de plantas de milho, a análise de variância apresentada na Tabela 7 não detectou, pelo teste F a 1 e 5% de significância, efeito significativo para as variáveis (MFF, MFR, MFC, MSF, MSR, MSC, MFPA, MSPA, MFT, MST), para nenhuma das fontes de variação testadas.

Tabela 7 - Análise de variância (ANOVA) para os atributos de massa fresca de folha (MFF), massa fresca de raiz (MFR), massa fresca de colmo MFC (MFC), massa seca de folha (MSF), massa seca de raiz (MSR), massa seca de colmo (MSC), massa fresca da parte aérea, massa seca da parte aérea (MSPA).

Fonte de variação	GL	MFF	MFR	MFC	MSF	MSR	MSC	MFPA	MSPA	MFT	MST
		Valor F									
Biocarvões (B)	1	0,03 ^{ns}	1,48 ^{ns}	1,28 ^{ns}	0,62 ^{ns}	1,00 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,91 ^{ns}	1,58 ^{ns}	0,91 ^{ns}	1,06 ^{ns}
Dose (D)	3	0,20 ^{ns}	0,24 ^{ns}	1,53 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,11 ^{ns}	1,41 ^{ns}	0,77 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,77 ^{ns}	0,71 ^{ns}
B x D	3	0,39 ^{ns}	0,63 ^{ns}	1,74 ^{ns}	0,71 ^{ns}	0,95 ^{ns}	0,46 ^{ns}	0,87 ^{ns}	0,69 ^{ns}	0,87 ^{ns}	0,43 ^{ns}
CV%		19,28	6,51	14,09	15,53	7,10	20,20	12,85	28,04	14,18	1,06 ^{ns}

CV: Coeficiente de Variação; ** e *: significativo a 1% e 5% de significância, respectivamente, pelo teste F; ns: não significativo. Os atributos MFR e MSR não apresentaram distribuição normal e foram submetidos à transformação Box-Cox para MFR² MSR²

Fonte: o próprio autor (2024)

A análise de variância, apresentada na Tabela 8, demonstrou efeito significativo, pelo teste F, para as variáveis altura da planta (AP) e número de folhas (NF) e interação entre biocarvão e dose. No entanto, não foram observadas diferenças significativas nas fontes de variação biocarvão e dose. Além disso, os atributos diâmetro do colmo (DC), altura do colmo (AC), número de nós (Nós) e área foliar (AF) não apresentaram significância para nenhuma das fontes de variação.

Tabela 8 - Análise de variância (ANOVA) para os atributos diâmetro do colmo (DC), altura do colmo (AC), altura da planta (AP), número de folha (NF), número de nós (Nós) e área foliar (AF).

Fonte de variação	GL	DC	AC	AP	NF	NÓS	AF
-----Valor F-----							
Biocarvões (B)	1	0,00 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,86 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,03 ^{ns}
Dose (D)	3	2,18 ^{ns}	0,79 ^{ns}	0,46 ^{ns}	1,18 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,56 ^{ns}
B x D	3	0,57 ^{ns}	1,42 ^{ns}	3,29*	3,33*	0,40 ^{ns}	0,61 ^{ns}
CV%		8,08	10,71	22,57	10,01	7,12	7,12

CV: Coeficiente de Variação; ** e *: significativo a 1% e 5% de significância, respectivamente, pelo teste F; ns: não significativo.

Fonte: o próprio autor (2024)

Não houve diferença estatísticas entre os valores médios referentes aos tratamentos e controle pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade (Tabela 9) para as variáveis de biomassa (MFF, MFR, MFC, MSF, MSR, MSC, MFPA, MSPA, MFT, MST). Possivelmente, isso pode ter ocorrido devido à uniformidade na adubação, já que todos os tratamentos, incluindo o controle, receberam as mesmas quantidades de adubo mineral. Isso sugere que a padronização da adubação mineral fez com que as diferenças causadas pelos tratamentos nos atributos físicos do solo não fossem suficientes para influenciar significativamente o desenvolvimento vegetal. Portanto, o milho foi suprido com todos os nutrientes necessários, desenvolvendo-se de forma uniforme e resultando em massas semelhantes entre os tratamentos em relação ao controle.

Tabela 9 - Valores médios dos atributos de crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) massa fresca de folha (MFF), massa fresca de raiz (MFR), massa fresca de colmo (MFC), massa seca de folha (MSF), massa seca de raiz (MSR massa seca de colmo (MSC), massa fresca de parte aérea (MFPA), massa seca de parte aérea (MSPA).

Tratamentos	Médias dos tratamentos									
	MFF	MFR	MFC	MSF	MSR	MSC	MFPA	MSPA	MFT	MST
----- g planta ⁻¹ -----										
Controle	166,25	246,53	353,75	28,33	2,29	75,54	520,00	274,84	766,53	175,63
BLP5	140,00	244,40	405,00	28,95	2,32	98,32	545,00	273,36	789,41	197,10
BLP10	143,25	101,84	381,25	32,22	2,25	95,88	524,50	286,18	778,64	187,11
BLP20	157,50	277,35	351,75	31,05	2,39	93,76	509,25	308,40	786,53	204,35
BLP40	153,75	239,44	378,75	29,53	2,23	84,68	532,50	268,97	771,94	169,19
BC5	155,00	213,76	382,50	31,35	2,22	85,40	537,50	245,12	751,27	171,85
BC10	140,00	194,03	362,50	28,26	2,25	100,16	502,50	222,30	696,54	189,69
BC20	141,25	211,20	390,00	28,49	2,20	98,03	531,25	239,69	742,45	178,80
BC40	151,25	267,45	299,00	28,53	2,29	77,09	450,25	295,98	717,70	169,22

BLP5, BLP10, BLP20 e BLP40 – Biocarvão de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro nas doses de 5, 10, 20 e 40 Mg ha⁻¹, respectivamente; BC5, BC10, BC20 e BC40 – Biocarvão de bagaço de caju nas doses de 5, 10, 20 e 40 Mg ha⁻¹, respectivamente; *Representa a diferença significativa da média do tratamento em relação à média do tratamento controle pelo teste de Dunnett a 5% de significância.

Fonte: o próprio autor (2024)

Pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade demonstrado na Tabela 10, não foram detectadas diferenças significativas entre os tratamentos e o controle nos atributos de altura do colmo (AC), número de folhas (NF), número de nós (NÓS) e área foliar (AF). O atributo diâmetro do colmo (DC) apresentou diferença significativa em relação ao controle apenas no solo tratado com BLP na dose de 20 Mg ha⁻¹, apresentando média de 22,32 mm, com acréscimo de 22% em relação ao controle. Cabe ressaltar que a biomassa referente a esse tratamento (MFC e MFC, MFPA, MSPA) não apresentou redução significativa. Para o agricultor, o aumento do diâmetro do colmo pode ser interessante, pois torna a planta mais resistente a condições adversas, como ventos fortes e ataques de pragas, proporcionando maior robustez (Stubbs *et al.*, 2020; Losey; Carter; Silverman, 2022).

Tabela 10 - Valores médios para os atributos de crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) diâmetro do colmo (DC), altura do último colmo (AC), altura da planta (AP), número de folha (NF), número de nós e área foliar (AF).

