



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

MARIA VITÓRIA RICARTE GONÇALVES

CARVÕES PIROLÍTICO E HIDROTÉRMICO COMO ESTRATÉGIA PARA
ECONOMIA DE FERTILIZANTES MINERAIS NA AGRICULTURA

FORTALEZA

2024

MARIA VITÓRIA RICARTE GONÇALVES

CARVÕES PIROLÍTICO E HIDROTÉRMICO COMO ESTRATÉGIA PARA ECONOMIA
DE FERTILIZANTES MINERAIS NA AGRICULTURA

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

Orientadora: Prof^a. Dra. Mirian Cristina Gomes Costa.

Coorientadora: Dra. Francisca Gleiciane da Silva.

FORTALEZA

2024

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

- G626c Gonçalves, Maria Vitória Ricarte.
Carvões pirolítico e hidrotérmico como estratégia para economia de fertilizantes minerais na agricultura / Maria Vitória Ricarte Gonçalves. – 2024.
110 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Fortaleza, 2024.
Orientação: Profa. Dra. Mirian Cristina Gomes Costa.
Coorientação: Profa. Dra. Francisca Gleiciane da Silva.
1. fertilidade química do solo. 2. desenvolvimento de plantas. 3. Zea mays. 4. materiais carbonáceos. 5. condicionadores de solo. I. Título.

CDD 631.4

MARIA VITÓRIA RICARTE GONÇALVES

CARVÕES PIROLÍTICO E HIDROTÉRMICO COMO ESTRATÉGIA PARA ECONOMIA
DE FERTILIZANTES MINERAIS NA AGRICULTURA

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

Aprovado em: 24/11/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dra. Mirian Cristina Gomes Costa (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

Prof. Dr. Helon Hébano de Freitas Sousa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

À minha querida tia, Socorro Ricarte (*in
memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus, por minha vida, por minha família, por todas as graças.

À minha mãe, Joana Darc, por sempre estar ao meu lado e por me ajudar a me reerguer quando penso que estou sem forças para seguir na luta.

Ao meu companheiro, Tiago Moniz, por todo o amor, por segurar em minha mão para caminharmos juntos, apoiando um ao outro.

Ao meu irmão, João Emanuel, pelas palavras de conforto em momentos difíceis.

A toda a minha família e aos meus amigos, pelo incentivo e pelo carinho.

Ao meu pai, Francisco Julio, por ter retornado como alguém que busca ressignificar a relação familiar por meio de boas ações.

À professora Dra. Mirian Cristina, pela excelente orientação, por toda a compreensão, pelo apoio e pelos ensinamentos.

À Dra. Francisca Gleiciane, por tantas instruções essenciais durante a coorientação, por toda a ajuda, pela paciência e carinho.

Aos meus parceiros do Manejo: Deyse Maia, Rafaela Batista, Lucas Melo, John Fonteles, João Felipe, Daniel Alves, Ana Maia, Lucas, Renan, Mario e Iris por toda a ajuda, pelos conselhos e pelas risadas.

Ao professor Dr. Carlos Tadeu, por ser tão paciente e por sempre estar disposto a auxiliar da melhor forma, de coração.

À banca examinadora, professor Dr. Helon Hébano e professor Dr. Odair Pastor, por todo o incentivo e encorajamento, pelas imprescindíveis contribuições e ensinamentos.

Aos meus parceiros do Departamento de Ciências do Solo e agregados: Ivo, Ícaro, Alexandre, Angélica, Rovenne, Gilvanete, João, Luan, Josué, Maiany, Gabriela, Luciana, Waldir, Jefferson e Wandercleyson, pela amizade, pela ajuda, pelos estudos e pela partilha de conhecimento.

Aos funcionários do Departamento de Ciências do Solo: Edilson, Franzé, Marilene, Elena, Amilson, Crisanto e Caio, pelas conversas, pelo auxílio nos trabalhos, pelos sorrisos.

Aos professores Jaedson Mota, Maria Eugênia, Arthur Prudêncio, Gabriel, Ricardo, Claudivan e Rosilene, por toda a assistência e por tantos ensinamentos.

À Secretaria do Desenvolvimento Agrário (SDA), por contribuir para esta e outras pesquisas com materiais carbonáceos a partir da doação das sementes de milho.

À Universidade Federal do Ceará, meu segundo lar desde a graduação, por todo o apoio e por me conceder o benefício de aprimorar meus conhecimentos científicos durante a pós-graduação em Ciência do Solo.

Ao CNPq, por me conceder a bolsa de estudo que possibilitou minha permanência no Mestrado e o desenvolvimento de toda a minha pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES); à Agência Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP); à Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará (CAGECE); à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) e ao Programa Cientista-Chefe em Agricultura, do Governo do Estado do Ceará pelo apoio financeiro para a realização das pesquisas com os materiais carbonáceos.

A todos e todas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Diante das limitações para a produção de fertilizantes minerais, é essencial explorar fontes alternativas de nutrientes para a agricultura, como os materiais carbonáceos. No entanto, a depender das características desses materiais, influenciadas pelo método de produção, seu uso pode ser mais efetivo quando associado a fertilizantes minerais (FM). A partir disso, foram testadas duas hipóteses: em relação ao carvão hidrotérmico (CH), o carvão pirolítico (CP) de bagaço de caju é mais efetivo como fonte de nutrientes para a cultura do milho; a aplicação dos carvões associados a fertilizantes minerais permite reduzir o uso destes insumos. O objetivo deste trabalho foi avaliar a fertilidade de solo degradado e o desenvolvimento inicial de plantas de milho após adubação com carvões pirolítico e hidrotérmico de bagaço de caju aplicados de forma isolada e associados a fertilizantes minerais. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento inteiramente aleatorizado, com 6 tratamentos e 6 repetições. Os tratamentos foram: Controle (T0); 100% FM (T1); 100% CH (T2); 100% CP (T3); 50% FM + 50% CH (T4) e 50% FM + 50% CP (T5). Ao final do experimento, foram analisadas as trocas gasosas, os pigmentos fotossintéticos, a biomassa seca e o acúmulo de macro e micronutrientes nas plantas, além das análises químicas do solo. A análise estatística foi constituída pela análise de variância (ANOVA) e pelo teste de Duncan para comparação de médias ao nível de 5% de significância utilizando programa SAS versão acadêmica. Os maiores valores para trocas gasosas foram obtidos por T1, T2 e T5, com fotossíntese líquida média de $27,2 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Entretanto, T0 e T3 elevaram os teores de clorofila em 34,9% em média em relação aos demais tratamentos. Para as variáveis de crescimento, T5 gerou maiores benefícios. A biomassa seca total da planta foi maior para T1, T4 e T5 (24,77, 22,99 e 23,19, respectivamente). Os tratamentos T2 e T4 dedicaram mais recursos para a produção de raízes, com razão da massa da raiz apresentando aumento médio de 14,6% em relação a T0. O acúmulo de macronutrientes na biomassa foliar foi maior para T1 e T5, assim como para os micronutrientes, exceto para Mn. Os atributos de fertilidade do solo foram melhorados por T1, T4 e T5. A aplicação isolada de CH e CP de bagaço de caju não melhoram efetivamente o desenvolvimento inicial do milho e a fertilidade do solo degradado. Entretanto, a aplicação dos carvões juntamente aos FM proporciona resultados benéficos e reduz a necessidade de fertilizantes. Dentre os carvões, o CP forneceu maiores benefícios em relação ao CH.

Palavras-chave: fertilidade química do solo; desenvolvimento de plantas; *Zea mays*; materiais carbonáceos; condicionadores de solo.

ABSTRACT

Given the limitations in the production of mineral fertilizers, it is essential to explore alternative nutrient sources for agriculture, such as carbonaceous materials. However, depending on the characteristics of these materials, influenced by the production method, their use may be more effective when combined with mineral fertilizers (MF). Based on this, two hypotheses were tested: in relation to hydrochar (HC), pyrochar (PC) from cashew bagasse is more effective as a nutrient source for maize crops; and the application of charcoals combined with mineral fertilizers allows for a reduction in the use of these inputs. The aim of this study was to evaluate the fertility of degraded soil and the initial development of maize plants after fertilization with pyrolytic and hydrothermal cashew bagasse charcoals applied individually and in combination with mineral fertilizers. The experiment was conducted in a greenhouse, in a completely randomized design, with 6 treatments and 6 replications. The treatments were: Control (T0); 100% MF (T1); 100% HC (T2); 100% PC (T3); 50% MF + 50% HC (T4); and 50% MF + 50% PC (T5). At the end of the experiment, gas exchange, photosynthetic pigments, dry biomass, and the accumulation of macro and micronutrients in the plants were analyzed, along with soil chemical analyses. Statistical analysis consisted of analysis of variance (ANOVA) and Duncan's test for mean comparison at a 5% significance level using SAS academic version software. The highest values for gas exchange were obtained by T1, T2, and T5, with an average net photosynthesis of $27.2 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. However, T0 and T3 increased chlorophyll content by an average of 34.9% compared to the other treatments. For growth variables, T5 provided the greatest benefits. Total plant dry biomass was higher for T1, T4, and T5 (24.77, 22.99, and 23.19, respectively). Treatments T2 and T4 allocated more resources to root production, with the root mass ratio showing an average increase of 14.6% compared to T0. The accumulation of macronutrients in the leaf biomass was higher for T1 and T5, as well as for micronutrients, except for Mn. Soil fertility attributes were improved by T1, T4, and T5. The isolated application of HC and PC from cashew bagasse did not effectively improve the initial development of maize and degraded soil fertility. However, the application of charcoals together with MF provided beneficial results and reduced the need for fertilizers. Among the charcoals, PC provided greater benefits compared to HC.

Keywords: soil chemical fertility; plant development; *Zea mays*; carbonaceous materials; soil conditioners.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Localização da área em que o solo foi coletado (Irauçuba – CE)	29
Figura 2	– Plantas de milho desenvolvidas sob aplicação dos respectivos tratamentos: Controle (T0), 100% FM (T1), 100% CH (T2), 100% CP (T3), 50% FM + 50% CH (T4) e 50% FM + 50% CP (T5), aos 39 dias após a emergência	39
Figura 3	– Análise de trocas gasosas nas plantas de milho utilizando IRGA	40
Figura 4	– Medição do teor de clorofila nas folhas das plantas de milho	41
Figura 5	– Retirada dos discos foliares das plantas de milho para análise de pigmentos fotossintéticos	42
Figura 6	– Medição da altura das plantas de milho utilizando trena graduada (A) e medição do diâmetro do colmo com paquímetro digital (B)	43
Figura 7	– Determinação da área foliar do milho em integrador de área	43
Figura 8	– Fotossíntese líquida (A), condutância estomática (B), eficiência do fotossistema II (C), transporte de elétrons (D) e transpiração (E) das plantas de milho aos 36 dias após a emergência em resposta à aplicação dos tratamentos	47
Figura 9	– Índice SPAD das plantas de milho aos 39 dias após a emergência em resposta à aplicação dos tratamentos	51
Figura 10	– Clorofila <i>a</i> (A), clorofila <i>b</i> (B), clorofila total (C) e carotenoides (D) de plantas de milho aos 41 dias após a emergência em resposta à aplicação dos tratamentos	52
Figura 11	– Variação de altura em cm (A) e diâmetro do colmo em mm (B) das plantas de milho aos 35 dias após a emergência em resposta à aplicação dos tratamentos	55
Figura 12	– Área foliar em cm ² das plantas de milho aos 41 dias após a emergência em resposta à aplicação dos tratamentos	56

