



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

**ÍCARO VASCONCELOS DO NASCIMENTO**

**BIOCARVÃO COMO CONDICIONADOR DA QUALIDADE FÍSICA DE SOLO  
COM CARÁTER COESO**

**FORTALEZA**

**2023**

ÍCARO VASCONCELOS DO NASCIMENTO

BIOCARVÃO COMO CONDICIONADOR DA QUALIDADE FÍSICA DE SOLO COM  
CARÁTER COESO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, do Departamento de Ciências do Solo, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor. Área de Concentração: Manejo do Solo e da Água.

Orientador: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota.

FORTALEZA

2023

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)

---

N199b Nascimento, Ícaro Vasconcelos do.  
Biocarvão como condicionador da qualidade física de solo com caráter coeso / Ícaro Vasconcelos do Nascimento. – 2023.  
94 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Fortaleza, 2023.  
Orientação: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota.

1. Condicionadores de solo. 2. Tabuleiros Costeiros. 3. Solos adensados. 4. Silício. 5. Reometria. I. Título.

CDD 631.4

---

ÍCARO VASCONCELOS DO NASCIMENTO

BIOCARVÃO COMO CONDICIONADOR DA QUALIDADE FÍSICA DE SOLO COM  
CARÁTER COESO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, do Departamento de Ciências do Solo, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor. Área de Concentração: Manejo do Solo e da Água.

Aprovada em: 28/11/2023.

BANCA EXAMINADORA



---

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



---

Dra. Francisca Gleiciane da Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)



---

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



---

Prof. Dr. Odair Pastor Ferreira  
Universidade Estadual de Londrina (UEL)



---

Prof. Dr. Ricardo Espíndola Romero  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A meu avô, Waldemar Moreira do Nascimento,  
em saudososa memória.

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) e à Secretaria do Desenvolvimento Econômico e Trabalho (SEDET) pelo apoio financeiro ao projeto “Condicionador de solos obtido de resíduo agroindustrial para uso nas condições edafoclimáticas do Nordeste brasileiro”, no âmbito do Meta-Projeto Cientista-chefe em Agricultura.

À Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo apoio financeiro ao projeto “Produção de materiais carbonáceos funcionais obtidos a partir de resíduo agroindustrial: uso como condicionador de solos no Nordeste brasileiro”, FINEP nº 0122017200, que financiou parte desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota, pela orientação, amizade e exemplo de profissional. Nossa parceria acadêmica, iniciada na graduação em Agronomia, culminou nesta tese de Doutorado.

À Dra. Francisca Gleiciane da Silva, à Profa. Dra. Mirian Cristina Gomes Costa, ao Prof. Dr. Odair Pastor Ferreira e ao Prof. Dr. Ricardo Espíndola Romero, pela amizade, parceria, ensinamentos e disponibilidade em participar da banca de defesa desta tese de doutorado.

À Profa. Dra. Diana Ferreira de Freitas, ao Prof. Dr. Helon Hébano de Freitas Sousa e à Dra. Laís Gomes Fregolente, pela suplência na banca de defesa desta tese.

Ao Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior, pela amizade e constante troca de saberes – que, sem dúvidas, agregaram valor à minha vida acadêmica e pessoal.

À Dra. Laís Gomes Fregolente, pela obtenção do biocarvão utilizado, parceria acadêmica e amizade.

À Dra. Emanuela Barbosa, pela amizade, parceria e auxílio na montagem dos corpos de prova utilizados neste experimento.

À Dra. Angélica da Silva Lopes, pela amizade e auxílio na execução das análises de resistência tênsil e densidade do solo.

Ao Me. Francisco José da Silva, funcionário da Universidade Federal do Ceará lotado no laboratório de Física do Solo, pela amizade, apoio e ajuda na execução das análises laboratoriais.

À Profa. Dra. Maria Eugênia Ortiz Escobar, por ter permitido que eu utilizasse as instalações do Laboratório de Química do Solo para realização ensaios de adsorção de silício.

Ao Me. Crisanto Crisanto Dias Teixeira Filho, funcionário da Universidade Federal do Ceará lotado no laboratório de Química do Solo, pelo auxílio na execução dos ensaios de capacidade de adsorção de silício.

À Ma. Viviane Sobucki, Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Ciência do solo da Universidade Federal de Santa Maria, pela amizade e auxílio na execução dos ensaios de reometria.

Ao Prof. Dr. José Miguel Reichert, por autorizar e supervisionar à minha ida à Santa Maria para a execução dos ensaios de reometria.

A Deus, pelo dom da vida e por renovar diariamente minhas forças frente aos desafios da vida.

Aos meus pais, Antônio Augusto do Nascimento e Maria Zenilda Ferreira Vasconcelos, por todo amor e preocupação com a qualidade da educação que recebi.

A meu avô, Waldemar Moreira do Nascimento (*In memoriam*), grande contador de histórias, com quem tive o prazer de viver memoráveis momentos.

À minha irmã, Carla Danielle Vasconcelos do Nascimento, com quem dividi e ainda divido parte da minha vida.

À minha noiva, Paloma Eleutério Bezerra, pelo companheirismo diário e todo o amor e apoio a mim dispensado.

Ao meu cunhado, Alan Ferreira, pela amizade, apoio e auxílio na coleta das amostras de solo.

Aos meus demais familiares que, cada um com a sua contribuição, ajudaram a construir a base na qual estou inserido.

Ao Prof. Dr. José Othon Dantas Lopes, pelo apoio que me fora dado desde a época da graduação em Agronomia.

Ao Prof. Dr. Arthur Prudêncio de Araujo Pereira, pela amizade e parceria acadêmica ao longo do curso de Doutorado.

Aos colegas da pós-graduação, especialmente Ana Carla, André Nogueira, Cillas Pollicarto, Emanuela Barbosa, Éricka Paloma, Godofredo, Isabela, João Marcos, Nailton, Luan, Rafaela Magalhães, Raquel da Hora e Thiago Leite, pela amizade, cooperação e constante troca de saberes.

Aos colegas do grupo de pesquisa em Física/Gênese do Solo, em especial, Alexandre Queiroz, João Ivo e Tiago Moniz, pela amizade e ajuda na execução das atividades ligadas a este trabalho.

Aos funcionários da Universidade Federal do Ceará, principalmente os lotados no Departamento de Ciências do Solo, em especial Deyse de Sousa, Dona Helena, José Edilson Dote, Marilene Bezerra e Vitória Emilly, pela presteza na realização dos afazeres diários.

Aos mestres responsáveis pela minha formação, desde o jardim de infância até a pós-graduação, cujos ensinamentos me trouxeram até aqui.

Aos demais que, de alguma forma, tenham contribuído com este trabalho.

“Se não houver frutos, valeu a beleza das flores;  
se não houver flores, valeu a sombra das folhas;  
se não houver folhas, valeu a intenção da  
semente”. Henfil.

## RESUMO

Horizontes com caráter coeso impõem restrições físicas ao desenvolvimento vegetal, especialmente quando próximos à superfície do solo. A gênese do caráter coeso tem relação com a cimentação temporária e reversível por sílica amorfa. A hipótese deste trabalho foi que há dose de biocarvão oriundo da pirólise de resíduos do processamento do caju, que aplicada ao solo, além de favorecer a flocculação e agregação das partículas do solo, otimiza a adsorção de silício e, por consequência, reduz a coesão e melhora a qualidade física de horizontes com caráter coeso. Para realização do experimento, foram coletadas amostras com estrutura deformada no horizonte Bt1 (com caráter coeso) de um Argissolo Amarelo Eutrocoeso típico, em Fortaleza/CE. Em seguida, foram montados corpos de prova utilizando terra fina seca ao ar e biocarvão advindo da pirólise de resíduos do processamento do caju nos seguintes tratamentos: 0, 5, 10, 20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup>. Todas as amostras foram sujeitas a dez ciclos de umedecimento e secagem (um ciclo por semana). Foram avaliadas propriedades físicas tradicionais e reométricas. O delineamento experimental foi o inteiramente aleatorizado. Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e comparação de médias pelo teste de Tukey, ambos a 5% de significância. Também se realizou análise de regressão e correlação entre as variáveis estudadas e as respectivas doses de biocarvão. Por fim, realizou-se análise de componentes principais para caracterização dos tratamentos, e análise de agrupamento para formação e grupos de maior similaridade. As análises foram realizadas utilizando a plataforma *SAS® OnDemand for Academics*. Em relação ao controle, na maior dose de biocarvão, houve aumento da capacidade de adsorção de silício (+15,3%), porosidade total (+1,9%), macroporosidade (+15,3%), permeabilidade ao ar na tensão de 33 kPa (+20,7%) e condutividade hidráulica do solo saturado (+25,8%); e redução da densidade do solo (-0,8%), resistência à penetração (-16,1%), resistência tênsil (-36,5%), deformação no final do intervalo viscoelástico linear (-10,5%) e tensão de cisalhamento máxima (-26,9%) e no final do intervalo viscoelástico linear (-10,5%). Concluiu-se que aplicação do biocarvão oriundo da pirólise de resíduos do processamento do caju promove a adsorção de Si, resultando em redução da coesão e melhoria da qualidade física de solos com caráter coeso; e que dose entre 20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup> é mais efetiva na melhoria da qualidade física.

**Palavras-chave:** condicionadores de solo; tabuleiros costeiros; solos adensados; silício; sílica amorfa; reometria.

## ABSTRACT

Horizons with cohesive character impose physical constraints on plant development, especially when near the soil surface. The genesis of cohesive character is related to temporary and reversible cementation by amorphous silica. The hypothesis of this study was that a dose of biochar derived from the pyrolysis of cashew processing waste, when applied to the soil, not only promotes soil particle flocculation and aggregation but also optimizes silicon adsorption, consequently reducing cohesion and improving the physical quality of horizons with cohesive character. To conduct the experiment, samples were collected from a Bt1 horizon (with cohesive characteristics) of an ARGISSOLO AMARELO Eutrocoeso típico in Fortaleza, CE. Then, test specimens were assembled using dry fine soil and biochar derived from the pyrolysis of cashew processing waste in the following treatments: 0, 5, 10, 20, and 40 Mg ha<sup>-1</sup>. All samples were subjected to ten wetting and drying cycles (one cycle per week). Traditional and rheometric physical properties were evaluated. The experimental design was completely randomized. The data were subjected to analysis of variance using the F-test and mean comparison using the Tukey test, both at a 5% significance level. Regression and correlation analysis were also conducted between the studied variables and the respective biochar doses. Finally, principal component analysis was performed to characterize the treatments, and cluster analysis was conducted to form groups of greater similarity. The analyses were carried out using the SAS<sup>®</sup> OnDemand for Academics platform. Compared to the control group, the highest biochar dose resulted in increased soil silicon adsorption capacity (+15.3%), total porosity (+1.9%), macroporosity (+15.3%), air permeability at 33 kPa (+20.7%) and saturated hydraulic conductivity (+25.8%); and reduction in bulk density (-0.8%), penetration resistance (-16.1%), tensile strength (-36.5%), deformation at the end of the linear viscoelastic range (-10.5%), shear stress at the end of the linear viscoelastic range (-10.5%), and maximum shear stress (-26.9%). It was concluded that the application of biochar derived from cashew processing waste pyrolysis promotes silicon adsorption, resulting in reduced cohesion and improved physical quality of soils with cohesive characteristics. A dose between 20 and 40 Mg ha<sup>-1</sup> was found to be more effective in improving the physical quality of these soils.

**Keywords:** soil conditioners; coastal tablelands; adensed soils; silicon; amorphous silica; rheometry.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Ilustração dos parâmetros reológicos obtidos em um teste de varredura de amplitude (*Amplitude Sweep Test - AST*). (A) Módulo de armazenamento viscoelástico ( $G'$ ), módulo de perda ( $G''$ ) e fator de perda ( $\tan \delta$ ) em função da deformação ( $\gamma$ ) (Escala logarítmica). (B) Tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) em função da deformação ( $\gamma$ )..... 31
- Figura 2 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura (SEM) da estrutura porosa de duas amostras de biocarvão. BCCS e BCPS são amostras de biocarvão oriundas da pirólise da palhada do algodão (*Gossypium herbaceum*) e batata (*Solanum tuberosum*), respectivamente..... 36
- Figura 3 – Efeito do biocarvão no ciclo Si do solo. As setas cor de laranja representam transformações ou processos que aumentam a concentração de Si na solução do solo. Setas azuis representam a transformação ou processos que reduzem a concentração de Si na solução do solo..... 37
- Figura 4 – Localização do ponto de coleta referente ao Argissolo Amarelo Eutrocoeso típico, no Setor Hidráulica da Universidade Federal do Ceará – Fortaleza/Ceará..... 38
- Figura 5 – Procedimento de montagem dos corpos de prova. (A) Adição do material; (B) compactação manual (B); e (C) corpo de prova montado..... 40
- Figura 6 – Procedimento de montagem dos corpos de prova para a obtenção de torrões para a análise de resistência tênsil. Detalhe para a operação da prensa hidráulica (A) e compactação do material no cilindro metálico (B)..... 41
- Figura 7 – Corpos de prova sujeitos a ciclos de umedecimento e secagem. (A) Amostras postas sobre esponjas saturadas com água destilada para umedecimento, por capilaridade, até próximo à capacidade de campo. (B) Amostras postas em bandejas para secagem ao ar..... 42
- Figura 8 – Ilustração da medição da altura das amostras após os ciclos de umedecimento e secagem. Para tanto, foi considerada a média entre a

	altura do cilindro de alumínio ( $h_1$ ), a altura em um ponto intermediário ( $h_2$ ) e a maior altura ( $h_3$ ) de cada amostra.....	44
Figura 9	– Amostra para execução de ensaio de reometria.....	49
Figura 10	– (A) Reômetro modular compacto MCR 102, com amostra posicionada sobre a placa inferior fixa. (B) Corte horizontal na amostra. (C) Corte vertical na amostra. (D) Amostra após o corte vertical e horizontal, com altura e diâmetro ajustados. (E) Amostra ajustada ao mesmo diâmetro da placa superior (25 mm) e ao gap (distância entre as placas) de 4 mm.....	50
Figura 11	– (A) Capacidade de adsorção de Si ( $q_e$ ) em função das doses de biocarvão. (B) Regressão entre $q_e$ e as doses de biocarvão.....	52
Figura 12	– (A) Grau de floculação em função das doses de biocarvão. (B) Regressão entre grau de floculação e as doses de biocarvão.....	54
Figura 13	– (A) Densidade do solo em função das doses de biocarvão. (B) Regressão entre densidade do solo e as doses de biocarvão.....	55
Figura 14	– (A) Porosidade total em função das doses de biocarvão. (B) Regressão entre porosidade total e as doses de biocarvão.....	56
Figura 15	– (A) Macroporosidade em função das doses de biocarvão. (B) Regressão entre macroporosidade e as doses de biocarvão.....	57
Figura 16	– (A) Microporosidade em função das doses de biocarvão. (B) Regressão entre microporosidade e as doses de biocarvão.....	58
Figura 17	– Permeabilidade do solo ao ar ( $K_{ar}$ ) para amostras com umidade equilibrada com os potenciais mátricos de -2, -6, -10, -33 e -100 kPa; nas doses avaliadas.....	59
Figura 18	– Regressão entre permeabilidade do solo ao ar ( $K_{ar}$ ) e as doses de biocarvão para cada potencial mátrico avaliado, a saber: (A) -2 kPa, (B) -6kPa, (C) -10 kPa, (D) -33 kPa, (E) -100 kPa.....	60
Figura 19	– (A) Índice de continuidade de poros $N$ ; (B) $\log M$ ; e (C) $K_I$ em função das doses de biocarvão. Regressão entre $N$ (D), $\log M$ (E), $K_I$ (F) e as doses de biocarvão.....	62
Figura 20	– (A) Porosidade bloqueada ( $\varepsilon_b$ ) em função das doses de biocarvão. 5% de significância. (B) Regressão entre $\varepsilon_b$ e as doses de biocarvão.....	63

Figura 21	– Curva de água no solo (eixo principal) e curva de distribuição de poros por tamanho (eixo secundário) para os tratamentos avaliados. A área alaranjada indica o aumento da macroporosidade nos tratamentos B20 e B40.....	64
Figura 22	– (A) Condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) em função das doses de biocarvão. (B) Regressão entre $K_{sat}$ e as doses de biocarvão....	66
Figura 23	– (A) Resistência à penetração ( $\Psi_m = -33$ kPa) em função das doses de biocarvão. (B) entre resistência à penetração e as doses de biocarvão.....	68
Figura 24	– (A) Resistência tênil em função das doses de biocarvão. (B) Regressão entre resistência tênil e as doses de biocarvão.....	69
Figura 25	– Atributos relacionados à resistência ao cisalhamento: (A) Tensão no final do intervalo viscoelástico linear ( $\tau_{LVE}$ ); (B) Tensão de cisalhamento máxima ( $\tau_{máx}$ ); e Módulo de armazenamento e perda no ponto de escoamento ( $G'G''YP$ ) em função das doses de biocarvão. Regressão entre $\tau_{LVE}$ (D); $\tau_{máx}$ (E); e $G'G''YP$ e as doses de biocarvão.....	71
Figura 26	– Atributos relacionados à viscoelasticidade: (A) Deformação no final do intervalo viscoelástico linear ( $\gamma_{LVE}$ ); (B) Deformação no ponto de escoamento ( $\gamma_{YP}$ ); e (C) Integral Z em função das doses de biocarvão. (B) Regressão entre $\gamma_{LVE}$ (D), $\gamma_{YP}$ (E), Integral Z (F) e as doses de biocarvão.....	73
Figura 27	– Gráfico biplot com variáveis selecionadas.....	75
Figura 28	– Dendrograma.....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Tratamentos e as respectivas doses de biocarvão.....	39
Tabela 2	–	Parâmetros do modelo de van Genuchten (1980) para os tratamentos avaliados.....	64

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	19
<b>2.1</b>	<b>Qualidade do solo: ênfase em atributos físicos</b> .....	19
<i>2.1.1</i>	<i>Densidade do solo</i> .....	20
<i>2.1.2</i>	<i>Porosidade total e distribuição de poros por tamanho</i> .....	21
<i>2.1.3</i>	<i>Permeabilidade do solo ao ar</i> .....	22
<i>2.1.4</i>	<i>Curva de água no solo</i> .....	23
<i>2.1.5</i>	<i>Condutividade hidráulica</i> .....	24
<i>2.1.6</i>	<i>Resistência do solo à penetração</i> .....	25
<i>2.1.7</i>	<i>Resistência tênsil</i> .....	25
<i>2.1.</i>	<i>Reometria</i> .....	27
<b>2.2</b>	<b>Solos com caráter coeso: visão geral</b> .....	31
<b>2.3</b>	<b>Condicionadores de solo: o caso do biocarvão</b> .....	33
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	37
<b>3.1</b>	<b>Coleta de amostras de solo</b> .....	37
<b>3.2</b>	<b>Montagem de corpos de prova, tratamentos e delineamento experimental</b> .....	38
<b>3.3</b>	<b>Atributos analisados</b> .....	41
<i>3.3.1</i>	<i>Capacidade de adsorção de silício</i> .....	41
<i>3.3.2</i>	<i>Grau de flocculação</i> .....	42
<i>3.3.3</i>	<i>Densidade do solo</i> .....	42
<i>3.3.4</i>	<i>Porosidade total, macroporosidade e microporosidade</i> .....	43
<i>3.3.5</i>	<i>Permeabilidade do solo ao ar</i> .....	44
<i>3.3.6</i>	<i>Índices de continuidade de poros</i> .....	44
<i>3.3.7</i>	<i>Curva de água no solo</i> .....	45
<i>3.3.8</i>	<i>Condutividade hidráulica do solo saturado</i> .....	46
<i>3.3.9</i>	<i>Resistência do solo à penetração</i> .....	47
<i>3.3.10</i>	<i>Resistência tênsil</i> .....	47

3.3.11	<i>Reometria</i> .....	48
3.4	Análise de dados.....	50
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	51
4.1	Capacidade de adsorção de Silício .....	51
4.2	Grau de floculação de argilas .....	52
4.3	Densidade do solo.....	54
4.4	Porosidade total, macroporosidade e microporosidade.....	55
4.5	Permeabilidade do solo ao ar.....	57
4.6	Índices de continuidade de poros .....	60
4.7	Curva de água no solo e distribuição de poros por tamanho .....	63
4.8	Condutividade hidráulica do solo saturado .....	65
4.9	Resistência à penetração .....	66
4.10	Resistência tênsil.....	68
4.11	Reometria .....	69
4.12	Análise multivariada .....	73
5	<b>CONCLUSÕES</b> .....	77
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	78
	<b>ANEXO A – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DO SOLO ESTUDADO</b> .....	93
	<b>ANEXO B – CARACTERIZAÇÃO DO SOLO ESTUDADO</b> .....	94
	<b>ANEXO C – CARACTERIZAÇÃO DO BIOCÁRVÃO UTILIZADO</b> .....	95

## 1 INTRODUÇÃO

A qualidade do solo é um estado complexo, advindo da intercessão de seus atributos físicos, químicos e biológicos, que garante que o solo desempenhe funções ligadas à manutenção dos ecossistemas e suporte à vida. Dentre essas funcionalidades do solo, pode-se citar: atuar como meio para o desenvolvimento de plantas e animais; promover a purificação da água e recarga de aquíferos e rios; suportar a carga das fundações de obras de engenharia; participar da ciclagem dos elementos químicos; sequestrar o carbono da atmosfera; e decompor resíduos orgânicos.

Alguns solos apresentam, naturalmente, limitações em termos da sua qualidade física. É o caso dos solos com caráter coeso, que são dotados de horizontes pedogenéticos subsuperficiais adensados, que são muito duros a extremamente duros quando secos e friáveis ou firmes quando úmidos, com o grau de desenvolvimento dos agregados/torrões sendo fraco e/ou maciço. Em adição, a presença do caráter coeso é, geralmente, identificada nos horizontes transicionais AB e BA (entre 30 e 70 cm de profundidade); ou, ainda, em maiores profundidades, nos horizontes Bw e Bt (Santos *et al.*, 2018).

Em relação à sua gênese, uma das principais hipóteses relaciona o adensamento com processos de polimerização e precipitação reversível de compostos silicosos e sílicoaluminosos de baixa cristalinidade, associados a ciclos de umedecimento e secagem.

A respeito de sua ocorrência, os solos com caráter coeso são, geralmente, associados à Formação Barreiras, que consiste em um depósito de sedimentos argilosos, argilo-arenosos e arenosos, que retoma aos períodos Terciário e Quaternário. Essa formação é relacionada à unidade geomorfológica dos Tabuleiros Costeiros, que ocupa porção expressiva do litoral brasileiro, desde o Amapá até o Rio de Janeiro.

Na região Nordeste, uma parcela significativa de sua população vive sobre os Tabuleiros Costeiros. No local, são desenvolvidas atividades agrícolas de elevada importância econômica, com destaque para a fruticultura, pecuária e silvicultura. Entretanto, a presença de horizontes com caráter coeso próximos à superfície pode comprometer o potencial produtivo da região, por afetar negativamente o desenvolvimento das plantas por fatores como elevada resistência mecânica ao crescimento das raízes e comprometimento aos fluxos de água e ar.

Uma estratégia que pode ser utilizada para melhorar a qualidade física de solos com caráter coeso é o uso de condicionadores. Tais materiais, uma vez adicionados ao solo, podem melhorar a sua qualidade e favorecer o desenvolvimento das plantas. Um condicionador que

vem ganhando notoriedade é o biocarvão, obtido pela pirólise de biomassa em atmosfera limitada em oxigênio.

As melhorias que o biocarvão acarreta ao solo são diversas, como aumento na retenção e disponibilidade de água para as plantas, favorecimento da atividade biológica, imobilização de contaminantes, sequestro de carbono etc. O biocarvão também pode atuar como fonte de nutrientes como N, P e K. Portanto, o condicionador modifica o ciclo biogeoquímico desses elementos.

Entretanto, ainda não é claro o efeito do uso do biocarvão sobre o ciclo biogeoquímico de elementos como o silício (Si). Isso reforça a importância de averiguar a relação entre biocarvão e o Si, pois o elemento é o segundo mais abundante na crosta terrestre e tem grande participação na composição dos solos minerais. O que se sabe, até então, é que o biocarvão, uma vez incorporado ao solo, pode adsorver o silício à sua estrutura porosa. O efeito é mais pronunciado em biocarvões oriundos de resíduos com baixo teor de silício, que podem atuar como dreno do elemento químico no solo.

Dessa forma, presume-se que biocarvões com baixo teor de silício podem adsorver o elemento da solução e amenizar as restrições físicas que os solos com caráter coeso impõem ao desenvolvimento vegetal. Diversas plantas cultivadas na região Nordeste, tidas como não acumuladoras de silício, podem fornecer biomassa para a produção de biocarvões que atendam esse requisito. Merece destaque a cultura do cajueiro, cuja produção nacional é concentrada na região, facilitando o acesso à biomassa a ser utilizada para a produção do condicionador.

Diante do exposto, a hipótese deste trabalho foi que há dose de biocarvão oriundo da pirólise de resíduos do processamento do caju que, além de favorecer a floculação e agregação das partículas do solo, otimiza a adsorção de silício e, por consequência, reduz a coesão e melhora a qualidade física de horizontes com caráter coeso. Assim, objetivou-se: 1) avaliar a capacidade de adsorção de Si do solo após mistura com o biocarvão, grau de floculação, densidade do solo, porosidade, permeabilidade do solo ao ar, continuidade de poros, curva de retenção de água no solo, condutividade hidráulica, resistência do solo à penetração, resistência tênsil, deformação no final do intervalo viscoelástico linear, tensão de cisalhamento no final do intervalo viscoelástico linear, tensão de cisalhamento máxima, deformação no ponto de escoamento, módulo de armazenamento e perda no ponto de escoamento, e integral Z; e 2) identificar a dose de biocarvão mais efetiva na melhoria da qualidade física de solos com caráter coeso.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Qualidade do solo: ênfase em atributos físicos

O termo “qualidade do solo” faz menção à sua capacidade, como ente integrante da biosfera, em desempenhar diferentes funções dentro dos ecossistemas naturais ou manejados (Doran; Parkink, 1994; Larson; Pierce, 1991). Dentre tais funções, pode-se citar: sustentar o desenvolvimento de plantas e animais; manter ou melhorar a qualidade da água; oferecer suporte mecânico às habitações; favorecer a manutenção da saúde humana, vegetal e animal; sequestrar o carbono atmosférico; servir de habitat a diversos tipos de organismos; atuar na ciclagem de nutrientes e atuar na decomposição de resíduos orgânicos (Seifu; Elias, 2019; Lal, 2016; Karlen *et al.*, 1997). Ressalta-se que as funcionalidades do solo advêm da intercessão entre seus atributos físicos, químicos e biológicos (Novák; Vopravil; Lagová, 2010).

A qualidade do solo é relacionada à sua estrutura. Endente-se por estrutura o arranjo entre as partículas primárias do solo (areia, silte e argila), quer estejam ou não agregadas, incluindo o espaço poroso advindo desse arranjo (Amaro Filho; Assis Júnior; Mota, 2008).

Os agregados são formados por dois processos: aproximação das partículas sólidas (pela floculação das argilas, por exemplo) e cimentação (união estável das partículas) (Lal; Shukla, 2004). Uma das formas de avaliar a agregação é pelo grau de floculação, que consiste na razão entre a argila floculada (argila total – dispersa em água) e a argila total. O grau de floculação é uma medida da quantidade de argila floculada (Souza *et al.*, 2018).

Os poros formados entre agregados são responsáveis pelos fluxos de água e ar. Já os poros internos aos agregados são responsáveis pela retenção de água (Reichardt; Timm, 2022). Dessa forma, a estrutura possui relação direta e indireta com as funcionalidades do solo nos ecossistemas e, por consequência, com a própria qualidade do solo. Portanto, para garantir a manutenção da qualidade do solo, é imprescindível que a sua estrutura seja constantemente avaliada (Stefanoski *et al.*, 2013). Uma das dificuldades dessa avaliação é o fato de que a qualidade do solo é uma condição complexa e não pode ser mensurada de maneira direta. Entretanto, esse estado pode ser avaliado com base em atributos do solo que atuam como indicadores da sua qualidade (Islam; Weil, 2000).

Do ponto de vista físico, merecem destaque indicadores relacionados a fatores que afetam diretamente o desenvolvimento das plantas, a saber: água, oxigênio, temperatura e resistência mecânica ao crescimento das raízes (Pedrotti; Mello Júnior, 2009). Assim, diversos indicadores quantitativos têm sido empregados na avaliação da qualidade física do solo, tais

como: densidade do solo; porosidade total; distribuição de poros por tamanho; permeabilidade do solo ao ar, condutividade hidráulica, resistência do solo à penetração; e resistência tênzil; (Cherubin; Tormena; Karlen, 2017; Arshad; Martin, 2002).

A curva de água no solo também merece destaque como indicador da qualidade física do solo (Stefanoski *et al.*, 2013). Além de nortear o manejo da água na agricultura, modificações na estrutura do solo e, por consequência, na distribuição de poros por tamanho, implicam em mudanças no formato dessa curva (Nascimento *et al.*, 2018a).

A reometria também é uma interessante ferramenta na avaliação da qualidade física do solo, pois permite compreender as propriedades plásticas e elásticas (viscosas) de amostras de solo com a aplicação de tensões transitórias, de modo a inferir sobre a sua qualidade microestrutural (Holthusen *et al.*, 2019).

Alguns solos apresentam, naturalmente, limitações em termos da sua qualidade física. É o caso dos solos com caráter coeso, que são dotados de horizontes pedogenéticos subsuperficiais adensados, que são muito duros a extremamente duros quando secos e friáveis ou firmes quando úmidos, com o grau de desenvolvimento dos agregados/torrões sendo fraco e/ou maciço (Santos *et al.*, 2018). Essas restrições de natureza física se devem a fatores como aumento da densidade do solo e da resistência à penetração de raízes; e diminuição da porosidade total, com conseqüente comprometimento dos fluxos de água e ar (Giarola *et al.*, 2001).

### **2.1.1 Densidade do solo**

Numericamente, a densidade do solo pode ser calculada pela razão entre a massa das partículas e o volume do solo (Blake; Hartage, 1986a). Esse atributo é um indicador chave da qualidade do solo (Casanova *et al.*, 2016), pois permite inferir sobre o seu adensamento/compactação ao longo do tempo (Figueiredo; Dias Júnior; Ferreira, 2000).