Tratamentos	Médias dos tratamentos					
	DC	AC	AP	NF	NÓS	AF
	-----mm	-----	cm	-	-	cm ²
Controle	18,30	218,25	238,50	18,00	14,25	5512,00
BLP5	20,44	211,75	228,75	17,75	14,25	5830,00
BLP10	19,76	209,75	224,25	17,50	14,50	6685,50
BLP20	22,32*	198,75	211,25	20,50	14,75	6436,50
BLP40	20,01	177,75	187,00*	19,00	14,00	6203,50
BC5	21,18	197,50	206,75	18,50	14,50	6573,00
BC10	19,62	198,25	214,50	18,50	14,00	6822,75
BC20	21,12	194,00	212,75	17,75	14,50	5329,00
BC40	20,58	203,00	229,25	18,25	14,50	6063,25

BLP5, BLP10, BLP20 e BLP40 – Biocarvão de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro nas doses de 5, 10, 20 e 40 Mg ha⁻¹, respectivamente; BC5, BC10, BC20 e BC40 – Biocarvão de bagaço de caju nas doses de 5, 10, 20 e 40 Mg ha⁻¹, respectivamente; *Representa a diferença significativa da média do tratamento em relação à média do tratamento controle pelo teste de Dunnett a 5% de significância.

Fonte: o próprio autor (2024)

O atributo altura da planta (AP) apresentou diferença estatística em relação ao controle apenas no tratamento com dose de 40 Mg ha⁻¹ de biocarvão de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro, com média de 187 cm, evidenciando redução de 22% na altura das plantas. Apesar disso, não foi constatada redução significativa em nenhum parâmetro de biomassa mensurado, de modo que as plantas desse tratamento reduziram sua altura, mas não a biomassa, apresentando características fenotípicas de uma planta mais compacta. Essas características são vantajosas do ponto de vista agrônomo, pois aumentam a resistência ao tombamento e facilitam colheitas, tanto manuais quanto mecânicas, já que as espigas são mais

acessíveis e menos propensas à quebra (Zhao *et al.*, 2022).

Na Tabela 11, que apresenta os valores médios de massa fresca de folha (MFF), massa fresca de raiz (MFR), massa fresca de colmo (MFC), massa seca de folha (MSF), massa seca de raiz (MSR), massa seca de colmo (MSC), massa fresca de parte aérea (MFPA) e massa seca de parte aérea (MSPA), observa-se que não houve diferenças estatísticas em nenhum tratamento.

Tabela 11 - Valores médios dos atributos de crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) massa fresca de folha (MFF), massa fresca de raiz (MFR), massa fresca de colmo (MFC), massa seca de folha (MSF), massa seca de raiz (MSR), massa seca de colmo (MSC), massa fresca de parte aérea (MFPA), massa seca de parte aérea (MSPA), para uso no teste de Tukey a 1 e 5% de probabilidade.

Biocarvões	Teste de média dos Biocarvões									
	MFF	MFR	MFC	MSF	MSR	MSC	MFPA	MSPA	MFT	MST
----- g planta ⁻¹ -----										
Controle	166,3 a	3,0 a	353,8 a	28,3 a	2,3 a	75,6 a	520,0 a	274,8 a	766,5 a	175,6 a
BLP	148,6 a	3,0 a	379,2 a	30,4 a	2,3 a	93,2 a	527,8 a	284,2 a	781,6 a	189,4 a
BC	146,9 a	2,9 a	358,5 a	29,2 a	2,2 a	90,2 a	505,4 a	250,8 a	727,0 a	177,4 a
Tratamentos	Teste de médias dos tratamentos									
	MFF	MFR	MFC	MSF	MSR	MSC	MFPA	MSPA	MFT	MST
----- g planta ⁻¹ -----										
Controle	166,3 a	295,2 a	353,8 a	28,3 a	228,6 a	75,6 a	520,0 a	274,8 a	766,5 a	175,6 a
BLP5	140,0 a	405,0 a	405,0 a	29,0 a	232,3 a	98,3 a	545,0 a	273,4 a	789,4 a	197,1 a
BLP10	143,3 a	381,3 a	381,3 a	32,2 a	225,2 a	95,9 a	524,5 a	286,2 a	778,6 a	187,1 a
BLP20	157,5 a	351,8 a	351,8 a	31,1 a	238,9 a	93,8 a	509,3 a	308,4 a	786,5 a	204,4 a
BLP40	153,8 a	378,8 a	378,8 a	29,5 a	222,5 a	84,7 a	532,5 a	269,0 a	771,9 a	169,2 a
BC5	155,0 a	382,5 a	382,5 a	31,4 a	222,0 a	85,4 a	537,5 a	245,1 a	751,3 a	171,9 a
BC10	140,0 a	362,5 a	362,5 a	28,3 a	225,2 a	100,2 a	502,5 a	222,3 a	696,5 a	189,7 a
BC20	141,3 a	390,0 a	390,0 a	28,5 a	220,1 a	98,0 a	531,3 a	239,7 a	742,5 a	178,8 a
BC40	151,3 a	299,0 a	299,0 a	28,5 a	228,8 a	77,1 a	450,3 a	296,0 a	717,7 a	169,2 a

¹Médias seguidas de mesma letra, dentro de cada coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ²ns, ** e *: Não significativo e significativo a 1 e 5% de significância, respectivamente. ³BC: Biocarvão de bagaço de caju; BLP: Biocarvão de lodo de esgoto + resíduo de poda de cajueiro.

Fonte: o próprio autor (2024)

Conforme mencionado anteriormente, os tratamentos referentes aos atributos de biomassa não se alteraram estatisticamente, se mantendo uniformes. A razão já apresentada para isso é que as plantas receberam adubação mineral que atendeu completamente suas necessidades nutricionais, mascarando o efeito dos biocarvões sobre a biomassa. Para Scotti *et al.* (2022), quando a nutrição das plantas é otimizada por fertilizantes minerais os efeitos do biocarvão sobre a biomassa e o crescimento das plantas podem não ser significativamente distintos.

Embora as doses de biocarvão não tenham mostrado benefícios evidentes no desenvolvimento vegetal, elas desempenharam um papel importante na melhoria de atributos físicos do solo, que são essenciais para a serviços ecossistêmicos que os solos exercem. Esses efeitos positivos no solo podem não se refletir imediatamente no crescimento das plantas, mas são fundamentais para a manutenção dos serviços ecossistêmicos a longo prazo. Além disso, a análise foi realizada em um estágio anterior ao final do ciclo da cultura, o que levanta a possibilidade de que as plantas possam manifestar uma resposta mais significativa aos tratamentos com o avanço do ciclo.

Os valores médios para os parâmetros diâmetro do colmo (DC), altura do colmo (AC), altura da planta (AP), número de folhas (NF), número de nós (NÓS) e área foliar (AF), apresentados na Tabela 12, evidenciam diferença significativa apenas para a variável DC, considerando os biocarvões e as doses. Observou-se que os biocarvões (BC e BLP), de forma condensada (média dos tratamentos), apresentaram médias estatisticamente superiores ao controle. Ao desdobrar os tratamentos, nota-se que o tratamento controle demonstrou a menor média para o diâmetro do colmo, com 18,30 cm, enquanto a dose de 20 Mg ha⁻¹ do BLP apresentou a maior média, 22,32 cm, representando acréscimo de 22%. Os demais tratamentos (BLP5, BLP10, BLP40, BC5, BC10, BC20, BC40) não diferiram do controle e do BLP20.