Figura 13 – Massa seca da raiz (A), massa seca do colmo (B), massa seca da folha (C) e massa seca total (D) das plantas de milho, em gramas, aos 41 dias após a emergência em resposta à aplicação dos tratamentos	60
Figura 14 – Razões entre massa seca de raízes e massa seca total (A) e massa seca foliar e massa seca total (B) das plantas de milho aos 41 dias após a emergência em resposta à aplicação dos tratamentos	63
Figura 15 – Teores dos macronutrientes nitrogênio (A), fósforo (B), potássio (C), cálcio (D) e magnésio (E) e teor de sódio (F) na biomassa foliar das plantas de milho aos 41 dias após a emergência em resposta à aplicação dos tratamentos	67
Figura 16 – Teores dos micronutrientes ferro (A), cobre (B), zinco (C) e manganês (D) na biomassa das plantas de milho aos 41 DAE em resposta à aplicação dos tratamentos	72
Figura 17 – Teores dos macronutrientes nitrogênio (A), potássio (B), magnésio (C) e sódio (D) no solo aos 41 dias após a emergência das plantas de milho em resposta à aplicação dos tratamentos	76
Figura 18 – Teor do micronutriente manganês no solo aos 41 dias após a emergência das plantas de milho em resposta à aplicação dos tratamentos	80
Figura 19 – Valores de CTC efetiva (A), CTC total (B), soma de bases (C), acidez potencial (D) e pH (E) no solo aos 41 dias após a emergência das plantas de milho em resposta à aplicação dos tratamentos	83
Figura 20 – Valores de saturação por bases (A), saturação por alumínio (B) e porcentagem de sódio trocável (C) no solo aos 41 dias após a emergência das plantas de milho em resposta à aplicação dos tratamentos	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atributos químicos da camada de 0-10 cm do solo utilizado no experimento	31
Tabela 2 – Atributos físicos e granulometria da camada de 0-10 cm do solo utilizado no experimento	31
Tabela 3 – Caracterização do carvão pirolítico, carvão hidrotérmico e bagaço de caju ...	33
Tabela 4 – Doses de carvão pirolítico e carvão hidrotérmico, quantidades de N, P, K, S e Mg fornecidas e quantidades necessárias a serem complementadas para suprir a demanda da cultura do milho	35
Tabela 5 – Quantidades de adubos minerais aplicados no solo, em cada tratamento, para suprir a demanda da cultura do milho por meio dos fertilizantes ureia, superfosfato triplo (SPT), enxofre elementar (Se) e óxido de magnésio (MgO)	36
Tabela 6 – Umidade com base em volume na capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e capacidade de água disponível (CAD) para os tratamentos com adição de fertilizantes minerais, carvão pirolítico e carvão hidrotérmico	37
Tabela 7 – Preço médio dos fertilizantes minerais, de acordo com a quantidade aplicada em cada tratamento em que houve adição desses, valor total gasto e valor total economizado para cada tratamento	90
Tabela 8 – Resumo da análise de variância (ANOVA) para as variáveis fotossíntese líquida (<i>A</i>), condutância estomática (<i>g_s</i>), concentração intercelular de CO ₂ (<i>C_i</i>), eficiência do fotossistema II (<i>F_v/F_m</i>), taxa de transporte de elétrons (<i>ETR</i>), transpiração (<i>E</i>), concentração intercelular de CO ₂ (<i>C_i</i>), relação entre a quantidade de CO ₂ externa e interna (<i>C_i/C_a</i>), eficiência instantânea do uso da água (<i>A/E</i>), eficiência de carboxilação (<i>A/C_i</i>), índice SPAD, clorofila <i>a</i> (<i>Clfa</i>), clorofila <i>b</i> (<i>Clfb</i>), clorofila total (<i>Clfa+b</i>) e carotenoides (<i>Car</i>)	107
Tabela 9 – Resumo da análise de variância (ANOVA) para as variáveis altura da planta (AP), diâmetro do colmo (DC), área foliar (AF), massa seca da raiz (MR),	

<p>massa seca do colmo (MC), massa seca da folha (MF), massa seca da planta (MP), razão da massa da raiz (RMR), razão da massa do colmo (RMC) e razão da massa da folha (RMF)</p>	108
<p>Tabela 10 – Resumo da análise de variância (ANOVA) para os acúmulos de sódio (Na), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), nitrogênio (N), fósforo (P), ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn) e manganês (Mn) na biomassa foliar das plantas de milho</p>	108
<p>Tabela 11 – Resumo da análise de variância (ANOVA) para os atributos de fertilidade do solo pH, sódio (Na), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), nitrogênio (N), fósforo (P), carbono orgânico (CO), ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn), acidez potencial (H+Al), soma de bases (SB), CTC efetiva (t), CTC total (T), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%) e porcentagem de sódio trocável (PST) do solo cultivado com milho sob diferentes tratamentos envolvendo adubação com fertilizantes minerais, carvão hidrotérmico, carvão pirolítico e a mistura de cada um dos carvões com fertilizantes minerais</p>	109
<p>Tabela 12 – Médias obtidas por cada tratamento nas variáveis de trocas gasosas: concentração intercelular de CO₂ (Ci), relação entre a quantidade de CO₂ externa e interna (Ci/Ca), eficiência instantânea do uso da água (A/E), eficiência de carboxilação (A/Ci); na variável razão entre massa seca do colmo e massa seca total da planta (RMC) e nos atributos de fertilidade do solo: sódio (Na), cálcio (Ca), fósforo (P), carbono orgânico (CO), ferro (Fe), cobre (Cu) e zinco (Zn) que não foram significativos pelo teste F da ANOVA</p>	110

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Impactos da adubação na produtividade e na degradação dos solos agrícolas	16
2.2	Processos de produção de carvões pirolíticos e hidrotérmicos e biomassas precursoras	19
2.2.1	<i>Aspectos gerais</i>	19
2.2.2	<i>Processos de produção</i>	21
2.2.3	<i>Resíduos agroindustriais para a produção de carvões pirolíticos e hidrotérmicos</i>	22
2.3	Uso agrícola do carvões pirolíticos e dos carvões hidrotérmicos	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	Amostragem e caracterização do solo	29
3.2	Carvões utilizados, delineamento experimental e tratamentos	31
3.3	Instalação e condução do experimento	37
3.4	Avaliações	39
3.4.1	<i>Trocas gasosas nas plantas de milho</i>	39
3.4.2	<i>Teores de clorofila (índice SPAD) e pigmentos fotossintéticos nas folhas das plantas de milho</i>	40
3.4.3	<i>Altura da planta, diâmetro do colmo e área foliar das plantas de milho</i>	42
3.4.4	<i>Biomassa seca e razões alométricas das plantas de milho</i>	44
3.4.5	<i>Acúmulo de macro e micronutrientes da biomassa foliar do milho</i>	44
3.4.5	<i>Fertilidade do solo</i>	45
3.5	Análises estatísticas dos dados	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1	Trocas gasosas nas plantas de milho	46
4.2	Índice SPAD, teores de clorofila e carotenoides	50
4.3	Altura da planta, diâmetro do colmo e área foliar	54
4.4	Biomassa seca e razões alométricas	59
4.5	Macro e micronutrientes da biomassa foliar	66
4.6	Fertilidade do solo	75

5	CONCLUSÃO	91
	REFERÊNCIAS	92
	APÊNDICE A – RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA OS	
	ATRIBUTOS ANALISADOS	107
	APÊNDICE B – MÉDIAS DAS VARIÁVEIS NÃO SIGNIFICATIVAS	
	PELO TESTE F DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA	110

1 INTRODUÇÃO

A agricultura moderna conta com metodologia de produção que utiliza adubos inorgânicos na busca pela alta produtividade. Entretanto, o uso demasiado e/ou contínuo desses insumos tem trazido consequências negativas como poluição de corpos hídricos e degradação dos solos. Além disso, outros problemas estão associados ao uso de fertilizantes inorgânicos ou minerais, tais como o impacto ambiental gerado na sua produção e a limitação de suas fontes na natureza. Isso contribui com a emissão de gases de efeito estufa, resulta em alto custo para aquisição de fertilizantes pelos produtores e gera dependência internacional para obtenção desses insumos.

A degradação dos solos gera insegurança global em relação à produção de alimentos, especialmente pela demanda contínua e crescente, e traz a necessidade de novas formas de se praticar a agricultura. Com isso, a ciência tem se dedicado à pesquisa de insumos alternativos que possam garantir a produtividade e, de forma concomitante, contribuir para a regeneração do solo e auxiliar na redução de danos ambientais e das mudanças climáticas. Dentre os estudos recentes, os materiais carbonáceos advindos da carbonização de resíduos orgânicos têm sido considerados de pertinente uso como condicionadores de solo.

As formas de produção dos materiais carbonáceos com potencial de uso como condicionadores de solo podem ser divididas entre carbonização hidrotérmica (CHT) e pirolítica. Na CHT é utilizada água no processo de produção, possibilitando o aproveitamento da biomassa ainda úmida, com aplicação de temperaturas mais baixas em relação à pirolítica, tendo como produto o carvão hidrotérmico, comumente também denominado hidrocarvão. Já na carbonização pirolítica, é utilizada biomassa seca, não há adição de água no processo, e são aplicadas elevadas temperaturas, resultando no chamado carvão pirolítico ou biocarvão. Ambas as carbonizações ocorrem na ausência ou baixa disponibilidade de oxigênio.

O uso dos carvões pirolíticos e hidrotérmicos na agricultura pode promover melhorias nos atributos químicos, favorecer a estruturação do solo, a retenção e a percolação da água no solo e interagir com a comunidade microbiana, melhorando a biologia do solo. Entre os carvões, a literatura tem demonstrado que o pirolítico apresenta maiores vantagens como condicionador de solo devido a características como a sua estrutura química, que possui grupos funcionais que permitem a maior adsorção de cátions no solo quando comparado ao carvão hidrotérmico.

O carbono aportado ao solo por meio dos materiais carbonáceos não é liberado facilmente para a atmosfera e contribui para reduzir a emissão de gases de efeito estufa. Ademais, como a produção dos carvões pode ser realizada a partir de resíduos agroindustriais, a aplicação desses materiais em solos agrícolas se mostra como oportunidade de promover a destinação correta de resíduos, auxiliando na construção da bioeconomia circular.

No entanto, vale destacar que a eficiência dos carvões pirolíticos e hidrotérmicos como insumo agrícola é variável em função do tipo de matéria-prima e das condições de produção (tipo de carbonização, temperatura e tempo), de modo que podem apresentar melhores resultados quando aplicados de forma combinada com fertilizantes minerais.

Com a execução deste trabalho foram testadas duas hipóteses: a primeira admite que em relação ao carvão hidrotérmico produzido a partir de bagaço de caju, o carvão pirolítico (derivado da mesma matéria-prima) é mais efetivo como fonte de nutrientes para a cultura do milho, tanto aplicado de forma isolada, quanto associado a fertilizantes minerais; e a segunda admite que a aplicação dos carvões associados aos fertilizantes minerais promove efeito sinérgico no solo que permite reduzir consideravelmente o uso de fertilizantes minerais e promove efeitos benéficos para o crescimento e o desenvolvimento da cultura do milho.

O objetivo do estudo foi avaliar a fertilidade de solo degradado e o desenvolvimento inicial do milho (*Zea mays*) em resposta à adubação com carvão pirolítico e carvão hidrotérmico (produzidos a partir de bagaço de caju) aplicados de forma isolada e adubação com cada um desses carvões associados a fertilizantes minerais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Impactos da adubação na produtividade e na degradação dos solos agrícolas

A adubação dos solos é fator fundamental para que seja garantida a boa produtividade das áreas de cultivo agrícola, especialmente em regiões que naturalmente possuem solos de baixa fertilidade. O desenvolvimento vegetal depende diretamente da concentração de nutrientes na solução do solo. Os macronutrientes e micronutrientes essenciais estão envolvidos em processos vitais e definidores da produtividade das plantas, como a fotossíntese, responsável pela conversão de CO₂ atmosférico e água em glicose (Meurer, 2007).