A densidade do solo guarda relação inversa com a porosidade do solo e, por consequência, influencia diversos outros atributos, como: umidade volumétrica; condutividade hidráulica; taxa de infiltração; condutividade térmica; capacidade volumétrica de calor; e resistência à penetração (Al-Shammary *et al.*, 2018; Keller; Håkansson, 2010). Desse modo, a densidade do solo permite inferir sobre os impactos que as estratégias de manejo impõem ao solo, bem como pode auxiliar na escolha das práticas conservacionistas a serem implementadas nos ecossistemas manejados (Souza *et al.*, 2012).

A densidade do solo depende diretamente do teor e tipo de matéria orgânica; bem como da proporção relativa, densidade, tipo e empacotamento das partículas minerais do solo (NRCS, 2014). No que diz respeito à matéria orgânica, além da quantidade, o tipo também exerce papel determinante sobre a densidade do solo. A matéria orgânica humificada, que corresponde ao produto estável, nos estágios finais do processo de decomposição, além da elevada superfície específica, também exibe cargas elétricas de superfície. Dessa forma, esse tipo de matéria orgânica, muito ativa no solo, atua na cimentação de partículas e, conseqüentemente, na formação de agregados, o que modifica a porosidade e, por fim, a densidade do solo. Já a matéria orgânica leve, em que ainda se reconhece o tecido vegetal de origem, possui densidade menor do que as partículas minerais do solo. Dessa forma, esse tipo de matéria orgânica modifica a densidade do solo ao ocupar espaços que antes seriam ocupados pelas partículas minerais (Bauer, 1974).

Vale salientar, também, que o tipo de argila influencia a densidade do solo. Em solos com predomínio de caulinita, com estrutura cristalina bem definida, as lâminas do mineral podem ajustar-se em um arranjo face-a-face, o que diminui a porosidade e culmina em aumento da densidade do solo (Lima Neto *et al.*, 2010; Giarola *et al.*, 2009). É importante mencionar que, no caso dessas argilas 1:1, bordos com cargas positivas podem ser atraídos pela face negativamente carregadas de outras partículas de caulinita, em um arranjo conhecido como “casa de cartas”, o que favorece a formação de agregados e a diminuição da densidade do solo devido ao incremento na porosidade (HilleL, 2003). Por outro lado, em solos com predomínio de argilas expansivas do tipo 2:1, como montmorilonita, a expansão e contração gerada pelas variações de umidade implica variações de volume e, por conseqüência, de densidade (Sarboukh; Henidy; Arslan, 2014).

### ***2.1.2 Porosidade total e distribuição de poros por tamanho***

A porosidade total nada mais é do que a fração de volume do solo que não é ocupada por material sólido, i.e., trata-se de um número que indica o espaço disponível para fluxos de água e ar; bem como para o armazenamento de água (Flint; Flint, 2002).

A porosidade de um solo depende de vários fatores, incluindo: (1) densidade do solo; (2) granulometria; (3) grau de seleção das partículas; (4) natureza mineralógica das partículas; (5) forma das partículas; e (6) ação de agentes biológicos (Nimmo, 2004).

O solo é composto de partículas sólidas de diferentes tamanhos, geralmente agregadas pela ação cimentante da matéria orgânica, óxidos e partículas de argila eletricamente

carregadas. As lacunas entre as partículas e os agregados formam uma complexa rede de poros de vários tamanhos (Hao *et al.*, 2008).

Richards (1965) dividiu os poros do solo em macroporos (diâmetro  $\geq 50 \mu\text{m}$ ) e microporos (diâmetro  $< 50 \mu\text{m}$ ), cuja função é, respectivamente, permitir o fluxo de água e de ar; e armazenar água (Reichardt; Timm, 2022). Para Kiehl (1979), a razão ideal entre macroporos e microporos, que confere ao solo boa condição de fluxo de água e gases, bem como boa retenção de água, é de 1:2. A análise anterior é simplista, uma vez que os fenômenos de difusão gasosa também dependem da continuidade da rede porosa (Silveira Júnior *et al.*, 2012).

Práticas agrícolas que envolvem o revolvimento do solo e utilização de maquinaria pesada podem implicar em diminuição da porosidade e aumento da densidade do solo. Por outro lado, práticas que incorporam matéria orgânica ao solo favorecem a formação de agregados e o aumento da porosidade. Assim, a porosidade é um atributo muito sensível ao manejo a qual o solo é sujeito e permite interferir sobre as alterações antropogênicas impostas às terras (Hao *et al.*, 2008).

### **2.1.3 Permeabilidade do solo ao ar**

A aeração do solo é fundamental para a sua funcionalidade nos ecossistemas, sendo função de dois processos: difusão e convecção (Reichardt; Timm, 2022). A difusão é o movimento de moléculas de gás a favor de um gradiente de concentração, já a convecção ocorre a favor de um gradiente de pressão total (Ball; Schjønning; 2002). A habilidade do solo em conduzir o ar pelo processo de convecção chama-se permeabilidade ao ar –  $K_{ar}$  (Kirkham, 1947). O atributo tem elevada correlação com a geometria porosa do solo, especialmente com os macroporos. Dessa forma, os valores de  $K_{ar}$  variam de acordo com a umidade do solo e com alterações impostas à sua estrutura (Cavaliere *et al.*, 2009).

Para McQueen e Shepherd (2002), o valor limítrofe de  $K_{ar}$  que possibilita um correto desenvolvimento da maioria das plantas é de  $1 \mu\text{m}^2$  de área disponível ao fluxo de ar. Isso garante que o  $\text{CO}_2$  seja removido do entorno do sistema radicular, enquanto o suprimento de  $\text{O}_2$  seja mantido, já que a maioria dos vegetais não consegue translocar o  $\text{O}_2$  das folhas para o sistema radicular na taxa requerida pelo processo respiratório (Nusier; Rousan, 2008).

Dessa forma, a permeabilidade do solo ao ar consiste em um robusto indicador da qualidade física do solo, visto que influencia no desenvolvimento das plantas e dos demais

organismos que habitam o solo. O atributo pode ser estimado pela lei de Darcy, modificada para mensurar o fluxo de gás, no solo, em condição de pressão decrescente (Silva *et al.*, 2009).

Para que o solo seja um bom condutor de ar, é necessário que sua rede porosa seja contínua, isto é, que um maior número de poros participe do processo de aeração (Silveira Júnior *et al.*, 2012). Alencar *et al.* (2018) descrevem a continuidade da rede porosa do solo como sendo a razão entre a permeabilidade do solo ao ar e a porosidade de aeração, consistindo num índice que permite avaliar a qualidade estrutural do solo.

#### 2.1.4 Curva de água no solo

A curva de água no solo (CAS) é outro indicador sensível a modificações na estrutura do solo. Essa curva consiste na representação gráfica da relação entre a umidade volumétrica ( $\theta$ ) e o potencial mátrico ( $\Psi_m$ ), sendo expressa, do ponto de vista matemático, por  $\theta = f(\Psi_m)$  (Almeida *et al.*, 2015).

A CAS oferece subsídio para a determinação da umidade do solo, uma vez que se disponha dos valores de potencial mátrico, norteando o manejo da irrigação (Costa *et al.*, 2008). Outrossim, essa curva funciona como um indicador da qualidade estrutural do solo, pois alterações na geometria porosa implicam mudanças no seu formato (Nascimento *et al.*, 2018a). Portanto, a CAS pode ser utilizada para avaliar o impacto que as práticas de manejo acarretam ao solo (Machado *et al.*, 2008).

Em posse de um conjunto de pares de dados de  $\theta$  e  $\Psi_m$ , é possível plotar manualmente a CAS. Entretanto, geralmente opta-se por descrever a relação entre as duas variáveis utilizando uma equação empírica, com obtenção dos parâmetros por ajuste não linear (Nascimento *et al.*, 2018b). O modelo proposto por van Genuchten (1980), com cinco parâmetros empíricos ( $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$ ), é um dos mais utilizados para a descrição da CAS, pois ajusta-se bem aos dados advindos de uma grande variedade de solos (Xiang-Wei *et al.*, 2010).

No que diz respeito aos parâmetros da equação de van Genuchten (1980), o  $\theta_s$  corresponde à umidade de saturação, i.e., quando todos os poros do solo estão preenchidos por água. O parâmetro  $\theta_r$  corresponde à umidade residual, ou seja, àquela em que  $d\theta/d\Psi_m$  é zero. Já o parâmetro  $\alpha$  não tem significado físico aparente e é tido, apenas, como um “escalador” do potencial mátrico – já que multiplica  $\Psi_m$  na equação (van Lier; Pinheiro, 2018).

Quanto aos demais parâmetros, Nascimento *et al.* (2018b) relatam que  $m$  e  $n$  são relacionados ao formato da CAS. Os autores discorrem que o parâmetro  $n$ , especialmente, é um

índice de distribuição de poros por tamanho relacionado à inclinação dessa curva. Dessa forma, alterações na rede porosa do solo implicam alterações em  $n$ , principalmente no intervalo de tensões desde a saturação até o ponto de inflexão da CAS (Alencar *et al.*, 2019).

### **2.1.5 Condutividade hidráulica**

Outro indicador da qualidade física do solo que merece destaque é a condutividade hidráulica. Em 1856, o Engenheiro Hidráulico Henry Darcy, em experimento com colunas saturadas de areia, constatou que o volume de água que flui através de um meio poroso, por unidade de tempo e área, é proporcional ao gradiente de energia potencial total da água. Para inserir o sinal de igualdade na assertiva matemática anteriormente citada, pela primeira vez foi definida a constante de proporcionalidade –  $K$ , ou condutividade hidráulica do solo saturado (Libardi, 2018). Dessa forma, a condutividade hidráulica é uma medida da permissão que o solo oferece ao fluxo de água (Reichardt; Timm, 2022).

Mais tarde, Buckingham (1907) estudou o movimento da água no solo não saturado e obteve a equação de Darcy-Buckingham. A equação considera que o gradiente do que na época foi chamado de “potencial capilar” é o responsável pela força motriz da água no solo não saturado (Liu, 2017). Passados 24 anos, Richards (1931) relacionou a equação da continuidade com a equação de Darcy-Buckingham. O autor obteve a equação geral que governa o movimento da água no solo não saturado, conhecida como equação de Richards, que relaciona a variação temporal da umidade com a condutividade hidráulica e gradiente de potencial total.

Em condição de solo saturado a condutividade hidráulica é máxima, uma vez que todos os poros estão preenchidos com água. Desse modo, é máxima a área disponível ao fluxo. Já no solo não saturado, alguns poros, preenchidos com ar, não contribuem com o fluxo, portanto, a condutividade hidráulica tende a diminuir (Almeida *et al.*, 2017).

A condutividade hidráulica tem papel chave no ciclo hidrológico, pois influencia no processo de recarga de aquíferos e no abastecimento dos rios via fluxos subsuperficiais e subterrâneos de água (Chow; Maidment; Mays, 2013). Do ponto de vista agrícola, o atributo se relaciona diretamente com os processos de infiltração e drenagem de água, portanto, tem grande influência na produtividade das culturas e na preservação do solo e do ambiente (Gonçalves; Libardi, 2013).

### **2.1.6 Resistência do solo à penetração**

A resistência à penetração (RP) é um atributo amplamente utilizado na avaliação da qualidade física do solo, pois influencia diretamente o crescimento das raízes e, por consequência, o desenvolvimento e produtividade das plantas (Valadão Júnior *et al.*, 2014). Dessarte, a RP consiste num indicador numérico que permite inferir sobre a compactação/adensamento do solo e seus efeitos nas diferentes fases do ciclo de vida das plantas (Tavares Filho *et al.*, 2001). Valores de RP acima de 2,0 MPa são tidos como limitantes ao alongamento do sistema radicular da maioria das plantas cultivadas (Cortez *et al.*, 2018; Tormena; Silva; Libardi, 1998; Silva; Kay, Perfect, 1994).

Existe forte correlação entre a RP e outros atributos do solo, a saber: densidade do solo, umidade e potencial mátrico (Busscher *et al.*, 1997). Dessa forma, tais atributos podem auxiliar no entendimento da variação espacial da RP (Silva; Bianchini; Cunha, 2016).

Aumento da densidade do solo ao longo do tempo é indicativo da ocorrência de compactação/adensamento. Consequentemente, há redução da porosidade do solo e aumento do gasto energético e impedimento físico para o crescimento das raízes. Isso ocorre porque o sistema radicular das plantas se desenvolve mais facilmente pelos poros do solo, especificamente, pelos macroporos (Hirt; Mckenzie; Tisdall, 2005).

Já em relação à umidade, quanto menor o seu valor, maior será a RP em decorrência do aumento das forças de coesão entre as partículas do sólidas do solo (Costa *et al.*, 2012). Conforme a umidade do solo diminui, o potencial mátrico tende a se tornar cada vez mais negativo. Assim, Bengough *et al.* (2011) constataram que valores de RP iguais a 2 MPa, associados a potenciais mátricos menores do que  $-0,5$  MPa, resultaram em diminuição da taxa de alongação do sistema radicular da cultura do milho pela metade. Os autores ainda afirmam que no potencial mátrico de  $-1,5$  MPa praticamente nenhum desenvolvimento radicular é observado, não como efeito da RP, mas pelo fato das plantas não conseguirem mais absorver água, já que o valor corresponde ao ponto de murcha permanente.

### **2.1.7 Resistência tênsil**

A qualidade estrutural do solo também pode ser avaliada por meio da resistência tênsil, que consiste na força necessária – por unidade de área – para romper seus agregados/torrões (Dexter; Kroesbergen, 1985).

A resistência tênsil de agregados/torrões pode ser avaliada por intermédio de métodos diretos e indiretos. Nos testes diretos, a amostra é dividida em duas partes pela aplicação direta de uma tração. Esses métodos são os menos utilizados, pois existe a dificuldade operacional de garantir que o agregado/torrão esteja bem aderido à extremidade superior e inferior do equipamento, para que a tração seja corretamente aplicada quando do afastamento desses componentes. Já nos métodos indiretos, a tração não é aplicada diretamente. Em vez disso, uma força compressiva é aplicada ao longo da superfície de fratura do agregado/torrão; o que dá origem a uma tensão de ruptura no interior do espécime. Nos testes indiretos com agregados/torrões, a força é aplicada utilizando duas placas paralelas (Dexter; Watts, 2000).

Uma vez que o comportamento mecânico do solo, do ponto de vista macroscópico, depende das propriedades físicas de seus agregados/torrões (Ferreira *et al.*, 2011); a resistência tênsil pode ser utilizada para inferir sobre os efeitos dos diversos usos e manejos do solo sobre a sua qualidade (Oliveira *et al.*, 2020). Por exemplo, a ruptura e desagregação de massas de solo, que ocorre durante ciclos de umedecimento e secagem ou durante as operações de preparo da terra, é fortemente relacionada à resistência tênsil (Dexter; Watts, 2000).

A resistência tênsil é influenciada por fatores como umidade; granulometria; tipo de argila predominante; grau de dispersão das argilas; grau de seleção da fração areia; conteúdo e tipo de matéria orgânica; e cimentação por material silicoso amorfo (Mota *et al.*, 2021; Araújo *et al.*, 2018; Reis *et al.*, 2014; García *et al.*, 2012; Tormena; Fildalski; Rossi Júnior, 2008; Chartres, Kirby, Raupach, 1990).

De maneira geral, quando maior a umidade do solo menor é a resistência tênsil. Isso ocorre devido ao aumento das forças de adesão (sólido-líquido) em detrimento das forças de coesão (sólido-sólido) (García *et al.*, 2012).

O tipo e quantidade de argila influenciam diretamente diversos atributos do solo, como capacidade de troca de cátions (CTC); retenção de água; conteúdo de matéria orgânica e estabilidade de agregados (Graham; O'gen, 2010), modificando a resistência tênsil. Em adição, de modo geral, quando maior a quantidade e atividade de argila, maior é a resistência tênsil devido o favorecimento aos processos de floculação e cimentação, com conseqüente gênese de agregados estáveis (Ávila, Leiva, Madriñán, 2015). O grau de dispersão das argilas também é importante, já que, uma vez dispersas, essas partículas atuam obstruindo poros e aumentando o contato entre as partículas maiores do solo (areia e silte), com conseqüente aumento na resistência tênsil (Araújo *et al.*, 2018).

Araújo *et al.* (2018) também relatam a existência de uma relação entre a resistência tênsil e o grau de seleção da fração areia, de modo que, devido a presença de diferentes classes

de tamanho de areias, ocorre um empacotamento mais denso dessas partículas com um correspondente aumento da tensão de ruptura dos agregados/torrões do solo.

Cita-se, em adição, a influência da matéria orgânica sobre a resistência tênsil. Para Tormena, Fidalski e Rossi Júnior (2008), a matéria orgânica pode atuar diminuindo a resistência tênsil por favorecer um aumento da porosidade dos agregados/torrões e diminuição da densidade do solo. Por outro lado, quando mais humificada for a matéria orgânica, menor será o efeito de redução da resistência tênsil devido ao aumento no número e na força de ligação entre as partículas.

Adicionalmente, Chartres, Kirby e Raupach (1990) citam que a cimentação por sílica amorfa pode colaborar com o aumento da resistência tênsil. Nesse sentido, Mota *et al.* (2021) afirmam que a resistência tênsil possui correlação direta com a coesão em horizontes com caráter coeso que, por sua vez, está associada à compostos silicosos e aluminosos de baixa cristalinidade.

Por fim, como exemplo de prática de manejo que pode modificar a resistência tênsil, cita-se a aplicação de biocarvão como condicionador de solo. Uma vez adicionado ao solo, o biocarvão atua favorecendo a formação de agregados e a estruturação do solo, com um consequente aumento na porosidade total e redução na densidade do solo e na resistência tênsil (Sokołowska *et al.*, 2020; Ahmed; Raghavan, 2017).

### **2.1.8 Reometria**

A qualidade do solo pode ser avaliada, de um ponto de vista microestrutural, por intermédio da reologia. A reologia é a ciência que avalia o comportamento mecânico de materiais quando sujeitos a estresses advindos do meio externo (Zhu; Zhu; Yu, 2017). Basicamente, a reologia busca estabelecer uma relação entre o fluxo e a deformação de um material com a sua estrutura; bem como elucidar o processo de deformação e fluxo de materiais que não podem ser descritos pela mecânica de fluidos clássica. A mensuração de parâmetros reológicos é denominada reometria (Markgraf, 2011).

Independente da complexidade de um material, sua estrutura pode ser avaliada, matematicamente, pela relação entre a tensão aplicada e a deformação e o fluxo gerados ao longo do tempo (Oliveira *et al.*, 2000). Essa relação é, geralmente, expressa em gráficos denominados “curvas de fluxo” em função da viscosidade e da tensão de cisalhamento do material (Melo, 2014).

O solo, após a ruptura, comporta-se como um fluido não newtoniano. Isso ocorre porque a relação entre a tensão aplicada e a deformação não é linear, pois as partículas sólidas modificam a sua viscosidade (Melo, 2014). Isso confere ao solo características complexas no que diz respeito à sua ruptura, exibindo tanto propriedades plásticas quanto elásticas (Ghezzehei; Or, 2001).

A estrutura do solo, especialmente em escala microscópica, é dependente das interações eletrostáticas entre as partículas, bem como pela presença de agentes de cimentação (Markgraf; Horn; Peth, 2006). Dessa forma, esses fatores regem os processos de deformação e fluxo de uma massa de solo (Ghezzehei; Or, 2001). Portanto, a deformação do solo frente a estresses mecânicos, na microescala, é dependente de suas propriedades físicas e químicas (Markgraf; Horn, 2009). Nesse contexto, a reometria permite avaliar as propriedades plásticas e elásticas (viscosas) de amostras de solo, com a aplicação de tensões transitórias, e permite inferir sobre a sua qualidade microestrutural (Holthusen *et al.*, 2019).

Ghezzehei e Or (2001) citam que ensaios oscilatórios são adequados para a avaliação de atributos reológicos de materiais com propriedades viscoelásticas, tais como o solo. Nesse tipo de ensaio, uma amostra de solo é posta em um equipamento que possui duas placas paralelas. A placa inferior é fixa e a superior, móvel, executa um movimento rotatório e oscilatório. A oscilação da placa superior advém do seu movimento alternado para a esquerda e para a direita, seguindo uma função senoidal ao longo do tempo, com ângulo de deflexão inicial conhecido ( $\phi$ , °), de modo a gerar estresses de resistência ou deformação na amostra (Pétille *et al.*, 2018).

Dentre os testes oscilatórios, o teste de varredura de amplitude (*Amplitude Sweep Test - AST*) é um dos mais utilizados, pois engloba uma amplitude variável de tensão de cisalhamento e deformação que pode ser controlada (Markgraf; Horn; Peth, 2006).

Em ensaios oscilatórios, a tensão de cisalhamento ( $\tau$ , Pa) resulta da força requerida para gerar uma deformação ao longo da superfície de cisalhamento ( $\gamma$ , %). A deformação ( $\gamma$ , %) é calculada utilizando a Equação (1), enquanto a tensão de cisalhamento ( $\tau$ , Pa) é calculada utilizando a Equação (2) (Mezger, 2014; Holthusen; Peth; Horn, 2010),

$$\gamma = \frac{s}{h} 100 \quad , \quad (1)$$

$$\tau = \frac{2M}{\pi r^3} \quad , \quad (2)$$

em que  $\gamma$  é a deformação (%);  $s$  é a distância de deflexão (m);  $h$  é a distância entre as placas (m);  $\tau$  é a tensão de cisalhamento (Pa);  $M$  é o torque necessário para que ocorra a deformação (N); e  $r$  é o raio da placa superior (m).

Segundo Pértile *et al.* (2018), para quantificar atributos reológicos do solo por ensaios oscilatórios, alguns parâmetros da mecânica clássica são modificados. Ainda segundo os autores, o módulo de cisalhamento ( $G$ ), oriundo da lei de Hooke, deve ser modificado para a condição de tensão oscilatória, dando origem a um módulo de cisalhamento complexo ( $G^*$ , Pa), conforme consta na Equação (3),

$$G^* = \frac{\tau_A}{\gamma_A} , \quad (3)$$

em que  $G^*$  é o módulo de cisalhamento complexo (Pa);  $\tau_A$  a amplitude da tensão de cisalhamento  $\tau$  (Pa); e  $\gamma_A$  é amplitude de deformação  $\gamma$  (%).

O módulo de cisalhamento complexo ( $G^*$ , Pa), é dividido em um módulo de armazenamento ( $G'$ , Pa) (Equação 4) e um módulo de perda ( $G''$ , Pa) (Equação 5). O módulo de armazenamento ( $G'$ , Pa) representa o componente elástico de um material, e relaciona-se com a fração de energia armazenada e posteriormente liberada pelo corpo; enquanto o módulo de perda ( $G''$ , Pa) representa o componente viscoso de um material, e relaciona-se com uma fração imaginária de energia que é perdida, permanentemente, durante o escoamento (Mezger, 2014; Holthusen; Peth; Horn, 2010),

$$G' = \frac{\tau_A}{\gamma_A} \cos \delta , \quad (4)$$

$$G'' = \frac{\tau_A}{\gamma_A} \sen \delta , \quad (5)$$

em que  $G'$  é o módulo de armazenamento viscoelástico (Pa);  $G''$  é o módulo de perda (Pa);  $\tau_A$  a amplitude da tensão de cisalhamento  $\tau$  (Pa);  $\gamma_A$  é amplitude de deformação  $\gamma$  (%); e  $\delta$  é o ângulo de mudança de fase, obtido pelo deslocamento da curva de resposta  $\tau$  em relação à curva controlada de  $\gamma$ . Para substâncias viscoelásticas como o solo,  $0 < \delta < 90^\circ$ .

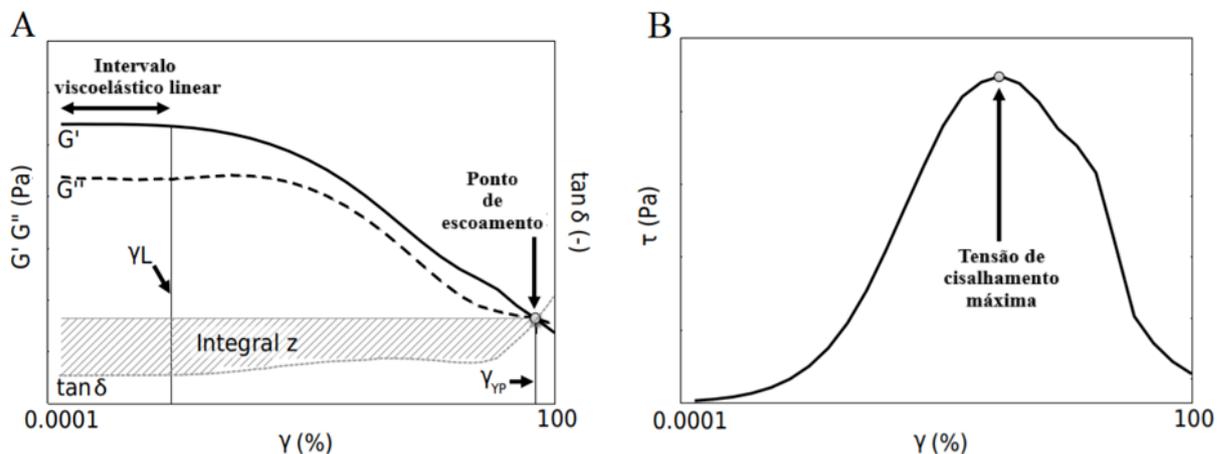
A razão entre  $G''$  e  $G'$  resulta na tangente de  $\delta$  (Equação 6), chamada de “fator de perda”, pois se relaciona com a quantidade de energia que é perdida do sistema com a deformação. Quando  $\delta < 1$  ( $G' > G''$ ), o componente elástico predomina; e quando  $\delta > 1$  ( $G' < G''$ ), o componente viscoso é predominante (Markgraf; Horn; Peth, 2006):

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (6)$$

em que  $\tan \delta$  é o fator de perda (-);  $G''$  é o módulo de perda (Pa); e  $G'$  é o módulo de armazenamento viscoelástico (Pa).

Para obtenção dos demais atributos reológicos em um teste de varredura de amplitude, os valores  $G'$ ,  $G''$ ,  $\tan \delta$  e  $\tau$  são representados, graficamente, em função de  $\gamma$ , conforme está exemplificado na Figura 1.

Figura 1 – Ilustração dos parâmetros reológicos obtidos em um teste de varredura de amplitude (*Amplitude Sweep Test - AST*). (A) Módulo de armazenamento viscoelástico ( $G'$ ), módulo de perda ( $G''$ ) e fator de perda ( $\tan \delta$ ) em função da deformação ( $\gamma$ ) (Escala logarítmica). (B) Tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) em função da deformação ( $\gamma$ ).



Fonte: Adaptado de Pértile *et al.*, 2016.

Em posse das curvas de  $G'$  e  $G''$  em função de  $\gamma$  (Figura 1A), é determinado o intervalo viscoelástico linear (*Linear Viscoelastic Range - LVE*). Esse intervalo é definido como a região da curva em que  $G'$  e  $G''$  são constantes e ainda não foi atingido um valor limítrofe de deformação ( $\gamma_{LVE}$ , %) que sinaliza a ocorrência de alterações irreversíveis na estrutura da amostra. Também é possível obter a respectiva tensão ( $\tau_{LVE}$ , Pa) associada ao valor de  $\gamma_{LVE}$  (%) (Mezger, 2014; Holthusen; Peth; Horn, 2010).

Em adição, considerando a interseção das curvas de  $G'$  e  $G''$  em função de  $\gamma$  (Figura 1A), pode-se calcular o “ponto de escoamento” (*Yield Point - YP*), em que  $\tan \delta = 1$  e  $G' = G''$  ( $G'G''_{YP}$ ), ou seja, o componente viscoso e plástico são iguais. Esse valor ocorre no intervalo viscoelástico não linear e define a deformação crítica ( $\gamma_{YP}$ , %) a partir da qual o componente viscoso predomina e a amostra flui irreversivelmente. Também é possível obter a respectiva

tensão ( $\tau_{YP}$ , Pa) associada ao valor de  $\gamma_{YP}$  (%) (Holthusen *et al.*, 2019; Pértile *et al.*, 2018; Pértile *et al.*, 2016; Mezger, 2014; Holthusen; Peth; Horn, 2010; Markgraf; Horn; Peth, 2006).

Por fim, ainda em posse das curvas de  $G'$  e  $G''$  em função de  $\gamma$  (Figura 1A), pode-se obter os valores da *integral z* (Figura 1A) e a da tensão de cisalhamento máxima ( $\tau_{max}$ , Pa) (Figura 1B). A *integral z* é calculada como a área definida, no limite inferior, pela curva de  $\tan \delta$  e, no limite superior, pela linha paralela ao eixo das abscissas, à altura de YP ( $\tan \delta = 1$ ). Quanto maior o valor *z* integral, maior a proporção de deformação elástica e maior a rigidez do solo. Já o valor de  $\tau_{max}$  é obtido observando o maior valor de  $\tau$  (Pa) de cada ensaio. O valor de  $\tau_{max}$  indica a máxima tensão de cisalhamento ( $\tau$ , Pa) suportada por uma amostra de solo (Pértile *et al.*, 2018; Mezger, 2014; Markgraf, 2011; Holthusen; Peth; Horn, 2010; Markgraf; Horn; Peth, 2006).

## 2.2 Solos com caráter coeso: visão geral

Os solos com caráter coeso são aqueles dotados de horizontes pedogenéticos subsuperficiais adensados, que são muito duros a extremamente duros quando secos e friáveis ou firmes quando úmidos (Santos *et al.*, 2018). Os solos com caráter coeso são, no geral, relacionados à Formação Barreiras – depósito sedimentar datado do período Terciário/Quaternário e formado por materiais argilosos, argilo-arenosos e arenosos, usualmente muito meteorizados (Giarola; Silva, 2002; Jacomine, 1996). Essa formação é associada à unidade geomorfológica dos Tabuleiros Costeiros, que ocupa ampla faixa do litoral brasileiro, desde o Amapá até o Rio de Janeiro (Jacomine, 2001). No geral, os solos desenvolvidos dos sedimentos da Formação Barreiras possuem baixa fertilidade natural; baixo teor de ferro; predomínio de caulinita na fração argila e quartzo na fração areia (Ribeiro, 2001; Rezende, 2000).