O estudo de Tanure *et al.* (2019) mostrou que a aplicação de biocarvão produzido pela pirólise de *Eucalyptus* spp., em Latossolo franco-arenoso, resultou em aumento de 32,7% na altura das plantas de milho e de 36,4% no diâmetro do caule em comparação ao controle. Isso sugere que o biocarvão, combinado com fertilizantes, provoca efeito sinérgico, melhorando a fertilidade do solo, a eficiência no uso de nutrientes, a estrutura do solo e a capacidade de retenção de água, promovendo crescimento superior das plantas. Esse estudo corrobora esta pesquisa, em que se observou aumento do diâmetro do colmo com a aplicação de biocarvão, com a dose de 20 Mg ha⁻¹ no BLP. Esse aumento é atribuído às melhorias na estrutura do solo proporcionadas pela aplicação de BLP, relacionadas com a densidade do solo (DS), porosidade total (PT), resistência à penetração (RP), resistência tênsil dos agregados (RT) e diâmetro médio ponderado (DMP).

Desse modo, a melhoria da qualidade estrutural proporcionada pela aplicação do BLP, com conseqüente redução da densidade do solo, é um dos fatores relacionados ao maior valor de diâmetro do colmo, visto que a compactação do solo, por exemplo, por sobrepastoreio, resulta em menor crescimento das plantas de milho, menor diâmetro do caule e menor área foliar (Wang *et al.*, 2022).

Tabela 12 - Valores médios para os atributos diâmetro do colmo (DC), altura do colmo (AC), altura da planta (AP), número de folha (NF), número de nós (NÓS), área foliar (AF) submetidos ao teste Tukey a 1 e 5% de probabilidade.

Biocarvões	Teste de média dos biocarvões					
	DC	AC	AP	NF	NÓS	AF
	mm	----- cm -----		-	-	cm ²
Controle	18,29 b	218,25 a	238,50 a	18,00 a	14,25 a	5512,00 a
BLP	20,63 a	199,50 a	212,81 a	18,69 a	14,37 a	6288,88 a
BC	20,62 a	198,19 a	215,81 a	18,25 a	14,37 a	6197,00 a

Tratamentos	Teste de médias dos tratamentos					
	DC	AC	AP	NF	NÓS	AF
	----- mm -----		-	-	cm ²	
Controle	18,30 b	218,25 a	238,50 a	18,00 a	14,25 a	5512,00 a
BLP5	20,44 ab	211,75 a	228,75 a	17,75 a	14,25 a	5830,00 a
BLP10	19,76 ab	209,75 a	224,25 a	17,50 a	14,50 a	6685,50 a
BLP20	22,32 a	198,75 a	211,25 a	20,50 a	14,75 a	6436,50 a
BLP40	20,01 ab	177,75 a	187,00 a	19,00 a	14,00 a	6203,50 a
BC5	21,18 ab	197,50 a	206,75 a	18,50 a	14,50 a	6573,00 a
BC10	19,62 ab	198,25 a	214,50 a	18,50 a	14,00 a	6822,75 a
BC20	21,12 ab	194,00 a	212,75 a	17,75 a	14,50 a	5329,00 a
BC40	20,58 ab	203,00 a	229,25 a	18,25 a	14,50 a	6063,25 a

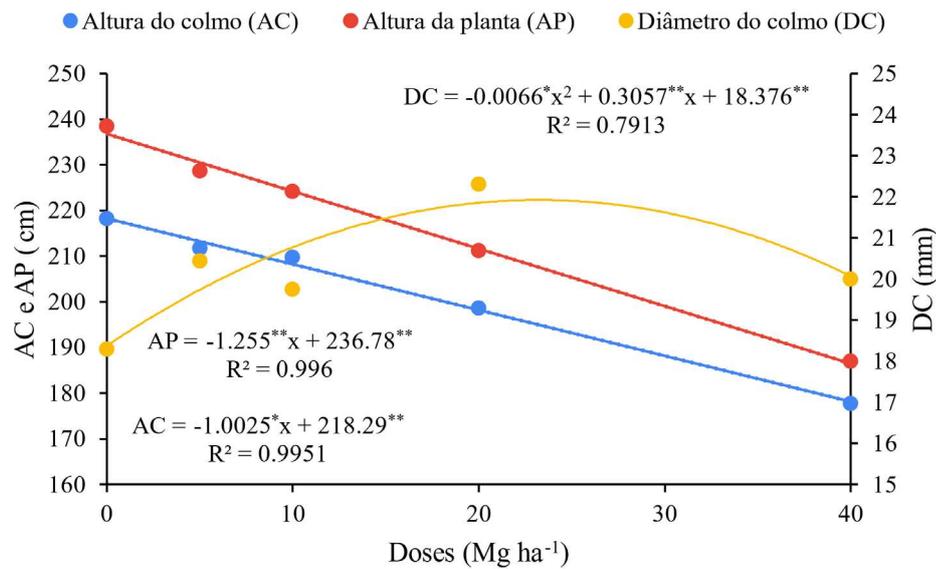
¹Médias seguidas de mesma letra, dentro de cada coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ²ns; ** e *: Não significativo e significativo a 1 e 5% de significância, respectivamente. ³BC: Biocarvão de bagaço de caju; BLP: Biocarvão de lodo de esgoto + resíduo de poda de cajueiro
Fonte: o próprio autor (2024)

Na literatura, é encontrado que o número de folhas é uma característica mais rigorosamente controlada geneticamente e menos suscetível às melhorias proporcionadas pelos tratamentos (Mabuza; Mavengahama; Mokolobate, 2022), sendo sua aferição realizada pelo acompanhamento dos estádios fenológicos (crescimento de plantas) e biomassa. A altura da planta (AP) é um atributo que também fortemente ligado à genética da planta, porém é mais influenciada por fatores ambientais que o número de folhas, podendo ser modificada por diversos tratamentos incluindo biocarvões (Chen *et al.*, 2024). No entanto, essas variáveis também são influenciadas por fatores ambientais como luz, água, nutrientes, temperatura e atributos de solo. Desses fatores ambientais, luz e nutrientes foram comuns para todos os tratamentos nesta pesquisa. Portanto, a aplicação de biocarvões, por influenciar positivamente em atributos do solo, modulando favoravelmente o ambiente edáfico, tem potencial de contribuir para que as plantas se tornem mais vigorosas e atinjam o seu potencial genético.

Conforme visto na Figura 10, as variáveis (AC) e altura da planta (AP) apresentaram ajuste matemático linear, que permite a visualização da tendência à redução desses dois parâmetros ao passo que a dose aumenta. Entretanto, essas correlações foram

significativas apenas para o biocarvão BLP. Já a variável DC apresentou regressão que se ajusta ao modelo polinomial de segundo grau, em que se estimou o ponto de máximo DC igual a 21,9 mm a uma dose de 23,2 Mg ha⁻¹.