Na segunda metade do século XX, a agricultura moderna se alastrou pelos países em desenvolvimento visando o aumento da produção vegetal e passou a contar com um pacote tecnológico que permaneceu como modelo convencional atual, o qual inclui alto uso de insumos externos, como agrotóxicos e fertilizantes industriais, maquinário pesado e monocultivo (Mazoyer; Roudart, 2010). A alta produção de *commodities* nesse modelo aliada ao comércio globalizado, provoca impactos negativos como poluição ambiental, perda da biodiversidade, degradação de terras e problemas associados à saúde humana (Eliasson *et al.*, 2023; Steen-Olsen *et al.*, 2012).

O atual modelo produtivo resultou na dependência dos adubos inorgânicos devido ao uso em grande quantidade para possibilitar altas produções. O uso excessivo e desequilibrado desses produtos gera danos de ordem ambiental, econômica e sanitária (Kumar *et al.*, 2023). Há baixa eficiência de uso dos adubos pelas culturas e durante os processos de absorção, transporte e remobilização, ocorre a perda de mais da metade de macronutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio aplicados no solo (Guo *et al.*, 2018).

Os nutrientes perdidos são transportados por meio de processos erosivos e por lixiviação, chegando a corpos d'água, resultando na eutrofização desses (Eliasson *et al.*, 2023). Alguns fertilizantes inorgânicos (ou minerais) são revestidos com polímeros e podem causar poluição por microplásticos em terras agrícolas, os quais possibilitam carrear poluentes como metais potencialmente tóxicos, resultando também em alteração no pH do solo e perturbações na comunidade microbiana (Diao *et al.* 2023). Altos teores de adubos nitrogenados, por exemplo, provocam a redução do pH e podem agravar problemas como a transmissão de doenças fitossanitárias causadas por patógenos do solo (Zhang *et al.*, 2022), assim como o uso demasiado de fertilizante mineral à base de fósforo pode contribuir para o aumento da

salinidade do solo, impactando de forma significativa a produção agrícola (Khasanov *et al.*, 2023).

O manejo inadequado ou a aplicação excessiva de fertilizantes minerais tem sido um dos principais fatores de degradação dos solos (Nascimento *et al.*, 2021). A degradação do solo implica na redução da sua capacidade produtiva, de forma temporária ou permanente, decorrente de perturbações naturais e/ou atividades antrópicas. O processo degradativo pode advir de processos físicos (que prejudicam a estrutura do solo), químicos (contaminação, depleção de nutrientes, acidificação, salinização), biológicos (redução da biodiversidade e da capacidade de sequestro de C) e ecológicos (danos aos processos de infiltração e purificação da água e de produtividade líquida do bioma) (Lal, 2015).

Em regiões tropicais o processo de degradação torna-se mais acelerado, especialmente pela dificuldade de manutenção da matéria orgânica do solo devido à rápida taxa de decomposição resultante do clima quente e úmido (Nascimento *et al.*, 2021). O uso de fertilizantes orgânicos em doses adequadas é capaz de mitigar a degradação decorrente do cultivo constante e da utilização de fertilizantes minerais, visto que podem preservar a qualidade do solo e elevar os níveis de nutrientes e atividades enzimáticas da microbiota do solo (Fan *et al.*, 2024).

A extração das matérias-primas para produção dos fertilizantes minerais também causa poluição e degradação ambiental e, por serem provenientes de fontes finitas, demandam por fontes alternativas. Além da poluição e degradação do solo, fatores como o aumento de custos para produção de insumos para adubação e o conseqüente aumento de preços, a menor disponibilidade de gás natural e o encarecimento de fertilizantes nitrogenados são problemas conhecidos da cadeia de produção dos fertilizantes minerais (Chojnacka *et al.*, 2023). Nesse cenário, outro exemplo é a crise que poderá ser instaurada a partir do esgotamento de rochas fosfáticas, das quais se derivam os fertilizantes fosfatados (Gilbert, 2009). Essas limitações tem impacto direto na produção agrícola e trazem riscos ao suprimento mundial de alimentos, sendo necessárias formas alternativas que se sobressaiam a esses problemas.

Os solos brasileiros, em sua maioria, apresentam boas condições físicas e biológicas para a agricultura. Todavia, as condições químicas são limitantes para a produção devido a acidez resultante do intemperismo acentuado e da lixiviação de bases. Apesar desse aspecto, solos com boa fertilidade química não são necessariamente produtivos, pois podem apresentar restrições como a presença de elementos potencialmente tóxicos, condições físicas

desfavoráveis, bem como podem estar localizados em regiões onde fatores climáticos sejam limitantes, entre outros (Novais *et al.*, 2007).

Dentro desses aspectos, o semiárido brasileiro possui solos sensíveis ao uso exacerbado dos adubos inorgânicos e ao modelo de monocultivo. A região é fortemente caracterizada por elevada evapotranspiração potencial, períodos de secas prolongadas, solos pouco profundos e com baixa retenção de umidade (Baracuh; Furtado; Francisco, 2017). Associados a esses fatores, tem-se problemas relacionados ao manejo inadequado dos agroecossistemas na região. No semiárido nordestino, por exemplo, as atividades agropecuárias iniciaram no século XVII a partir da ocupação pelos colonizadores (Nogueira; Simões, 2007), e são realizadas ainda hoje de forma predatória, de modo a estarem atribuídas às principais causas de danos ambientais e do processo de desertificação (Araújo; Araújo, 2019), tornando o solo menos produtivo.

A desertificação confere a degradação de terras em ambientes áridos, semiáridos e subúmidos, resultante da interação de fatores variados, sejam esses físicos, biológicos, sociais e outros (AbdelRahman, 2023). Na região semiárida brasileira, há o reconhecimento de quatro núcleos desertificados: Gilbués (Piauí), Irauçuba (Ceará), Seridó (Paraíba) e Cabrobó (Pernambuco) (PAN-Brasil, 2004), compreendendo áreas em alto nível de degradação, com substancial redução da fertilidade e da produtividade do solo (AbdelRahman, 2023).

Nesse contexto, torna-se crucial debater os avanços nos processos que causam a degradação do solo, visto que a preservação desse recurso é essencial para garantir a produção de alimentos e serviços ecossistêmicos fundamentais para a manutenção da biosfera, como: sequestro de carbono, auxiliando na mitigação das mudanças climáticas (David, 2022); filtragem de resíduos e ciclagem de nutrientes (Távora *et al.*, 2022); reservatório de biodiversidade; filtragem e armazenamento de água (Dominati; Patterson; Mackay, 2010), entre outros. Para que seja obtida produtividade aliada à conservação ambiental, é necessária a adoção de práticas conservacionistas de manejo do solo, isso inclui a adubação balanceada e a adição de matéria orgânica (MO). Nessa perspectiva, materiais carbonáceos (carvões hidrotérmicos e pirolíticos) utilizados como condicionadores de solo, de forma isolada ou associados a fertilizantes minerais, podem ser fontes alternativas de nutrientes e, com isso, podem contribuir para mitigar os danos advindos de processos degradativos.

2.2 Processos de produção de carvões pirolíticos e hidrotérmicos e biomassas precursoras

O carvão pirolítico e o carvão hidrotérmico são materiais resultantes da carbonização de um determinado componente orgânico na ausência ou limitação de oxigênio e possuem potencial para melhorar os atributos físicos, químicos e biológicos dos solos. A queima da biomassa nessas condições resulta em um produto com maior quantidade de carbono em estruturas de anéis aromáticos, o que atribui propriedades vantajosas aos solos em relação à mineralização e adsorção de nutrientes. A produção desses materiais pode ser realizada por diversos métodos de carbonização que envolvem diferentes biomassas, temperaturas aplicadas, tempo de processamento e equipamentos variados (Kambo; Dutta, 2015; Yadav *et al.*, 2023; Al-Nuaimy *et al.*, 2024).

2.2.1 Aspectos gerais

Apesar das inúmeras pesquisas recentes, estudos científicos com materiais carbonáceos remontam de épocas antigas, em meados de 1800, a partir da observação do desenvolvimento de plantas em antigos locais de armazenamento de carvão (Lehmann; Joseph, 2015). No século XX, devido ao uso massivo de fertilizantes minerais com a agricultura moderna, os estudos acerca de fertilizantes orgânicos perderam forças.

Contudo, na década de 1980, os estudos relacionados aos solos denominados "Terra Preta de Índio" (Terra Preta da Amazônia) na Bacia Amazônica, estimularam as pesquisas com os materiais carbonáceos. As características dessa terra como teor de matéria orgânica, saturação por bases e saturação por alumínio, a caracterizam como mais produtiva do que as outras terras da mesma região (Lehmann; Joseph, 2015). Carvão e substâncias húmicas altamente aromáticas são encontradas na Terra Preta de Índio e são um indicativo de combustão incompleta da matéria orgânica. Esse fator se torna componente chave para os atributos físicos: porosidade, retenção de umidade, densidade; e químicos: CTC, pH e teor de carbono que esses solos apresentam (Glaser *et al.*, 2001). Suas propriedades foram desenvolvidas por populações indígenas há milhares de anos, formando um solo de horizonte A antrópico de alta fertilidade (López-Noronha *et al.*, 2020).

Os carvões pirolítico e hidrotérmico são produtos semelhantes, porém as condições de pré-tratamento e produção são distintas. Ambos são resultantes da carbonização em

condições de baixa disponibilidade ou ausência de oxigênio, como já mencionado. Todavia, o carvão pirolítico é produzido por pirólise, com a queima da biomassa a seco, enquanto o carvão hidrotérmico é formado pela carbonização hidrotérmica (CHT), também denominada “pirólise úmida”, na qual a queima da biomassa ocorre na presença de água, além de não ser necessário o pré-tratamento de secagem dessa biomassa (Libra *et al.*, 2011). Para a pirólise seca, é requerido elevado calor para vaporizar a umidade da biomassa, o que resulta em maior demanda de energia em relação à CHT, tornando-a um processo menos econômico (Wang *et al.*, 2018).

Tanto o carvão pirolítico quanto o hidrotérmico possuem estruturas aromáticas extensas, mas o tipo de produção promove arranjo estrutural e características físico-químicas que diferenciam os produtos de forma significativa (Libra *et al.*, 2011). A variação nas propriedades morfológicas, por exemplo, dá-se pela formação de espaços livres dentro da matriz do carvão a partir da volatilização de compostos orgânicos (Kambo; Dutta, 2015). Para que o carvão pirolítico atinja maior área de superfície e com isso maior eficiência na retenção de água e de compostos tóxicos, por exemplo, é necessária temperatura acima de 500 °C na carbonização (Kloss *et al.*, 2012).

O carvão hidrotérmico geralmente apresenta características hidrofóbicas e limitações como menor área de superfície e porosidade (Titirici *et al.*, 2012). Como constatado por He, Giannis e Wang (2013), a carbonização em tempo mais longo aparentemente reduz grupos funcionais que contêm oxigênio, enquanto há o aumento de estruturas aromáticas, conferindo alta hidrofobicidade ao carvão hidrotérmico. Isso pode representar uma desvantagem para a dinâmica físico-hídrica, uma vez que o material seja aplicado ao solo (Mau; Arye; Gross, 2018).

Há estudos em que foram observadas desvantagens da aplicação do material carbonáceo e seus subprodutos em solos, a depender de alguns fatores como a espécie cultivada, a matéria-prima carbonizada e o processo de carbonização. Essas desvantagens envolvem efeitos fitotóxicos em sementes, redução na biomassa microbiana do solo e efeitos tóxicos à mesofauna do solo (Bargmann *et al.*, 2013; Dempster *et al.*, 2012; Shi *et al.*, 2013). Contudo, as limitações podem ser contornadas ao realizar tratamentos no material carbonáceo produzido, como lavagem e armazenamento antes de sua aplicação ao solo (Bargmann *et al.*, 2013). Assim, ainda que haja as limitações dos produtos da carbonização, os benefícios do uso do carvão hidrotérmico e do carvão pirolítico são diversos.