A literatura relata a ocorrência do caráter coeso na classe dos Latossolos Amarelos, Argissolos Amarelos e Argissolos Acinzentados (Lima *et al.*, 2004; Jacomine, 2001). Entretanto, Corrêa *et al.* (2008) relataram a ocorrência desse atributo em solos vermelhos nos estados da Bahia, Espírito Santo e Minas Gerais. Nunes *et al.* (2019), ao estudarem uma topossequência no litoral norte do estado da Bahia, concluíram que a gênese dos solos vermelhos encontrados no local, que se deu a partir de sedimentos da Formação Barreiras, foi acompanhada pela conformação de horizontes com caráter coeso, que se tornaram mais endurecidos e espessos com a evolução da cobertura pedológica para amarelo.

Ramos *et al.* (2013), ao avaliarem atributos físicos de solos em duas topossequências, no município de Itaboraí, Rio de Janeiro, concluíram que solos originados de sedimentos da Formação Macacu, datada do período Terciário, possuem “tendência” de expressão de caráter coeso. Em adição, Curcio *et al.* (2000) também constataram forte coesão no horizonte BA de um Argissolo Vermelho-Amarelo no município de Pinheiro Machado, no Rio Grande do Sul. Ainda, segundo os autores, a análise mineralógica da fração argila desse solo é bastante semelhante a observada em solos oriundos dos sedimentos da Formação Barreiras.

É importante mencionar que os solos com caráter coeso guardam semelhanças com os chamados *hardsetting*, encontrados na Austrália, África e em outras regiões semiáridas (Giarola *et al.*, 2001). O atributo *hardsetting* caracteriza solos com horizontes cujo material se esboroa com facilidade quando úmido e, quando seco, apresenta-se endurecido e com aspecto maciço (Mullins, 1999).

Em termos de posição no solo, a presença do caráter coeso é, geralmente, identificada nos horizontes transicionais AB e BA (entre 30 e 70 cm de profundidade); ou, ainda, em maiores profundidades, nos horizontes Bw e Bt (Santos *et al.*, 2018). Além das características já citadas quanto à sua consistência, os horizontes com caráter coeso possuem, naturalmente, fraca organização estrutural e estrutura maciça (Lima Neto *et al.*, 2009).

No que diz respeito ao Nordeste, a importância do estudo desses solos reside no fato de que cerca de 50% da população da região vive sobre os Tabuleiros Costeiros (Fonsêca *et al.*, 2007). No local, são desenvolvidas atividades agrícolas de importância econômica, como cultivos expressivos de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), coco (*Cocos nucifera*), mandioca (*Manihot esculenta*), caju (*Anacardium occidentale*), cacau (*Theobroma cacao*), mamão (*Carica papaya*), abacaxi (*Ananas Sativus*), dendê (*Elaeis guineensis*) etc. (Souza e Souza, 2008).

Entretanto, como mais de 90% das raízes metabolicamente ativas das plantas concentram-se na camada de 0 – 20 cm (van Raij, 2011), a presença de horizontes coesos próximos à superfície, em muitos solos encontrados no local, somada à má distribuição de chuvas, podem comprometer o potencial produtivo da região (Cintra; Libardi, 1998). Essas restrições se devem a fatores como aumento da densidade do solo e da resistência à penetração de raízes; e diminuição da porosidade total, com conseqüente comprometimento dos fluxos de água e ar (Giarola *et al.*, 2001). Salienta-se que esse efeito é notado em solo seco, quanto a coesão aumenta a ponto de dificultar as operações de preparo do solo e o desenvolvimento das plantas (Giarola; Silva, 2002).

Dentre as hipóteses de gênese de horizontes com caráter coeso, pode-se citar, inicialmente, o acúmulo de argila iluvial, evidenciado pela constatação de feições micromorfológicas de deposição de argila (*argilãs*), causando entupimento de poros, diminuição da porosidade total e aumento da densidade do solo (Moreau *et al.*, 2006). Para Lima Neto *et al.* (2010), o horizonte com caráter coeso é formado, em um primeiro instante, pelo entupimento de poros por argila fina advinda das camadas subjacentes (iluviação); seguida pela translocação de Fe, que colapsa a estrutura.

Segundo Baumgartl (1998), alguns atributos físicos do solo, como a porosidade total, podem sofrer alterações devido a ciclos de umedecimento e secagem. Dessa forma, outra hipótese de gênese de horizontes com caráter coeso relaciona ciclos de umedecimento e secagem com a dessecação e consolidação da matriz argilosa do solo, com posterior adensamento (Giarola; Silva, 2002; Ponte; Ribeiro, 2001).

Outra hipótese está relacionada com o adensamento por processos de polimerização e precipitação reversível de compostos silicosos e sílicoaluminosos de baixa cristalinidade, associados a ciclos de umedecimento e secagem (Araújo Filho; Carvalho; Silva, 2001). Na presença de água, ocorre a dissolução de polimorfos de sílica por hidrólise; já no período seco, o ácido monossilícico ( $H_4SiO_4$ ) pode precipitar na forma de compostos de baixa cristalinidade.

Vieira *et al.* (2012), após extraírem o material amorfo de amostras coletadas em horizontes com caráter coeso, utilizando solução de oxalato de amônio, concluíram que houve redução significativa na resistência à penetração, o que indica que esses compostos silicosos de baixa cristalinidade atuam na gênese de horizontes coesos.

Por fim, cita-se que a má seleção da fração areia é outro fator associado à gênese do caráter coeso, pois a presença de grãos com duas ou mais granulometrias favorece um empacotamento denso entre essas partículas, com os pequenos espaços restantes sendo preenchidos com material mais fino (Silva *et al.*, 2020; Bezerra *et al.* 2014).

Segundo Corrêa *et al.* (2023), o manejo de solos com caráter coeso envolve a execução de operações de subsolagem para amenizar as restrições físicas impostas pelo adensamento. Ainda segundo os autores, o conteúdo de água no solo também pode ser manejado de modo a reduzir a resistência mecânica proporcionada pela coesão notada em solo seco.

### **2.3 Condicionadores de solo: o caso do biocarvão**

Um condicionador nada mais é do que um material adicionado ao solo para melhorar sua condição geral, favorecendo, desse modo, o desenvolvimento das plantas (Yu *et*

*al.*, 2023; Davis; Whiting, 2013). Esses condicionadores podem ser classificados, quanto à sua origem, em sintéticos ou de ocorrência natural; e, quanto à sua composição, em orgânicos ou inorgânicos (Mukherjee, 2013). O uso de condicionadores de solo está relacionado à melhoria de diversos de seus atributos, dos quais, pode-se citar: aumento da infiltração, capacidade de retenção e disponibilidade de água; promoção da agregação das partículas; diminuição da compactação ou adensamento; melhoria da aeração e drenagem; atuação como substrato para a atividade biológica; regulação do pH; aumento da disponibilidade de nutrientes para as plantas; atenuação da toxidez por metais pesados e outros contaminantes; sequestro e carbono; etc. (Liu *et al.*, 2023; Shinde, Sakar, Thombare, 2019).

Uma prática que vem ganhando notoriedade é o uso de resíduos orgânicos carbonizados como condicionadores da qualidade do solo (Luo *et al.*, 2023; Trazzi *et al.*, 2018). Dessa forma, tem-se utilizado o termo biocarvão para designar o produto sólido, rico em carbono, advindo da pirólise da biomassa em condição de suprimento limitado de oxigênio e em temperaturas que variam desde 100 a 700 °C (Manikandan *et al.*, 2023; Wang; Xiao; Chen, 2018). A pirólise é um processo barato e simples, usado para produzir carvão há centenas de anos. Entretanto, os fornos tradicionais de barro e tijolos utilizados no processo costumam liberar grande quantidade de voláteis na atmosfera, o que culmina em poluição. Já os pirolisadores modernos são projetados para capturar esses voláteis e utilizá-los na produção de bio-óleo e gás de síntese (Zhang *et al.*, 2023; Zheng; Sharma; Rajagopalan, 2010).

Dentre as características gerais do biocarvão, pode-se citar: elevada superfície específica ( $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ ) e alta densidade de cargas negativas de superfície ( $\text{pH} >$  ponto de carga zero – PCZ); o que confere ao condicionador a habilidade de adsorver água e nutrientes (cátions) que podem ser disponibilizados para as plantas (Fregolente *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2019).

Salienta-se que o uso de biocarvão também melhora a aeração do solo; favorece o aumento da atividade microbiana; e contribui com o sequestro de carbono e a mitigação do efeito estufa, devido à alta recalcitrância do carbono em sua estrutura (Nascimento *et al.*, 2023; Shinde, Sakar, Thombare, 2019).

Em adição, biocarvões que passaram por processos específicos de ativação física ou química têm a capacidade de adsorver herbicidas, pesticidas e metais pesados (Zheng; Sharma; Rajagopalan, 2010); o que diminui a absorção desses contaminantes pelas plantas. No caso de metais pesados, tais íons, positivamente carregados, se combinam com grupos funcionais que contêm oxigênio, como carboxila, carbonila e hidroxila. Componentes minerais do biocarvão, como  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SiO}_3^{4-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{SO}_3^{2-}$  e  $\text{OH}^-$ , combinam-se com metais pesados e formam substâncias insolúveis em água, como óxidos metálicos, fosfatos metálicos

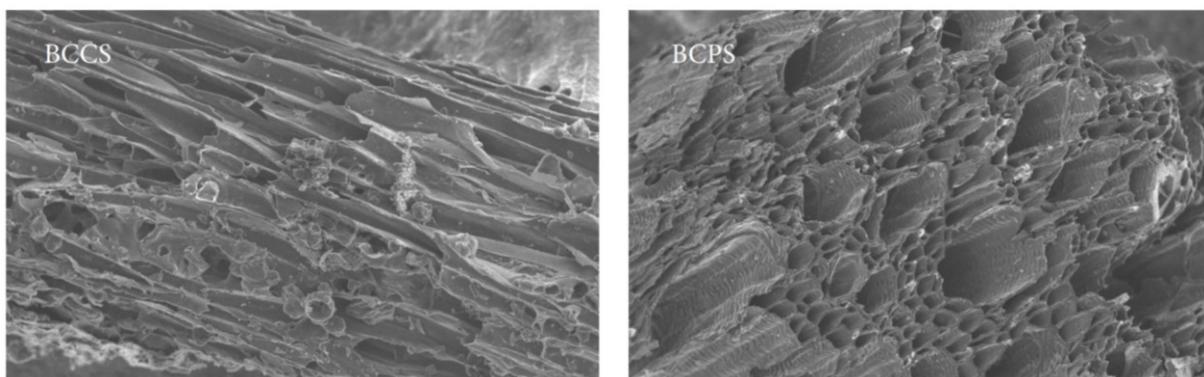
e carbonatos metálicos, promovendo, assim, a adsorção e imobilização desses contaminantes (Yang *et al.*, 2019).

Após a adição no solo, o biocarvão pode atuar como fonte de nutrientes como N, P e K. Portanto, o ciclo biogeoquímico desses elementos pode ser modificado pelo condicionador. Entretanto, ainda existe uma lacuna sobre os impactos que o uso do biocarvão acarreta sobre o ciclo biogeoquímico de outros elementos como o silício (Si) (Wang; Xiao; Chen, 2018).

A importância de averiguar a influência do biocarvão no ciclo biogeoquímico do Si é justificada pelo fato de que o elemento é o segundo mais abundante na crosta terrestre, sendo importante componente dos solos, onde é encontrado tanto na forma sólida quanto em solução. O elemento é encontrado, na natureza, associado a uma grande variedade de minerais silicatados, formas de baixa cristalinidades e amorfas (Wang *et al.*, 2020; Sommer *et al.*, 2006; Savant *et al.*, 1999).

O que se sabe é que, uma vez incorporado ao solo, o biocarvão possui a capacidade de adsorver o ácido silícico ( $H_4SiO_4$ ), presumivelmente na sua estrutura porosa (Figura 2), em um processo de adsorção física, o que o torna um reservatório de silício. O efeito é mais pronunciado em biocarvões oriundos de resíduos com baixo teor de silício, que podem atuar como dreno do elemento no solo (Wang; Xiao; Chen, 2018).

Figura 2 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura (SEM) da estrutura porosa de duas amostras de biocarvão. BCCS e BCPS são amostras de biocarvão oriundas da pirólise da palhada do algodão (*Gossypium herbaceum*) e batata (*Solanum tuberosum*), respectivamente.



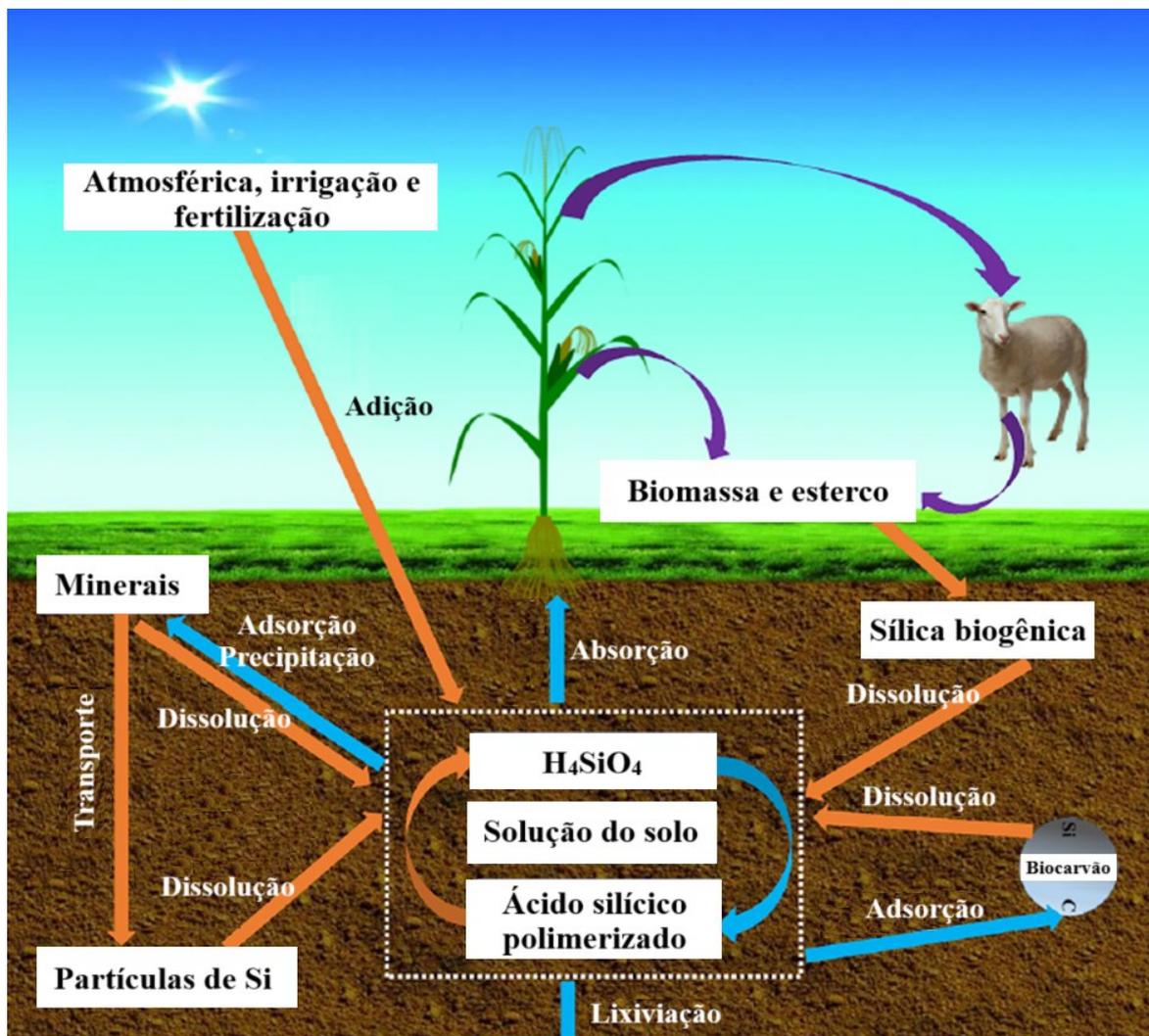
Fonte: Wang *et al.*, (2019).

Do lado contrário, sugere-se que o mecanismo de liberação de silício, pelo biocarvão, seja controlado por uma interação protetora entre carbono-silício, acompanhada pela liberação de carbono (Wang; Xiao; Chen, 2018). Como a via é de mão dupla, o Si pode ser liberado do biocarvão para o solo e, assim, ser absorvido por diversas espécies de plantas que

têm o elemento como benéfico ao seu desenvolvimento. Isso ocorre, principalmente, com biocarvões oriundos de resíduos ricos em Si, como biomassa de plantas de arroz, por exemplo (Rizwan *et al.*, 2019). De maneira geral, um biocarvão que contém mais de  $5 \text{ g kg}^{-1}$  de Si amorfo pode ser chamado de *sichar* (Wang *et al.*, 2019).

Diante do exposto, nota-se que, com a aplicação do biocarvão, é necessária a inserção de um novo compartimento no ciclo do silício no solo (Figura 3). Tal compartimento é extremamente dinâmico e pode tanto atuar como fonte, aumentando a concentração de silício na solução do solo, ou como dreno, diminuindo a concentração de silício na solução do solo (Wang *et al.*, 2019).

Figura 3 – Efeito do biocarvão no ciclo do Si do solo. As setas cor de laranja representam transformações ou processos que aumentam a concentração de Si na solução do solo. Setas azuis representam a transformação ou processos que reduzem a concentração de Si na solução do solo.



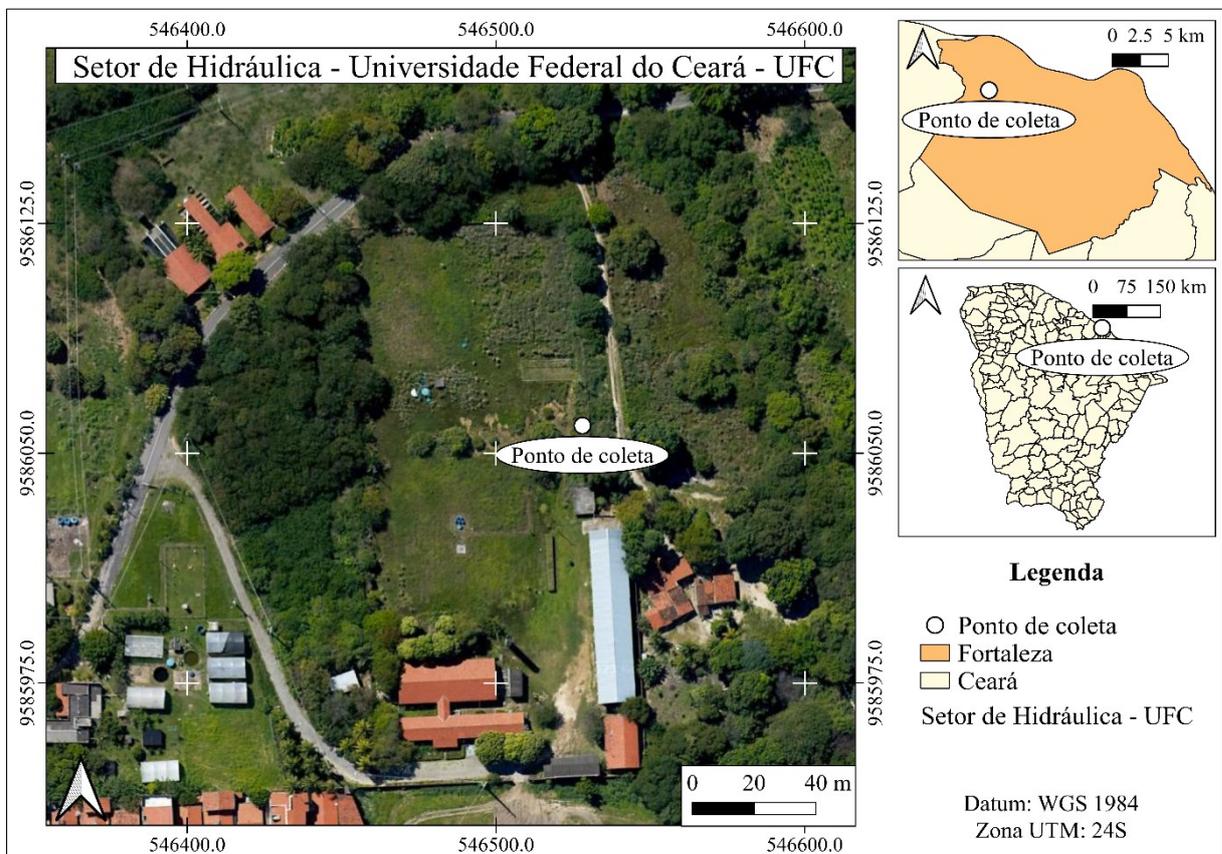
Fonte: Adaptado de Wang *et al.*, (2019).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Coleta de amostras de solo

A coleta das amostras de solo foi realizada no Setor de Hidráulica do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus do Pici, em Fortaleza/CE. O solo do ponto amostral (546528.0 L, 9586059.0 S – UTM 24S), representado na Figura 4, foi descrito (Vieira, 2013) e classificado como Argissolo Amarelo Eutrocoeso típico (ANEXO A). Salienta-se que, para o solo em questão, Vieira (2013) constatou que existe forte influência da cimentação por compostos amorfos ou de baixa cristalinidade na gênese do horizonte com caráter coeso.

Figura 4 – Localização do ponto de coleta referente ao Argissolo Amarelo Eutrocoeso típico, no Setor de Hidráulica da Universidade Federal do Ceará – Fortaleza/Ceará.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No local, foram coletadas amostras com estrutura deformada para a montagem de corpos de prova. A coleta foi realizada no centro do horizonte Bt1 (com caráter coeso) do solo em questão.

### 3.2 Montagem de corpos de prova, tratamentos e delineamento experimental

As amostras com estrutura deformada foram secas ao ar, até o equilíbrio com a umidade do ambiente, destorroadas com rolo e passadas em peneira com abertura da malha igual a 2 mm. Com isso, as amostras foram levadas à condição de terra fina seca ao ar (TFSA), ou seja, amostras equilibradas com a umidade do ambiente e compostas, exclusivamente, pelas frações areia, silte e argila (partículas com diâmetro equivalente menor ou igual a 2 mm).

O delineamento experimental foi o inteiramente aleatorizado (DIA), com cinco tratamentos (Tabela 1) e cinco repetições, totalizando 25 unidades experimentais por conjunto amostral. Foi necessária a montagem de quatro conjuntos de amostras para a obtenção da curva de retenção de água no solo e permeabilidade do solo ao ar (primeiro conjunto); resistência do solo à penetração e obtenção de material para avaliação da capacidade de adsorção de Si (segundo conjunto); condutividade hidráulica do solo saturado (terceiro conjunto); e obtenção de torrões para a avaliação da resistência tênsil e de material para a reometria (quarto conjunto).

Os corpos de prova foram montados utilizando TFSA e biocarvão advindo da pirólise de resíduos do processamento do pseudofruto do caju (ANEXO C), nos tratamentos e doses descritos na Tabela 1. Após coletado, o bagaço de caju foi seco em forno (40°C por 24h). Em seguida, a biomassa foi moída e passada em peneira com abertura de malha igual a 2mm. A pirólise foi realizada em forno tubular (FTHI/20, EDG), a 550 °C por 90 min, sob fluxo moderado de nitrogênio. O caju foi escolhido porque a sua produção está concentrada na Região Nordeste (Brainer; Vidal, 2018). Além disso, a cajucultura tem grande desafio relacionado à gestão de resíduos (Bártholo, 1994). Por fim, a literatura não cita o cajueiro como planta acumuladora de Si – possibilitando a obtenção de biocarvão com baixo teor do elemento, com favorecimento a adsorção em detrimento da liberação de Si. Em ensaio realizado pelo laboratório produtor do biocarvão utilizado, a capacidade de adsorção de Si foi de 2,3 mg g<sup>-1</sup>.

Tabela 1 – Tratamentos e as respectivas doses de biocarvão.

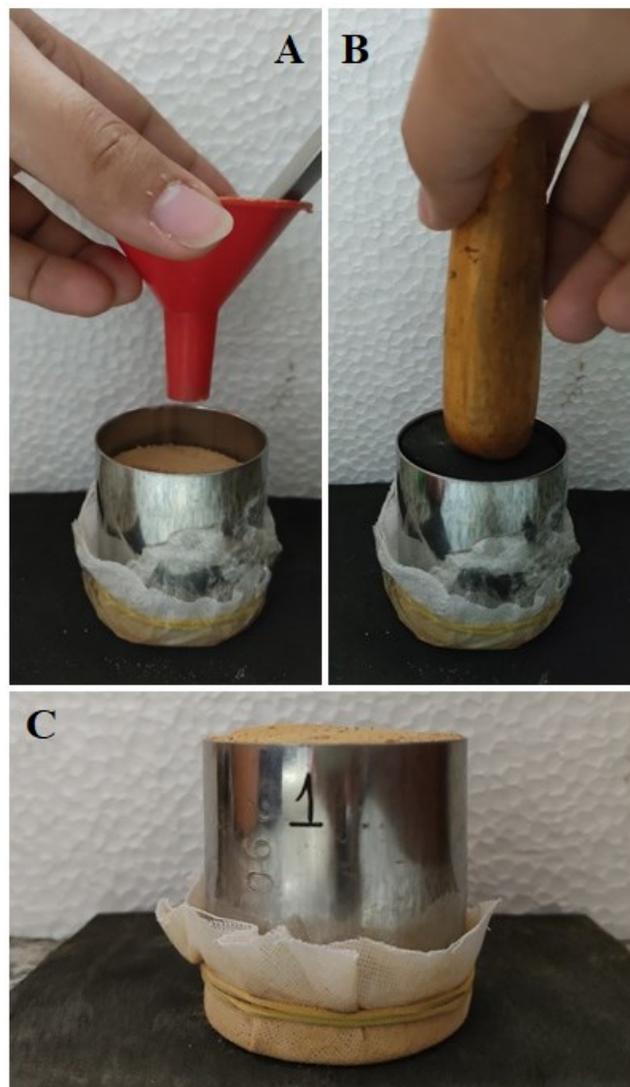
Tratamento	Dose de biocarvão (Mg ha <sup>-1</sup> )
B0 (Testemunha)	0
B5	5
B10	10
B20	20
B40	40

Fonte: Elaborado pelo autor.

Salienta-se que, por ocasião da montagem dos corpos de prova, as doses foram transformadas em porcentagem de massa. Para isso, foi considerada a massa de biocarvão do respectivo tratamento e a massa de solo que ocupa a área de 1 ha. A massa de solo foi obtida com os dados de espessura e densidade do horizonte coeso donde as amostras foram coletadas (espessura = 49 cm; densidade do solo =  $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ ), para simular a aplicação de biocarvão no horizonte avaliado.

Ainda sobre a montagem dos corpos de prova, foram utilizados cilindros de alumínio com volume de aproximadamente  $100 \text{ cm}^3$ , com altura e diâmetro interno de aproximadamente 5 cm (Figura 5). A densidade inicial de cada amostra foi definida como sendo igual a densidade do solo do horizonte no qual o material foi coletado ( $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ ).

Figura 5 – Procedimento de montagem dos corpos de prova. (A) Adição do material; (B) compactação manual (B); e (C) corpo de prova montado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso da análise de resistência tênsil, foram montados também na densidade de  $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ , com auxílio de prensa hidráulica, corpos de prova com volume de aproximadamente  $330 \text{ cm}^3$  (altura e diâmetro de aproximadamente 7,5 cm), para facilitar a obtenção dos torrões que foram analisados (Figura 6).

Figura 6 – Procedimento de montagem dos corpos de prova para a obtenção de torrões para a análise de resistência tênsil. Detalhe para a operação da prensa hidráulica (A) e compactação do material no cilindro metálico (B).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Todas as unidades experimentais foram sujeitas a dez ciclos de umedecimento e secagem, para oportunizar a manifestação do caráter coeso (Vieira *et al.*, 2012). Foi realizado um ciclo por semana, totalizando dez semanas. O intervalo de dez semanas, referente aos ciclos de umedecimento e secagem, também funcionou como um período de incubação das amostras, para possibilitar que a aplicação do biocarvão resultasse em alterações estruturais detectáveis pelos indicadores de qualidade física do solo adotados.

O procedimento adotado foi o seguinte: sempre às segundas-feiras, às 14h00min, as amostras eram postas sobre esponjas saturadas com água destilada para que, por capilaridade, atingissem umidade próxima à capacidade de campo (Figura 7A). Após isso, sempre às quartas-

feiras, às 14h00min, as amostras eram retiradas das esponjas e postas para secar ao ar em bandejas de plástico (Figura 7B), onde permaneciam até a segunda-feira seguinte. Esse procedimento foi repetido durante dez semanas, de 23/08/2021 a 01/11/2021.

Figura 7 – Corpos de prova sujeitos a ciclos de umedecimento e secagem. (A) Amostras postas sobre esponjas saturadas com água destilada para umedecimento, por capilaridade, até próximo à capacidade de campo. (B) Amostras postas em bandejas para secagem ao ar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3 Atributos analisados

#### 3.3.1 Capacidade de adsorção de silício

Ao final do experimento, os corpos de prova foram destorroados. O material obtido foi utilizado para a execução dos ensaios de capacidade de adsorção de Si. Nesse sentido, 5 g do material advindo dos corpos de prova, nas respectivas doses de biocarvão, foram adicionados em tubos *falcon* de 50 mL juntamente com 25 mL de solução contendo 10 ppm de Si (1:5 w/v). Optou-se por utilizar o  $\text{Na}_4\text{SiO}_4$  como fonte de Si devido à sua boa solubilidade em água. Na sequência, realizou-se agitação por 24h em agitador mecânico horizontal. Por fim, realizou-se

centrifugação (5 minutos; 5000 rpm) e coletou-se o sobrenadante – que seguiu para a determinação do Si remanescente em solução. Esse ensaio foi realizado em triplicata.