Figura 10 - Curva de regressão para os parâmetros de crescimento de plantas altura do colmo (AC), altura da planta (AP) e diâmetro do colmo (DC) referentes ao biocarvão de lodo de esgoto adicionado de poda de cajueiro.



******, *****: significativo a 1% e a 5% de significância, respectivamente.

Fonte: o próprio autor (2024)

Como discutido anteriormente, a redução do porte das plantas, sem que houvesse diminuição na produção e biomassa, é interessante do ponto de vista agrônomo, por trazer algumas vantagens como maior resiliência frente às adversidades, como vento fortes, que podem provocar o acamamento das plantas, além de facilitar a colheita tanto manual quanto mecanizada (Stubbs *et al.*, 2020; Losey; Carter; Silverman, 2022). Além disso, colmo mais espesso implica maior robustez e resistência ao ataque de pragas (Zhao *et al.*, 2022).

Um estudo conduzido por Cong *et al.* 2023 com biocarvão obtido a partir de palha de trigo, aplicado em solo arenoso e analisado ao longo de sete anos (2014-2021), demonstrou impacto negativo (redução) no crescimento do milho quando utilizado em doses elevadas (63-126 Mg ha⁻¹). No entanto, o efeito inibitório inicial da aplicação de grandes quantidades de biocarvão transformou-se em efeito promotor de crescimento após sete anos de envelhecimento no campo. Os autores explicam que a aplicação inicial de altas doses de biocarvão aumenta significativamente o pH e a condutividade elétrica do solo, inibindo a absorção de nutrientes e

o crescimento das plantas, além de potencialmente conter poluentes que induzem à fitotoxicidade e citotoxicidade. Assim, o estudo mostrou que os efeitos tóxicos do biocarvão diminuem com o tempo, promovendo benefícios às culturas agrícolas.

Portanto, as maiores doses causaram redução no tamanho de plantas, podendo guardar relação com a presença de metais pesados (Cd, Pb, Cr, Ni e Ba) que são encontradas em baixas concentrações no BLP, além de micronutrientes (Mn, Fe, Mn, Mo, Zn) que são demandados em pequenas quantidades (o limiar entre a nutrição e a fitotoxicidade é muito tênue, Tabela 1). Entretanto, destaca-se que essa redução no tamanho não foi acompanhada por diminuição da biomassa, de forma que as plantas ficaram mais compactas e robustas, não sendo a menor altura considerada uma característica negativa.

Outra possibilidade a ser considerada é a influência do sódio encontrado no biocarvão (BLP), com uma concentração de $4,09 \text{ g kg}^{-1}$ (Tabela 1). A cultura do milho é moderadamente sensível à salinidade, com um limiar de salinidade no solo de $1,7 \text{ dS m}^{-1}$, equivalente a $1,088 \text{ g kg}^{-1}$ (Ayers & Westcot, 1999). Essa quantidade de sódio pode variar dependendo da sensibilidade da variedade de milho e das condições específicas do solo, potencialmente resultando em sintomas de redução na altura das plantas e no desenvolvimento vegetativo.

5 CONCLUSÕES

O biocarvão de lodo de esgoto adicionado de biomassa de poda de cajueiro (BLP) melhora a qualidade física de solo arenoso em maior escala que o de bagaço de caju (BC).

O biocarvão de bagaço de caju (BC) otimiza a eficiência do uso da água no período de incubação do biocarvão no solo.

O biocarvão proveniente da mistura de lodo de esgoto com biomassa de poda de cajueiro (BLP) promove benefícios morfométricos na cultura do milho quando comparado ao biocarvão de bagaço de caju (BC).

As doses recomendadas para a melhoria dos atributos físicos do solo estão na faixa de 20-25 Mg ha⁻¹ para o biocarvão de lodo de esgoto adicionado de biomassa de poda de cajueiro (BLP) e de 9 Mg ha⁻¹ para o biocarvão de bagaço de caju (BC).

REFERÊNCIAS

- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. 2.ed. Campina Grande, PB: Universidade Federal da Paraíba, p. 153, 1999.
- AMALINA, F.; ABD RAZAK, A, S.; KRISHNAN, S.; SULAIMAN, H.; ZULARISAM, A. W.; NASRULLAH, M. Biochar production techniques utilizing biomass waste-derived materials and environmental applications: a review. **Journal of Hazardous Materials Advances**, p. 100-134, 2022.
- AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. **Física do solo: conceitos e aplicações**. Fortaleza: Imprensa Universitária, v. 1, 2008.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas**. Brasília, 2017. Disponível em: http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/ATLASESGOTOSDespoluicaoodeBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo_livro.pdf. Acesso em: 13 mar. 2023.
- AWASTHI, M. K.; WANG, Q.; REN, X.; ZHAO, J.; HUANG, H.; AWASTHI, S. K.; ZHANG, Z. Role of biochar amendment in mitigation of nitrogen loss and greenhouse gas emission during sewage sludge composting. **Bioresource Technology**, v. 219, p. 270-280, 2016.
- BÁRCENA, A.; SAMANIEGO, J.; PERES, W.; ALATORRE, J. E. **La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe: ¿seguimos esperando la catástrofe o pasamos a la acción?** Santiago: CEPAL, 2020. Disponível em: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/68d30fbe-9c44-4848-867f-59bbdec62992/content>. Acesso em: 12 jun. 2023.
- BARRETO, A. C.; NETO, M. F.; OLIVEIRA, R. P.; MOREIRA, L. C. J.; MEDEIROS, J. F.; SILVA, F.V. Comparative analysis of spectral indexes for soil salinity mapping in irrigated areas in a semi-arid region, Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 209, p. 104-888, 2023.
- BEKCHANOVA, M.; CAMPION, L.; BRUNS, S.; KUPPENS, T.; LEHMANN, J.; JOZEFCAK, M.; MALINA, R. Biochar improves the nutrient cycle in sandy-textured soils and increases crop yield: a systematic review. **Environmental Evidence**, v. 13, n. 1, p. 1-34, 2024.
- BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN NETO, L.; ANDRADE, C. A. **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. 21. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2023. E-book.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. *In*: KLUTE, A. **Methods of Soil Analysis: Part 1 - Physical and Mineralogical Methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, cap. 13, p. 363-375, 1986.
- BLANCO-CANQUI, Humberto. Biochar and soil physical properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 81, n. 4, p. 687-711, 2017.

BERLATO, M. A.; FARENZENA, H.; FONTANA, D. C. Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade de milho no Estado do Rio Grande do Sul, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, p. 423-432, 2005.

BOX, G. E. P.; COX, D. R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Statistical Society**. Series B (Methodological), London, v. 26, p. 211–234, 1964.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

BRAINER, M. S. C. P. **Cajucultura**. Fortaleza, CE: Banco do Nordeste do Brasil, ano 7, n. 230, 2022 (Caderno Setorial ETENE, n. 230).

BRASIL. Ministério do meio ambiente. Secretaria de Secretaria de recursos Hídricos. **Programa de ação nacional de combate à desertificação e mitigação dos efeitos da seca: PAN-BRASIL**. Brasília, DF: 2005. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/estruturas/sedr_desertif/_arquivos/pan_brasil_portugues.pdf. Acesso em: 14 jun. 2023.

BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, [s.l.], v. 124, n. 1-2, p. 3-22, jan. 2005.