Na carbonização hidrotérmica, além do carvão hidrotérmico, são gerados subprodutos do processo, dentre eles a água de processo, a qual é uma considerável fonte de

nutrientes para a agricultura. Fregolente *et al.* (2019) verificaram que a água de processo gerada pela CHT de vinhaça e bagaço de cana-de-açúcar ao ser diluída e aplicada em sementes de milho e tomate, promoveu melhor crescimento da raiz e da parte aérea das plantas. A produção dos carvões por pirólise ou CHT possibilita a utilização de resíduos industriais e urbanos como fonte de biomassa (Wang *et al.*, 2018), aspecto importante para a destinação sustentável desses resíduos.

2.2.2 Processos de produção

A carbonização hidrotérmica e a pirólise são duas formas de realizar a conversão termoquímica de biomassa, sendo o composto final da primeira comumente conhecido como hidrochar, carvão hidrotérmico, ou ainda, carvão hidrotérmico, enquanto o produto da pirólise é mais conhecido como carvão pirolítico, ou biochar (Fregolente *et al.*, 2021). Uma das principais diferenças entre esses processos é que no hidrotérmico pode ser utilizada biomassa úmida e há necessidade de água para a produção, além do uso de temperaturas mais baixas e maior tempo de preparo. A pirólise, de maneira oposta, necessita da biomassa seca e de maiores temperaturas (Mohan *et al.*, 2014). Dessa forma, a carbonização hidrotérmica requer menor entrada de energia no processamento (Fang *et al.*, 2015).

Na carbonização hidrotérmica a biomassa é submetida a temperaturas que podem variar de 180 a 250 °C. Esta carbonização pode ser do tipo direta, em que a água e a biomassa são aquecidas em reator a temperaturas diferentes, ou catalítica, em que o processo direto é realizado com a presença de um catalisador. Quando em temperaturas mais baixas, a produção resulta em maior quantidade de sólidos, mas em temperaturas mais altas há maior formação de produtos líquidos e gasosos (Nizamuddin *et al.*, 2017). A reação ocorre em suspensão com água sob pressão autogerada por horas, caracterizando um processo exotérmico que reduz o teor de oxigênio e hidrogênio na biomassa por desidratação e descarboxilação, respectivamente (Funke; Ziegler, 2010).

Com relação ao processo pirolítico, a transformação energética da biomassa pode ser realizada por pirólise lenta ou rápida. As principais diferenças entre essas estão nas taxas de aquecimento e máximas temperaturas de reação. A taxa de aquecimento na pirólise lenta pode assumir valores entre 5 e 20 °C min⁻¹, e o processamento pode durar horas, enquanto a pirólise

rápida pode chegar a valores maiores que $1000\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ e durar apenas alguns minutos (Brown; Wright; Brown, 2011).

Diferentemente da carbonização hidrotérmica, antes de realizar a pirólise é necessário o pré-tratamento da biomassa com a secagem do material, demandando mais energia em sua produção. Considerando as distinções entre os processos, fica evidente a importância de classificar a matéria-prima a ser usada quanto ao teor de umidade inicial, uma vez que ele determina a viabilidade para o processamento seco ou úmido, a exemplo da biomassa recém-colhida, que apresenta alto teor de umidade. Mesmo que tenha a possibilidade de secagem desta biomassa, a técnica pode demandar energia de forma tão intensa que provoque a redução da eficiência econômica do sistema (Kambo; Dutta, 2015).

Como já mencionado, carvão pirolítico e carvão hidrotérmico podem ser produzidos a partir de diferentes biomassas. O tipo de biomassa a ser utilizado, além de representar uma oportunidade de valoração e deposição segura de resíduos, também resulta em características específicas aos carvões, o que leva a geração de produtos com maior ou menor potencial de uso agrícola.

2.2.3 Resíduos agroindustriais para a produção de carvões pirolíticos e hidrotérmicos

Mundialmente, por ano, mais de cinco mil megatoneladas de resíduos culturais são deixadas em campo no processo de colheita. Uma parte desses resíduos são direcionados para uso como ração animal, substrato para cultivo e produção de bioenergia. Entretanto, grande parte passa por queima no local de produção, causando poluição do ar e limitando a ciclagem de nutrientes no solo (Shinde *et al.*, 2022). Além da biomassa que fica em campo após a colheita, o processamento de produtos na agroindústria também gera grandes quantidades de resíduos, como comumente ocorre com o beneficiamento do café, no qual os restos são deixados sob o próprio cafeeiro ou passam pelo processo de queima (Setiawan *et al.*, 2022). A destinação correta desse material é algo desafiador e pesquisas têm sido realizadas visando soluções com o carvão pirolítico produzido a partir desse tipo de resíduo.

O tipo de material utilizado para produção do carvão pirolítico e carvão hidrotérmico contribui para a formação de um condicionador de solo com maior ou menor teor de nutrientes, ou seja, a presença de macro e micronutrientes varia conforme a biomassa utilizada na carbonização. A exemplo disso, o carvão pirolítico de esterco de gado e de aves

contém maiores teores de nutrientes minerais (Zhang; Wang; Feng, 2021) em relação a outros materiais.

Matos *et al.* (2021), em estudo para avaliar o carvão obtido por pirólise de três biomassas distintas (bagaço de cana, casca de acácia negra e capim elefante), observaram que a biomassa de capim elefante apresentou maiores quantidades de nutrientes, principalmente Mg, K, Ca e Si, e que isso resultou na maior produtividade da cultura que teve a adição de carvão pirolítico dessa matéria no solo. Em um estudo realizado por Ilyas *et al.* (2021), os autores compararam o efeito da incorporação de carvões de diferentes origens (esterco bovino, lascas de madeira e bagaço de cana) em solo de região semiárida. Os resultados demonstraram que o carvão pirolítico de esterco bovino apresentou maior teor de potássio disponível no solo e promoveu aumento no rendimento da cultura do milho, quando comparado aos carvões derivados das demais biomassas.

No processamento do carvão hidrotérmico, diferentes biomassas, assim como diferentes temperaturas e pressões na carbonização, contribuem para rendimentos diversos de carbono, como demonstrado por Güleç *et al.* (2021) em estudo feito com CHT de biomassas de resíduo de café, madeira branca, pellet de madeira e arroz. Dentre as biomassas, o resíduo de café resultou no menor rendimento quando processado a 250 °C e valores de pressão variando entre 50 e 240 bar. Porém, nessas mesmas condições, o pellet de madeira apresentou alto rendimento e carbono fixo (aproximadamente 24% em peso). Também são obtidos diferentes rendimentos de nutrientes a partir de biomassas distintas na CHT. Em pesquisa realizada por Taskin *et al.* (2019), a caracterização detalhada de carvão hidrotérmico obtido a partir de resíduos sólidos urbanos e de poda urbana mostrou que o primeiro apresentou maior teor de elementos minerais, inclusive nutrientes essenciais para as plantas, como N, P, K e Fe. Todavia, também apresentou maior teor de moléculas inorgânicas potencialmente tóxicas.

Diferentes resíduos agroindustriais são utilizados para o processo de carbonização, como talos, palhadas, bagaços, fibras, caules, rizomas e outros. Os restos de colheita geralmente se apresentam com maior teor de nitrogênio em relação a biomassa lenhosa e biomassa orgânica (Pariyar *et al.*, 2020). Alguns resíduos podem se tornar uma estratégia eficiente para a correção do solo, a exemplo daqueles que são transformados em carvão pirolítico, como demonstra pesquisa realizada por Ibrahim *et al.* (2016). No estudo citado, o carvão obtido por pirólise da casca de arroz auxiliou na redução de elementos potencialmente tóxicos do solo, como cromo (Cr), cádmio (Cd) e chumbo (Pb).

Dentre as atividades agrícolas, a fruticultura é uma das grandes contribuintes na geração de resíduos. As pesquisas desenvolvidas para aproveitamento de resíduos dessa atividade incluem a avaliação da influência do tipo de carbonização sobre o produto e possuem grande relevância, especialmente para o Brasil, por ser o terceiro maior produtor de frutas no mundo (Abrafrutas, 2019). O Nordeste é uma região de destaque como grande produtor e exportador de frutas no país e, no semiárido, o cultivo do caju (*Anacardium occidentale*) tem alta relevância socioeconômica, sendo as castanhas o principal produto para exportação (Alencar; Espindola; Carneiro, 2018). Todavia, após o processamento do fruto, grande quantidade de resíduos são formados, como bagaço (pseudo-fruto), cascas da castanha e madeira.

Dessa forma, a utilização desses componentes para a produção de carvão pirolítico/hidrotérmico pode ser algo promissor. Em pesquisa realizada por Pimenta *et al.* (2019), a adição de carvão pirolítico obtido da madeira de cajueiro em vasos, para produção de arroz e feijão caupi, aumentou os valores de pH, K e P no solo. Contudo, foi observada a redução dos valores de Ca e Mg, além da elevação do percentual de sódio trocável. Outro cultivo que apresenta desafio de aproveitamento de resíduos na fruticultura brasileira é o açazeiro, pois as sementes e fibras restantes após o processamento da fruta ficam inutilizadas. Em pesquisa elaborada por Sato *et al.* (2020), a aplicação de carvão pirolítico de resíduo de sementes de açaí em Latossolo Amarelo distrófico resultou no aumento dos teores de P, K e Mg e reduziu o teor de alumínio, refletindo em aumento da saturação por bases após período de nove meses.

Os teores de nutrientes presentes no carvão pirolítico dependem, além da biomassa utilizada, do processo de produção realizado. Abdullah *et al.* (2023) analisaram o efeito da pirólise lenta e pirólise rápida no biochar produzido com pseudocaule de bananeira. Os resultados indicaram que a pirólise rápida para esse material gerou maior rendimento percentual, enquanto a pirólise lenta apresentou carvão com maior teor de carbono e área superficial. Gonzaga *et al.* (2017) observaram as diferenças entre a produção de biochar utilizando forno de retorta tradicional e a produção utilizando mufla de laboratório. O segundo método resultou em maior conteúdo de cinzas e carbono fixo, mas o primeiro aumentou o teor de nitrogênio em plantas de milho.

Dessa forma, vê-se que existem muitas variações nos atributos dos carvões pirolíticos e hidrotérmicos a depender do processo e dos tipos de biomassas utilizadas em sua produção. Estudos a respeito da utilização do bagaço de caju como matéria-prima desses

processos ainda são pouco explorados, especialmente com relação à carbonização hidrotérmica. Sendo assim, é considerada válida a realização de estudos que tenham como objetivo conhecer essas variações e possam, com isso, indicar quais os tipos de biomassa e processos de carbonização são necessários para produzir materiais carbonáceos que sejam adequados aos diferentes tipos de solo, considerando as particularidades e necessidades de cada um.

2.3 Uso agrícola dos carvões pirolíticos e dos carvões hidrotérmicos

Tanto o carvão pirolítico quanto o hidrotérmico auxiliam na melhoria da fertilidade química dos solos por proporcionar o aumento na disponibilidade de nutrientes devido aos altos valores de capacidade de troca catiônica (CTC) que os materiais podem apresentar. Isso é atribuído à sua extensa área superficial e ao oxigênio retido, por incluir grupos carbonila, carboxila e fenólicos que aumentam a CTC (Ding *et al.*, 2016; Fang *et al.*, 2015; Mohan *et al.*, 2018). Apesar desse aumento, a atividade dos materiais carbonáceos pode depender da fertilidade natural do solo e do manejo de fertilizantes inorgânicos ou orgânicos associados. Outro fator contribuinte para a melhoria da fertilidade é a presença de diversos nutrientes na composição dos carvões, os quais são requeridos para o desenvolvimento vegetal (Al-Nuaimy *et al.*, 2024; Asai *et al.*, 2009).