A quantificação do Si remanescente após o equilíbrio foi realizada por espectroscopia UV-VIS, por colorimetria azul de molibdênio, conforme consta em Korndörfer, Pereira e Nolla (2004). O método se baseia na formação de um complexo sílico-molíbídico de cor amarela que, após a adição de ácido ascórbico, adquire coloração azulada – permitindo a quantificação do Si mesmo em pequenas quantidades. A leitura foi realizada no comprimento de onda de 660 nm. Após a leitura, a capacidade de adsorção de Si foi calculada pela Equação (7),

$$q_e = \frac{(C_i - C_r) \times V}{m}, \quad (7)$$

em que  $q_e$  é a capacidade de adsorção de Si ( $\text{mg g}^{-1}$ ),  $C_i$  é a concentração inicial da solução ( $\text{mg L}^{-1}$ ),  $C_r$  é a concentração remanescente após o equilíbrio ( $\text{mg L}^{-1}$ ),  $V$  é o volume do sobrenadante (L) e  $m$  é a massa de adsorvente utilizada (g).

### 3.3.2 Grau de flocculação

Determinado com o material advindo dos corpos de prova, após os ciclos de umedecimento e secagem, conforme a Equação (8),

$$GF = \frac{AT - AD}{AT} \times 100, \quad (8)$$

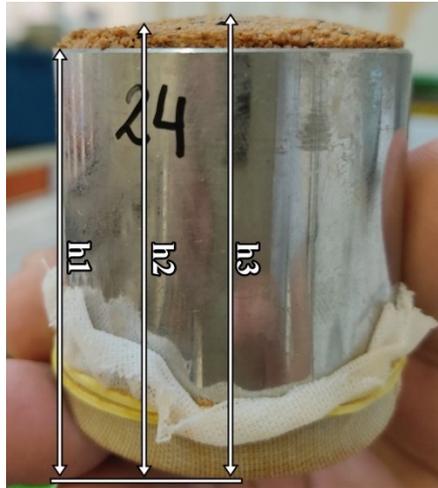
sendo  $GF$  o grau de flocculação (%);  $AT$  a porcentagem de argila na respectiva amostra (%); e  $AD$  a porcentagem de argila dispersa em água na respectiva amostra (%). A argila total foi determinada pelo método da pipeta (Gee; Bauder, 1986), utilizando NaOH 1M como dispersante químico. A argila dispersa em água foi determinada pelo mesmo método, substituindo o dispersante químico por água destilada.

### 3.3.3 Densidade do solo

Foi determinada com os corpos de prova, após os ciclos de umedecimento e secagem. Para tanto, a nova altura das amostras foi considerada como sendo a média entre a

altura do cilindro de alumínio ( $h_1$ ), a altura em um ponto intermediário ( $h_2$ ) e a maior altura ( $h_3$ ) de cada amostra (Figura 8). As alturas foram medidas utilizando paquímetro digital.

Figura 8 – Ilustração da medição da altura das amostras após os ciclos de umedecimento e secagem. Para tanto, foi considerada a média entre a altura do cilindro de alumínio ( $h_1$ ), a altura em um ponto intermediário ( $h_2$ ) e a maior altura ( $h_3$ ) de cada amostra.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em posse da altura e área da seção do cilindro, foi calculado o volume de cada amostra. Após isso, em posse da massa das partículas referente à cada amostra, a densidade do solo foi calculada utilizando a Equação (9) (Blake; Hartge, 1986a),

$$\rho_s = \frac{M_p}{V_s}, \quad (9)$$

sendo  $\rho_s$  a densidade do solo ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $M_p$  a massa das partículas (kg) e  $V_s$  o volume do solo ( $\text{m}^3$ ).

### 3.3.4 Porosidade total, macroporosidade e microporosidade

Foi obtida, ao final do experimento, com os dados de densidade do solo e de partículas, de acordo com a Equação (10),

$$\alpha = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_p}\right), \quad (10)$$

sendo  $\alpha$  a porosidade ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e  $\rho_p$  e  $\rho_s$  as densidades de partículas e do solo ( $\text{kg m}^{-3}$ ), respectivamente. A densidade das partículas foi obtida, para cada tratamento (dose de biocarvão), pelo método do balão volumétrico, cujo princípio é determinar o volume de álcool utilizado para completar um balão volumétrico de 50 mL que contenha 20 g do material a ser analisado. O volume das partículas é igual à diferença entre o volume do balão e o volume de álcool gasto (Blake; Hartge, 1986b).

A microporosidade foi determinada com a aplicação de uma tensão de 6kPa, em mesa de tensão, para total esvaziamento dos macroporos (Klute, 1986). Já a macroporosidade foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

### 3.3.5 Permeabilidade do solo ao ar

Foi determinada pelo método da pressão decrescente (Kirkham, 1947; Neves *et al.*, 2007; Silva *et al.*, 2009; Silveira *et al.*, 2011). Para tanto, foram utilizados corpos de prova com a umidade equilibrada com as tensões de 2, 6, 10, 33 e 100 kPa. O procedimento foi o seguinte: se fez passar, por cada amostra, uma quantidade de ar correspondente à pressão de 1 kPa. Em seguida, o decaimento da pressão ao longo do tempo foi mensurado eletronicamente, até que a pressão no interior da amostra atingisse o equilíbrio com a pressão atmosférica. As operações foram feitas utilizando o *software* PermeAr v.1.0 (Silveira *et al.*, 2011). O coeficiente de permeabilidade ao ar ( $K_{ar}$ ) foi calculado utilizando a Equação (11),

$$K_{ar} = \frac{L\eta V}{AP_{atm}} \times |S|, \quad (11)$$

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

### 3.3.6 Índices de continuidade de poros

Neste procedimento, os valores de permeabilidade do solo ao ar foram relacionados com os valores de porosidade de aeração ( $\varepsilon_{ar}$ ) pela Equação de Kozeny-Carman, de um modo análogo ao de Ahuja *et al.* (1984), conforme a Equação (12),

$$K_{ar} = M \varepsilon_{ar}^N, \quad (12)$$

em que  $M$  (intercepto) e  $N$  (inclinação) são constantes empíricas. O expoente  $N$  é considerado como um índice de continuidade de poros, pois reflete o aumento de  $K_{ar}$  com o incremento de  $\varepsilon_{ar}$  (porosidade de aeração); ou um decréscimo na tortuosidade de poros, com incremento da área disponível ao fluxo de ar. A porosidade de aeração  $\varepsilon_{ar}$  foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a umidade base em volume ( $\theta$ ) equilibrada com as tensões de 2, 6, 10, 33 e 100 kPa.

A Equação (12), ajustada para forma logarítmica, resulta na Equação (13),

$$\log K_{ar} = \log M + N \log \varepsilon_{ar}. \quad (13)$$

Com a regressão linear da relação de  $\log \varepsilon_{ar}$  versus  $\log K_{ar}$ , foram estimados os valores de  $M$  e  $N$ . O intercepto da reta linear com o eixo das abcissas pode ser utilizado como medida da porosidade bloqueada ( $\varepsilon_b$ ), que corresponde ao valor de  $\varepsilon_{ar}$  abaixo do qual o fluxo de ar pelo do solo cessa. Partindo da Equação (13),  $\varepsilon_b$  é expressa pela Equação (14),

$$\varepsilon_b = 10^{(-\log M)/N}, \quad (14)$$

O índice de continuidade de poros  $K_l$  (Groenevelt; Kay; Grant, 1984) também foi avaliado, na tensão correspondente à capacidade de campo (33 kPa). Esse índice foi calculado pela razão entre a permeabilidade intrínseca do solo ao ar e a porosidade de aeração, isto é,

$$K_1 = \frac{K_{ar}}{\varepsilon_{ar}}. \quad (15)$$

### 3.3.7 Curva de água no solo

Foi obtida utilizando corpos de prova. No procedimento, o conteúdo de água na saturação foi considerado igual à porosidade total do solo ( $\alpha$ ,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ). Para os pontos de baixa tensões (2, 6 e 10 kPa) o funil de Haines foi utilizado para a estabelecer o equilíbrio entre a tensão aplicada e o conteúdo de água no solo. Para os demais pontos (33, 100, 300, 700 e 1500 kPa), o equilíbrio foi obtido em extrator de placa porosa de Richards (Soilmoisture Equipment

Corp.) (Klute, 1986). Em seguida, o modelo matemático proposto por van Genuchten (1980) (Equação 16) foi ajustado aos dados experimentais,

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha |\Psi_m|)^n]^m}, \quad (16)$$

em que  $\theta$  corresponde ao conteúdo de água ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ),  $\theta_r$  e  $\theta_s$  são, respectivamente, os teores de água residual e de saturação ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ),  $\Psi_m$  o potencial mátrico da água no solo (kPa),  $\alpha$  o inverso do potencial mátrico de entrada de ar no solo ( $\text{kPa}^{-1}$ );  $m$  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*) (Dourado Neto *et al.*, 2001).

Em posse da curva de retenção de água no solo, foi avaliada a distribuição de poros por tamanho, desde  $\Psi_m = 0$  a  $-1500 \text{ kPa}$ . Para tanto, em posse da função matemática  $\theta = f(\Psi_m)$ , a umidade ( $\theta$ ) foi derivada em função de  $\Psi_m$  ( $d\theta/d\Psi_m$ ). O pico da curva obtida representa o potencial mátrico que corresponde ao poro mais frequente no solo.

### 3.3.8 Condutividade hidráulica do solo saturado

Para medida deste atributo foi fixado um cilindro, com dimensões de 0,025 m de altura e 0,050 m de diâmetro, sobre o cilindro com a amostra a ser analisada. O ensaio foi realizado com as amostras previamente saturadas, considerando o método do permeâmetro de carga constante (Youngs, 2000). O princípio deste método consiste em manter uma lâmina constante de água sobre as amostras. Concomitantemente, coleta-se, na parte inferior do cilindro, o volume de água que é drenado em intervalos de tempo conhecidos. O nível constante, ou seja, o potencial de pressão ( $\Psi_p$ ), é garantido utilizando-se um recipiente com água vertido sobre as amostras ou outros dispositivos como o frasco de Mariotte (Amaro Filho; Assis Júnior; Mota, 2008). A condutividade hidráulica foi calculada conforme a lei de Darcy,

$$q = -K \frac{\Delta\Psi}{Z}, \quad (17)$$

em que  $q$  é a densidade de fluxo ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $K$  é a condutividade hidráulica ( $\text{m s}^{-1}$ ) e  $\Delta\Psi$  é o gradiente de potencial ( $\text{m m}^{-1}$ ). O sinal negativo é a indicação de que o sentido do movimento é contrário ao do gradiente.

### 3.3.9 Resistência do solo à penetração

Foi determinada com corpos de prova, com umidade equilibrada com uma tensão de 33 kPa (Silva; Kay, Perfect, 1994). Para tanto, foi utilizado um penetrômetro eletrônico estático de laboratório (Marconi MA933) com as seguintes características: sistema atuador linear com velocidade de 1 cm min<sup>-1</sup>, célula de carga de 20 kgf, haste com cone de 0,4 cm de diâmetro de base, ângulo de 60° e área de 12,566 mm<sup>2</sup>. O equipamento tem capacidade de registrar uma leitura por segundo.

O penetrômetro utilizado é acoplado a um microcomputador para aquisição dos dados por software próprio do equipamento, conforme descrito por Tormena *et al.* (1998). Foram realizadas três leituras equidistantes para cada unidade experimental.

### 3.3.10 Resistência tênsil

Para a determinação da variável, os corpos de prova com volume de aproximadamente 330 cm<sup>3</sup> (altura e diâmetro de 7,5 cm) foram umedecidos sob esponjas, até próximo da capacidade de campo e, posteriormente, desmembrados em torrões com diâmetro variando entre 19 e 25 mm.

Os ensaios de resistência tênsil foram realizados utilizando um dinamômetro com atuador eletrônico linear a uma velocidade constante de 0,08 mm s<sup>-1</sup> (Tormena; Fildalski; Rossi Júnior, 2008). Foram tomados cinco torrões para compor uma repetição. Antes da avaliação, cada torrão teve sua massa medida em balança analítica. A média aritmética da resistência tênsil dos cinco torrões foi utilizada para definir o valor da respectiva da repetição.

Para execução do ensaio, cada torrão foi, individualmente, colocado na posição mais estável entre duas placas metálicas: uma inferior, fixa à base do equipamento, e outra superior móvel e ligada à extremidade da célula de carga do atuador eletrônico linear, com capacidade de 20 kgf. O valor da carga empregado para a ruptura foi armazenado por um sistema eletrônico de aquisição de dados. Depois de cada procedimento de ruptura, mensurou-se a massa de uma porção de cada torrão e, posteriormente, o material foi seco em estufa (105 °C por 48 horas) para cálculo a umidade.

A resistência tênsil (RT) foi avaliada, segundo Dexter e Kroesbergen (1985), pela Equação (18),

$$RT = \frac{0,576P}{D^2 10^3} , \quad (18)$$

sendo  $RT$  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). O diâmetro efetivo do agregado foi calculado pela Equação (19) (Watts; Dexter, 1998),

$$D = Dm \left( \frac{M}{M_0} \right)^{0.333}, \quad (19)$$

sendo  $D$  o diâmetro efetivo do torrão (m);  $Dm$  o diâmetro médio dos torrões (mm), obtido pela média dos tamanhos da abertura das peneiras;  $M$  a massa do torrão seco a 105 °C (g); e  $M_0$  a massa média dos torrões secos a 105 °C (g).

### 3.3.11 Reometria

Para execução dos ensaios de reometria foram montadas amostras com densidade conhecida e igual a do solo com caráter coeso estudado (1,55 g cm<sup>-3</sup>) (Figura 9), em anéis metálicos (altura de 36 mm e diâmetro de 10 mm), utilizando material homogeneizado advindo dos corpos de prova que foram submetidos aos ciclos de umedecimento e secagem nos respectivos tratamentos. Optou-se por material homogeneizado porque o volume final das amostras utilizadas é de poucos cm<sup>3</sup>, sendo a avaliação muito sensível a heterogeneidades estruturais como fissuras e fendas; além disso, a coesão é associada a forças eletrostáticas, de modo que a opção por amostras homogeneizadas garante uma taxa de cisalhamento constante durante o ensaio (Sobucki *et al.*, 2022).

Figura 9 – Amostra para execução de ensaio de reometria.

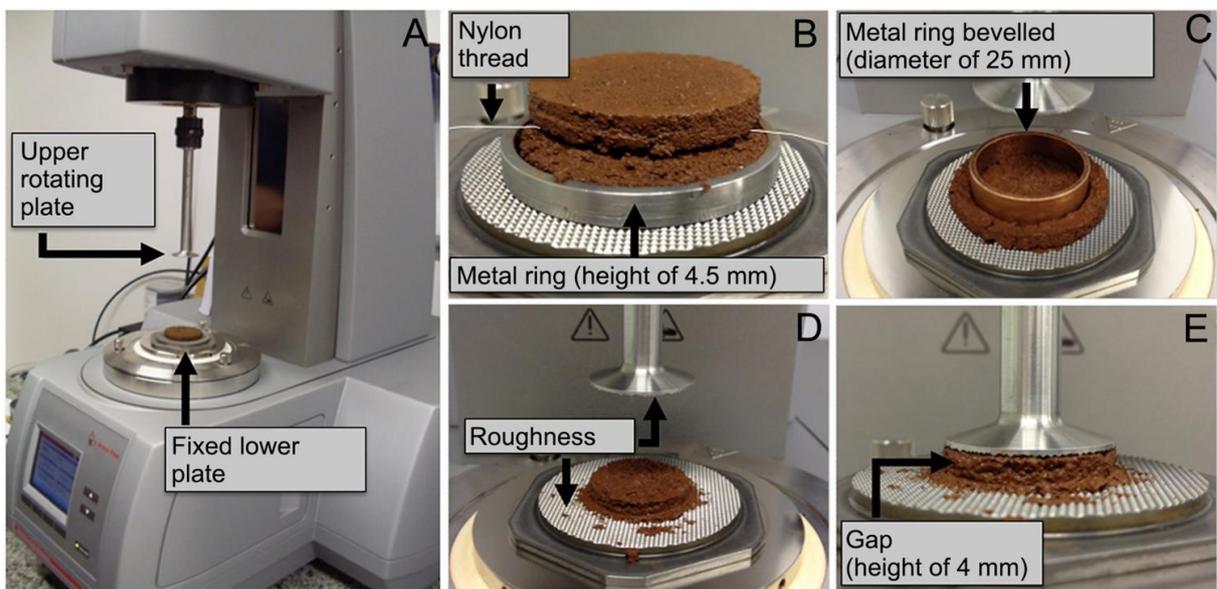


Fonte: Elaborado pelo autor.

Antes dos ensaios as amostras foram saturadas, com água destilada, em placas de petri e, em seguida, levadas à mesa de tensão para equilíbrio da umidade do solo com o potencial mátrico de  $-10$  kPa (Sobucki *et al.*, 2022).

Em seguida, procedeu-se o teste de varredura de amplitude (*Amplitude Sweep Test - AST*) com um reômetro modular compacto (MCR 102, Anton Paar, Alemanha), equipado com um sistema de medição com placas paralelas rugosas de 25 mm (placa superior) e 50 mm de diâmetro (placa inferior) (Figura 10A). Imediatamente antes do teste, as amostras foram cortadas horizontalmente a uma altura de aproximadamente 4,5 mm utilizando um fio de nylon e/ou estilete (Figura 10B), e verticalmente utilizando um anel de 25 mm de diâmetro (Figura 10C). Com isso, além da altura, ajustou-se o diâmetro da amostra ao mesmo diâmetro da placa superior do equipamento (Figura 10D). A temperatura da placa inferior foi mantida constante e igual a  $20$  °C; a distância entre as placas (*gap*) foi de 4,0 mm (Figura 10E); o tempo de espera antes do teste foi de 30 segundos; a variação da amplitude de deformação foi de 0,0001 a 100%; a frequência angular foi de 0,5 Hz; o número de pontos medidos igual a 30; e a duração média dos testes foi de 12 minutos. Em adição, a força normal foi sempre inferior a 50 N no início do teste e a redução de umidade durante o teste não excedeu 10% em nenhuma avaliação.

Figura 10 – (A) Reômetro modular compacto MCR 102, com amostra posicionada sobre a placa inferior fixa. (B) Corte horizontal na amostra. (C) Corte vertical na amostra. (D) Amostra após o corte vertical e horizontal, com altura e diâmetro ajustados. (E) Amostra ajustada ao mesmo diâmetro da placa superior (25 mm) e ao gap (distância entre as placas) de 4 mm.



Fonte: Pértile *et al.* (2018).

Após o teste, os atributos reológicos foram calculados utilizando o *software* Rheoplus/32 v 3.62 (Anton Paar, Alemanha). As variáveis obtidas foram as seguintes:  $\gamma_{LVE}$  (Deformação no final do intervalo viscoelástico linear – LVE);  $\tau_{LVE}$  (Tensão no final no final do intervalo viscoelástico linear);  $\tau_{\text{máx}}$  (Tensão de cisalhamento máxima);  $\gamma_{YP}$  (Deformação no ponto de escoamento);  $G'G''_{YP}$  (Módulo de armazenamento e perda no ponto de escoamento); e integral Z. Para mais detalhes, vide tópico 2.1.8 deste manuscrito.

### 3.4 Análise de dados

Inicialmente, a normalidade dos dados foi avaliada utilizando os testes de Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Cramer-von Mises e Anderson-Darling. Adotou-se como critério considerar que os dados seguem a distribuição normal caso o valor de P, em pelo menos dos testes mencionados, fosse maior do que o nível de significância de 0,05 (aceita-se  $H_0$  se os dados seguem uma distribuição normal). Nos casos em que a normalidade não foi confirmada, realizou-se a transformação dos dados pelo procedimento de Box e Cox (1964), em que se busca encontrar uma potência ótima ( $\lambda$ ) tal que os dados transformados assumam uma distribuição o mais próxima possível da normal. Em seguida, procedeu-se a análise de variância (ANOVA) pelo teste F e a comparação de médias pelo teste de Tukey, ambos a 5% de significância.

Também se realizou análise de regressão e correlação entre os atributos avaliados e as respectivas doses de biocarvão – considerando o modelo linear ( $y = ax + b$ ) e quadrático ( $y = ax^2 + bx + c$ ). Testou-se a significância do coeficiente angular ( $a$ ) da regressão linear e do coeficiente dominante do polinômio ( $a$ ) da regressão quadrática. Optou-se por utilizar o modelo que fornecesse o melhor ajuste ( $r^2$ ) e fosse estatisticamente significativo.

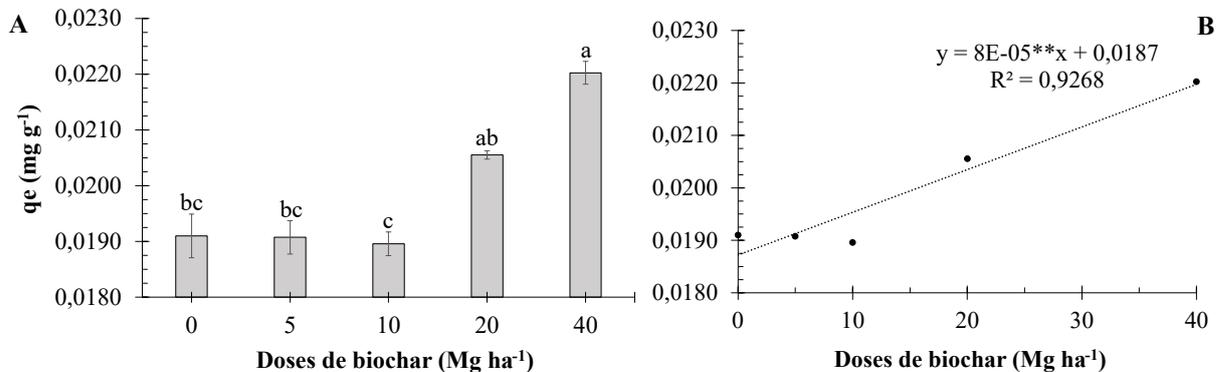
Por fim, foi realizada análise de componentes principais (ACP), para caracterizar os tratamentos, e análise de agrupamento para a formação de grupos com os tratamentos de maior similaridade. Todas as análises foram feitas utilizando a plataforma *SAS® OnDemand for Academics*.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Capacidade de adsorção de Silício

Houve diferença significativa da capacidade de adsorção ( $q_e$ ) de Si entre o tratamento B40 e o controle (Figura 11A), com tendência de aumento de  $q_e$  na medida em que a proporção de biocarvão aumentou na mistura *solo*+biocarvão (Figura 11B). Esse aumento foi perceptível desde a dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup>, com  $q_e$  alcançando o valor máximo (0,0220 mg de Si adsorvido por g da mistura *solo*+biocarvão) na dose de 40 Mg ha<sup>-1</sup> (Figura 11A). Considerando a dose de 40 Mg ha<sup>-1</sup> e o horizonte com caráter coeso estudado, com sua densidade de 1,55 g cm<sup>-3</sup> e espessura de 49 cm, isso implica a capacidade de adsorver 11,2 kg de Si a mais, por hectare, em comparação ao tratamento controle.

Figura 11 – (A) Capacidade de adsorção de Si ( $q_e$ ) em função das doses de biocarvão. (B) Regressão entre  $q_e$  e as doses de biocarvão.



Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância. As barras representam o erro padrão da média. \*\*Coeficiente angular significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Wang, Xiao e Chen (2018), em estudo que avaliou a cinética de dissolução de Si mediante a adição de biocarvões no solo (biomassas pirolisadas: casca de arroz, palha de arroz, serragem e casca de laranja; taxa de aplicação: 2,5% w/w), afirmam que, uma vez incorporado ao solo, o condicionador possui capacidade de adsorver o silício, presumivelmente em sua estrutura porosa, em um processo de adsorção física – o que o torna um reservatório (dreno) do elemento químico. Os autores ainda relatam que o efeito é mais pronunciado em biocarvões oriundos de resíduos com baixo teor de silício, especialmente aqueles advindos de espécies vegetais não acumuladoras do elemento – como é o caso do cajueiro, planta cujos resíduos do pseudofruto foram utilizados na pirólise e obtenção do biocarvão utilizado neste experimento.

O adensamento em horizontes de solo com caráter coeso tem relação com processos de polimerização e precipitação reversível de compostos silicosos e sílicoaluminosos de baixa cristalinidade (Mota *et al.*, 2021). Diante do exposto, infere-se que o biocarvão obtido do resíduo do bagaço de caju tem o potencial de adsorver o Si, evitando sua precipitação e, por consequência, atuando como mitigador da coesão já estabelecida em solos e, provavelmente, interrompendo o processo iniciado da gênese de horizontes de solos com caráter coeso. A principal hipótese é que a adsorção se dê por mecanismos físicos de interação do Si com os poros da superfície do biocarvão. Entretanto, não se pode descartar a possibilidade de interação entre espécies de Si e grupos funcionais da superfície das partículas de biocarvão.

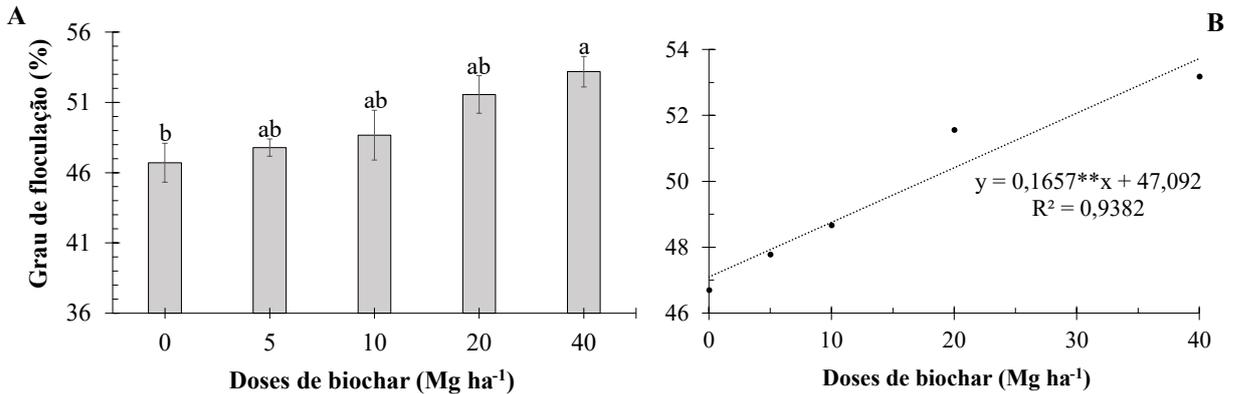
Destaca-se que apenas o tratamento B40 diferiu estatisticamente do tratamento controle (B0). Desse modo, infere-se que é necessária a aplicação de biocarvão em quantidade considerável ( $40 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) para que a adsorção de silício, em horizonte com caráter coeso, seja favorecida. Baiamonte *et al.* (2019) citam que doses de biocarvão até  $10 \text{ Mg ha}^{-1}$  são mais viáveis economicamente, em termos de retorno financeiro. Contudo, se o objetivo for a adsorção do agente de cimentação (compostos amorfos ou de baixa cristalinidade) e melhoria da qualidade física de horizonte com caráter coeso, a dose de  $10 \text{ Mg ha}^{-1}$  não seria eficiente – justificando a adoção de taxa de aplicação mais elevada ( $40 \text{ Mg ha}^{-1}$ ).

#### 4.2 Grau de flocculação de argilas

Do ponto de vista de sua composição granulométrica, o horizonte estudado possui 56% de areia, 8% de silte e 36% de argila, pertencendo à classe textural argilo-arenosa – o que está de acordo com o esperado, já que os horizontes com caráter coeso, geralmente, possuem textura média, argilosa ou muito argilosa (Santos *et al.*, 2018).

O grau de flocculação foi calculado com base no teor de argila total e de argila dispersa em água, com o valor referente à dose de  $40 \text{ Mg ha}^{-1}$  (53,18%) tendo diferido estatisticamente do tratamento controle – B0 (Figura 12A). Adicionalmente, constatou-se que houve tendência significativa de aumento desse atributo com o aumento da dose de biocarvão (Figura 12B), pois o coeficiente angular da reta de regressão foi significativo a 1% de probabilidade.

Figura 12 – (A) Grau de floculação em função das doses de biocarvão. (B) Regressão entre grau de floculação e as doses de biocarvão.



Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância. As barras representam o erro padrão da média. \*\*Coeficiente angular significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O aumento no grau de floculação ocorreu porque as partículas de biocarvão atuam como agentes de ligação que, uma vez adicionadas ao solo, estão sujeitas ao processo de oxidação – resultando na presença de grupos carboxílicos em sua superfície que funcionam como sítios de interação com cátions e partículas minerais (Glasser *et al.*, 2002). Essa informação é confirmada por Fregolente *et al.* (2023) que, ao realizarem o envelhecimento químico do biocarvão de bagaço de caju, constataram aumento na proporção de grupos funcionais contendo oxigênio como carboxila, carbonila e hidroxila. As partículas de biocarvão ainda podem atuar reduzindo o balanço de forças repulsivas no solo (Hu *et al.*, 2021). Esses fatores favorecem o processo de floculação e a agregação (Nascimento *et al.*, 2023).

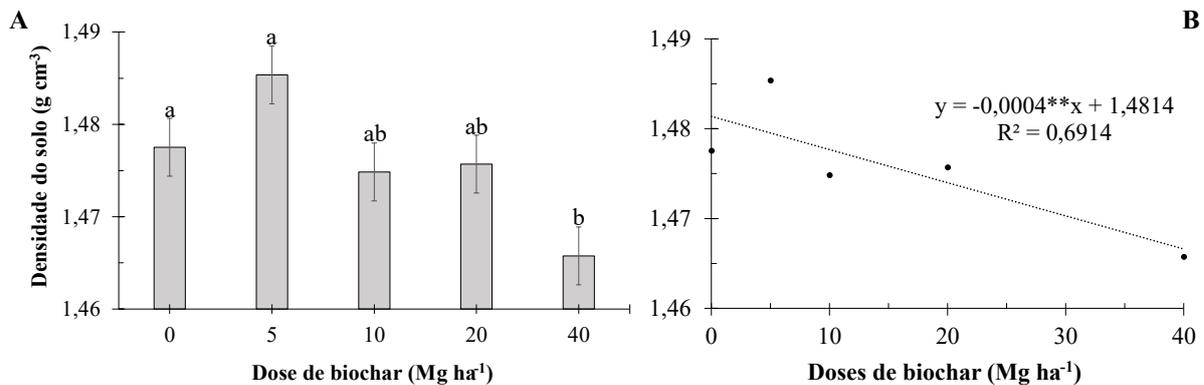
O grau de floculação é uma medida da quantidade de argila floculada (Souza *et al.*, 2018), portanto, da proporção de argila que não está sujeita a movimentação quando da passagem da água. Dessa feita, a aplicação do biocarvão de bagaço de caju, por favorecer a floculação das argilas, diminui o potencial de movimentação dessas partículas no solo, amenizando o risco de entupimento de poros e aumento da densidade. Isso implica ganhos em termos de qualidade física em horizontes com caráter coeso, cuja coesão está associada, em parte, ao entupimento de poros por argila (Silva *et al.*, 2020; Moreau *et al.*, 2006).