BUSSCHER, W. J.; NOVAK, J. M.; EVANS, D. E.; WATTS, D. W.; NIANDOU, M. A. S.; AHMEDNA, M. Influence of pecan biochar on physical properties of a Norfolk Loamy Sand. **Soil Science**, [s.l.], v. 175, n. 1, p. 10-14, jan. 2010.

CASTRO, C. N. **A agricultura no Nordeste brasileiro: oportunidades e limitações ao desenvolvimento**. Brasília, DF: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, n.1786, 2012 (Texto para Discussão, n. 1786).

CHEN, X.; YANG, L.; MYNENI, S. C.; DENG, Y. Leaching of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from sewage sludge-derived biochar. **Chemical engineering journal**, v. 373, p. 840-845, 2019.

CHEN, X.; LIU, L.; YANG, Q.; XU, H.; SHEN, G.; CHEN, Q. Optimizing Biochar Application Rates to improve soil properties and crop growth in saline–alkali soil. **Sustainability**, v. 16, n. 6, p. 2523, 2024.

CHEN, C.; WANG, R.; SHANG, J.; LIU, K.; IRSHAD, M. K.; HU, K.; ARTHUR, E. Effect of biochar application on hydraulic properties of sandy soil under dry and wet conditions. **Vadose Zone Journal**, v. 17, n. 1, p. 1-8, 2018.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020**. Brasília, DF, 20 ago, 2020.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB **Acompanhamento da Safra Brasileira: Grãos - Safra 2023/2024**, Sexto levantamento, ISSN: 2318-6852.

CONG, M.; Hu, Y.; SUN, X.; YAN, H.; Yu, G.; TANG, G.; JIA, H. Mengfei et al. Long-term effects of biochar application on the growth and physiological characteristics of

maize. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1172425, 2023.

COOK, J.; NUCCITELLI, D.; GREEN, S. A.; RICHARDSON, M.; WINKLER, B.; PAINTING, R.; SKUCE, A. Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. **Environmental research letters**, England, v. 8, n. 2, p. 024024, 2013.

DUARTE, J. S.; GLASER, B.; CERRI, P. C. E. Effect of biochar particle size on physical, hydrological and chemical properties of loamy and sandy tropical soils. **Agronomy**, Basel, Switzerland, v. 9, n. 4, p. 165, 2019.

DE MELO, T. R.; FERREIRA, R. R. M.; FELTRAN, C.; FILHO, T. J. Sobreposição do efeito dispersivo causado pela valência dos cátions no complexo de troca pela matéria orgânica de vinhaça em um Cambissolo Háptico degradado por queimadas. **CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**, 35., 2015, Natal. Anais eletrônicos [...]. Natal: SBSCS, 2015. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/130344/1/25730.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2024.

DEXTER, A. R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal of Agriculture Engineering Research**, [S.I.], v. 31, p. 139-147, 1985.

DE SOUSA OLIVEIRA, L.; MAIA, R. N.; DE ASSIS JÚNIOR, R. N.; ROMERO, R. E.; COSTA, M. C. G.; DE ALENCAR, T. L.; MOTA, J. C. A. Tensile strength values for the degrees of soil consistency using human perception and TS-Soil device, **Catena**, v. 190, p. 104-541, 2020.

DOURADO, N. D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; LOPES, P.P. **Programa para confecção da curva de retenção de água no solo, modelo vanGenuchten Soil Water Retention Curve, SWRC (versão 3,0 beta)**, Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2001.

DRUMOND, M. A.; KIILL, L.H. P.; LIMA, P. C. F.; DE OLIVEIRA, M. C.; DE OLIVEIRA, V. R.; DE ALBUQUERQUE, S. G.; CAVALCANTI, J. **Estratégias para o uso sustentável da biodiversidade da caatinga**. 2000. Trabalho apresentado no Seminário Biodiversidade da Caatinga da universidade Federal de Pernambuco, 2000, Petrolina.

EIBISCH, N.; DURNER, W.; BECHTOLD, M.; FUB, R.; MIKUTTA, R.; WOCHE, S. K.; HELFRICH, M. Does water repellency of pyrochars and hydrochars counter their positive effects on soil hydraulic properties? **Geoderma**, v. 245, p. 31-39, 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Circular Técnica, Nutrição e Adubação do Milho**. Sete Lagoas, MG: Embrapa milho e sorgo, 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Solos do Nordeste**. Recife: Embrapa Solos, 2014. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1003864>. Acesso em: 15 jun. 2023.

FERREIRA, J. T. P. **Desenvolvimento de Planossolos em distintas condições**

Geoambientais e o efeito do pousio em áreas sob processo de desertificação. 2006. Tese (Doutorado em solos e Nutrição de plantas), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

FERNANDES, V. L. B. *et al*, **Recomendações de adubação e calagem para o estado do Ceará**, Fortaleza: UFC, p. 248, 1993.

FONSÊCA, M. H.; GUERRA, H. O.; LACERDA, R. D. D.; BARRETO, A. N. Uso de propriedades físico-hídricas do solo na identificação de camadas adensadas nos Tabuleiros Costeiros, Sergipe, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, p. 368-373, 2007.

FREGOLENTE, L. G.; RODRIGUES, M. T.; OLIVEIRA, N. C.; ARAUJO, B. S.; NASCIMENTO, Í. V.; SOUZA FILHO, A. G.; PAULA, A. J.; COSTA, M. C.G.; MOTA, J. C.A.; FERREIRA, O. P. Effects of chemical aging on carbonaceous materials: stability of water-dispersible colloids and their influence on the aggregation of natural-soil colloid. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 903, p. 166835, dez. 2023.

GARG, A.; BORDOLOI, S.; NI, J.; CAI, W.; MADDIBIONA, P. G.; MEI, G.; POULSEN, T. G.; LIN, P. Influence of biochar addition on gas permeability in unsaturated soil. **Géotechnique Letters**, [s.l.], v. 9, n. 1, p. 66-71, mar. 2019.

GAUR, R. Z.; KHOURY, O.; ZOHAR, M.; POVERENOV, E.; DARZI, R.; LAOR, Y.; POSMANIK, R. Hydrothermal carbonization of sewage sludge coupled with anaerobic digestion: Integrated approach for sludge management and energy recycling, **Energy Conversion and Management**, v. 224, p. 113353, 2020.

GE, D.; HUANG, S.; CHENG, J.; HAN, Y.; WANG, Y.; DONG, Y.; ZHU, N. A new environment-friendly polyferric sulfate-catalyzed ozonation process for sludge conditioning to achieve deep dewatering and simultaneous detoxification. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 359, p. 132-049, 2022.

GEE, G. W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. **Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods**, v. 5, p. 383-411, 1986.

HANKE, D.; NASICMENTO, S. G.; DICK, D. P.; ÁVILA, M. R.; PILLON, C. N. Produção e caracterização de biocarvão a partir de diferentes fontes de biomassa vegetal: aproveitamento de resíduos arbóreos e agrícolas sem destinação apropriada, **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, [s.l.], v. 10, n. 2, 2022.

HARDIE, M.; CLOTHIER, B.; BOUND, S.; OLIVER, G.; CLOSE, D. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? **Plant and soil**, New Zealand, v. 376, p. 347-361, 2014.