As interações solo-carvão após a adição do material carbonáceo ao solo, como adsorção, dessorção e reações redox, são variáveis e dependentes de uma série de fatores, tais como: condições do processo de carbonização, tipo de matéria-prima, composição da fração mineral do carvão, tipo de solo e as condições ambientais locais (Joseph *et al.*, 2010). Azeem *et al.* (2019), ao adicionarem carvão pirolítico produzido a partir de bagaço de cana-de-açúcar em solo franco-arenoso, constataram aumento do carbono orgânico do solo, da fixação de nitrogênio no feijão mungo, além de melhoria do rendimento da cultura. Em outra pesquisa, dessa vez utilizando carvão hidrotérmico, Chu *et al.* (2020) identificaram o potencial do lodo de esgoto como matéria prima da carbonização, tendo em vista que o uso de seu produto após CHT em solo pode reduzir a volatilização da amônia (NH₃) e aumentar a eficiência do uso de nitrogênio por plantas de arroz, aumentando a produtividade em grãos.

Em pesquisa realizada por Wang *et al.* (2021), a aplicação de carvão pirolítico adicionado de fertilizantes minerais no solo resultou em aumento na eficiência fotossintética, condutância estomática e taxa de transpiração da cultura do amendoim, consequentemente

melhorando seu rendimento agrícola. Lee *et al.* (2021) em experimento avaliando o uso de carvão pirolítico associado a fertilizante mineral e fertilizante mineral aplicado de forma isolada, apuraram em seus resultados a elevação do teor de clorofila nas plantas de milho no tratamento contendo a mistura dos adubos, e isso foi devido à melhor absorção de nitrogênio pela presença do carvão pirolítico, o que levou ao aumento da biomassa vegetal. De mesmo modo, Cong *et al.* (2023) verificaram que a utilização do carvão pirolítico em solo arenoso em doses variando de 15 a 31 t ha⁻¹ podem aumentar o teor de clorofila e tornar o milho mais produtivo. Os autores também observaram que doses maiores podem gerar melhorias quando a longo prazo, ou seja, a partir do “envelhecimento” do carvão.

No entanto, alguns estudos verificaram que a adição de materiais carbonáceos não resultou em mudanças significativas para o crescimento de plantas. Keller *et al.* (2023) em estudo avaliando solo adicionado de carvão pirolítico aplicado juntamente a fertilizantes minerais influenciando o aumento da biomassa de feijão e sorgo, constataram que após duas estações de cultivo não houve ganho dessa variável em relação ao tratamento controle. A adição do carvão hidrotérmico ao solo pode, ainda, prejudicar a germinação e o crescimento das plantas, visto que alguns compostos (como fenóis) podem ser hidrolisados durante o processo de CHT e ficarem retidos no material carbonáceo (Bargmann *et al.*, 2013). Em outros casos, pode até haver a redução da biomassa, como demonstrado em pesquisa realizada por Wagner e Kaupenjohann (2014), em que foi verificada a diminuição da biomassa de plantas de aveia cultivadas em solo adubado com carvão hidrotérmico.

A adição dos materiais carbonáceos pode promover a recuperação de solos degradados. A exemplo dos solos afetados por sais, o carvão pirolítico possui a capacidade de aumentar o teor de carbono orgânico e a retenção de cátions, além de promover a substituição do sódio dos locais de troca, disponibilizando cálcio na solução do solo (Saifullah *et al.*, 2018). Solos de alta densidade e baixa porosidade, em que o risco de compactação é iminente, podem ser melhorados a partir da aplicação do carvão hidrotérmico, visto que este pode formar e elevar a estabilidade de agregados, e com isso aumentar a porosidade e reduzir a densidade do solo (Khosravi *et al.*, 2022).

Outro aspecto importante a ser considerado, é a utilização desses materiais na atenuação da biodisponibilidade de elementos potencialmente tóxicos como Cd, Pb e As. Lahori *et al.* (2024) verificaram que carvão pirolítico de resíduo de limão e carvão hidrotérmico de estrume de búfalo demonstraram capacidade de redução de metais potencialmente tóxicos em solo contaminado, além de aumentar o teor de MO e a CTC, especialmente com o uso de 2%

v/v (porcentagem com base em volume) de carvão hidrotérmico, o qual elevou esse parâmetro em 30,1%. Os carvões também possibilitaram o aumento do teor de macronutrientes primários no solo, raiz e parte aérea de plantas de mostarda.

Apesar dos efeitos positivos, é necessária a melhor compreensão a respeito das interações entre os tipos de solo e tipos de carvões para que sejam utilizados os materiais adequados como condicionador de solo. A matéria-prima para geração desse produto é diversa e comumente são utilizados resíduos vegetais (podas, lascas de madeira) e esterco animal (Sohi *et al.*, 2010), sendo que a composição final muitas vezes apresenta elementos como carbono (C) e nitrogênio (N) em maior quantidade, seguido de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) (Zhang; Voroney; Price, 2015).

A melhoria da fertilidade do solo pela adição dos carvões se deve, muitas vezes, à maior disponibilidade de macronutrientes, enquanto os teores de micronutrientes geralmente não apresentam mudanças significativas. O carvão pirolítico mais ácido, produzido a partir de temperaturas mais amenas (350 °C) pode reduzir o pH de solos alcalinos, melhorando a oferta de Zn e Mn disponíveis, como demonstrado por Ippolito *et al.* (2015). Todavia, os teores foram inferiores ao demandado pelas culturas do estudo e os valores decresceram ao passar do tempo. Para o carvão hidrotérmico, temperaturas mais altas no processo de carbonização podem implicar uma redução da disponibilidade de macronutrientes aportados no solo, ao passo que pode haver aumento no teor de micronutrientes como Cu e Zn (Islam *et al.*, 2021).

Além disso, o efeito de muitos carvões pode ser de incremento no pH. Em estudo realizado por Almutairi *et al.* (2023), ao avaliarem os efeitos de diferentes matérias-primas e temperaturas de pirólise nos atributos do carvão pirolítico, constataram que maiores temperaturas resultaram em maior recalcitrância e estabilidade, enquanto a matéria-prima influenciou no pH, apresentando maiores valores para materiais vegetais, destacando o carvão pirolítico de resíduo de pepino, apresentando valores de pH entre 8,41 e 11,02.

A aplicação do carvão pirolítico em solos de regiões de clima temperado pode ainda resultar na redução da disponibilidade de micronutrientes, como constatado por Kloss *et al.* (2014). A biomassa carbonizada induziu o aumento do pH do solo e conseqüentemente diminuiu os teores de Fe, Mn e Zn, ao passo que promoveu aumentos significativos de Ca, K e P. Há tendência de que em temperaturas mais elevadas no processo de produção, os carvões hidrotérmicos sejam mais alcalinos, contudo, na maioria das vezes, as carbonizações hidrotérmicas resultam em carvões ligeiramente ácidos. Dessa forma, geralmente esse pode não ser um material para utilizar visando neutralização da acidez do solo, mas pode ser um auxiliar

na retenção de nutrientes em virtude da sua capacidade de tamponamento (Fang *et al.*, 2015).

A produção dos materiais carbonáceos também pode ser vista como uma possibilidade de melhorar o desenvolvimento da bioeconomia circular, pois a fabricação pode ser baseada em reuso de resíduos sólidos e resíduos da agroindústria (Shahid, 2022). O aumento da produção de alimentos elevou, conseqüentemente, a geração de resíduos de colheita, trazendo a necessidade de soluções eficientes para reuso desse material. A carbonização das biomassas tem sido um método frequentemente adotado para converter esses resíduos em carvão pirolítico e hidrotérmico, obtendo ainda coprodutos como bio-óleo, biogás e água de processo (Fregolente *et al.*, 2019; Kambo; Dutta, 2015; Li *et al.*, 2022).

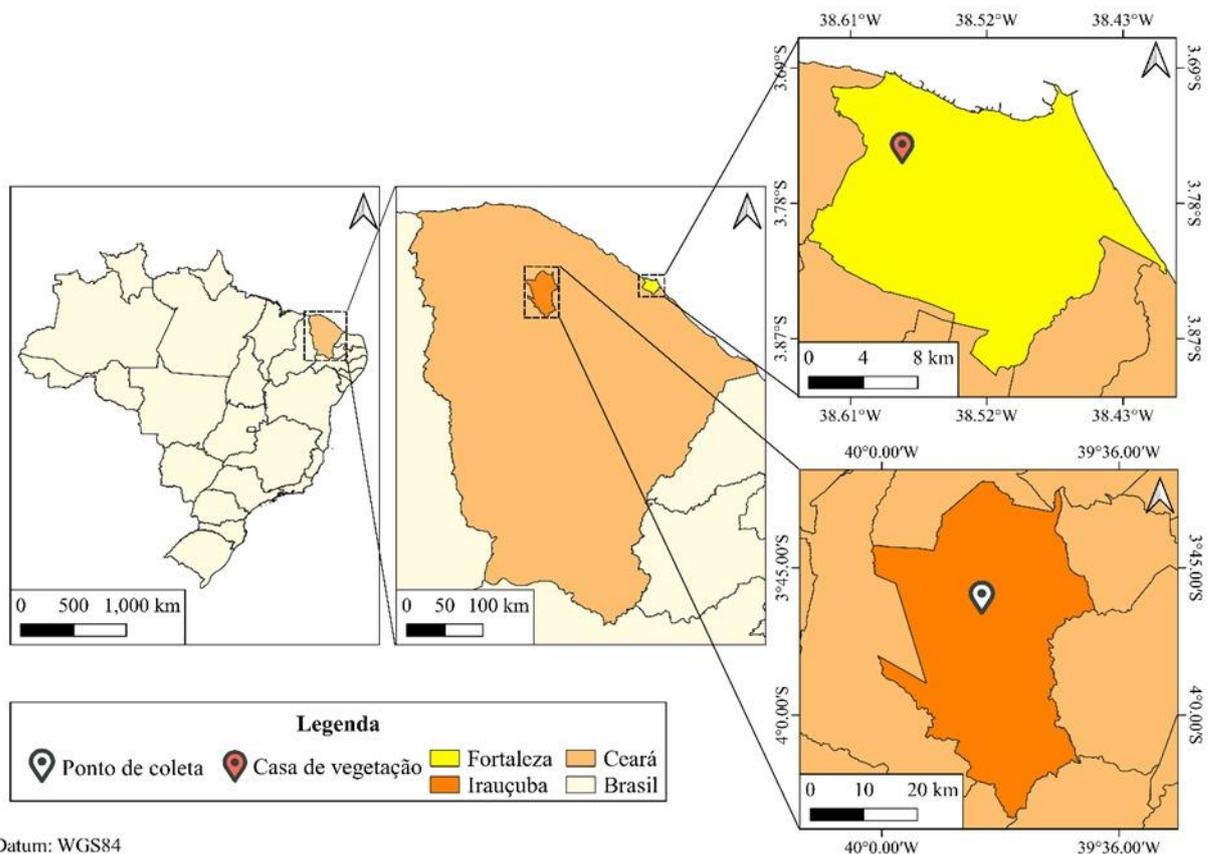
A partir dos fatores expostos, pode-se considerar que materiais carbonáceos têm demonstrado potencial para ser uma ferramenta importante para a promoção da sustentabilidade dentro da agricultura, por meio da melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, além de servir como ferramenta para a gestão de resíduos, promovendo benefícios econômicos e ambientais. Contudo, o potencial desses materiais carbonáceos servirem como fonte de nutrientes e trazerem benefícios à fertilidade dos solos agrícolas depende da biomassa de origem, bem como os tipos dos processos de carbonização que resultam em carvão pirolítico ou carvão hidrotérmico.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Amostragem e caracterização do solo

O trabalho foi realizado com solo proveniente de PLANOSSOLO HÁPLICO Solódico (Santos *et al.*, 2018), de textura franco arenosa, coletado em zona de desertificação no município de Irauçuba, Ceará, Brasil (Figura 1). Foram coletadas amostras sem estrutura preservada na camada de 0-10 cm com auxílio de picareta e pá.