É importante mencionar que o teor de argila dispersa em água e o grau de floculação são indicadores da suscetibilidade do solo à erosão, sendo parâmetros comumente empregados em modelos que simulam perdas de solo (Igwe, 2005). Desse modo, o aumento do grau de floculação das argilas proporcionado pela aplicação do biocarvão implica em menor erodibilidade para o solo avaliado.

### 4.3 Densidade do solo

Houve tendência significativa de redução da densidade do solo com o aumento da dose de biocarvão (Figura 13B). O menor valor da variável foi referente à dose de 40 Mg ha<sup>-1</sup> (Figura 13A) – que diferiu estatisticamente do tratamento controle.

Figura 13 – (A) Densidade do solo em função das doses de biocarvão. (B) Regressão entre densidade do solo e as doses de biocarvão.



Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância. As barras representam o erro padrão da média. \*\*Coeficiente angular significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Sabe-se que aplicação de biocarvão favorece a agregação das partículas do solo, com melhoria da sua porosidade – especialmente da macroporosidade – o que implica aumento de volume e redução da densidade do solo (Nascimento *et al.*, 2023). Isso ocorre porque as partículas de biocarvão são capazes de interagir com cátions e partículas minerais, além de reduzir o balanço líquido de forças repulsivas no solo, favorecendo o processo de agregação (Hu *et al.*, 2021; Ibrahim *et al.*, 2013; Glaser *et al.*, 2002). Salienta-se que horizontes com caráter coeso apresentam densidade elevada (entre 1,50 e 1,80 g cm<sup>3</sup>) (Ribeiro, 2001; Araújo Filho; Carvalho; Silva, 2001) e, comumente, fraca organização estrutural (Lima Neto *et al.*, 2009). Portanto, estratégias que favoreçam a agregação – com aumento da porosidade e redução da densidade do solo – são fundamentais para tornar o ambiente físico do solo mais favorável ao desenvolvimento de plantas.

Outro fator a ser considerado é que a densidade do solo, em geral, costuma ser maior do que a densidade dos diversos tipos de biocarvão. Dessa forma, a mistura de um material de menor densidade (biocarvão) com outro de maior densidade (solo) implica redução na razão massa/volume do todo, isto é, na densidade do solo após a incorporação do condicionador. Esse

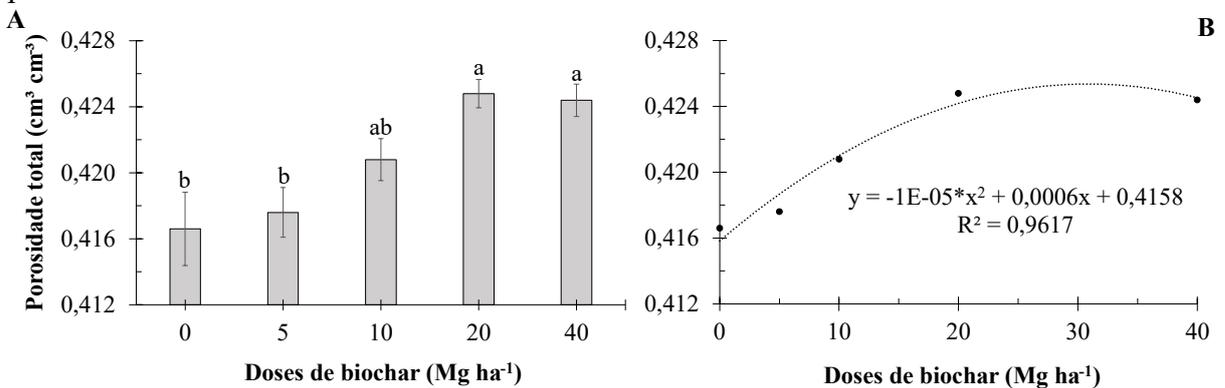
efeito é tão mais pronunciado quanto maior for a dose aplicada e quanto maior for a diferença entre a densidade do solo e a do biocarvão utilizado (Blanco-Canqui, 2017).

A densidade do solo é um indicador chave que possui relação com diversos outros atributos físicos do solo, como porosidade total e resistência mecânica à penetração de raízes (Al-Shammary *et al.*, 2018; Keller; Håkansson, 2010). Dessa feita, conforme era esperado, a redução na variável mediante a aplicação do biocarvão de bagaço de caju resultou em melhoria de outros indicadores da qualidade física para o solo avaliado, conforme será detalhado nos tópicos a seguir.

#### 4.4 Porosidade total, macroporosidade e microporosidade

Houve aumento significativo da porosidade total para os tratamentos B20 e B40, que diferiram estatisticamente em relação ao tratamento controle – B0 (Figura 14A). Os valores máximos da variável, correspondentes às doses de 20 e 40  $\text{Mg ha}^{-1}$ , foram de 0,4248 e 0,4244  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , respectivamente. Já o ponto de máximo da função quadrática (Figura 14B) correspondeu à dose 30  $\text{Mg ha}^{-1}$  e à porosidade total de 0,4248  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  (coordenada  $x$  e  $y$  do vértice da parábola, respectivamente).

Figura 14 – (A) Porosidade total em função das doses de biocarvão. (B) Regressão entre porosidade total e as doses de biocarvão.



Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância. As barras representam o erro padrão da média. \*Coeficiente dominante do polinômio significativo a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

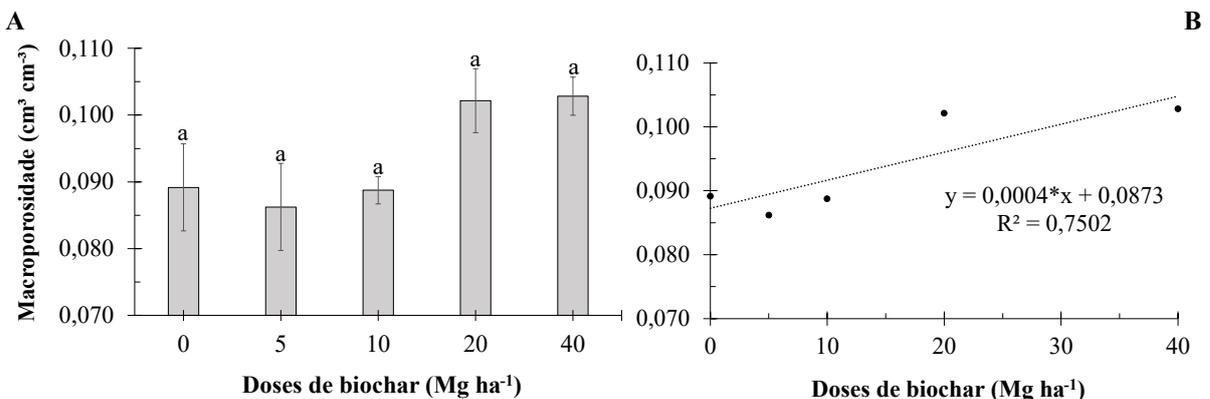
Como já fora relatado na seção anterior, conforme observado em outros estudos, a aplicação de biocarvão favorece a agregação de partículas e, com isso, aumento da porosidade total do solo (Nascimento *et al.*, 2023). Essas lacunas entre partículas e agregados formam uma complexa rede de poros de vários tamanhos (Hao *et al.*, 2008), cuja funcionalidade é crucial

para o desenvolvimento de plantas. O interior dos agregados é dotado de microporos (poros de retenção de água), enquanto o espaço entre os agregados corresponde à macroporos (poros de fluxo de água e gás) (Reichardt; Timm, 2022). Portanto, a agregação proporcionada pela interação das partículas de biocarvão com as partículas do solo resulta na formação de novos macroporos, com correspondente aumento na porosidade total. Esse fato é de extrema relevância na melhoria da qualidade física de horizontes com caráter coeso que, geralmente, possuem estrutura maciça – isto é, com baixa proporção de macroporos (Mota *et al.*, 2021).

Outro fator importante é que a aplicação de biocarvão favorece a atividade biológica do solo, com aumento da porosidade devido ao processo de bioturbação (Blanco-Canqui, 2017). Embora essa ocorrência não tenha sido detectada neste estudo, é válido mencionar a sua possibilidade.

Mesmo que as médias não tenham diferido estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade (Figura 15A), houve tendência significativa de aumento da macroporosidade em resposta às doses do biocarvão de bagaço de caju (Figura 15B) – neste caso, a análise de regressão foi suficiente para detectar os efeitos dos tratamentos no solo. Mota *et al.* (2018), estudando horizontes com e sem caráter coeso no Estado do Ceará, concluíram que os horizontes coesos possuem menor macroporosidade, o que resulta em restrições a fluxos de água e ar, prejudicando o crescimento de plantas. Com isso, a aplicação do biocarvão testado, com incremento da macroporosidade, surge como alternativa de melhoria da permissão a fluxos de água e ar em horizontes com caráter coeso, confirmada pelo incremento da permeabilidade ao ar (tópico 4.5) e da condutividade hidráulica do solo saturado (tópico 4.8).

Figura 15 – (A) Macroporosidade em função das doses de biocarvão. (B) Regressão entre macroporosidade e as doses de biocarvão.



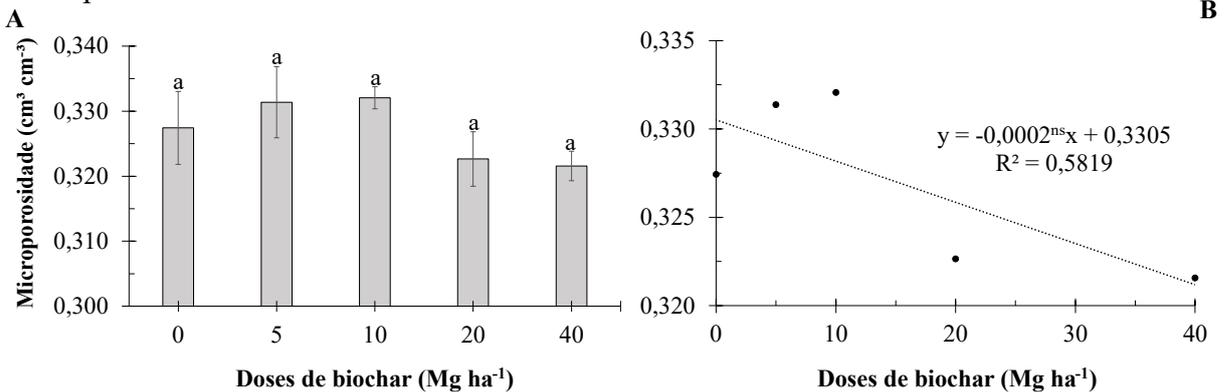
Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância. As barras representam o erro padrão da média. \*Coeficiente angular significativo a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro fator a ser considerado é o tempo de incubação das amostras que, neste estudo, foi de dez semanas, coincidindo com os ciclos de umedecimento e secagem. Infere-se que com um tempo de incubação maior os efeitos da aplicação do biocarvão de bagaço de caju sobre a macroporosidade e a porosidade total sejam ainda mais expressivos.

No que diz respeito à microporosidade, não houve diferença estatística entre o tratamento controle e os tratamentos com aplicação do biocarvão de bagaço de caju (Figura 16A). Em adição, apesar de haver tendência de redução da variável com o aumento da dose de biocarvão (Figura 16B), o coeficiente angular da regressão linear não foi significativo, portanto, variações na dose de biocarvão não implicaram, necessariamente, em variações na microporosidade. Desse modo, embora a capilaridade possa atuar nos poros das partículas de biocarvão (Batista *et al.*, 2018), o que os qualificariam, do ponto de vista físico, como microporos ( $\varnothing \geq 50 \mu\text{m}$ ), a adição do biocarvão não resultou em aumento da microposidade do solo. Isso corrobora a afirmação de que o aumento na porosidade total, mediante a aplicação do condicionador, foi proporcionado pelo aumento da macroporosidade – e não por um eventual aumento na microporosidade que, estatisticamente, permaneceu constante.

Figura 16 – (A) Microporosidade em função das doses de biocarvão. (B) Regressão entre microporosidade e as doses de biocarvão.



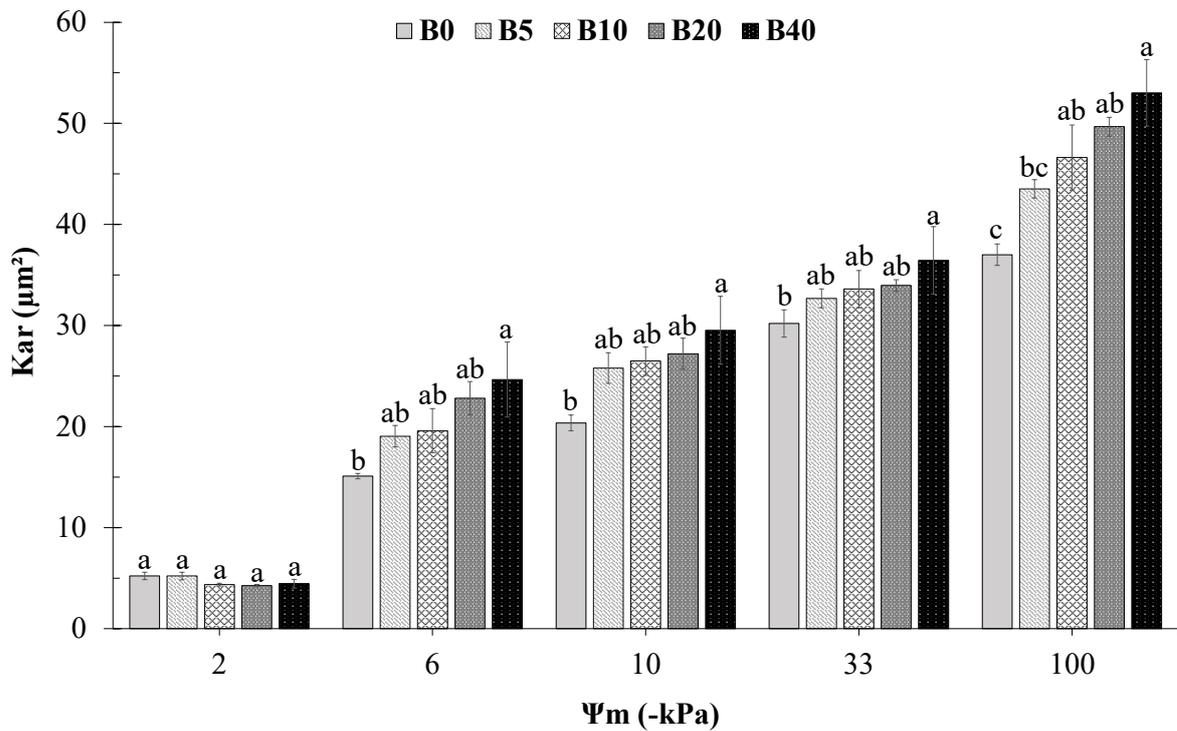
Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância. As barras representam o erro padrão da média. <sup>ns</sup>Coeficiente angular não significativo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.5 Permeabilidade do solo ao ar

No que se refere à permeabilidade do solo ao ar ( $K_{ar}$ ), Figura 17, houve aumento da área disponível ao fluxo de ar mediante a aplicação do biocarvão testado, com exceção à condição mais próxima da saturação ( $\Psi_m = -2 \text{ kPa}$ ). A dose do condicionador equivalente a 40 Mg ha<sup>-1</sup> foi a mais eficiente na melhoria desse atributo.

Figura 17 – Permeabilidade do solo ao ar ( $K_{ar}$ ) para amostras com umidade equilibrada com os potenciais mátricos de -2, -6, -10, -33 e -100 kPa; nas doses avaliadas.



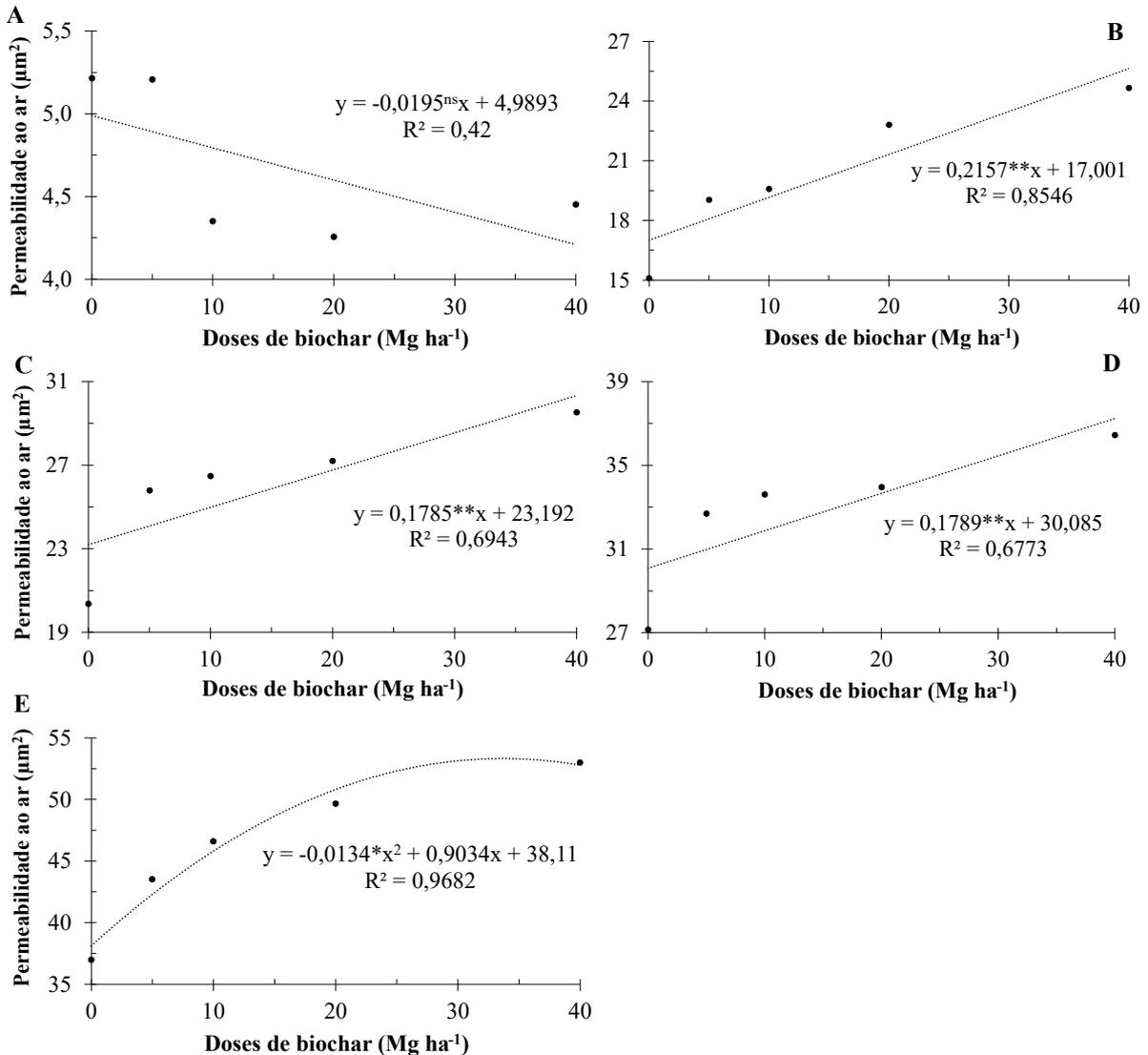
Médias seguidas pela mesma letra, na mesma tensão, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância. As barras representam o erro padrão da média.

Fonte: Elaborado pelo autor.

As trocas gasosas entre o solo e a atmosfera são fundamentais para garantir a renovação do suprimento de  $O_2$  no solo, bem como a saída do  $CO_2$  produzido pelo processo respiratório das plantas e organismos edáficos (Lal; Shukla, 2004). Caso as trocas gasosas não operem de forma plena, é possível que muitas plantas experimentem toxidez por  $CO_2$  antes mesmo de sofrerem com a falta do  $O_2$  (Hillel, 2003). Em horizontes com caráter coeso, a diminuição da porosidade total com o aumento da densidade do solo resulta em comprometimento aos fluxos de água e ar (Giarola *et al.*, 2001), com conseqüente prejuízo ao crescimento de plantas. Dessa forma, a aplicação do biocarvão testado, por aumentar a permeabilidade ao ar, configura uma alternativa promissora para a melhoria da qualidade física desses horizontes quando da facilitação às trocas gasosas.

Com exceção à condição mais próxima da saturação ( $\Psi_m = -2$  kPa, Figura 18A), a tendência de aumento da permeabilidade do solo ao ar com o aumento da dose de biocarvão foi estatisticamente significativa, Figuras 18 B, C, D e E. Dessa forma, o aumento da dose implicou, necessariamente, aumento de  $K_{ar}$  (correlação direta).

Figura 18 – Regressão entre permeabilidade do solo ao ar ( $K_{ar}$ ) e as doses de biocarvão para cada potencial mátrico avaliado, a saber: (A) -2 kPa, (B) -6kPa, (C) -10 kPa, (D) -33 kPa, (E) - 100 kPa.



\*Coeficiente angular (regressão linear) ou coeficiente dominante (regressão quadrática) significativo a 5% de probabilidade; \*\*Significativo a 1% de probabilidade; <sup>ns</sup>Não significativo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para McQueen e Shepherd (2002), o valor limítrofe de  $K_{ar}$  que possibilita o desenvolvimento adequado da maioria das plantas é de  $1 \mu m^2$  de área disponível ao fluxo de ar. Isso garante que o  $CO_2$  seja removido do solo e o  $O_2$  seja renovado. Embora, em todos os cenários avaliados, os valores de  $K_{ar}$  tenham sido superiores a  $1 \mu m^2$ , os maiores valores da variável corresponderam aos tratamentos com aplicação de biocarvão. Esse aumento pode ser explicado pela maior macroporosidade proporcionada pelo condicionador, cujas partículas eletricamente ativas favorecem a floculação e agregação das partículas do solo – com aumento

da porosidade total, especialmente dos poros de condução de ar (macroporos) (Nascimento *et al.*, 2023).

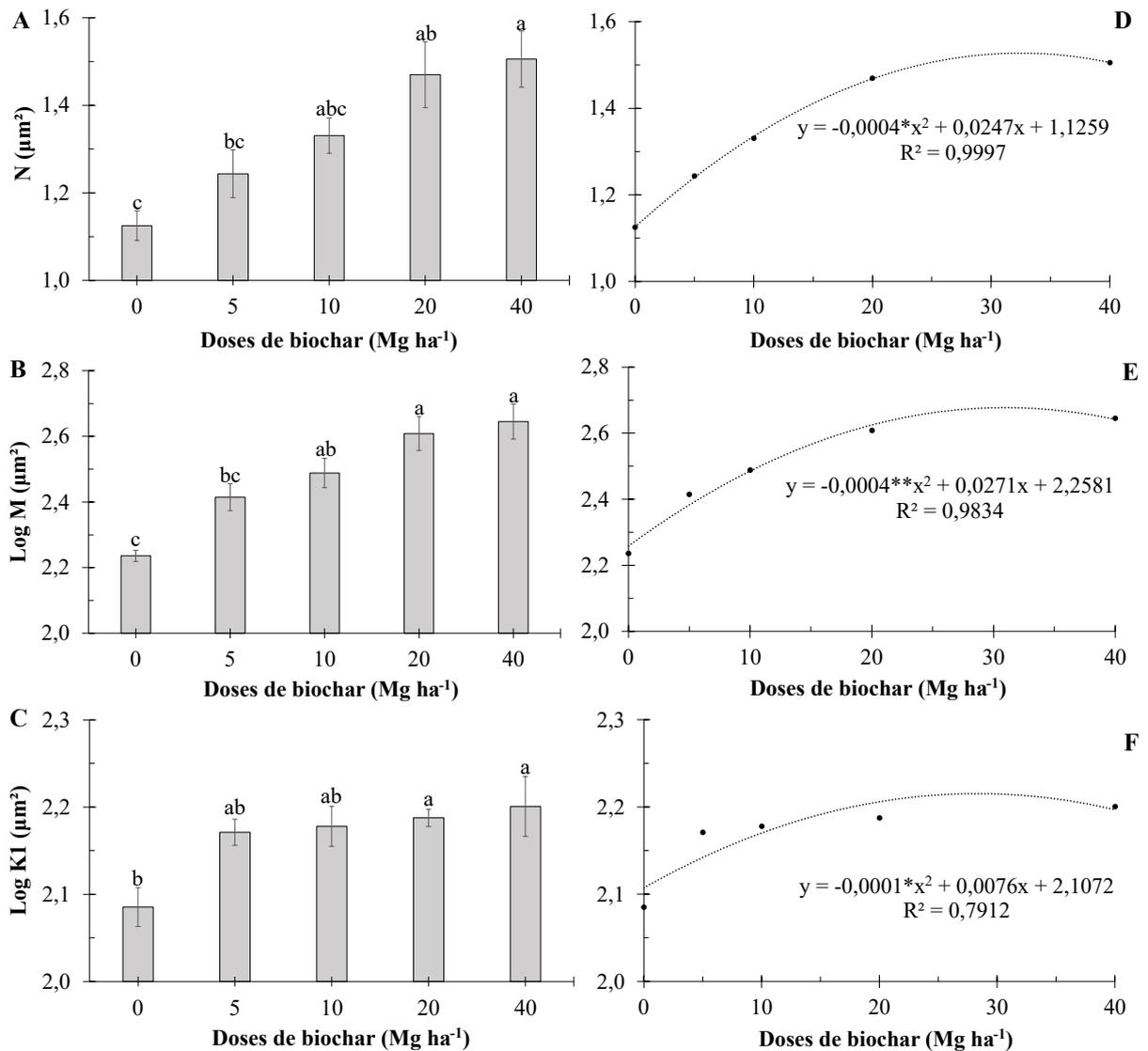
Além disso, a aplicação de biocarvão resultou em maior conectividade de poros (vide tópico 4.6 “índices de continuidade de poros”). Portanto, os poros do solo passaram a integrar uma rede mais contínua, o que significa que houve melhoria nos processos de troca gasosa e na qualidade estrutural do solo (Alencar *et al.*, 2018), constatada pelos maiores valores de permeabilidade do solo ao ar observados. Entretanto, salienta-se que se trata de uma avaliação puramente quantitativa, portanto, não é possível inferir sobre a orientação espacial de tais poros. Lima *et al.* (2006), ao avaliarem a rede porosa de um Argissolo Acinzentado com caráter coeso, utilizando a técnica da micromorfologia, constataram que os poros do horizonte coeso são orientados, preferencialmente, na horizontal – o que pode prejudicar fluxos de água e gases através do solo. Desse modo, sugere-se a realização de investigações futuras, utilizando técnicas como a tomografia computadorizada ou a micromorfologia, para avaliar os efeitos da adição de biocarvão sobre a conectividade e orientação da rede porosa de horizontes com caráter coeso.

É importante destacar que o único caso em que houve tendência de redução da permeabilidade ao ar com o aumento da dose de biocarvão foi no potencial mátrico de -2 kPa, contudo, essa tendência não foi significativa (Figura 18A) e não houve diferença estatística entre os valores médios do atributo observados nessa situação (Figura 17). Menciona-se que, antes da pirólise, a biomassa foi moída e passada em peneira com abertura de malha de 2 mm, portanto, o material pirolisado foi composto por partículas com diâmetro equivalente inferior a 2 mm. Nesse sentido, infere-se que as partículas do biocarvão testado podem, eventualmente, obstruir poros com diâmetro maior ou igual a 150  $\mu\text{m}$ , o que resultaria na – ainda que não significativa – tendência de redução de  $K_{\text{ar}}$  nessa tensão. Essa afirmação corrobora o aumento da porosidade bloqueada com o aumento da dose de biocarvão de bagaço de caju, detalhado no tópico 4.6 deste manuscrito.

#### **4.6 Índices de continuidade de poros**

Houve efeito significativo de tratamentos, com os maiores valores de  $\text{Log } M$  e  $\text{Log } K_l$  correspondendo às doses de 20 e 40  $\text{Mg ha}^{-1}$  (Figuras 19B e C, respectivamente); e os maiores valores de  $N$  correspondendo à dose de 40  $\text{Mg ha}^{-1}$  (Figura 19A). Também houve tendência significativa de aumento desses índices com o aumento da dose do biocarvão (Figuras 19 D, E e F, respectivamente).

Figura 19 – (A) Índice de continuidade de poros  $N$ ; (B)  $\text{Log } M$ ; e (C)  $K_l$  em função das doses de biocarvão. Regressão entre  $N$  (D),  $\text{Log } M$  (E),  $K_l$  (F) e as doses de biocarvão.



Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância. As barras representam o erro padrão da média. \*Coeficiente dominante significativo a 5% de probabilidade; \*\*Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

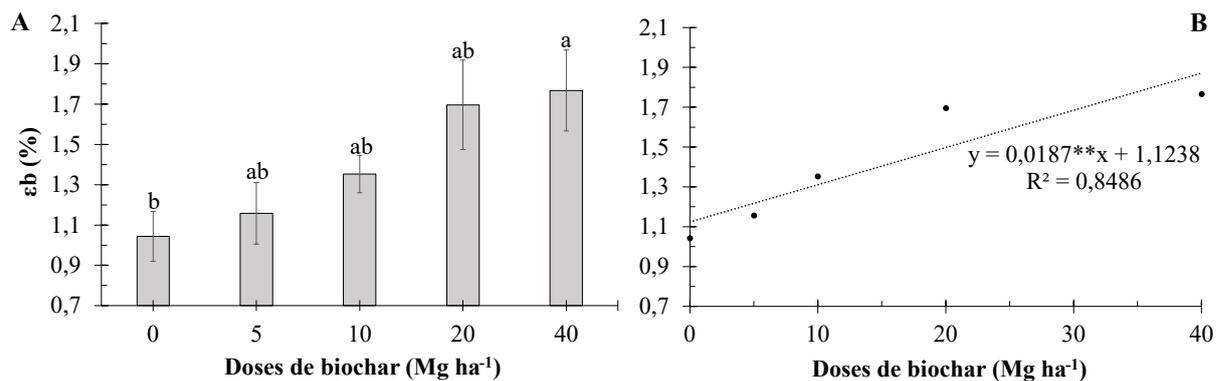
O ponto de máximo da função quadrática  $N$ ,  $\text{Log } M$ ,  $\text{Log } K_l$  vs. doses de biocarvão (Figura 19D) correspondeu à dose de 30,9 Mg ha<sup>-1</sup>, 33,9 Mg ha<sup>-1</sup> e 38 Mg ha<sup>-1</sup>. Diante disso, infere-se que doses de biocarvão de bagaço de caju entre 20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup> são eficientes na melhoria da conectividade dos poros de horizontes com caráter coeso.

Maiores valores de  $N$ ,  $\text{Log } M$  e  $\text{Log } K_l$  implicam melhoria da conectividade da rede porosa do solo, com um maior número de poros contribuindo com os fluxos de gases (Alencar *et al.*, 2016). Isso explica os maiores valores de permeabilidade do solo ao ar nos tratamentos com aplicação de biocarvão, como visto no tópico anterior. Portanto, a aplicação do biocarvão

testado resultou em aumento da conectividade de poros e da permeabilidade do solo ao ar, com melhoria da qualidade física de horizonte com caráter coeso, uma vez que esse tipo de horizonte apresenta, por natureza, restrições ao movimento de gases (Giarola *et al.*, 2001).

Já no que diz respeito à porosidade bloqueada, houve tendência significativa de aumento da variável com o aumento da dose de biocarvão, sendo o maior valor da variável referente à dose de 40 Mg ha<sup>-1</sup> (Figuras 20A e 20B).

Figura 20 – (A) Porosidade bloqueada ( $\varepsilon_b$ ) em função das doses de biocarvão. (B) Regressão entre  $\varepsilon_b$  e as doses de biocarvão.



Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância. As barras representam o erro padrão da média. \*\*Coeficiente angular significativo a 1% de probabilidade.

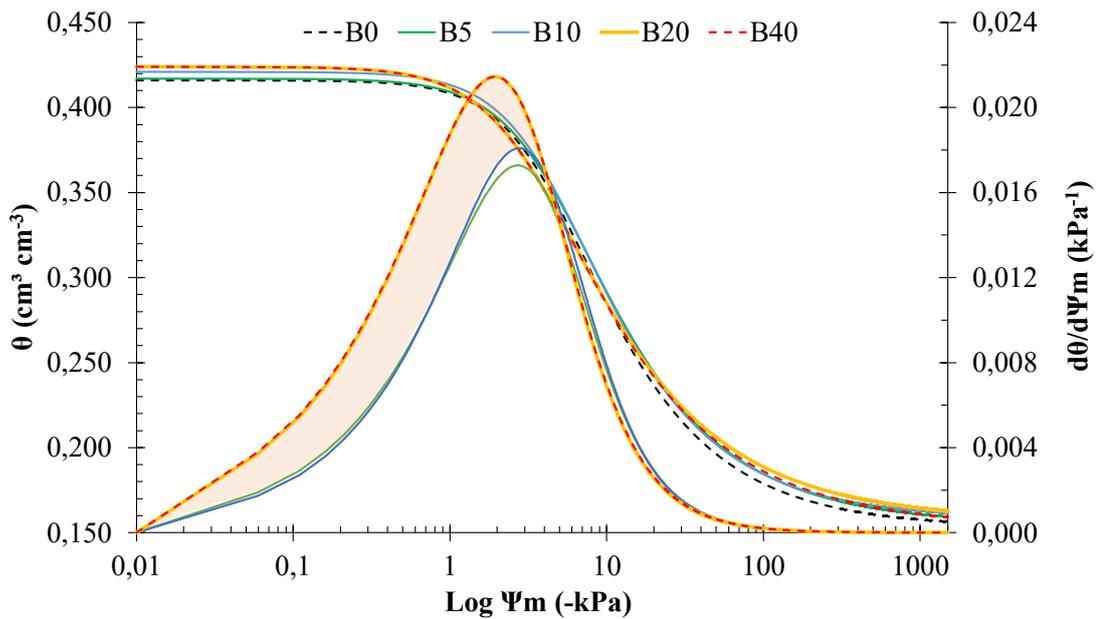
Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme visto na Figura 18A, tópico 4.5, com o aumento da dose de biocarvão, houve tendência – ainda que não significativa – de redução da permeabilidade ao ar no potencial mátrico de -2 kPa. O aumento da porosidade bloqueada pela adição de material particulado ao solo também foi relatado por Alencar *et al.* (2016). Segundo Blanco-Canqui (2017), partículas finas de biocarvão podem obstruir os macroporos do solo. Diante disso, infere-se que as partículas do biocarvão testado obstruíram poros com diâmetro maior ou igual a 150  $\mu\text{m}$ , o que resultou em redução na permissão a fluxos de gás nesse potencial mátrico – com aumento na porosidade bloqueada, ou seja, na proporção de poros que não participam do processo de convecção. Entretanto, esse aumento resultou em poucos efeitos sobre a permeabilidade do solo ao ar – que aumentou, com exceção no potencial mátrico de -2 kPa, em resposta ao incremento da macroporosidade e da conectividade da rede porosa do solo proporcionados pelo biocarvão. Contudo, é válido inferir que o processo natural de envelhecimento do biocarvão pode resultar em alteração do tamanho das partículas e, eventualmente, resultar no entupimento de poros de outras faixas de tamanho.

#### 4.7 Curva de água no solo e distribuição de poros por tamanho

Constam, na Figura 21, a curva de água no solo e a curva de distribuição de poros por tamanho para o controle e os demais tratamentos com aplicação de biocarvão.

Figura 21 – Curva de água no solo (eixo principal) e curva de distribuição de poros por tamanho (eixo secundário) para os tratamentos avaliados. A área alaranjada indica o aumento da macroporosidade nos tratamentos B20 e B40.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já na Tabela 2 é possível visualizar os parâmetros do modelo de van Genuchten (1980) para os tratamentos avaliados.

Tabela 2 – Parâmetros do modelo de van Genuchten (1980) para os tratamentos avaliados.

Tratamento	Parâmetros do modelo de van Genuchten (1980)				
	$\alpha$ (kPa <sup>-1</sup> )	$m$	$n$	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )
B0	0,225 a	0,429 a	1,758 a	0,153 a	0,417 b
B5	0,229 a	0,416 a	1,718 a	0,155 a	0,418 b
B10	0,221 a	0,429 a	1,755 a	0,158 a	0,421 ab
B20	0,297 a	0,387 a	1,634 a	0,157 a	0,425 a
B40	0,297 a	0,381 a	1,619 a	0,153 a	0,424 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, na coluna, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para Jorge, Corá e Barbosa (2010), duas curvas de água no solo são matematicamente iguais quando os parâmetros do modelo que as descrevem, no caso, o modelo de van Genuchten (1980), não diferem estatisticamente. Nota-se que houve diferença significativa apenas para o parâmetro  $\theta_s$  – com destaque para as doses de 20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup> (Tabela 2). Portanto, apesar da similaridade estatística dos demais parâmetros, a aplicação do biocarvão de bagaço de caju resultou em curvas de água no solo distintas em relação à situação controle, especialmente nas maiores doses (20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup>). O parâmetro  $\theta_s$  equivale à porosidade total do solo (Figura 14), que tende a aumentar devido ao aumento da macroporosidade e redução da densidade do solo proporcionada pela adição do condicionador (Singh *et al.*, 2022; Verheijen *et al.*, 2019).

Já o parâmetro  $\alpha$ , escalonador do potencial mátrico (van Lier; Pinheiro, 2018), e os parâmetros  $m$  e  $n$ , relacionados à forma da curva (Nascimento *et al.*, 2018b), não diferiram estatisticamente entre os tratamentos considerados. Com isso, pode-se inferir que as curvas foram similares quanto à sua forma, com a maior diferença sendo relacionada ao parâmetro  $\theta_s$  – que foi maior nos tratamentos com aplicação do biocarvão devido ao aumento da porosidade total e da macroporosidade do solo.

Observando a curva de retenção de água no solo (Figura 21, eixo principal), nota-se que, principalmente para as doses de 20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup>, houve incremento da umidade do solo na faixa que corresponde à macroporosidade, ou seja, desde a saturação ( $\Psi_m = 0$ ) até  $\Psi_m = -6$  kPa (Reichardt; Tim, 2022). Isso confirma o aumento da macroporosidade em resposta à adição do biocarvão, claramente visualizando na área alaranjada da curva de distribuição de poros por tamanho (Figura 21, eixo secundário). Para Nascimento *et al.* (2018a), uma das vantagens da curva de distribuição de poros por tamanho é facilitar a avaliação da estrutura do solo mesmo em situações em que as curvas de retenção de água sejam muito similares, como o são no caso deste experimento.

Observando a curva de distribuição de poros por tamanho (Figura 21, eixo secundário), para os tratamentos B0 e B40, o poro mais frequente está associado ao potencial mátrico de -1,96 kPa, correspondendo a aproximadamente 150  $\mu\text{m}$  de diâmetro. Ressalta-se que houve tendência de redução da permeabilidade ao ar no potencial mátrico de -2 kPa (Figura 18A) e de aumento da porosidade bloqueada (Figura 20B) com aumento taxa de aplicação, sendo esse efeito mais pronunciado nas maiores doses (20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup>) – o que sugere que as partículas do biocarvão testado podem obstruir poros com diâmetro  $\geq 150$   $\mu\text{m}$ . Entretanto, a maior proporção de poros de 150  $\mu\text{m}$  de diâmetro pode ter compensado o efeito da obstrução nesses tratamentos, de modo que a tendência de redução da permeabilidade do solo ao ar em -

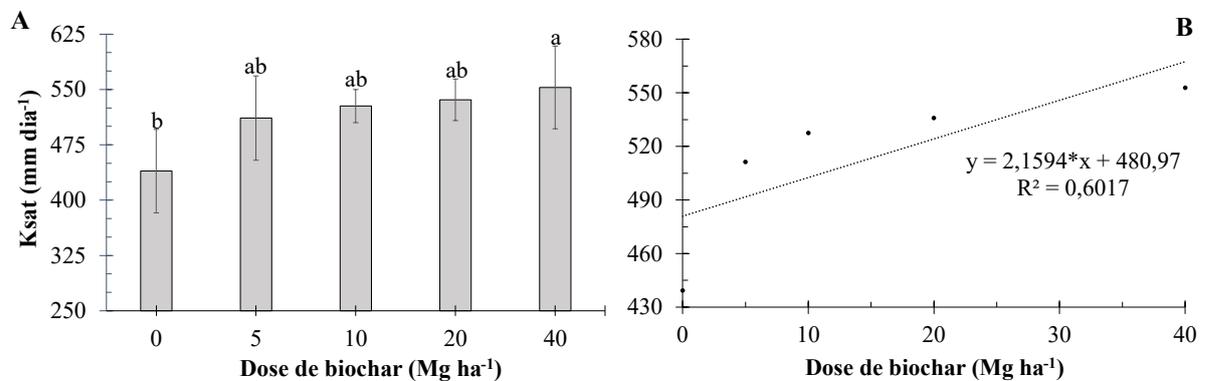
2 kPa sequer foi significativa (Figura 18A). Outro fator que pode ter compensado essa obstrução foi o aumento da conectividade da rede porosa do solo (tópico 4.6) com o incremento da dose do biocarvão, o que resulta em facilitação aos processos de troca gasosa (Alencar *et al.*, 2016).

Por fim, menciona-se que a semelhança no formato das curvas de água no solo implica similaridade em termos de retenção de água, a despeito da aplicação do biocarvão testado. Diante disso, a água disponível às plantas, calculada pela diferença entre a umidade na capacidade de campo ( $\Psi_m = -33$  kPa) e no ponto e murcha permanente ( $\Psi_m = -1500$  kPa), teve pequena variação – sendo igual a  $0,055 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  no tratamento controle e a  $0,060 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  na maior dose de biocarvão ( $40 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), o que representa aumento de 9,1% - efeito positivo que não pode ser desconsiderado para solos utilizados na agricultura. Isso ocorreu porque o efeito da aplicação de biocarvão sobre a água disponível geralmente é menos pronunciado em solos de textura argilosa do que em solos de textura arenosa (Edeh; Mašek; Buss, 2020; Razzaghi; Obour; Arthur, 2019), pois pode ser atenuado pela influência da fração argila (Santos, 2021).

#### 4.8 Condutividade hidráulica do solo saturado

Houve tendência significativa de aumento da condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) (Figura 22B). O valor máximo da variável foi associado à dose de  $40 \text{ Mg ha}^{-1}$  ( $552,80 \text{ mm dia}^{-1}$ ) (Figura 22A), que diferiu estatisticamente em relação ao tratamento controle.

Figura 22 – (A) Condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) em função das doses de biocarvão. (B) Regressão entre Ksat e as doses de biocarvão.



Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância. As barras representam o erro padrão da média. \*Coeficiente angular significativo a 5% de probabilidade.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

A condutividade hidráulica do solo é controlada pela geometria e distribuição de poros por tamanho (Edeh; Mašek; Buss, 2020). Como já fora relatado, houve tendência de aumento da proporção de macroporos em resposta ao incremento da dose do biocarvão avaliado

(Figura 15B) – que são poros de condução de água e ar (Reichardt; Timm, 2022). Além disso, os poros do solo passaram a integrar uma rede mais contínua (vide tópico 4.6 “índices de conectividade de poros”), com reflexos positivos não apenas à permissão ao fluxo de gás, mas também à sua habilidade em conduzir água, i.e., na sua condutividade hidráulica – que é máxima em solo saturado (Almeida *et al.*, 2017).

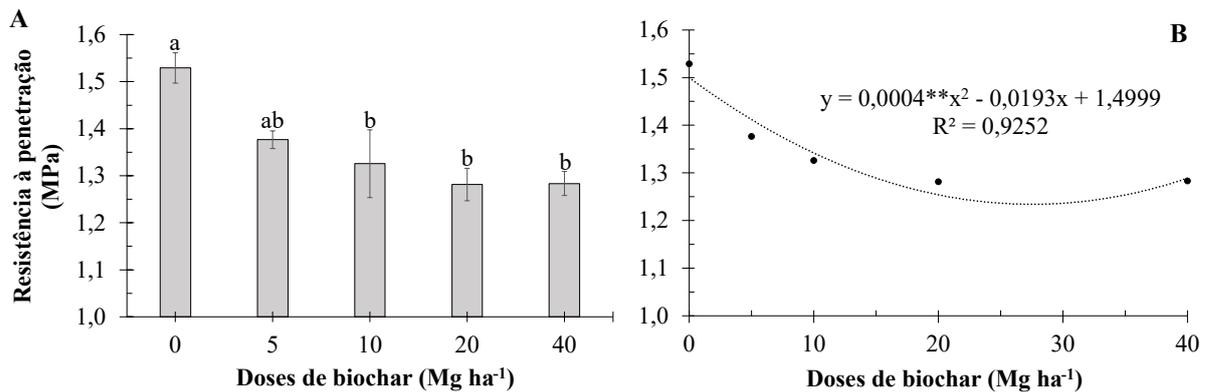
O incremento de  $K_{sat}$  em solos argilosos e/ou compactados que receberam a aplicação de biocarvão é bem documentado na literatura, sendo relacionado, muitas vezes, ao aumento da macroporosidade (Santos, 2021; Edeh; Mašek; Buss, 2020; Alghamdi, 2018). Entretanto, deve-se atentar que biocarvões com propriedades hidrofóbicas podem aumentar a repelência à água e reduzir a condutividade hidráulica do solo (Blanco-Canqui, 2017), especialmente em altas taxas de aplicação. Ressalta-se que, nas doses testadas, considerando o biocarvão de bagaço de caju, não houve manifestação de hidrofobicidade. Essa afirmação é confirmada pela similaridade das curvas de retenção de água no solo entre o tratamento controle e os demais cenários com a aplicação do biocarvão (Figura 21, Tópico 4.7).

Em horizontes com caráter coeso, a diminuição da porosidade total com o aumento da densidade do solo resulta em comprometimento aos fluxos de água e ar (Giarola *et al.*, 2001), dificultando o desenvolvimento de plantas. Dessa forma, a aplicação do biocarvão de bagaço de caju, por aumentar a condutividade hidráulica do solo saturado, consiste em alternativa viável para melhoria da qualidade física em horizontes coesos, já que a variável tem influência direta sobre os processos de infiltração e drenagem de água (Gonçalves; Libardi, 2013) e, portanto, papel chave no ciclo hidrológico (Chow; Maidment; Mays, 2013).

#### **4.9 Resistência à penetração**

Houve redução significativa nos valores de resistência à penetração (RP), medida na capacidade de campo ( $\Psi_m = -33$  kPa) – com as coordenadas do vértice da função quadrática correspondendo à RP de 1,27 MPa e à dose de 24,1 Mg ha<sup>-1</sup>. Quanto à comparação de médias, os valores mínimos da variável foram associados às doses de 10, 20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup> (1,3258; 1,2814; e 1,2834 MPa, respectivamente), Figura 23.

Figura 23 – (A) Resistência à penetração ( $\Psi_m = -33$  kPa) em função das doses de biocarvão. (B) Regressão entre resistência à penetração e as doses de biocarvão.



Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância. As barras representam o erro padrão da média. \*\*Coeficiente dominante significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O adensamento em horizontes com caráter coeso está relacionado com a precipitação reversível de compostos silicosos e sílicoaluminosos de baixa cristalinidade (Araújo Filho; Carvalho; Silva, 2001). Diante disso, infere-se que o biocarvão testado, por favorecer a adsorção do Si em detrimento da sua precipitação (vide tópico 4.1), favoreceu a diminuição da coesão, com reflexos na redução da RP.

Em adição, existe forte correlação entre a RP e outros atributos físicos como a densidade do solo (Busscher *et al.*, 1997). Dessa forma, outro fator preponderante na redução da RP mediante a aplicação do biocarvão de bagaço de caju foi a redução na densidade do solo proporcionada pelo condicionador (Figura 13).

Segundo Blanco-Canqui (2017), os efeitos da aplicação de biocarvão sobre a RP, a depender da dose e do tempo de incubação, podem não ser significativos – demandando, muitas vezes, taxas de aplicação elevadas, bem como tempo de incubação considerável para que haja alteração perceptível no atributo. Entretanto, considerando a escala deste experimento, o tipo de biocarvão, o tempo de incubação e as doses testadas, houve redução perceptível nas médias dessa variável. Os menores valores de RP, associados às doses de 10, 20 e 40 Mg ha⁻¹, implicam no desprendimento de menor esforço mecânico e gasto energético por parte do sistema radicular de plantas que crescessem nesse solo.

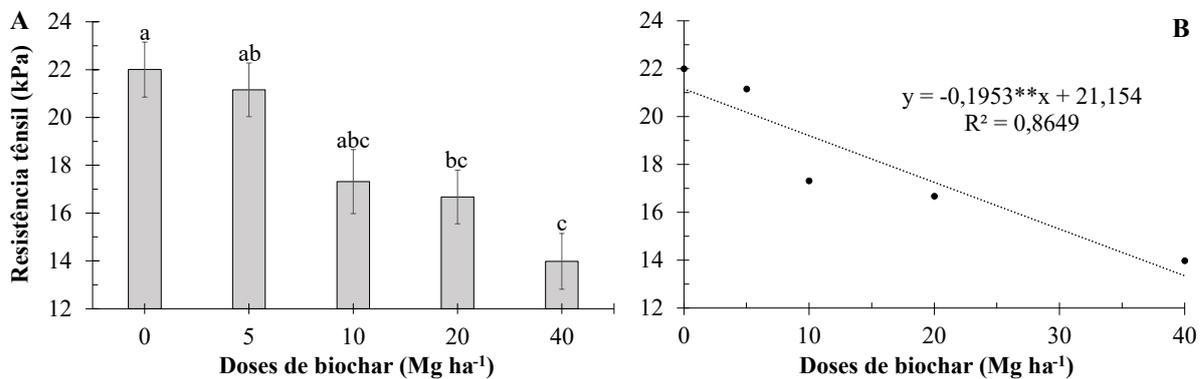
Apesar dessa redução, salienta-se que todos os valores encontrados, inclusive no tratamento controle, foram inferiores a 2MPa – limiar crítico de RP a partir do qual ocorre restrição física ao crescimento radicular da maioria das plantas cultivadas (Cortez *et al.*, 2018; Tormena; Silva; Libardi, 1998; Silva; Kay, Perfect, 1994). Sabe-se que, quando úmidos, os horizontes com caráter coeso apresentam consistência de friável a firme (Santos *et al.*, 2018).

Portanto, na umidade em que a variável foi avaliada (capacidade de campo), mesmo o tratamento sem aplicação de biocarvão exibiu valores de RP inferiores ao limiar crítico de 2 MPa – dada a redução na coesão proporcionada pela despolimerização de compostos silicosos e sílicoaluminosos de baixa cristalinidade (Araújo Filho; Carvalho; Silva, 2001). Entretanto, como dito anteriormente, os menores valores de RP foram associados a tratamentos com aplicação de biocarvão.

#### 4.10 Resistência tênsil

Houve redução significativa da resistência tênsil (RT) com o aumento dose de biocarvão (Figura 24A), com a variável atingindo o valor mínimo nas doses de 20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup> (Figura 24B). Os horizontes com caráter coeso costumam possuir RT maior do que outros horizontes sem esse atributo, sendo a variável diretamente correlacionada com o grau de coesão (Mota *et al.*, 2021). A aplicação do biocarvão foi eficiente na redução na RT e, portanto, na redução da coesão desse horizonte – uma vez que o condicionador favorece a adsorção de Si (vide tópico 4.4), diminuindo a precipitação do elemento e atuando como mitigador da coesão já estabelecida.

Figura 24 – (A) Resistência tênsil em função das doses de biocarvão. (B) Regressão entre resistência tênsil e as doses de biocarvão.



Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância. As barras representam o erro padrão da média. \*\*Coeficiente angular significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro fator a ser considerado é que a aplicação do biocarvão resultou em redução da densidade do solo (vide tópico 4.4), pois o condicionador favorece a interação entre partículas e a agregação, com conseqüente aumento da porosidade total e redução da densidade do solo e da resistência tênsil (Sokołowska *et al.*, 2020; Ahmed; Raghavan, 2017).

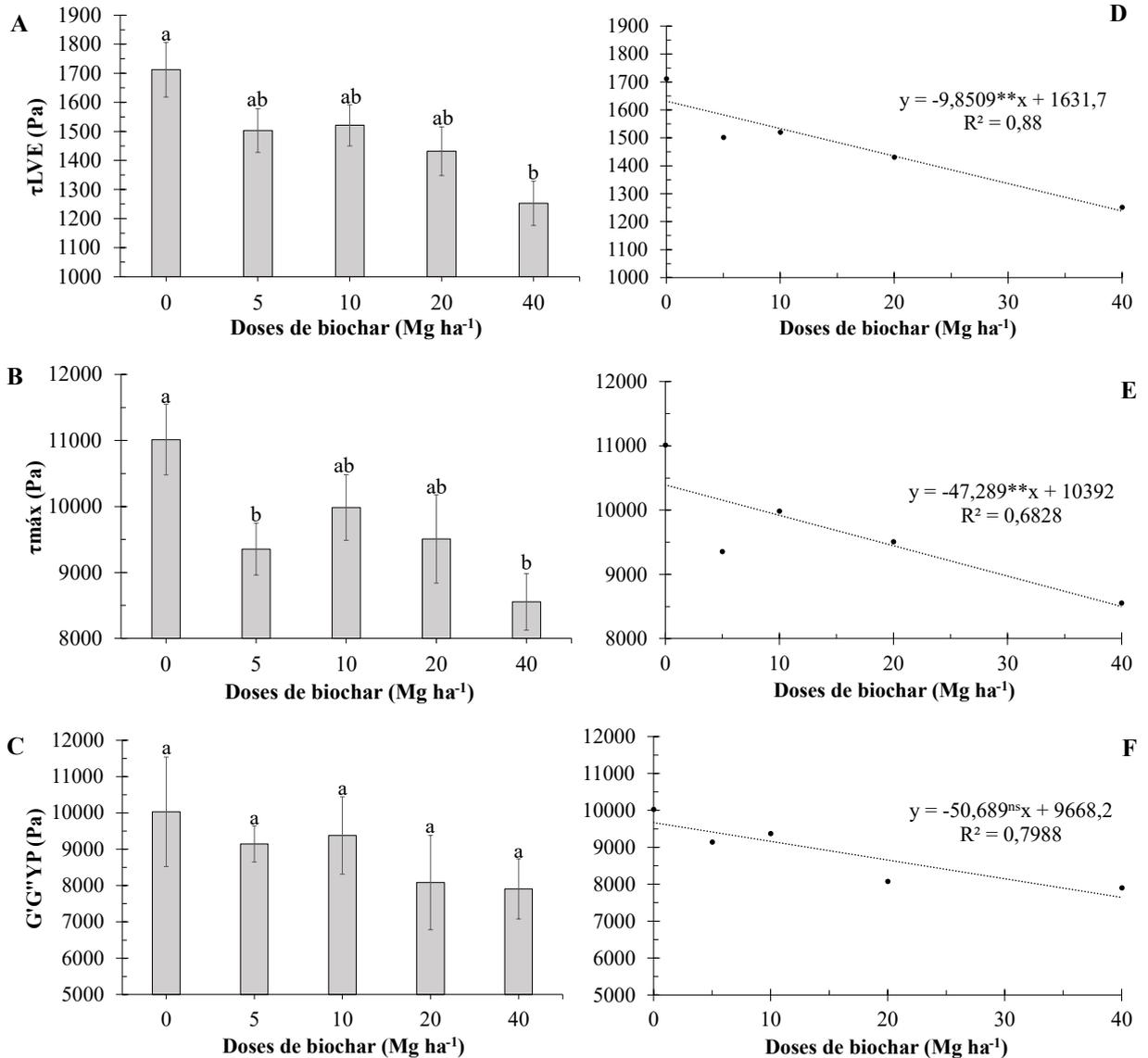
Adicionalmente, de acordo com Zong, Chen e Lu (2014), a aplicação de biocarvão é uma alternativa viável para melhoria da qualidade física do solo, resultando em redução na RT devido ao efeito da incorporação de um material poroso, de baixa densidade e que proporciona redução no número de pontos de contato entre as partículas minerais do solo – com reflexos na redução da tensão de cisalhamento e coesão. Os autores ainda afirmam que essa redução na resistência mecânica implica redução do gasto energético em operações de revolvimento do solo. Esse efeito é benéfico em horizontes com caráter coeso já que, quanto secos, a coesão dificulta as operações de preparo do solo e o desenvolvimento das plantas (Giarola; Silva, 2002).

Entretanto, esse efeito foi mais pronunciado na maior dose (40 Mg ha<sup>-1</sup>) – o que indica que doses elevadas do condicionador podem ser necessárias para gerar reduções consideráveis nesse atributo (Sokołowska *et al.*, 2020). Contudo, a redução na frequência e, por consequência, nos custos com operações de preparo da terra, como subsolagens, constantemente necessárias em áreas com solos com horizontes coesos, pode compensar os gastos com a aplicação de biocarvão – mesmo em doses elevadas.

#### 4.11 Reometria

Houve redução significativa de  $\tau_{LVE}$  e de  $\tau_{m\acute{a}x}$  mediante a aplicação do biocarvão de bagaço de caju, com os menores valores dessas variáveis referentes à dose de 40 Mg ha<sup>-1</sup> (Figura 25). Um dos fatores relacionados à redução de  $\tau_{LVE}$  e  $\tau_{m\acute{a}x}$  é a redução do número de pontos de contato entre as partículas minerais do solo proporcionado pela aplicação do biocarvão, com reflexos na redução da fricção, coesão e resistência ao cisalhamento (Zong; Chen; Lu, 2014). Outra possibilidade é o efeito lubrificante que ocorre devido à formação de filmes de água sobre a superfície das partículas de biocarvão, reduzindo a resistência ao cisalhamento a nível microestrutural (Alves *et al.*, 2021), que costuma ser naturalmente elevada em horizontes de solo com caráter coeso (Sobucki *et al.*, 2022).

Figura 25 – Atributos relacionados à resistência ao cisalhamento: (A) Tensão no final do intervalo viscoelástico linear ( $\tau_{LVE}$ ); (B) Tensão de cisalhamento máxima ( $\tau_{m\acute{a}x}$ ); e Módulo de armazenamento e perda no ponto de escoamento ( $G'G''YP$ ) em função das doses de biocharv\~{a}o. Regress\~{a}o entre  $\tau_{LVE}$  (D);  $\tau_{m\acute{a}x}$  (E); e  $G'G''YP$  e as doses de biocharv\~{a}o.