IBGE. Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA. Produção Agrícola Municipal: quantidade produzida e área plantada com banana, manga, melão, 2023. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 17 ago. 2024.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014 Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. Disponível em:

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-FrontMatterA_FINAL.pdf. Acesso em: 15 mar. 2023.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. Cambridge: Cambridge University, 2019. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/287579991.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2023.

JORGE, R. F.; CORÁ, J. E.; BARBOSA, J. C. Número mínimo de tensões para determinação da curva característica de retenção de água de um Latossolo Vermelho eutrófico sob sistema de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 6, p. 1831-1840, 2010.

JUNIOR, A.; GUO, M. Efficacy of sewage sludge derived biochar on enhancing soil health and crop productivity in strongly acidic soil. **Frontiers in Soil Science**, v. 3, p. 106-654, 2023.

KAMALI, M.; SWEYGERS, N.; AL-SALEM, S.; APPELS, L.; AMINABHAVI, T. M.; DEWIL, R. Biochar for soil applications-sustainability aspects, challenges and future prospects. **Chemical Engineering Journal**, v. 428, p. 131-189, 2022.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution, *In*: KLUTE, A., **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, p. 425-442, 1986

KHALIL, H. A.; HOSSAIN, M. S.; ROSAMAH, E.; AZLI, N. A.; SADDON, N.; DAVOUDPOURA, Y.; DUNGANI, R. A. The role of soil properties and it's interaction towards quality plant fiber: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 43, p. 1006-1015, 2015.

KIEHL, E. J. **Manual de Edafologia: relações solo-planta**. Piracicaba, SP: Agronômica Ceres, 1979. 263 p.

KIMBALL, B. A.; BOOTE, K. J.; HATFIELD, J. L.; AHUJA, L. R.; STÖCKLE, C. O.; ARCHONTOULIS, S. V.; TWINE, T. Prediction of evapotranspiration and yields of maize: An inter-comparison among 29 maize models. **ASA, CSSA and SSSA International Annual Meetings**. Phoenix: Arizona, 2016.

KINNEY, T. J.; MASIELLO, C. A.; DUGAN, B.; HOCKADAY, W. C.; DEAN, M. R.; ZYGOURAKIS, K.; BARNES, R. T. Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures. **Biomass and Bioenergy**, [s.l.], v. 41, p. 34-43, 2012.

KÖHL, L.; OEHL, F.; HEIJDEN, M. G. A. Agricultural practices indirectly influence plant productivity and ecosystem services through effects on soil biota. **Ecological Applications**, [s.l.], v. 24, n. 7, p.1842-1853, 2014.

KUMAR, Manish; XIONG, Xinni; WAN, Zhonghao; SUN, Yuqing; TSANG, Daniel C.W.; GUPTA, Juhi; GAO, Bin; CAO, Xinde; TANG, Jingchun; OK, Yong Sik. Ball milling as a mechanochemical technology for fabrication of novel biochar nanomaterials. **Bioresource**

Technology, [s.l.], v. 312, p. 123613, set. 2020.

LACERDA, C. F.; CAMBRAIA, J.; CANO, M. A. O.; RUIZ, H. A.; PRISCO, J. T. Solute accumulation and distribution during shoot and leaf development in two sorghum genotypes under stress. **Environmental and Experimental Botany**, Kidlington, v. 49, n.2, p. 107-120, 2003.

LANGNER, J. A., ZANON, A. J., STRECK, N. A., REINIGER, L. R., KAPMANN, M. P., ALVES, A. F. Maize: Key agricultural crop in food security and sovereignty in a future with water scarcity. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 23, p. 648-654, 2019.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. London, UK; Sterling, VA: Routledge, 2015.

LI, J.; LIANG, N.; JIN, X.; ZHOU, D.; LI, H.; WU, M.; PAN, B. The role of ash content on bisphenol A sorption to biochars derived from different agricultural wastes. **Chemosphere**, [s.l.], v. 171, p. 66-73, 2017.

LIM, T.J.; SPOKAS, K.A.; FEYEREISEN, G.; NOVAK, J.M. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. **Chemosphere**, [s.l.], v. 142, p. 136-144, jan. 2016.

LIMA, A. Y. V. **Soil health assessment in the brazilian dryland region (caatinga biome)**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

LIMA NETO, J. D. A.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M.; SOUZA JÚNIOR, V. S. D.; LIMA, J. F. W.; FERREIRA, R. F. D. A. Caracterização e gênese do caráter coeso em Latossolos Amarelos e Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, MG, v. 33, p. 1001-1011, 2009.

LIMA, H. V.; SILVA, A. P.; JACOMINE, P. T. K.; ROMERO, R. E.; LIBARDI, P. L. Identificação e caracterização de solos coesos no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, p. 467-476, 2004.

LIU, X.; DOU, S.; NDZELU, B. S.; BOUERJILAT, H.; ZHANG, X.; Lin, C.; XIE, S. Response of 15N to corn straw and biochar application in soils with different fertility levels, during corn seedling stage. **Journal of Plant Nutrition**, [s.l.], v. 44, n. 19, p. 2863-2875, 2021.

LOSEY, J. E.; CARTER, M. E.; SILVERMAN, S. A. The effect of stem diameter on European corn borer behavior and survival: potential consequences for IRM in Bt-corn. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, Netherlands, v. 105, n. 2, p. 89-96, 2002.

MABUZA, N. M.; MAVENGAHAMA, S.; MOKOLOBATE, M. M. Agronomic, Genetic and Quantitative Trait Characterization of Nightshade Accessions. **Plants**, Basel, Switzerland, v. 11, n. 11, p. 1489, 2022.

MAJOR, J. **Guidelines on practical aspects of biochar application to field soil in various**

soil management systems. 1.ed. International biochar initiative, 2010. 24 p.

MARIUZZO, P. Por uma cultura brasileira do milho. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 71, n. 1, p. 50-52, 2019. ISSN 2317-6660. Disponível em:

http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252019000100016&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 20 jun. 2023.

MCGUIRE, S. FAO, IFAD, and WFP. The State of Food Insecurity in the World 2015: Meeting the 2015 International Hunger Targets: Taking Stock of Uneven Progress. Rome: FAO, 2015. **Advances in Nutrition**, v. 6, n. 5, p. 623, 2015.

MIRANDA, R. A. Uma história de sucesso da civilização. **A Granja**, Porto Alegre, RS, v. 74, n. 829, p. 24-27, 2018.

MUNNS, Rana. Physiological processes limiting plant growth in saline soils: some dogmas and hypotheses. **Plant, cell & environment**, [s.l.], v. 16, n. 1, p. 15-24, 1993.

NASCIMENTO, I. V. *et al.* Biochar from cashew residue enhances silicon adsorption and reduces cohesion and mechanical resistance at meso-and micro-structural scales of soil with cohesive character. **Soil and Tillage Research**, [s.l.] v. 241, p. 106-101, 2024.

NASCIMENTO, I. V.; ALENCAR, T. L.; SANTOS, C. L. A.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. Effect of sample re-saturation on soil-water characteristic curve. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 31, n. 2, p. 446-454, 2018a.