Figura 1 - Localização da área em que o solo foi coletado (Irauçuba – CE).



O solo foi seco ao ar e passado em peneira com abertura de malha de 2 mm, para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). A fim de realizar a caracterização da fertilidade química do solo, foram determinados: pH em água; sódio (Na), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), nitrogênio (N), fósforo (P), carbono orgânico (CO), ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn), acidez potencial (H+Al), soma de bases (SB), CTC efetiva (t),

CTC total (T), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%) e porcentagem de sódio trocável (PST).

O pH em água (1:2,5) foi medido por pHmetro; os teores de Na e K foram extraídos com Mehlich 1 e quantificados por fotômetro de chama; os teores de P foram extraídos com Mehlich 1 e determinados por espectrofotômetro UV-Vis; para Ca e Mg foi utilizado KCl 1 mol L⁻¹ como extrator, seguido pela determinação por espectrometria de absorção atômica; a extração do Al foi realizada por meio de KCl a 1 mol L⁻¹, seguido da quantificação por solução diluída de NaOH 0,025 mol L⁻¹. Para a quantificação dos micronutrientes, foi utilizado o extrator Mehlich 1 e a quantificação foi realizada por espectrofotômetro de absorção atômica (Teixeira *et al.*, 2017).

A determinação dos teores de N total foi realizada pelo método Kjeldahl com digestão do N orgânico utilizando ácido sulfúrico concentrado (H₂SO₄) sob aquecimento contínuo, seguido da destilação da amônia produzida e, por fim, titulação com ácido padronizado (Raij *et al.*, 2001). A análise de C orgânico total foi realizada a partir da oxidação por via úmida com dicromato de potássio e ácido sulfúrico, com posterior quantificação por titulação do dicromato com sulfato ferroso amoniacal (Mendonça; Matos, 2005).

Para a caracterização física do solo foram analisados os atributos capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), água disponível (AD) e granulometria. Para CC e PMP, três repetições de amostras do solo foram aplicadas sobre placas porosas e foram contidas com ligas de borracha. As placas foram dispostas em bandejas com água até atingir a saturação completa do solo. Em seguida, essas foram depositadas em mesa de tensão, com aplicação de -10 kPa (para capacidade de campo) e na câmara de Richards, com aplicação de -1500 kPa (para o ponto de murcha permanente). Após a aplicação das tensões, as amostras foram pesadas e posteriormente secas em estufa a 105 °C. Por fim, as amostras foram novamente pesadas com o intuito de quantificar os conteúdos de água em massa e volume (Klute, 1986). A água disponível foi quantificada pela diferença entre CC e PMP.

A granulometria foi feita pela quantificação da argila pelo método da pipeta utilizando o hidróxido de sódio (NaOH) como dispersor químico das partículas. Em seguida, a fração areia foi quantificada por peneiramento e a fração silte foi determinada subtraindo a massa total da amostra de solo utilizada na análise pelo somatório das frações areia e argila (Gee; Balder, 1986).

Com relação à densidade do solo, foi admitido o valor de 1,5 g cm⁻³. Para essa admissão considerou-se o estudo de Lima (2022), o qual afirma que em áreas de sobrepastejo

na zona de desertificação onde foi coletado o solo para o presente estudo, a densidade atinge o valor de $1,85 \text{ g cm}^{-3}$. A partir disso, tendo em vista que em campo haveria a incorporação do carvão pirolítico e carvão hidrotérmico por meio de aração e gradagem, foi pressuposto que a densidade seria reduzida ao valor citado.

As análises foram realizadas no Laboratório de Manejo do Solo e no Laboratório de Física do Solo, pertencentes à Universidade Federal do Ceará (UFC). Os resultados das análises de caracterização dos atributos químicos e físicos estão representados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 - Atributos químicos da camada de 0-10 cm do solo utilizado no experimento.

pH _{H₂O}	Na	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T
-	----- $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ -----								
5,13	0,08	0,09	6,97	0,46	0,54	2,52	7,60	8,14	10,12
P	Zn	Cu	Fe	Mn	CO	V	m	PST	
----- mg dm^{-3} -----		-----			----- g kg^{-1} -----		----- % -----		
8,45	1,79	0,44	378,41	40,86	6,07	75,13	6,61	0,76	

Fonte: autora.

Tabela 2 - Atributos físicos e granulometria da camada de 0-10 cm do solo utilizado no experimento.

Densidade	CC	PMP	CAD	Argila	Areia	Silte	Classe textural
kg dm^{-3}	-----	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$	-----	----- % -----		-----	
1,5	0,160	0,041	0,119	6,52	76,05	17,43	franco-arenosa

Fonte: autora.

3.2 Carvões utilizados, delineamento experimental e tratamentos

Para a produção dos materiais carbonáceos foi feita a coleta do pseudofruto do caju em uma área do estado do Ceará, o qual foi submetido à secagem em pleno sol até ser atingido o ponto de desidratação. Em seguida, o material foi triturado e peneirado em peneira com abertura de malha de 2 mm.

Para a obtenção do carvão pirolítico, foi realizado o processo de pirólise em reator metálico hermeticamente fechado, com aquecimento a uma temperatura de $500 \pm 4,3 \text{ }^\circ\text{C}$ por 190

minutos na presença de fluxo moderado de nitrogênio. Para a produção do carvão hidrotérmico, a carbonização hidrotérmica foi realizada em temperatura de 211 °C por um período de 240 minutos. Ambos os materiais foram peneirados em peneira com abertura de malha de 2 mm para padronizar os grânulos a serem adicionados no solo. Os dados de caracterização do bagaço de caju e dos materiais carbonáceos estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização do carvão pirolítico, carvão hidrotérmico e bagaço de caju.

Material	pH	CE	U	CF	Cinzas	M.V.	Lig.	Cel.	Hem.	N*	P	K	Ca	Mg
	-	mS cm ⁻¹	----- % -----							----- g kg ⁻¹ -----				
Carvão pirolítico	9,61	2.016,66	1,74	32,27	22,65	43,27	68,4	1,30	1,20	28,00	11,62	7,71	1,95	4,54
Carvão hidrotérmico	4,98	346,03	3,10	12,57	2,91	81,42	62,5	2,65	2,95	24,00	1,11	1,50	0,39	0,53
Bagaço	4,80	2,40	6,40	5,25	7,23	81,12	13,41	18,14	19,09	-	3,75	11,70	0,06	0,43
	Na	S*	Cu	Fe	Mn	Zn	Al	Cd	Pb	Cr	Mo	Ni	Ba	CTC
	----- g kg ⁻¹ -----													mmol _c kg ⁻¹
Carvão pirolítico	0,35	2,00	0,05	0,77	0,05	0,06	1,35	0	0,001	0,002	0,001	0,004	0,011	35,12
Carvão hidrotérmico	0,11	5,00	0,03	0,41	0,02	0,03	0,65	0	0,001	0,007	0,004	0,011	0,002	460,60
Bagaço	1,04	0,16	0,01	0,19	0,02	0,04	0,24	0	0	0,002	0	0,001	0,003	529,20

U: umidade; CF: carbono fixo; M.V.: material volátil; Lig.: lignina; Cel.: celulose; Hem.: hemicelulose. *: valores retirados do estudo realizado por Fregolente *et al.* (2023).
Fonte: autora.

O delineamento experimental foi inteiramente aleatorizado (DIA) com 6 tratamentos: Controle (T0); 100% FM (T1); 100% CH (T2); 100% CP (T3); 50% FM + 50% CH (T4) e 50% FM + 50% CP (T5). Foram realizadas seis repetições, totalizando 36 unidades experimentais, cuja descrição está no item 3.3. As doses dos carvões foram definidas com base no teor de fósforo, que foi o nutriente que constou teor elevado em relação aos demais em ambos os materiais carbonáceos, além de que sua aplicação deve ser feita no plantio.

Os cálculos foram realizados a partir da recomendação de adubação para a cultura do milho, definido pelas Recomendações para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação (1999), tendo em vista que se trata das recomendações mais atualizadas com aplicabilidade para a adubação do milho em condições semiáridas. Dessa forma, os valores dos carvões foram calculados em: 31,5 t ha⁻¹ para T2; 3 t ha⁻¹ para T3; 15,8 t ha⁻¹ para T4 e 1,5 t ha⁻¹ para T5. Em relação à adubação mineral (T1), os fertilizantes utilizados foram: ureia, superfosfato triplo, cloreto de potássio e enxofre elementar. Os valores recomendados para solos com baixa disponibilidade de fósforo e potássio são de 10 kg ha⁻¹ de N, 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 50 kg ha⁻¹ de K₂O e 30 kg ha⁻¹ de S elementar em plantio. Para cobertura, o recomendado é a aplicação de 60 kg ha⁻¹ de N.

Além da adubação realizada seguindo as recomendações, foi aplicado óxido de magnésio (MgO) no solo, visando atender a relação de Ca:Mg recomendada, de valor 9:3 (Novais *et al.*, 2007). Devido ao baixo teor de magnésio do solo utilizado no experimento, a relação Ca:Mg constava valor 15:1. Portanto, foi feita a adição de MgO nos valores de 1.305,59 kg ha⁻¹ para o tratamento T1 e 1.292,76 kg ha⁻¹ para os tratamentos T4 e T5. As quantidades utilizadas dos carvões e dos fertilizantes minerais para a adubação do solo nos vasos são apresentadas nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Doses de carvão pirolítico e carvão hidrotérmico, quantidades de N, P, K, S e Mg fornecidas e quantidades necessárias a serem complementadas para suprir a demanda da cultura do milho.

Tratamento	Doses		N _f	P _f	K _f	S _f	Mg _f	N _n	P _n	K _n	S _n	Mg _n
	kg/ha	g/vaso	----- kg/ha -----									
T0	-	-	0	0	0	0	0	70,00	34,93	41,49	30,00	679,06
T1	-	-	70,00	34,93	41,49	30,00	679,06	0	0	0	0	0
T2	31.495,50	50,39	755,89	34,93	47,12	157,48	16,76	0	0	0	0	662,30
T3	3.008,61	4,81	84,24	34,93	21,30	6,02	13,65	0	0	20,19	23,98	665,41
T4	15.747,75	25,20	377,95	17,47	23,56	78,74	8,38	0	17,46	17,93	0	670,68
T5	1.504,30	2,40	42,12	17,47	12,03	3,00	6,83	27,88	17,46	29,46	27,00	672,23

O nutriente acompanhado da letra “f” corresponde à quantidade fornecida ao solo, enquanto o nutriente acompanhado da letra “n” corresponde à quantidade necessária a ser complementada. O valor de 70 kg/ha para N refere-se ao total a ser aplicado, considerando a adubação de plantio e de cobertura.

Fonte: autora.

Tabela 5 – Quantidades de adubos minerais aplicados no solo, em cada tratamento, para suprir a demanda da cultura do milho por meio dos fertilizantes ureia, superfosfato triplo (SPT), enxofre elementar (Se) e óxido de magnésio (MgO).

Tratamento	Ureia		SPT		KCl		Se		MgO	
	kg/ha	g/vaso	kg/ha	g/vaso	kg/ha	g/vaso	kg/ha	g/vaso	kg/ha	g/vaso
T0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T1	155,55	0,25	173,91	0,28	83,33	0,13	31,58	0,05	1.305,59	2,089
T2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T4	0	0	86,96	0,16	36,01	0,06	0	0	1.292,76	2,07
T5	61,95	0,10	86,96	0,14	59,16	0,09	28,41	0,04	1.292,76	2,07

Fonte: autora.

A capacidade de campo e o ponto de murcha permanente foram definidos para o solo com adição de fertilizantes minerais, de carvão pirolítico e de carvão hidrotérmico (T1, T2, T3, T4 e T5) a fim de definir a quantidade de água a ser adicionada nos vasos desses tratamentos. A metodologia utilizada foi a mesma realizada para definir CC e PMP para o solo como Controle, descrito no item 3.1. Os resultados estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 - Umidade com base em volume na capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e capacidade de água disponível (CAD) para os tratamentos com adição de fertilizantes minerais, carvão pirolítico e carvão hidrotérmico.