M\~{e}dias seguidas pela mesma letra n\~{a}o diferem pelo teste de Tukey a 5% de signific\~{a}ncia. As barras representam o erro padr\~{a}o da m\~{e}dia. \*\*Coeficiente angular significativo a 1% de probabilidade; <sup>ns</sup>N\~{a}o significativo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A estrutura do solo, especialmente em escala microsc\~{o}pica, \~{e} dependente das intera\~{c}\~{o}es eletrost\~{a}ticas entre as part\~{i}culas, bem como da presen\~{c}a de agentes de cimentan\~{c}\~{a}o (Markgraf; Horn; Peth, 2006). Al\~{e}m disso, sabe-se que o adensamento em horizontes com car\~{a}ter coeso est\~{a} relacionado com a precipita\~{c}\~{a}o revers\~{i}vel de compostos silicosos e s\~{i}licoaluminosos de baixa cristalinidade (Ara\~{u}jo Filho; Carvalho; Silva, 2001). Portanto, \~{e} poss\~{i}vel inferir que o biocharv\~{a}o de baga\~{c}o de caju, por favorecer a adsor\~{c}~{a}o do Si em detrimento

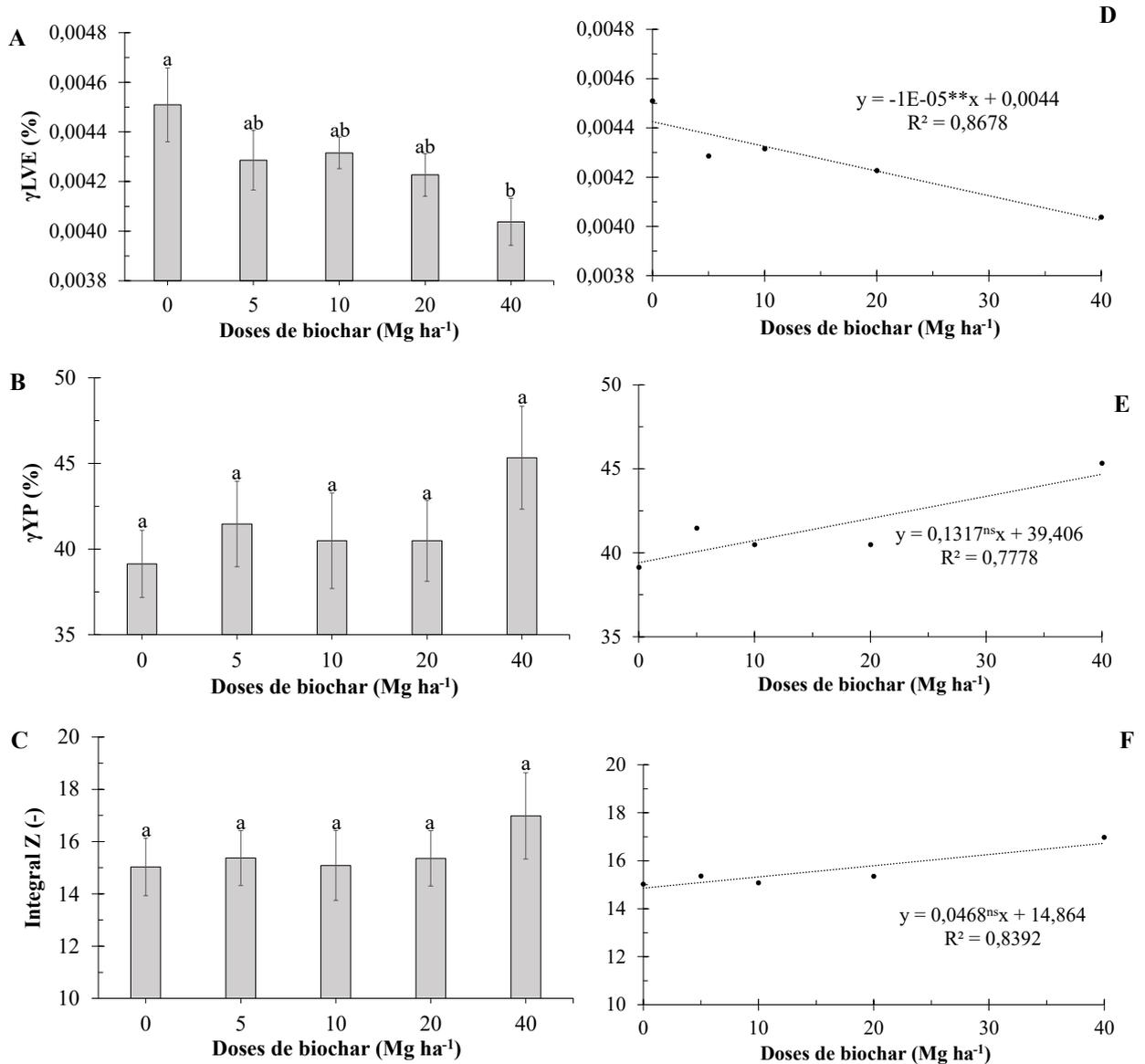
da sua precipitação (vide tópico 4.1), favoreceu a diminuição da coesão – com reflexos na redução da resistência ao cisalhamento a nível microestrutural – com redução de  $\tau_{LVE}$  e  $\tau_{máx}$ . A resistência do solo à penetração (tópico 4.9) e a resistência tênsil (tópico 4.10) também foram sensíveis à redução na coesão proporcionada pela adição do biocarvão avaliado.

Embora os ensaios de reometria terem sido executados com amostras montadas com material homogeneizado, com densidade definida, ressalta-se que a aplicação de biocarvão resulta em redução da densidade do solo (Nascimento *et al.*, 2023), fato que pode estar relacionado com a redução da tensão de cisalhamento em solos que receberam o condicionador. Essa afirmação é validada por Holthusen *et al.* (2019), que citam a densidade do solo como um dos fatores que afeta a resistência do solo ao cisalhamento em nível de microestrutura.

Ainda com base na Figura 25, apesar da tendência de redução de  $G'G''YP$  com o aumento da dose do biocarvão, o coeficiente angular da regressão não foi significativo e não houve diferença significativa entre as médias do atributo. Entretanto, pode-se afirmar que nos tratamentos com aplicação de biocarvão o colapso da estrutura e o início do fluxo ocorreu em tensões menores do que o tratamento controle – o que indica menor resistência ao estresse aplicado (Alves *et al.*, 2021).

Houve redução significativa de  $\gamma_{LVE}$  com o aumento da dose do biocarvão de bagaço de caju (Figura 26A e D), com o menor valor do atributo associado à dose de 40 Mg ha<sup>-1</sup>. Portanto, pode-se afirmar que o valor limítrofe de deformação que sinaliza a ocorrência de alterações irreversíveis na estrutura da amostra ( $\gamma_{LVE}$ ) (Mezger, 2014; Holthusen; Peth; Horn, 2010) foi primeiro atingido nos tratamentos com aplicação do biocarvão – o que pode ser lido como um indicador de menor estabilidade microestrutural.

Figura 26 – Atributos relacionados à viscoelasticidade: (A) Deformação no final do intervalo viscoelástico linear ( $\gamma_{LVE}$ ); (B) Deformação no ponto de escoamento ( $\gamma_{YP}$ ); e (C) Integral Z em função das doses de biocarvão. (B) Regressão entre  $\gamma_{LVE}$  (D),  $\gamma_{YP}$  (E), Integral Z (F) e as doses de biocarvão.



Variáveis transformadas ( $\lambda = -1,89, -0,72$  e  $-0,81$ , respectivamente). Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância. As barras representam o erro padrão da média. \*\*Coeficiente angular significativo a 1% de probabilidade; <sup>ns</sup>Não significativo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por outro lado, não houve diferença significativa entre as médias de  $\gamma_{YP}$  (Figura 26B) e Integral Z (Figura 26C) nos tratamentos considerados; e a regressão entre essas variáveis e as respectivas doses do biocarvão de bagaço de caju não foi significativa. Alves *et al.* (2021), estudando os efeitos da aplicação de biocarvões obtidos da pirólise da palha de arroz e soja (10 Mg ha<sup>-1</sup>), em amostras de terra coletadas na camada de 0–25 cm de um Argissolo Vermelho

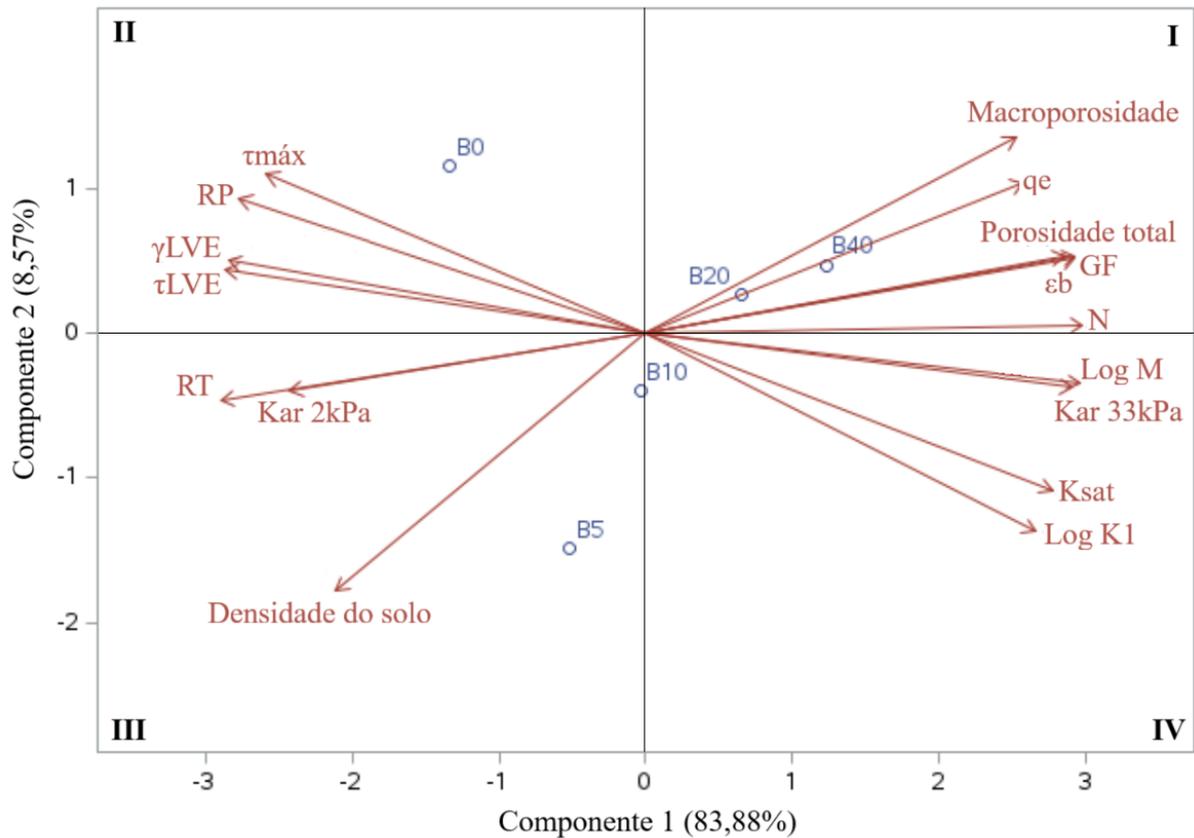
Distrófico, também relataram pouca ou nenhuma modificação em atributos relacionados à viscoelasticidade após a incubação por 15, 30, 45 e 60 dias. Os autores relatam que isso não era esperado, já que o aumento das interações eletrostáticas e da superfície específica do solo proporcionada pelo condicionador deveria resultar em alterações na viscoelasticidade – relacionando o resultado encontrado com o tempo de incubação e dose aplicada. Neste estudo, o tempo de incubação de 10 semanas e a dose de 40 Mg ha<sup>-1</sup> foram suficientes para modificar significativamente  $\gamma LVE$ , mas não  $\gamma YP$  e Integral Z – o que sugere a necessidade de avaliação em maiores doses e períodos de incubação.

Por fim, Ajayi e Horn (2016) relatam que a melhoria na qualidade física e desempenho agrônômico de solos e outros substratos que receberam a aplicação de biocarvão se deve pela melhoria na condição microestrutural – avaliada em ensaios de reometria. Neste estudo, a melhoria proporcionada pelo condicionador foi detectável pelos atributos reológicos utilizados, com destaque para  $\tau LVE$ ,  $\tau máx$  e  $\gamma LVE$ .

#### **4.12 Análise multivariada**

A análise de componentes principais foi realizada utilizando as variáveis de maior importância na compreensão dos efeitos da aplicação do biocarvão utilizado sobre a qualidade física de horizonte com caráter coeso, com base nos resultados observados na análise univariada. Os componentes 1 e 2 explicaram, juntos, 92,45% da variabilidade dos dados (Figura 27). De acordo com Jolliff e Cadima (2016), é comum selecionar o número de componentes para explicar, ao menos, 70% da variância. Para facilitar a interpretação, o gráfico biplot foi dividido em quatro quadrantes: I, II, III e IV. No quadrante I estão os tratamentos B20 e B40; no quadrante II está o tratamento B0; e no quadrante III estão os tratamentos B5 e B10.

Figura 27 – Gráfico biplot com variáveis selecionadas



Variáveis: Macroporosidade;  $q_e$  – Capacidade de adsorção de Si; Porosidade total;  $GF$  – Grau de floculação;  $\epsilon_b$  – porosidade bloqueada; Índice de continuidade de poros  $N$ ,  $\text{Log } M$  e  $\text{Log } K1$ ;  $\text{Kar } 2\text{kPa}$  e  $33\text{kPa}$  – Permeabilidade do solo ao ar no potencial mátrico de -2 kPa e -33 kPa (capacidade de campo), respectivamente;  $K_{sat}$  – condutividade hidráulica do solo saturado;  $\tau_{máx}$  – Tensão de cisalhamento máxima;  $RP$  – Resistência à penetração;  $\gamma_{LVE}$  – Deformação no final do intervalo viscoelástico linear;  $\tau_{LVE}$  – Tensão no final do intervalo viscoelástico linear;  $RT$  – Resistência tênsil; e Densidade do solo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os tratamentos B20 e B40 (Figura 27, quadrante I) estão associados a valores de macroporosidade, capacidade de adsorção de Si, porosidade total, grau de floculação, porosidade bloqueada e índice de continuidade de poros  $N$  acima da média, assim como valores de resistência tênsil, densidade do solo e permeabilidade do solo ao ar ( $\Psi_m = -2$  kPa) abaixo da média. Dessa forma, afirma-se que a aplicação do biocarvão de bagaço de caju, especialmente nas maiores doses (20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup>), implicou favorecimento à floculação das partículas do solo (vide tópico 4.2) e agregação – com conseqüente redução da densidade do solo (vide tópico 4.3), aumento da porosidade total e macroporosidade (vide tópico 4.4) e aumento da continuidade da rede porosa do solo (vide tópico 4.6). Contudo, salienta-se o efeito de possível obstrução de poros verificado nessas doses. Entretanto, o aumento da porosidade bloqueada (Figura 20) resultou em poucos efeitos sobre a permeabilidade do solo ao ar (vide tópico 4.5) –

que aumentou, com exceção no potencial mátrico de -2 kPa (Figura 18A), em resposta ao incremento da macroporosidade e da conectividade da rede porosa do solo.

Em adição, consultando a matriz de correlação gerada na análise de componentes principais, resistência tênsil e capacidade de adsorção de Si apresentaram forte correlação negativa (-82,37%). Desse modo, a menor RT e a maior capacidade de adsorção de Si nos tratamentos B20 e B40 confirmam que o biocarvão de bagaço de caju, por adsorver Si, proporciona diminuição da resistência tênsil e, por consequência, da coesão em horizonte com caráter coeso.

Ao analisar o quadrante II, percebe-se que o tratamento controle (B0) está associado à uma condição de maior estabilidade microestrutural e, conseqüentemente, maior coesão – com valores de tensão de cisalhamento máxima, tensão no final do intervalo viscoelástico e deformação no final do intervalo viscoelástico linear acima da média. B0 ainda apresenta resistência à penetração acima da média, fato comum em horizontes com caráter coeso, que costumam possuir valores elevados do atributo. Destaca-se que a RP apresentou forte correlação positiva com  $\tau_{\text{máx}}$ ,  $\tau_{LVE}$  e  $\gamma_{LVE}$  (83,38%, 87,39% e 86,70%, respectivamente); assim como a RT (73,69%, 88,35% e 87,03%, respectivamente). Desse modo, infere-se que a reometria consiste numa ferramenta importante na caracterização de horizontes de solo com caráter coeso, sendo sensível às modificações que as estratégias de manejo impõem.

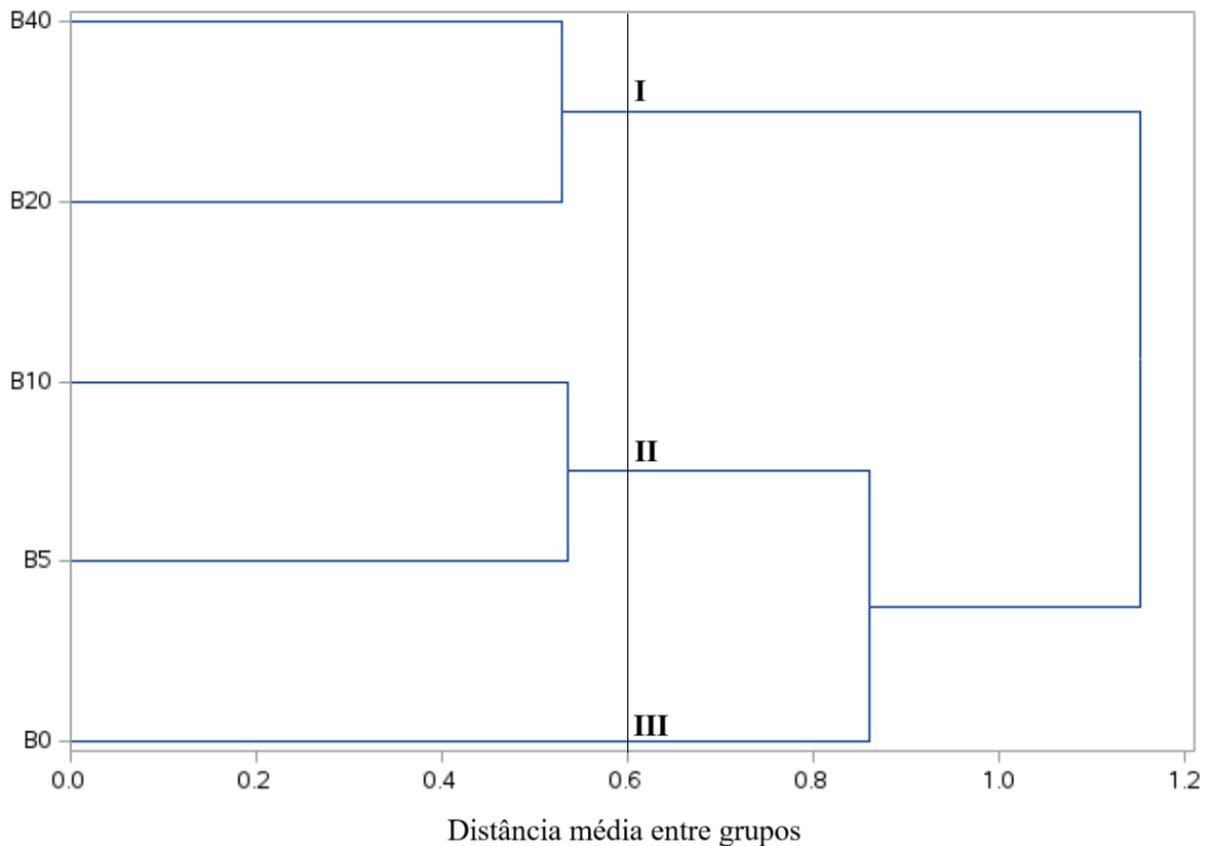
Ainda sobre o quadrante II, observa-se que o tratamento controle (B0) possui valores de Log K1, Log M, permeabilidade ao ar ( $\Psi_m = -33$  kPa) e condutividade hidráulica do solo saturado abaixo da média – o que é comum em horizontes coesos, que costumam apresentar restrições aos fluxos de água e ar.

No quadrante III, B5 e B10 aparecem associados com valores de macroporosidade, capacidade de adsorção de Si, porosidade total, grau de floculação, porosidade bloqueada e índice de continuidade de poros  $N$  abaixo da média, além de valores de densidade do solo, resistência tênsil e permeabilidade ao ar (2kPa) acima da média. Percebe-se que a aplicação do biocarvão de bagaço de caju em doses baixas não é suficiente para melhorar atributos relacionados à rede porosa do solo e para promover a adsorção de Si e redução da coesão – com a qualidade física permanecendo mais próxima de B0 do que quando tratados com B20 e B40. Entretanto, nas doses de 5 e 10 Mg ha<sup>-1</sup>, não houve efeito de entupimento de poros e aumento da porosidade bloqueada, tampouco de redução da permeabilidade do solo ao ar em -2 kPa, como ocorreu nas maiores doses (20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup>).

Procedendo-se um corte na distância multivariada de 0,6, no dendrograma referente à análise de agrupamento (Figura 28), constata-se a formação de três grupos distintos, a saber:

Grupo I: formado pelos tratamentos B20 e B40, em que os efeitos da aplicação do biocarvão de bagaço de caju foram mais expressivos e resultaram na redução da coesão e na melhoria da permissão à fluxos de água e ar; Grupo II: formado pelos tratamentos B5 e B10, em que os efeitos da aplicação do biocarvão são perceptíveis, mas não foram muito pronunciados, permanecendo a qualidade física similar ao tratamento controle que, por sua vez, passa a compor outro grupo junto com B5 e B10 na distância multivariada de 0,9; e Grupo III: formado pelo tratamento controle, em que a coesão e as restrições ao movimento da água e do ar são mais pronunciadas. Essa informação é importante quando da escolha da dose do biocarvão do bagaço de caju a ser aplicada em horizontes de solo com caráter coeso – sendo recomendada a utilização de doses entre 20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup>.

Figura 28. Dendrograma



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5 CONCLUSÕES

A aplicação do biocarvão oriundo da pirólise de resíduos do processamento do caju, além de favorecer a floculação e agregação das partículas do solo, promove a adsorção de silício e, por consequência, redução da coesão e melhoria da qualidade física de solos com caráter coeso.

Para solos com caráter coeso, os benefícios da aplicação do biocarvão de bagaço de caju são perceptíveis mesmo em doses baixas – entre 5 e 10 Mg ha<sup>-1</sup>. Entretanto, doses entre 20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup> são mais efetivas na melhoria da qualidade física do solo, amenizando a coesão e tornando o ambiente físico do solo mais favorável ao desenvolvimento de plantas.

## REFERÊNCIAS

- AHMED, S. F. A.; RAGHAVAN, V. Influence of wood-derived biochar on the physico-mechanical and chemical characteristics of agricultural soils. **International Agrophysics**, Lublin, v. 32, n. 1, p. 1-10, 2018.
- AHUJA, L. R.; NANEY, J. W.; GREEN, R. E.; NIELSEN, D. R. Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 699-702, 1984.
- AJAYI, A. E.; HORN, R. Modification of chemical and hydrophysical properties of two texturally differentiated soils due to varying magnitudes of added biochar. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 164, p. 34-44, 2016.
- ALENCAR, T. L.; CHAVES, A. F.; FREIRE, A. G.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. Liquid Bovine Biofertilizer and Cultivation Effects on the Porosity of a Typic Haplocambids as a Function of Cultivation and Dose. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, 2016.
- ALENCAR, T. L.; CHAVES, A. F.; FREIRE, A. G.; NASCIMENTO, Í. V.; SANTOS QUEIROZ, A.; MOTA, J. C. A. Field capacity: Methodological approach by static and dynamic criteria. **Geoderma**, Amsterdam, v. 353, p. 81-88, 2019.
- ALENCAR, T. L. D.; SOUSA, L. F. R. D. A.; CHAVES, A. F.; MOTA, J. C. A. Response function for the Srelative index in Cambisol treated with and without bovine liquid biofertilizer. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 31, n. 2, p. 466-475, 2018.
- ALGHAMDI, Abdulaziz G. Biochar as a potential soil additive for improving soil physical properties—a review. **Arabian Journal of Geosciences**, Riad-Basel, v. 11, n. 24, p. 766, 2018.
- ALMEIDA, E. L.; TEIXEIRA, A. S.; SILVA, F. C.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; LEÃO, R.A.O. Filter paper method for the determination of the soil water retention curve. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 5, p. 1344-1352, 2015.
- ALMEIDA, K. S. S. A.; SOUZA, L. S.; PAZ, V. P. S; SILVA, F. T. S.; SANTOS, D. N.; PEREIRA, J. D. S. L. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado em Latossolo Amarelo Distrocoeso, no município de Cruz das Almas. **Irriga**, Botucatu, v. 22, n. 2, p. 259-274, 2017.
- AL-SHAMMARY, A. A. G.; KOUZANI, A. Z.; KAYNAK, A.; KHOO, S. Y.; NORTON, M.; GATES, W. Soil bulk density estimation methods: a review. **Pedosphere**, Amsterdam, v. 28, n. 4, p. 581-596, 2018.
- ALVES, A. R.; HOLTHUSEN, D.; REICHERT, J. M.; SARFARAZ, Q.; SILVA, L. S. Biochar amendment effects on microstructure resistance of a sandy loam soil under oscillatory stress. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Basel, v. 21, p. 967-977, 2021.

AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. **Física do Solo: Conceitos e aplicações**. 1. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária – Universidade Federal do Ceará. 2008. 290 p.

ARAÚJO, A. M. S. S.; MENEZES, A. S.; ALENCAR, T. L.; SILVA, C. P.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; ROMERO, R. E.; COSTA, M. C. G.; ALMEIDA, B. G.; MOTA, J. C. A. Tensile strength in horizons with and without cohesive character: Variability and relation with granulometry. **Catena**, Amsterdam, v. 166, p. 290-297, 2018.

ARAÚJO FILHO, J. C.; CARVALHO, A.; SILVA, F. B. R. Investigações preliminares sobre a pedogênese de horizontes coesos em solos dos tabuleiros costeiros do Nordeste do Brasil. *In: Workshop coesão em solos dos tabuleiros costeiros, Aracaju, 2001. Anais...* Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p. 123-142.

ARSHAD, M. A.; MARTIN, S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agroecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 88, p. 153-160, 2002.

ÁVILA, E. A.; LEIVA, F. R.; MADRIÑÁN, R. Friability and its relationship with clay and organic carbon in soils cultivated with sugar cane. **Agronomía Colombiana**, Bogotá, v. 33, n. 3, p. 365-372, 2015.

BAIAMONTE, G.; CRESCIMANNO, G.; PARRINO, F.; DE PASQUALE, C. Effect of biochar on the physical and structural properties of a sandy soil. **Catena**, Amsterdam, v. 175, p. 294-303, 2019.

BALL, B. C.; SCHJØNNING, P. Air Permeability. *In: DANE, J. H.; TOPP, C.G.* eds. **Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods**. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 2002. v. 5, cap. 4.4, p. 1141-1158.

BÁRTHOLO, G. F. Perdas e qualidade preocupam. **Informe Agropecuário**, Horizonte, v. 17, n. 179, 1994.

BATISTA, E. M.; SHULTZ, J.; MATOS, T. T.; FORNARI, M. R.; FERREIRA, T. M.; SZPOGANICZ, B.; FREITAS, R. A.; MANGRICH, A. S. Effect of surface and porosity of biochar on water holding capacity aiming indirectly at preservation of the Amazon biome. **Scientific Reports**, Basel, v. 8, n. 1, p. 10677, 2018.

BAUER, A. Influence of soil organic matter on bulk density and available water capacity of soils. **Farm Research**, Fargo, v. 31, n. 5; p. 41-52, 1974.

BAUMGARTL, T. Physical soil properties in specific fields of application especially in anthropogenic soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 47, n. 1-2, p. 51-59, 1998.

BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.; VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of experimental botany**, Lancaster, v. 62, n. 1, p. 59-68, 2011.

BEZERRA, C. E. E.; FERREIRA, T.O.; ROMERO, R. E.; MOTA, J. C. A.; VIEIRA, J. M.;

DUARTE, L. R. S.; COOPER, M. Genesis of cohesive soil horizons from north-east Brazil: role of argilluviation and sorting of sand. **Soil Research**, Kingston, v. 53, p. 43-55, 2014

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. *In*: KLUTE, A., ed. **Methods of Soil Analysis: Part 1 - Physical and Mineralogical Methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986a. cap. 13, p. 363–375.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. *In*: KLUTE, A., ed. **Methods of Soil Analysis: Part 1 - Physical and Mineralogical Methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986b. cap. 14, p. 377-382.

BLANCO-CANQUI, Humberto. Biochar and soil physical properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 81, n. 4, p. 687-711, 2017.

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.

BRAINER, M. S. C. P.; VIDAL, M. F. Cajucultura nordestina em recuperação. **Informe ETENE**, Fortaleza, n. 54, 2018.

BUCKINGHAM, E. **Studies on the movement of soil moisture**. Washington: USDA, 1907. 61 p.

BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; CAMP, C. R.; SOJKA, R. E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 43, p. 205-217, 1997.

CASANOVA, M.; TAPIA, E.; SEGUEL, O.; SALAZAR, O. Direct measurement and prediction of bulk density on alluvial soils of central Chile. **Chilean journal of agricultural research**, Chillán, v. 76, n. 1, p. 105-113, 2016.

CAVALIERI, K. M. V.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; LEÃO, T. P.; DEXTER, A. R. e HÅKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 158-164, 2009.

CHARTRES, C. J.; KIRBY, J. M.; RAUPACH, M. Poorly ordered silica and aluminosilicates as temporary cementing agents in hard-setting soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 4, p. 1060-1067, 1990.

CHERUBIN, M. R.; TORMENA, C. A.; KARLEN, D. L. Soil quality evaluation using the soil management assessment framework (SMAF) in Brazilian oxisols with contrasting texture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 41, 2017.

CHOW V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied hydrology**. 2. ed. United States: McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering, McGraw-Hill Professional, 2013, 624 p.

CINTRA, F. L. D.; LIBARDI, P. L. Caracterização física de uma classe de solo do ecossistema do Tabuleiro Costeiro. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, n. 3, p. 367-378, 1998.

CORRÊA, M. M.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SCHAEFER, C. E.; KER, J. C. Soils of the Coastal Tablelands Under Atlantic Forest (Tabuleiros Costeiros). *In*: SCHAEFER, C. E., ed. **The Soils of Brazil**. 1. ed. Cham: Springer International Publishing, 2023. cap. 8, p. 221-238.

CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; CURI, N.; TORRE, T. C. P. Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica de horizontes coesos e fragipãs de solos vermelhos e amarelos do ambiente Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 297-313, 2008.

COSTA, M. A. T.; TORMENA, C. A.; LUGÃO, S. M. B.; FIDALSKI, J.; NASCIMENTO, W. G. D.; MEDEIROS, F. M. D. Resistência do solo à penetração e produção de raízes e de forragem em diferentes níveis de intensificação do pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 993-1004, 2012.

COSTA, W. A.; OLIVEIRA, C. A. D. S.; KATO, E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva característica de água de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 515-523, 2008.