NASCIMENTO, I. V.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; ARAÚJO, J. C.; ALENCAR, T. L.; FREIRE, A. G.; LOBATO, M. G. R.; SILVA, C. P.; MOTA, J. C. A.; NASCIMENTO, C. D. V. Estimation of van Genuchten equation parameters in laboratory and through inverse modeling with Hydrus-1D. **Journal of Agricultural Science**, Ontario, v. 10, n. 3, 2018b.

NEOGI, S.; SHARMA, V.; KHAN, N.; CHAURASIA, D.; AHMAD, A.; CHAUHAN, S.; BHARGAVA, P. C. Sustainable biochar: A facile strategy for soil and environmental restoration, energy generation, mitigation of global climate change and circular bioeconomy. **Chemosphere**, [s.l.] v. 293, p. 133-474, 2022.

NOVOTNY, E. H.; MAIA, C. M. B. D. F.; CARVALHO, M. T. D. M.; MADARI, B. E. Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use-a critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 39, p. 321-344, 2015.

OLIVEIRA, L. S.; MAIA, R. N.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; ROMERO, R. E; COSTA, Mirian C. G.; ALENCAR, T. L; MOTA, J. C. A. Tensile strength values for the degrees of soil consistency using human perception and TS-Soil device. **Catena**, [s.l.], v. 190, p. 104541, jul. 2020.

ONU BRASIL. **Articulando os Programas de Governo com a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: Orientações para organizações políticas e a cidadania**. DBCI: Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência da Informação, v. 16, n. 3, p. 355-372, 2018. Disponível em: https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-10/Publica%C3%A7%C3%A3o%20Articulando%20os%20ODS_REQ_ID_6998.pdf. Acesso

em: 9 mar. 2023.

OTTONI, M. V.; OTTONI FILHO, T. B. Avaliação da curva de retenção de umidade considerando a equação de van Genuchten e umidades residuais negativas, **XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**. 2011. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/17696/1/ottoni_ottonifilho_cbcs33_2011.pdf. Acesso em: 5 mai. 2023.

PENNOCK, Dan.; MCKENZIE, N.; MONTANARELLA, L. **Status of the world's soil resources**. Technical Summary FAO, Rome, Italy, 2015.

PEQUENO, P. D. L.; LEONIDAS, F. D. C.; Mendes, A. M.; Vieira, A. H.; Martins, E. P.; de VASCONCELOS, L. P. Água disponível do solo: algumas características físicas do solo importantes para quantificação. **EMBRAPA DOCUMENTOS 67**, 1ª edição: 2002. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/215269/1/cpafro-6632-doc67.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2024.

REIS, D. A.; LIMA, C. L. R. D.; PAULETTO, E. A.; DUPONT, P. B.; PILLON, C. N. Tensile strength and friability of an Alfisol under agricultural management systems. **Scientia Agricola**, v. 71, p. 163-168, 2014.

RICHÉ, G. R.; SÁ, I. B.; FOTIUS, G. A. **Pesquisa sobre reabilitação ambiental no trópico semi-árido brasileiro: anais Semana de Recursos Naturais e Meio Ambiente, Salvador: IBGE**, 1994. Disponível em: http://www.cpatsa.embrapa.br/public_eletronica/downloads/OPB1733.pdf. Acesso em: 08 mar. 2023.

ROBERTSON, G.P.; SWINTON, S.M. Reconciling agricultural productivity and environmental integrity: a grand challenge for agriculture. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 3, n. 1, p. 38-46, 2005.

RUI, Z.; LU, X.; LI, Z.; LIN, Z.; LU, H.; ZHANG, D.; PAN, G. Macroaggregates serve as micro-hotspots enriched with functional and networked microbial communities and enhanced under organic/inorganic fertilization in a paddy topsoil from Southeastern China. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, p. 831746, 2022.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed, rev, amp, Brasília, DF: EMBRAPA, 2018.

SCHMIDT, M. J.; GOLDBERG, S. L.; HECKENBERGER, M.; FAUSTO, C.; FRANCHETTO, B.; WATLING, J.; PERRON, J, T; Intentional creation of carbon-rich dark earth soils in the Amazon, **Science advances**, v. 9, n. 38, p.8499, 2023.

SCOTTI, C.; BERTORA, C.; VALAGUSSA, M.; BORRELLI, L.; CABASSI, G.; TOSCA, A. Agroenvironmental performances of biochar application in the mineral and organic fertilization strategies of a maize–ryegrass forage system. **Agriculture**, v. 12, n. 7, p. 925, 2022.

SILVA, S. I.; OLIVEIRA, A. F. M.; NEGRI, G.; SALATINO, A. Seed oils of

- Euphorbiaceae from the Caatinga, a Brazilian tropical dry forest. **Biomass and Bioenergy**, v. 69, p. 124-134, 2014.
- SILVEIRA, L. R. D.; BRITO, A. S.; MOTA, J. C. A.; MORAES, S. O.; LIBARDI, P. L. Sistema de aquisição de dados para equipamento de medida da permeabilidade intrínseca do solo ao ar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 429-436, 2011.
- SIX, J.; PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E. T.; COMBRINK, C. Soil structure and organic matter I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], v. 64, n. 2, p. 681-689, mar. 2000.
- STUBBS, C. J.; SEEGMILLER, K.; MCMAHAN, C.; SEKHON, R. S.; ROBERTSON, D. J. Diverse maize hybrids are structurally inefficient at resisting wind induced bending forces that cause stalk lodging. **Plant Methods**, v.16, p. 1-15, 2020.
- SUN, Z.; MOLDRUP, P.; ELSGAARD, L.; ARTHUR, E.; BRUUN, E. W.; HAUGGAARD N. H.; JONGE, L. W. Direct and indirect short-term effects of biochar on physical characteristics of an arable sandy loam. **Soil Science**, v. 178, n. 9, p. 465-473, 2013.
- TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**, 3a edição, Publicação digitalizada, 2017.
Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/194786/1/Pt-5-Cap-1-Micromorfologia-do-solo.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2023.
- TEIXEIRA, W.; MAIA, C.; CARVALHO, M.; REZENDE, F. **Potencialidades do uso do biocarvão como condicionador de solo no Brasil**. Nota Técnica. Distrito Federal, Embrapa, 4p, 2015.
- TANURE, M. M. C.; COSTA, L. M.; HUIZ, H. A.; FERNANDES, R. B. A.; CECON, P. R.; JUNIOR, J. D. P.; DA LUZ, J. M. R. Soil water retention, physiological characteristics, and growth of maize plants in response to biochar application to soil. **Soil and Tillage Research**, v. 192, p. 164-173, 2019.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 22, n. 4, p. 573-581, dez. 1998.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Foreign Agricultural Service, 2018, USEPA, **National Sewage Sludge Survey Report**, Washington DC, 2007.
- VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-897, 1980.
- VAN LIER, Q. J.; PINHEIRO, E. A. R. An alert regarding a common misinterpretation of the van Genuchten α parameter. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 42, 2018.
- VAN VALKENGOED, A. M.; STEG, L. Meta-analyses of factors motivating climate change adaptation behaviour. **Nature Climate Change**, [s.l.], v. 9, n. 2, p. 158-163, 2019.