Tratamento	CC	PMP	CAD
	----- cm ³ cm ⁻³ -----		
T1	0,160	0,041	0,119
T2	0,165	0,038	0,127
T3	0,190	0,036	0,154
T4	0,163	0,037	0,126
T5	0,181	0,033	0,148

Fonte: autora

3.3 Instalação e condução do experimento

O estudo foi desenvolvido com controle parcial de temperatura, a qual foi mantida a 27 °C (chegando a 35 °C nos horários mais quentes), e controle parcial de umidade, mantida em cerca de 80%, em casa de vegetação localizada no Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus do Pici. O local está situado em Latitude 3°44'34.87'' (S) e Longitude 38°34'31.34'' (W), no município de Fortaleza, Ceará. Posicionada a 16 metros de altitude, a cidade possui clima tropical quente subúmido, apresentando temperaturas que variam de 26 a 28°C. A pluviosidade anual média é de 1.338 mm concentrada nos meses de janeiro a maio. O relevo é caracterizado por planície litorânea e tabuleiros pré-litorâneos e as principais classes de solo presentes são: Neossolos quartzarênicos, Planossolo solódico, Argissolo vermelho-amarelo e Gleissolos sálicos (IPECE, 2017).

Cada unidade experimental foi constituída por um vaso plástico com capacidade para 3,5 litros. A preparação do solo (TFSA) consistiu na mistura manual deste com as respectivas doses para cada tratamento envolvendo o carvão pirolítico, o carvão hidrotérmico e a mistura de cada um desses com os fertilizantes minerais. Cada tratamento foi aplicado nos vasos de forma a ocupar 3,2 litros, visando deixar espaço no vaso para realizar a irrigação sem transbordamento. Posteriormente, foi efetuada a primeira irrigação com água destilada até atingir a capacidade de campo. Os vasos passaram por processo de incubação de 17 dias, sendo 15 dias cobertos com lona plástica e 2 dias descobertos, a fim de expor o material à luz solar para eliminar a presença de fungos (provavelmente saprófitas) que se desenvolveram em algumas repetições. Durante a incubação, os vasos não necessitaram irrigação, tendo em vista que se mantiveram na capacidade de campo por estarem cobertos.

Após a incubação, foi feito o semeio de três sementes de milho (cultivar BRS 2022) em cada vaso. Foram realizados os testes de sanidade e germinação previamente. O desbaste das plantas foi realizado sete dias após a emergência, visando deixar uma planta em cada vaso, a qual apresentava maior vigor. Para a irrigação, os vasos foram pesados diariamente para verificar o total de água evaporado e consumido pelas plantas de um dia para outro. O valor evaporado foi repostado, em água destilada, objetivando manter a capacidade de campo do solo.

As plantas foram conduzidas até atingirem o estágio fenológico de V6 a V8, quando estavam com 41 dias após a emergência - DAE (Figura 2). A manutenção das plantas até o referido estágio fenológico foi definida para evitar riscos de prejuízos decorrentes de limitações causadas pelo tamanho restrito dos vasos.

Figura 2 - Plantas de milho desenvolvidas sob aplicação dos respectivos tratamentos: Controle (T0), 100% FM (T1), 100% CH (T2), 100% CP (T3), 50% FM + 50% CH (T4) e 50% FM + 50% CP (T5), aos 39 dias após a emergência.



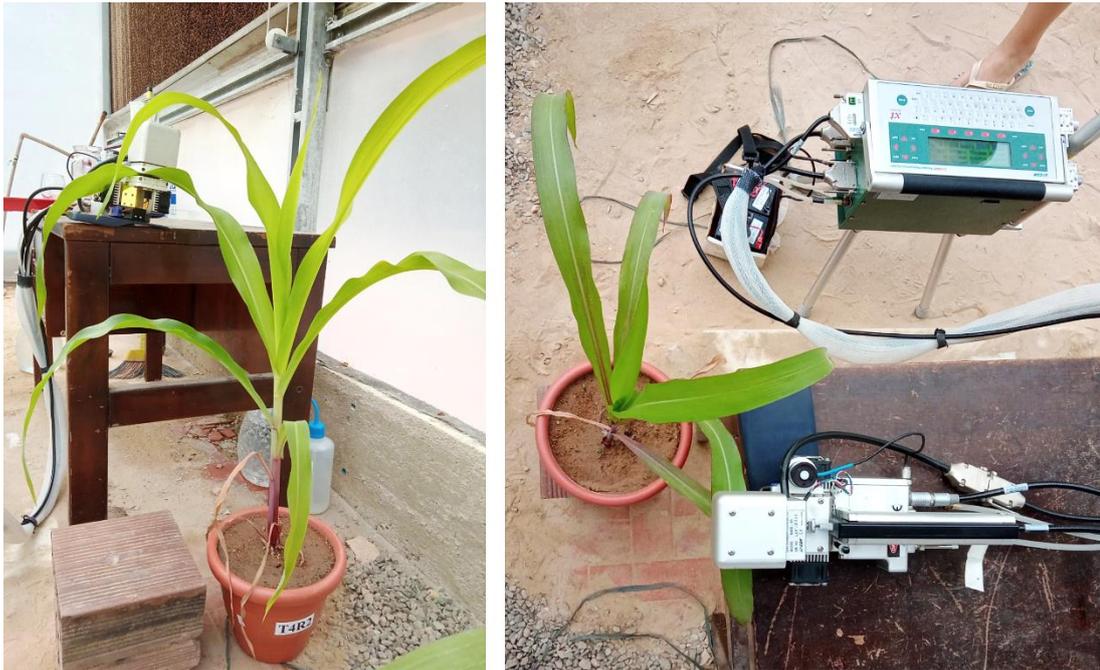
Fonte: autora.

3.4 Avaliações

3.4.1 Trocas gasosas nas plantas de milho

Essa variável foi avaliada utilizando o analisador de CO₂ por radiação infravermelha (Infra Red Gas Analyser - IRGA) modelo LI 6400XT, Li-Cor, USA. As variáveis de trocas gasosas mensuradas foram: fotossíntese líquida (A), condutância estomática (g_s), concentração intercelular de CO₂ (C_i), eficiência do fotossistema II (F_v/F_m), taxa de transporte de elétrons (ETR), transpiração (E), relação entre a quantidade de CO₂ externa e interna (C_i/C_a), eficiência instantânea do uso da água (A/E) e eficiência de carboxilação (A/C_i). A avaliação foi realizada no período da manhã, entre 07 h e 30 min e 09 h (Silva *et al.*, 2015), na última folha totalmente expandida, aos 36 DAE, quando as plantas se encontravam entre o estágio V6 e V8 (Figura 3).

Figura 3 - Análise de trocas gasosas nas plantas de milho utilizando IRGA.

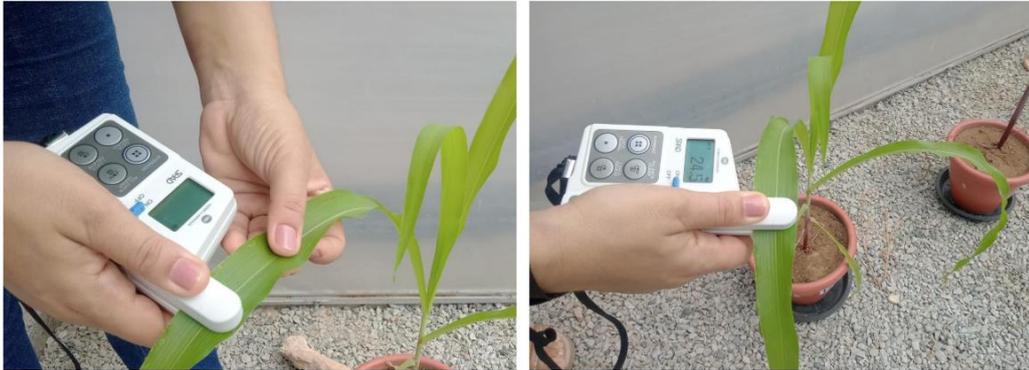


Fonte: autora.

3.4.2 Teores de clorofila (índice SPAD) e pigmentos fotossintéticos nas folhas das plantas de milho

O teor de clorofila total foi avaliado por dois métodos. Primeiramente, foi feita análise de forma instantânea, por método não destrutivo (indireto), a partir do uso do medidor portátil de clorofila (SPAD). O valor de cada repetição foi obtido por meio da média entre três leituras realizadas no terço médio da última folha totalmente expandida (Figura 4), a mesma folha em que foi realizada a medição das trocas gasosas. As leituras foram realizadas aos 39 DAE.

Figura 4 - Medição do teor de clorofila nas folhas das plantas de milho.



Fonte: autora

O segundo método foi realizado pela forma direta, em que as análises dos pigmentos fotossintéticos (clorofilas *a*, *b*, total e carotenoides) seguiram a metodologia aplicada por Wellburn (1994). Ao completar 40 DAE, foram retirados quatro discos foliares da última folha totalmente expandida de cada planta (Figura 5), os quais foram armazenados em frasco de vidro tipo penicilina cobertos com papel alumínio e contendo 2 ml de dimetilsulfóxido (DMSO). As amostras passaram por banho maria e incubação por 30 minutos. Posteriormente, ao atingir a temperatura ambiente, foram realizadas as leituras em espectrofotometria UV-Vis. Os resultados foram expressos em $\mu\text{g g}^{-1}$ de massa seca com base nos cálculos utilizando as equações que seguem.

1. Para clorofila *a*: $Clfa = 12,47_{A665} - 3,62_{A649}$;
2. Para clorofila *b*: $Clfb = 25,06_{A649} - 6,5_{A665}$;
3. Para clorofila total: $Clf(a + b) = 7,15_{A665} + 18,71_{A649}$;
4. Para carotenoides: $Car = (1000_{A480} - 1,29 Ca - 53,78 Cb) / 220$.

Figura 5 - Retirada dos discos foliares das plantas de milho para análise de pigmentos fotossintéticos.

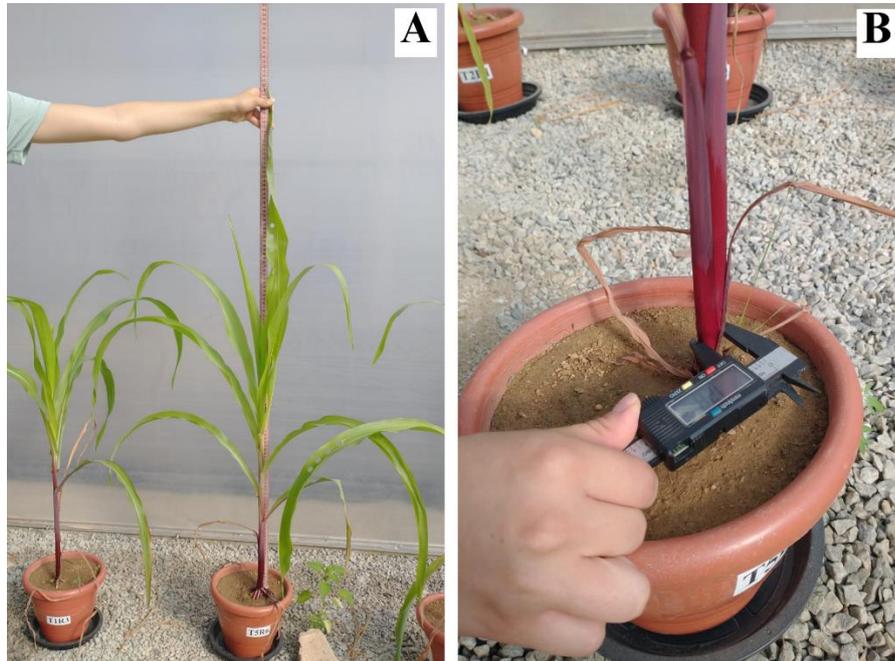


Fonte: autora.