CORTEZ, J. W.; CAVASSINI, V. H.; MOTOMIYA, A. V. A.; ORLANDO, R. C.; VALENTE, I. Q. Spatialization of soil resistance to penetration for localized management by precision agriculture tools. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 38, n. 5, p. 690-696, 2018.

CURCIO, G. R.; CARVALHO, A. P.; BOGNOLA, I. A.; GOMES, I. A.; ROSSI, M.; COELHO, M.R.; ANTOS, R. D. **Guia de excursão de estudos de solos nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná**. Colombo: Embrapa Florestas; Rio de Janeiro: Embrapa Solos; Campinas: IAC, 2000. 222p.

DAVIS, J. G.; WHITING, D. Choosing a soil amendment. **Gardening series. Basics**, n. 7. 235, 2013.

DOURADO NETO, 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 van Genuchten Soil Water Retention Curve, SWRC (versão 3.0 beta)**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2001.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. *In*: DORAN, J. W.; COLEMAM, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1994. v. 35, p. 1-21.

DEXTER, A. R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v. 31, n. 2, p. 139-147, 1985.

DEXTER, A.R.; WATTS, C. Tensile strength and friability. *In*: SMITH, K.; MULLINS, C. eds. **Soil and environmental analysis: Physical methods**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2000, cap. 11, p. 405-434.

EDEH, I. G.; MAŠEK, O.; BUSS, W. A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties—New insights and future research challenges. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 714, p. 136857, 2020.

FERREIRA, A. O.; SÁ, J. C. M.; GIAROLA, N. F. B.; HARMS, M. G.; MIARA, S.; BAVOSO, M. A.; BRIEDIS, C.; NETTO, C. Q. Variação na resistência tênsil de agregados em função do conteúdo de carbono em dois solos na região dos Campos Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 437-446, 2011.

FIGUEIREDO, L. H. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 487-493, 2000.

FLINT, L. E.; FLINT, L. Porosity. *In*: DANE, J. H.; TOPP, C.G. eds. **Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods**. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 2002. v. 5, cap. 2.3, p. 241-254.

FONSÊCA, M. H. P.; GUERRA, H. O. C.; LACERDA, R. 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**, Campina Grande, v. 11, n. 4, p. 368-373, 2007.

FREGOLENTE, L. G.; RODRIGUES, M. T.; OLIVEIRA, N. C.; ARAÚJO, 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**, Amsterdam, v. 903, p. 166835, 2023.

GARCÍA, A. J. H.; JAIME, Y. M. N.; CONTRERAS, A. M. Z.; BASTARDO, L. D. S.; LLOVERA, F. A. S. Savanna soil water content effect on its shear strength-compaction relationship. **Revista Científica UDO Agrícola**, Maturín, v. 12, n. 2, p. 324-337, 2012.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. *In*: KLUTE, A., ed. **Methods of Soil Analysis: Part 1 - Physical and Mineralogical Methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. cap. 15, p. 383-411.

GHEZZEHEI, T. A.; OR, D. Rheological properties of wet soils and clays under steady and oscillatory stresses. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 624-637, 2001.

GIAROLA, N. F. B.; LIMA, H. V.; ROMERO, R. E.; BRINATTI, A. M.; SILVA, A. P. Mineralogia e cristalografia da fração argila de horizontes coesos de solos nos Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 33-40, 2009.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P. Conceitos sobre solos coesos e hardsetting. **Scientia Agrícola**, v. 59, p. 613-620, 2002.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; SOUZA, L. S.; RIBEIRO, L. P. Similaridade entre o caráter coeso dos solos e o comportamento hardsetting: Estudo de caso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 239-247, 2001.

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

GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37 p. 1174-1184, 2013.

GRAHAM, R. C.; O'GEEN, A. T. Soil mineralogy trends in California landscapes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 154, n. 3-4, p. 418-437, 2010.

GROENEVELT, P. H.; KAY, B. D.; GRANT, C. D. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. **Geoderma**, Amsterdam, v. 34, p. 101-114, 1984.

HAO, X.; BALL, B. C.; CULLEY, J. L. B.; CARTER, M. R.; PARKIN, G. W. Soil density and porosity. In: ANGERS, D.A; LARNEY, F.J. eds. **Soil sampling and methods of analysis**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. cap. 57, p. 743-760.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. 1. ed. San Diego: Elsevier academic press, 2003. 494 p.

HIRTH, J. R.; MCKENZIE, B. M.; TISDALL, J. M. Ability of seedling roots of *Lolium perenne* L. to penetrate soil from artificial biopores is modified by soil bulk density, biopore angle and biopore relief. **Plant and Soil**, Basel, v. 272, n. 1-2, p. 327-336, 2005.

HOLTHUSEN, D.; PÉRTILE, P.; REICHERT, J. M.; HORN, R. Viscoelasticity and shear resistance at the microscale of naturally structured and homogenized subtropical soils under undefined and defined normal stress conditions. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 191, p. 282-293, 2019.

HOLTHUSEN, D.; PETH, S.; HORN, R. Impact of potassium concentration and matric potential on soil stability derived from rheological parameters. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 111, p. 75-85, 2010.

HU, F.; XU, C.; MA, R.; TU, K.; YANG, J.; ZHAO, S.; YANG, M.; ZHANG, F. Biochar application driven change in soil internal forces improves aggregate stability: Based on a two-year field study. **Geoderma**, Amsterdam, v. 403, p. 115276, 2021.

IBRAHIM, H. M.; AL-WABEL, M. I.; USMAN, A. R. A.; AL-OMRAN, A. Effect of *Conocarpus* biochar application on the hydraulic properties of a sandy loam soil. **Soil science**, Philadelphia, v. 178, n. 4, p. 165-173, 2013.

IGWE, C. A. Erodibility in relation to water-dispersible clay for some soils of eastern Nigeria. **Land degradation & development**, Hoboken, v. 16, n. 1, p. 87-96, 2005.

- ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Soil quality indicator properties in mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 55, p. 69-78. 2000.
- JACOMINE, P. K. T. Distribuição geográfica, características e classificação dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. *In: Reunião técnica sobre solos coesos dos Tabuleiros Costeiros, Cruz das Almas, 1996. Anais...* Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 1996, p. 13-26, 1996.
- JACOMINE, P. K. T. Evolução do conhecimento sobre solos coesos no Brasil. *In: Workshop coesão em solos dos Tabuleiros Costeiros, Aracaju, 2001. Anais...* Aracaju, EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, 2001, p. 19-46.
- JORGE, R. F.; CORÁ, J. E.; BARBOSA, J. 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, p. 1831-1840, 2010.
- KARLEN, D. L.; MAUSBACH, M. J.; DORAN, J. W.; CLINE, R.G.; HARRIS, R. F.; SCHUMAN, G.E. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 4-10, 1997.
- KELLER, T.; HÅKANSSON, I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. **Geoderma**, Amsterdam, v. 154, n. 3-4, p. 398-406, 2010.
- KIEHL, E. J. **Manual de Edafologia: relação solo planta**. Piracicaba, SP: Ceres, 1979. 262 p.
- KIRKHAM, D. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 11, p. 93-99, 1947.
- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. *In: KLUTE, A., ed. Methods of Soil Analysis: Part 1 - Physical and Mineralogical Methods*. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. cap. 26, p. 635-662.
- KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2014. 50 p.
- LAL, R. Soil health and carbon management. **Food and Energy Security**, Hoboken, v. 5, n. 4, p. 212-222, 2016.
- LAL, R.; SHUKLA, M. K. **Principles of soil physics**. New York: Marcel Dekker, 2004. 682 p.
- LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. Conservation and enhancement of soil quality. *In: Evaluation for sustainable land management in the developing world: proceedings of the International Workshop on Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World, 2, Bangkok, Thailand, 1991. Anais...* Bangkok, Thailand: International Board for Soil Research and Management, 1991.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 3.ed. São Paulo: EDUSP, 2018. 352 p.

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, v. 28, p. 467-476, 2004.

LIMA, H. V.; SILVA, A. P.; SANTOS, M. C.; COOPER, M.; ROMERO, R. E. Micromorphology and image analysis of a hardsetting Ultisol (Argissolo) in the state of Ceará (Brazil). **Geoderma**, Amsterdam, v. 132, n. 3-4, p. 416-426, 2006.

LIMA NETO, J. A.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M.; SOUZA JUNIOR, V. S.; LIMA, J. F. W. F.; FERREIRA, F. R. A. L. 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, v. 33, p. 1001-1011, 2009.

LIMA NETO, J. A.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M.; SOUZA JUNIOR, V. S.; ARAUJO FILHO, J. C.; LIMA, J. F. W. F. Atributos químicos, mineralógicos e micromorfológicos de horizontes coesos de Latossolos e Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 473-486, 2010.

LIU, H. H. **Fluid flow in the subsurface: history, generalization and applications of physical laws**. 28. ed. Gewerbestrasse: Springer, 2017. 230 p.

LIU, M.; TAN, X.; ZHENG, M.; YU, D.; LIN, A.; LIU, J.; WANG, C.; GAO, Z.; CUI, J. Modified biochar/humic substance/fertiliser compound soil conditioner for highly efficient improvement of soil fertility and heavy metals remediation in acidic soils. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 325, p. 116614, 2023.

LUO, L.; WANG, J.; LV, J.; LIU, Z.; SUN, T.; YANG, Y.; ZHU, Y. G. Carbon sequestration strategies in soil using biochar: advances, challenges, and opportunities. **Environmental Science & Technology**, [S.I.], v. 57, n. 31, p. 11357-11372, 2023.

MACHADO, J. L.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C. A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva característica de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 495-502, 2008.

MANIKANDAN, S.; VICKRAM, S.; SUBBAIYA, R.; KARMEGAM, N.; CHANG, S. W.; RAVINDRAN, B.; AWASTHI, M. K. Comprehensive review on recent production trends and applications of biochar for greener environment. **Bioresource Technology**, Amsterdam, p. 129725, 2023.

MARKGRAF, W. Rheology in soils. *In*: GLINSKI, J.; HORABIK, J.; LIPIEC, J., eds. **Encyclopedia of Agrophysics**. Dordrecht-Heidelberg-London-New York: Springer Press, Glossary R, 2011.

MARKGRAF, W.; HORN, R. Rheological investigations in soil micro mechanics: measuring stiffness degradation and structural stability on a particle scale. *In*: GRAGG, L.P.; CASSELL, J.M., eds. **Progress in management engineering**. New York: Nova Science, 2009. cap. 9, p. 237-279.

- MARKGRAF, W.; HORN, R.; PETH, S. An approach to rheometry in soil mechanics – structural changes in bentonite, clayey and silty soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 91, p. 1–14, 2006.
- MCQUEEN, D. J.; SHEPHERD, T. G. Physical changes and compaction sensitivity of a finetextured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 25, p. 217-230, 2002.
- MELO, D. F. M. **Comportamento reológico de solos a corridas de lama por liquefação estática**. 2014. 277 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- MEZGER, T. G. **The Rheology Handbook**. 4ed. Hannover, Germany: Vincentz Network, 2014. 434 p.
- MIRREH, H. F.; KETCHESON, J. W. Influence of soil bulk density and matric pressure on soil resistance to penetration. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 52, n. 3, p. 477-483, 1972.
- MOREAU, A. M. S. S.; KER, J. C.; COSTA, L. M.; GOMES, F. H. Caracterização de solos de duas topossequências em Tabuleiros Costeiros do sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 1007-1019, 2006.
- MOTA, J. C. A.; MENEZES, A. S.; NASCIMENTO, C. D. V.; ALENCAR, T. L.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; TOMA, R. S.; ROMERO, R. E.; COSTA, M. C. G.; COOPER, M. Pore shape, size distribution and orientation in Bt horizons of two Alfisols with and without cohesive character from Brazil. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 15, p. e00197, 2018.
- MOTA, J. C. A.; SILVA, C. P.; ALMEIDA, B. G.; ROMERO, R. E.; ALENCAR, T. L.; LOBATO, M. G. R.; OLIVEIRA, L. S.; SOUZA, L. S.; COSTA, M. C. G. Cohesive character in Alfisols, Ultisol and Oxisols in Northeast of Brazil: Relationship of tensile strength with silicon, aluminum and iron from poorly crystalline compounds. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 24, p. e00361, 2021.
- MUKHERJEE, S. **The science of clays – Applications in Industry, Engineering and Environment**. Netherlands: Springer Science and Business Media, 2013, 351 p.
- MULLINS, C. E. Hardsetting soils. *In*: SUMNER, M.E., ed. **Handbook of soil science**. New York: CRC Press, 1999. p. 65-87.
- NASCIMENTO, Í. V.; FREGOLENTE, L. G.; PEREIRA, A. P. A.; NASCIMENTO, C. D. V.; MOTA, J. C. A.; FERREIRA, O. P.; SOUSA, H. H. F.; SILVA, D. G. G.; SIMOES, L. R.; SOUZA FILHO, A. G.; COSTA, M. C. G. Biochar as a carbonaceous material to enhance soil quality in drylands ecosystems: A review. **Environmental Research**, Amsterdam, v. 233, p. 116489, 2023.
- NASCIMENTO, Í. 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, Í. 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.
- NARTEY, O. D.; ZHAO, B. Biochar preparation, characterization, and adsorptive capacity and its effect on bioavailability of contaminants: an overview. **Advances in Materials Science and Engineering**, London, v. 2014, 2014.
- NEVES, C. M. N. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; CARDOSO, E. L.; MACEDO, R. L. G.; FERREIRA, M. M.; SOUZA, F. S. Atributos indicadores da qualidade do solo em sistema agrossilvopastoril no noroeste do Estado de Minas Gerais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 74, p. 45-53, 2007.
- NIMMO, J. R. Porosity and pore size distribution. **Encyclopedia of Soils in the Environment**, Amsterdam, v. 3, n. 1, p. 295-303, 2004.
- NOVAK, P.; VOPRAVIL, J.; LAGOVA, J. Assessment of the soil quality as a complex of productive and environmental soil function potentials. **Soil and Water Research**, Slezská, v. 5, n. 3, p. 113-119, 2010.
- NRCS. **Soil Bulk Density/Moisture/Aeration**. 2014. Washington: USDA, 2014. 9 p.
- NUNES, F. C.; CARVALHO, C. C. N.; VILAS BOAS, G. D. S.; SILVA, E. F., MAFRA, Á. L. M. L.; ANDRADE, J. J.; VITAL, S. R. O. Solos vermelhos e amarelos coesos de tabuleiros costeiros: gênese, evolução e influência da neotectônica. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 20, n. 72, p. 294-314, 2019.
- NUSIER, O. K.; ROUSAN, L. M. Soil air permeability and carbon dioxide flux measurements from the soil surface. **Communications in soil science and plant analysis**, Abingdon-on-Thames, v. 39, n. 9-10, p. 1406-1415, 2008.
- OLIVEIRA, L. S.; MAIA, R. N.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; ROMERO, R. E.; COSTA, M. 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**, Amsterdam, v. 190, 2020.
- OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Editora Fazenda Arte, 2000, 224 p.
- PEDROTTI, A.; MELLO JÚNIOR, A. V. **Avanços em Ciência do Solo: a física do solo na produção agrícola e qualidade ambiental**. São Cristóvão: Editora da Universidade Federal de Sergipe, 2009. 212 p.
- PÉRTILE, P.; HOLTHUSEN, D.; GUBIANI, P. I.; REICHERT, J. M. Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry: properties, difficulties and opportunities. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 75, n. 2, p. 154-162, 2018.

PÉRTILE, P.; REICHERT, J. M.; GUBIANI, P. I.; HOLTHUSEN, D.; COSTA, A. Rheological parameters as affected by water tension in subtropical soils. **Revista Brasileira de ciência do solo**, Viçosa, v. 40, 2016.

PONTE, C. M.; RIBEIRO, L. P. Estudo da gênese de horizontes coesos em uma topossequência na área do Candéal. Escola de Agronomia da UFBA. Salvador: IGEO/ UFBA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 239-247, 2001.

RAMOS, M. R.; CURCIO, G. R.; DEDECEK, R. A.; MELO V. F.; UHLMANN, A. Influência da posição na encosta na manifestação do caráter coeso em solos da formação Macacu, no estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 837-845, 2013.

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

REICHARDT, K; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 5. ed. Barueri: Manole. 2022, 508 p.

REIS, D. A.; LIMA, C. L. R.; PAULETTO, E. A.; DUPONT, P. B.; PILLON, C. N. Tensile strength and friability of an Alfisol under agricultural management systems. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 71, n. 2, p. 163-168, 2014.

REZENDE, J. O. **Solos coesos dos Tabuleiros Costeiros: Limitações agrícolas e manejo**. Salvador: SEAGRI, 2000. 117 p.

RIBEIRO, M. R. Características morfológicas dos horizontes coesos dos solos dos Tabuleiros Costeiros. *In: workshop coesão em solos dos Tabuleiros Costeiros, Aracaju, 2001. Anais...* Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p. 161-168.

RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids in porous mediums. **Journal of Applied Physics**, New York, v. 1, p. 318– 333, 1931.

RICHARDS, L. A. Physical conditions of water in soil. *In: BLACK, C. A. ed. Methods of Soil Analysis: Part 1 - Physical and Mineralogical Methods*. Madison: American Society for Testing and Materials, 1965. cap. 8, p. 128-152.

RIZWAN, M.; UR REHMAN, M. Z.; ALI, S.; ABBAS, T.; MAQBOOL, A.; BASHIR, A. Biochar is a potential source of silicon fertilizer: An overview. *In: OK, Y. S.; TSANG, D. C. W.; BOLAN, N.; NOVAK, J. eds. Biochar from Biomass and Waste: Fundamentals and applications*. Amsterdam: Elsevier, 2019. cap. 12, p. 225-238.

SANTOS, E. B. Comportamento físico e hídrico de solos em interação com carvão vegetal. 2021. 87 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5.ed. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

SAVANT, N. K.; KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H. Silicon nutrition and sugarcane production: a review. **Journal of plant nutrition**, Abingdon-on-Thames, v. 22, n. 12, p. 1853-1903, 1999.

SARBOUKH, S.; HENIDY, R.; ARSLAN, A. The relationship between the bulk density and volumetric soil moisture content for a swelling heavy clayey soil in Syria. **Jordan Journal of Agricultural Science**, Amman, v. 10, n. 2, p. 346-357, 2014.

SEIFU, W.; ELIAS, E. Soil Quality Attributes and Their Role in Sustainable Agriculture: A Review. **International Journal of Plant & Soil Science**, London, v. 26, n. 3, p. 1-26, 2019.

SHINDE, R.; SARKAR, P. K.; THOMBARE, N. Soil Conditioners. **Agriculture & Food: e-Newsletter**, Dakshin Dinajpur, v. 1, n. 10, p. 1-5, 2019.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, A. P.; LEÃO, T. P.; TORMENA, C. A.; GONÇALVES, A. C. A. Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1535-1545, 2009.

SILVA, C. P.; ALMEIDA, B. G.; ROMERO, R. E.; ALENCAR, T. L.; LOBATO, M. G. R.; OLIVEIRA, L. S.; SOUZA, L. S.; COSTA, M. C. G.; MOTA, J. C. A. Cohesive character in Alfisols, Ultisol and Oxisols in northeast of Brazil: Relationship with tensile strength and particle size. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 23, p. e00341, 2020.

SILVA, W. M.; BIANCHINI, A.; CUNHA, C. A. Modeling and correction of soil penetration resistance for variations in soil moisture and soil bulk density. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 36, n. 3, p. 449-459, 2016.

SILVEIRA JUNIOR, S. D. D.; SILVA, A. P. D.; FIGUEIREDO, G. C.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1854-1867, 2012.

SILVEIRA, L. R.; 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.

SINGH, H.; NORTHUP, B. K.; RICE, C. W.; PRASAD, P. V. Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis. **Biochar**, Basel, v. 4, n. 1, p. 8, 2022.

SOBUCKI, V.; HOLTHUSEN, D.; BATISTÃO, A. C.; MOTA, J. C. A.; REICHERT, J. M. Potential of rheometry in detecting cohesive soils in Brazil as an additional tool to morphological field description and tensile resistance quantification. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 30, p. e00553, 2022.

SOKOŁOWSKA, Z.; SZEWCZUK-KARPISZ, K.; TURSKI, M.; TOMCZYK, A.; CYBULAK, M.; SKIC, K. Effect of wood waste and sunflower husk biochar on tensile strength and porosity of Dystric Cambisol artificial aggregates. **Agronomy**, Basel, v. 10, n. 2, 2020.

SOMMER, M.; KACZOREK, D.; KUZYAKOV, Y.; BREUER, J. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes – a review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Hoboken, v. 169, n. 3, p. 310-329, 2006.

SOUZA, L. D.; SOUZA, L. S. Irrigação nos Tabuleiros Costeiros no Nordeste do Brasil. **Portal do Agronegócio, [S.I.]**, v. 6, 2008.

SOUZA, M. F. P.; DAL BEM, E. A.; DALCHIAVON, F. C.; YOSHITOME, M. Y.; ALVES, M. C. Propriedades físicas de um latossolo vermelho tratado com lodo de esgoto. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, Espírito Santo do Pinhal, v. 9, n. 3, 2012.

SOUZA, M. P. S.; THOMAZINI, A.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VELOSO, G. V.; MOREIRA, G. M.; FERNANDES FILHO, E. I. Multivariate analysis and machine learning in properties of Ultisols (Argissolos) of Brazilian Amazon. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, 2018.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, 2013.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 725-730, 2001.

TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; ROSSI JUNIOR, W. Resistência tênsil e friabilidade de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 33-42, 2008.

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**, Viçosa, v. 22, p. 573-581, 1998.

TRAZZI, P. A.; HIGA, A. R.; DIECKOW, J.; MANGRICH, A. S.; HIGA, R. C. V. Biocarvão: realidade e potencial de uso no meio florestal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 875-887, 2018.

VALADÃO JUNIOR, D. D.; BIACHINI, A.; VALADÃO, F. C. A.; ROSA, R. P. Penetration resistance according to penetration rate, cone base size and different soil conditions. **Bragantia**, Campinas, v. 73, n. 2, p. 171-177, 2014.

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  $\alpha$  parameter. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, 2018.

VAN RAIJ, B. Melhorando o ambiente radicular em subsuperfície. **Informações agrônômicas - International Plant Nutrition Institute (IPNI) – Programa Brasil**, Piracicaba, n. 135, p. 8-18, 2011.

VIEIRA, J. M. **Contribuição de compostos de baixa cristalinidade e ciclos de umedecimento e secagem na gênese do caráter coeso em solos do Ceará**. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal do Ceará, 2013.

VIEIRA, J. M.; ROMERO, R. S.; FERREIRA, T. O.; ASSIS JUNIOR, R.N. Contribuição de material amorfo na gênese de horizontes coesos em Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do Ceará. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 43, p. 623-632, 2012.

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**, Amsterdam, v. 347, p. 194-202, 2019.

WANG, Y.; XIAO, X.; CHEN, B. Biochar impacts on soil silicon dissolution kinetics and their interaction mechanisms. **Scientific reports**, Basel, v. 8, n. 1, p. 1-11, 2018.

WANG, Y.; XIAO, X.; XU, Y.; CHEN, B. Environmental effects of silicon within biochar (Sichar) and carbon–silicon coupling mechanisms: A critical review. **Environmental science & technology**, Washington, v. 53, n. 23, p. 13570-13582, 2019.

WANG, Y.; ZHANG, K.; LU, L.; XIAO, X.; CHEN, B. Novel insights into effects of silicon-rich biochar (Sichar) amendment on cadmium uptake, translocation and accumulation in rice plants. **Environmental Pollution**, Amsterdam, v. 235, part b, 2020.

WATTS, C.W.; DEXTER, A.R. Soil Friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**, Hoboken, v. 49, p.73-84, 1998.

XIANG-WEI, H.; MING-NA, S.; HORTON, R. **Estimating van Genuchten model parameters of undisturbed soils using an integral method**. Soil Science Society of China, Nanjing, n. 20, 2010, p. 55-62.

YANG, X.; ZHANG, S.; JU, M.; LIU, L. Preparation and modification of biochar materials and their application in soil remediation. **Applied Sciences**, Basel, v. 9, n. 7, p. 1365, 2019.

YOUNGS, E. G. Hydraulic conductivity of saturated soils. *In*: SMITH, K.A.; MULLINS, C.E., eds. **Soil analysis: Physical methods**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2000. cap. 4, p. 141-182.

YU, X., ZHANG, Y., SHEN, M., DONG, S., ZHANG, F., GAO, Q., HE, P.; SHEN, G.; YANG, J.; WANG, Z.; BO, G. Soil conditioner affects tobacco rhizosphere soil microecology. **Microbial Ecology**, [S.I.], v. 86, n. 1, p. 460-473, 2023.

ZHANG, Y.; LIANG, Y.; LI, S.; YUAN, Y.; ZHANG, D.; WU, Y.; XIE, H.; BRINDHADEVI, K.; PUGAZHENDHI, A.; XIA, C. A review of biomass pyrolysis gas: Forming mechanisms, influencing parameters, and product application upgrades. **Fuel**, Amsterdam, v. 347, p. 128461, 2023.

ZHENG, W.; SHARMA, B. K.; RAJAGOPALAN, N. Illinois Department of Agriculture – Sustainable Agriculture Grant’s Research Report Series. **Using biochar as a soil amendment for sustainable agriculture**. Champaign, 2010.

ZHU, G.; ZHU, L.; YU, C. Rheological properties of soil: a review. *In*: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1, Ordos, China, 2017. **Anais...** Ordos, China: IOP Publishing, 2017. v. 64. 7 p.

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.

## ANEXO A – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DO SOLO ESTUDADO

### CLASSIFICAÇÃO – Argissolo Amarelo Eutrocoeso típico (SiBCS, 2018)

- Ap** 0 – 8cm; bruno acimentado muito escuro (10YR 3/2 úmida), bruno – acimentado escuro (10YR 4/2 seca); fraca média a grande granular; macia, solta, não plástica e não pegajosa; transição plana e clara.
- AE** 8 – 15 cm; bruno acimentado muito escuro (10YR 3/2 úmida), bruno – acimentado escuro (10YR 4/2 seca); fraca média a grande granular e fraca média blocos subangulares; macia, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição plana e gradual.
- E** 15 – 32 cm; bruno (10YR 4/3 úmida), bruno (10YR 5/3 seca); fraca a moderada média a grande blocos subangulares; ligeiramente dura, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição plana e gradual.
- EB** 32 – 62 cm; bruno (10YR 4/3 úmida), bruno (10YR 5/3 seca); moderada média a grande blocos subangulares; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.
- BE** 62 – 96 cm; bruno-amarelado-escuro (10YR 5/6 úmida), bruno-amarelado-claro (10YR 6/4 seca); moderada a forte média a grande blocos subangulares; dura, muito friável, plástica e pegajosa; transição ondulada e clara.
- Bt1** 96 – 145cm; bruno-amarelado-escuro (10YR 5/6 úmida), bruno-amarelado-claro (10YR 6/4 seca); moderada a forte média a grande blocos subangulares; dura, muito friável, plástica e pegajosa; transição ondulada e clara.
- Bt2** 145 – 190 cm+; vermelho- amarelado (5YR 5/8 úmida), amarelo-avermelhado (5YR 6/8 seca); moderada média blocos subangulares; muito duro a extremamente duro, friável, plástica e pegajosa.

**RAÍZES** – Muitas finas e médias no horizonte Ap; comuns finas em AE; poucas finas em E; raras finas em EB e BE.

**OBSERVAÇÕES** – O horizonte Bt1 apresenta caráter coeso; horizontes Bt1 e Bt2 apresentam mosqueados médios comuns proeminentes; as cores foram revisadas, com exceção do horizonte Bt2, em dezembro de 2022, por Ana Maria Vieira da Silva, Angélica Lopes e Ricardo Romero.

**Descrito por:** Juliana Matos Vieira e Ricardo Espíndola Romero.

## ANEXO B – CARACTERIZAÇÃO DO SOLO ESTUDADO

Tabela 1. Caracterização química do solo

Horizonte	Prof. (cm)	Cátions trocáveis						SB <sup>1</sup>	T <sup>2</sup>	V <sup>3</sup>	pH
		Ca	Mg	K	Na	Al	H				
		-----cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----								%	(H <sub>2</sub> O)
Ap1	0-8	3,0	4,4	0,36	0,37	0,2	2,0	8,13	10,33	79	6,0
AE	8-15	2,0	3,8	0,21	0,37	0,2	1,2	6,39	7,79	82	6,2
E	15-32	1,4	2,8	0,24	0,36	0,4	1,8	4,79	6,99	69	6,3
EB	32-62	1,4	3,2	0,30	0,43	0,4	1,8	5,33	7,53	71	6,3
BE	62-96	2,2	2,0	0,39	0,41	0,6	1,5	5,00	7,10	70	6,3
Bt1	96-145	1,6	3,8	0,40	0,43	0,6	1,6	6,23	8,43	74	6,3
Bt2	145-190+	1,8	3,0	0,17	0,46	0,4	1,6	5,43	7,43	73	6,4

<sup>1</sup>Soma de bases; <sup>2</sup>CTC potencial; <sup>3</sup>Saturação por bases.

Fonte: Vieira (2013)

Tabela 2. Caracterização física do solo

Horizonte	Profundidade (cm)	Areia	Silte	Argila
		-----g kg <sup>-1</sup> -----		
Ap1	0-8	826	109	65
AE	8-15	823	91	87
E	15-32	810	66	124
EB	32-62	706	78	216
BE	62-96	614	94	292
Bt1*	96-145	560	80	360
Bt2	145-190+	479	108	413

\*Com exceção da granulometria do horizonte Bt1, todos os demais dados foram obtidos por Vieira (2013).

**ANEXO C – CARACTERIZAÇÃO DO BIOCÁRVÃO UTILIZADO**

Tabela 1. Caracterização do biocárvão utilizado

<b>Superfície específica (m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>)</b>	70,0
<b>C (%)</b>	80,1
<b>H (%)</b>	2,5
<b>N (%)</b>	2,8
<b>S (%)</b>	0,2
<b>O (%)</b>	10,8
<b>Cinzas (%)</b>	3,6
<b>Razão atômica O/C</b>	0,10
<b>Razão atômica H/C</b>	0,38

Fonte: Fregolente *et al.*, 2023.