VERHEIJEN, F. G.; ZHURAVEL, A.; SILVA, F. C.; AMARO, A.; BEN-HUR, M.; KEIZER, J. J. The influence of biochar particle size and concentration on bulk density and maximum water holding capacity of sandy vs sandy loam soil in a column experiment. **Geoderma**, [s.l.], v. 347, p. 194-202, 2019.

WANG, X.; HE, J.; BAI, M.; LIU, L.; GAO, S.; CHEN, K.; ZHUANG, H. The impact of traffic-induced compaction on soil bulk density, soil stress distribution and key growth indicators of maize in North China Plain. **Agriculture**, Basel, Switzerland, v. 12, n. 8, p. 1220, 2022.

WATTS, C. W.; DEXTER, A. R. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**, [S.L.], v. 49, n. 1, p. 73-84, mar. 1998.

WEI, B.; PENG, Y.; LIN, L.; ZHANG, D.; MA, Li.; JIANG, L.; LI, Y.; HE, T.; WANG, Z. Drivers of biochar-mediated improvement of soil water retention capacity based on soil texture: a meta-analysis. **Geoderma**, [s.l.], v. 437, p. 116591, set. 2023

YIN, Y. Y. C.; Li, M.; ZHENG, Y.; GE, C.; GU, J.; CHEN, R. Research progress and prospects for using biochar to mitigate greenhouse gas emissions during composting: a review. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 798, p. 149294, 2021.

YU, H. Z. W.; CHEN, J.; CHEN, H.; YU, Z.; HUANG, J.; GAO, B. Biochar amendment improves crop production in problem soils: a review. **Journal of environmental management**, [s.l.], v. 232, p. 8-21, 2019.

ZANUTEL, M.; GARRÉ, S.; SANGLIER, P.; BIELDERS, C. Biochar modifies soil physical properties mostly through changes in soil structure rather than through its internal porosity. **Vadose Zone Journal**, [s.l.], v. 23, n. 1, p. 20301, 2024.

ZHANG, A.; BIAN, R.; Pan, G.; CUI, L.; HUSSAIN, Q.; LI, L.; YU, X. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: a field study of 2 consecutive rice growing cycles. **Field Crops Research**, [s.l.], v. 127, p. 153-160, 2012.

ZHANG, Y.; JINGSONG, Y. A. N. G.; RONGJIANG, Y. A. O.; XIANGPING, W. A. N. G.; WENPING, X. I. E. Short-term effects of biochar and gypsum on soil hydraulic properties and sodicity in a saline-alkali soil. **Pedosphere**, [s.l.], v. 30, n. 5, p. 694-702, 2020.

ZHAO, L.; SUN, Z. F.; PAN, X. W.; TAN, J. Y.; YANG, S. S.; WU, J. T.; REN, N. Q. Sewage sludge derived biochar for environmental improvement: Advances, challenges and solutions. **Water Research X**, [s.l.], p. 100-167, 2023.

ZHAO, H.; ZHANG, D.; YANG, L.; CUI, T.; SONG, W.; HE, X.; DONG, J. Optimal design and experiment of critical components of hand-pushing corn plot precision planter. **Agriculture**, v. 12, n. 12. p. 2103, 2022.

ZHENG, H.; WANG, X.; CHEN, L.; WANG, Z.; XIA, Y.; ZHANG, Y.; XING, B. Enhanced growth of halophyte plants in biochar-amended coastal soil: roles of nutrient availability and rhizosphere microbial modulation. **Plant, cell & environment**, v. 41, n. 3, p.

517-532, 2018.

ZONG, Y.; CHEN, D.; LU, S. Impact of biochars on swell–shrinkage behavior, mechanical strength, and surface cracking of clayey soil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Hoboken, v. 177, n. 6, p. 920-926, 2014.

ZORNOZA, R.; MORENO-BARRIGA, F.; ACOSTA, J. A.; MUÑOZ, M. A.; FAZ, A. nutrient availability and hydrophobicity of biochars derived from manure, crop residues, and municipal solid waste for their use as soil amendments. **Chemosphere**, v. 144, p. 122-130, 2016.

ZUSEVICS, J. A. Seasonal changes of permanent wilting coefficient in some selected tropical soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 11, n. 9, p. 843-850, 1980.

ANEXO A – TERMO DE AUTORIZAÇÃO

Av. Dr. Lauro Vieira Chaves, 1030 - Vila União
CEP: 60422-901 - Fortaleza / CE
CNPJ: 07.040.108/0001-57



TERMO DE AUTORIZAÇÃO

A Companhia de Água e Esgoto do Ceará – Cagece, sociedade de economia mista inscrita no CNPJ sob o número 07.040.108/0001-57, com sede na av. Doutor Lauro Vieira Chaves, nº 1030 – Vila União, Fortaleza/CE, CEP 60.422-901, por meio da sua Gerência de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação, representada pela gerente Cailiny Darley de Menezes Medeiros, vem, neste ato, considerando:

1. O Convênio de Receita para pesquisa voltada ao desenvolvimento de tecnologia entre a FUNCAP e a Cagece, publicado em DOE em 01/12/2020 (Extrato de Convênio 01/2020), que estabelece condições para que a Funcap selecione e apoie pesquisa científica e tecnológica cooperativa, a ser desenvolvida no Estado do Ceará, por pesquisadores vinculados a Instituições de Ensino Superior (IES) e/ou Instituições Científicas, Tecnológicas e de Inovação (ICT) ou por empresas, públicas ou privadas, selecionados mediante Chamada de Proposta de Pesquisa, com aporte de recursos da Cagece e Funcap, no valor total de R\$ 4.000.000,00 (quatro milhões de reais), sendo R\$ 3.000.000,00 com recursos próprios da Cagece e o restante pela FUNCAP;
2. Que a pesquisa “PRODUÇÃO DE MATERIAIS CARBONÁCEOS FUNCIONAIS PARA VALORAÇÃO DO LODO DE ESGOTO”, coordenada pela Prof. Mirian Cristina Gomes Costa foi selecionada mediante a Chamada de Proposta de Pesquisa;
3. As disposições acerca das confidencialidades previstas na cláusula 5ª (quinta) do referido Convênio;
4. A previsão de sigilo expressa no Termo de Concessão assinado pelo coordenador da referida pesquisa, a ser estendido a toda equipe envolvida no projeto de pesquisa;
5. Que a realização do trabalho envolve equipe composta por professores e alunos de cursos de graduação e pós-graduação;
6. Que a dissertação intitulada BIOCÁRVÕES PIROLÍTICOS: EFEITOS EM ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E NA CULTURA DO MILHO do(a) aluno(a) Tiago da Costa Dantas Moniz, orientado pela Prof. Jaedson Cláudio Anunciato Mota, atuante da pesquisa em questão, adotou informações cedidas pela Cagece;
7. Que o coordenador informou não haver previsão de propriedade intelectual na referida pesquisa;
8. Que a dissertação foi analisado pela equipe da Cagece e sua redação acatada;

Autorizamos a publicação da dissertação referenciado no item 6 (seis) do presente Termo de Autorização conforme preceitua a cláusula 5ª (quinta) do Convênio de Receita firmado entre a Funcap e a Cagece.

Fortaleza, 28 de agosto de 2024


Cailiny Darley de M. Medeiros
Gerente de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação – GEPED