3.4.3 Altura da planta, diâmetro do colmo e área foliar das plantas de milho

As avaliações do crescimento em altura iniciaram duas semanas após a emergência das plantas e foram finalizadas quando a maioria destas atingiu o estágio V7 (35 DAE). As medições foram feitas semanalmente com o auxílio de uma trena graduada posicionada da superfície do solo ao ápice da última folha totalmente expandida (Figura 6 A). O diâmetro do colmo de cada planta também foi avaliado a cada semana, no mesmo período, utilizando paquímetro digital (Figura 6 B).

Figura 6 - Medição da altura das plantas de milho utilizando trena graduada (A) e medição do diâmetro do colmo com paquímetro digital (B).



Fonte: autora.

Ao término do experimento, as folhas de todas as plantas de milho foram destacadas e avaliadas de imediato em integrador de área (Area meter, LI-3100, Li-Cor, Inc. Lincoln, NE, USA), a fim de determinar a área foliar em cm^2 (Figura 7).

Figura 7 - Determinação da área foliar do milho em integrador de área.



Fonte: da Silva, Francisca Gleiciane.

3.4.4 Biomassa seca e razões alométricas das plantas de milho

Ao término do experimento foram destacados as folhas e os colmos, enquanto as raízes foram separadas do solo utilizando peneiras de abertura de 2 mm e lavagem em água corrente. Posteriormente, as amostras foram dispostas em sacos de papel e levadas para estufa a 65 °C até a completa secagem. Em seguida, essas foram pesadas e suas massas foram subtraídas da massa seca média dos sacos de papel, os quais foram pesados previamente.

A partir da obtenção dos valores de biomassa seca, foram obtidos os valores das razões alométricas, sendo estas: razão entre massa seca de raízes e massa seca total da planta (RMR), razão entre a massa seca foliar e a massa seca total da planta (RMF) e razão entre a massa seca do colmo e a massa seca total da planta (RMC).

3.4.5 Acúmulo de macro e micronutrientes da biomassa foliar do milho

Para a determinação do acúmulo de macro e micronutrientes na biomassa foliar, as amostras de planta foram preparadas seguindo a metodologia descrita em Silva *et al.* (2009) para digestão seca em estufa a 65 °C. A partir da biomassa seca triturada foi realizada a pesagem das amostras considerando 0,2 g para a análise de nitrogênio e 0,5 g para os demais nutrientes. Após pesadas, as amostras foram dispostas em cadinho de porcelana e colocadas em mufla elétrica, mantendo a temperatura de 500 °C durante período de 180 minutos. Depois do resfriamento, em cada amostra foi adicionado 50 ml de solução de ácido nítrico diluído (HNO₃ 1 N). Em seguida, a mistura foi passada para papel filtro de filtração lenta, permitindo a obtenção dos extratos.

As análises foram realizadas conforme descrito no item 3.1. Para determinação de N foi utilizada a metodologia de Raij *et al.* (2001). As leituras de Ca, Mg, Cu, Fe, Zn e Mn foram realizadas em espectrometria de absorção atômica. Já para Na e K foi utilizado o fotômetro de chama e a leitura de P foi feita por meio do espectrofotômetro UV-Vis (Teixeira *et al.*, 2017). A partir da determinação do conteúdo de macro e micronutrientes foi calculado o acúmulo desses na biomassa considerando a massa foliar obtida em cada tratamento.

3.4.6 Fertilidade do solo

Ao final do experimento, foram coletadas amostras de solo de cada unidade experimental para a determinação dos seguintes atributos: pH em água, Na, K, Ca, Mg, N, P, CO, Fe, Cu, Zn, Mn, H+Al, SB, t, T, V%, m% e PST. A preparação das amostras e a realização das análises foram conforme informado no item 3.1.

3.5 Análises estatísticas dos dados

Para a análise estatística foi utilizado o programa SAS (Statistical Analysis System) versão acadêmica. Inicialmente, os pressupostos de normalidade foram avaliados utilizando o teste de Shapiro-Wilk, ao nível de significância de 5%. Para os casos em que os dados não apresentaram distribuição normal, realizou-se a transformação desses por meio do teste de Box-Cox (Box; Cox, 1964), com a finalidade de reduzir a dispersão dos dados. As transformações foram para as seguintes variáveis: $Cfb^{0,3}$, $CO^{0,3}$, $Cu^{0,3}$ e $m^{0,3}+0,5$. Em seguida, foi realizada a análise de variância (ANOVA) pelo teste F e a comparação de médias pelo teste de Duncan, ambos a 5% de significância.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

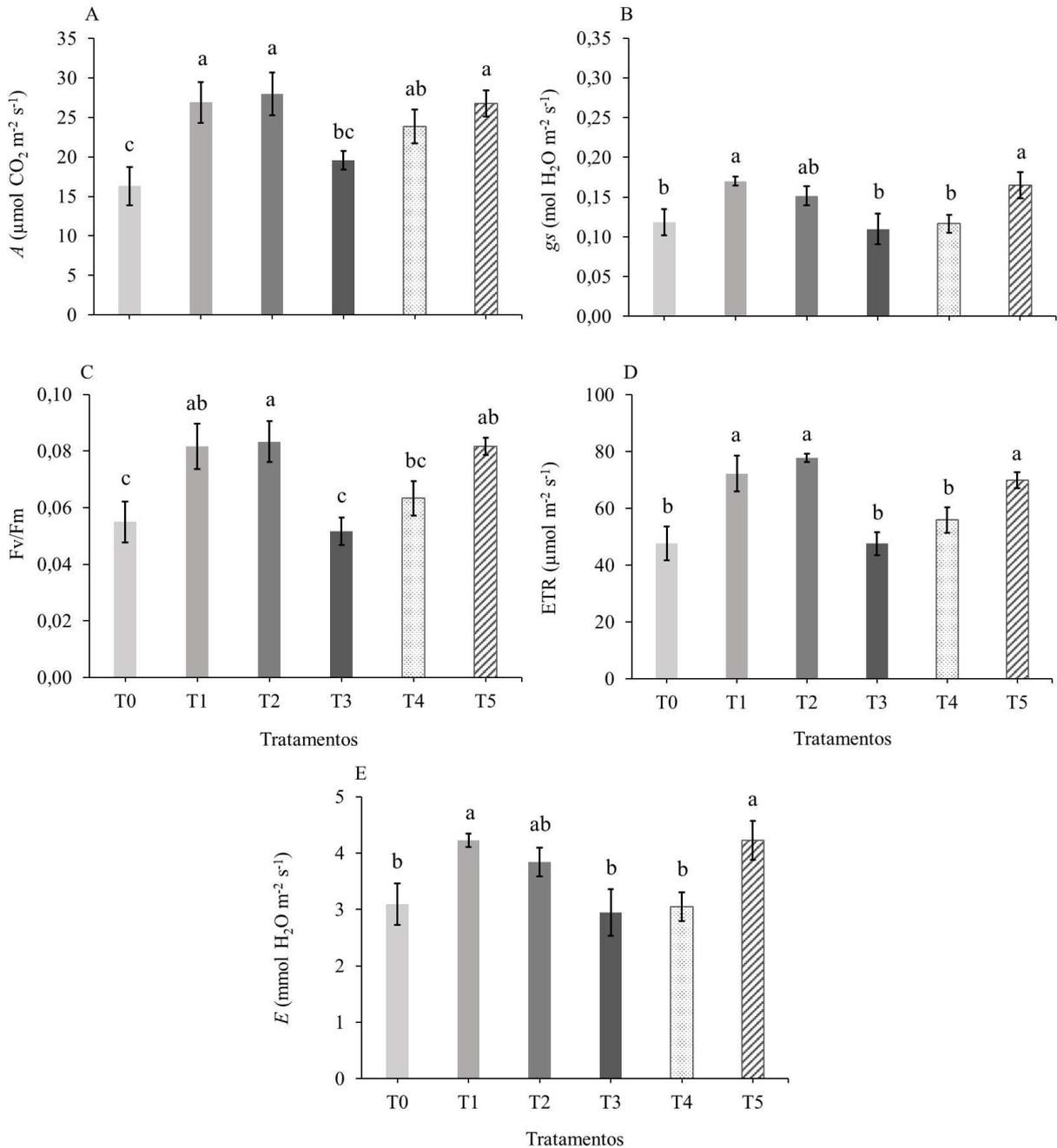
4.1 Trocas gasosas nas plantas de milho

Por meio do teste F da ANOVA foi constatada significância para as variáveis fotossíntese líquida (A), condutância estomática (g_s), eficiência do fotossistema II (F_v/F_m), transporte de elétrons (ETR) e transpiração (E), enquanto as variáveis concentração intercelular de CO_2 (C_i), relação entre a quantidade de CO_2 externa e interna (C_i/C_a), eficiência instantânea do uso da água (A/E) e eficiência de carboxilação (A/C_i) não foram significativos (Tabela 7 do apêndice A).

As maiores taxas de fotossíntese líquida foram obtidas nas plantas que cresceram submetidas aos tratamentos 100% FM (T1), com $26,90 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 100% CH (T2), com $27,94 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e 50% FM + 50% CP (T5), com $26,78 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, sem que houvesse diferença estatística entre esses. O tratamento 50% FM + 50% CH (T4) não diferiu estatisticamente dos demais tratamentos mencionados anteriormente, assim como não diferiu do 100% CP (T3), que, por sua vez, não diferiu do tratamento Controle, que resultou em menor valor de A , com $16,31 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 8 A).

Para condutância estomática, não houve diferença entre T1, T2 e T5, os quais resultaram as maiores médias: $0,17$, $0,15$ e $0,17 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente. O T2 não diferiu de T0, T3 e T4, e esses não diferiram entre si (Figura 8 B). As maiores taxas de eficiência do fotossistema II foram resultantes dos tratamentos T1, T2 e T5, com o valor de $0,08$ para todos, sem apresentar diferença estatística (Figura 8 C). O T4 não diferiu de T0, T1, T3 e T5 e os tratamentos T0 e T3 não diferiram entre si.

Figura 8 – Fotossíntese líquida (A), condutância estomática (B), eficiência do fotossistema II (C), transporte de elétrons (D) e transpiração (E) das plantas de milho aos 36 dias após a emergência em resposta à aplicação dos tratamentos.



Tratamentos: T0 – Controle; T1 – 100% FM; T2 – 100% CH; T3 – 100% CP; T4 – 50% FM + 50% CH; T5 – 50% FM + 50% CP. As médias seguidas de diferentes letras indicam diferença significativa para o teste de Duncan a 5% de probabilidade. As barras apresentam o erro padrão da média.

Fonte: autora.

Os tratamentos T1, T2 e T5 não diferiram significativamente entre si e resultaram os maiores valores para taxa de transporte de elétrons nas plantas de milho, com 72,28, 77,75 e 69,97 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente, enquanto T0, T3 e T4 contaram com valores bem abaixo desses e não diferiram entre si (Figura 8 D). Quanto a transpiração das plantas de milho (Figura

8 E), o maior valor foi observado para T1, com $4,23 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, não diferindo de T2 e T5. O T2 não diferiu de T0, T3 e T4, os quais, por sua vez, não diferiram entre si.

Nota-se que T1, T2 e T5, no geral, foram os tratamentos que apresentaram maiores valores para as trocas gasosas. O aumento na variável A fora acompanhado de elevações em g_s , F_v/F_m , ETR e E . Isso indica ausência de limitações estomáticas, ou seja, não houve restrições de ordem hidráulica ou bioquímica, visto que valores mais elevados de F_v/F_m refletem uma maior eficiência do fotossistema II, onde uma alta proporção de fótons absorvidos está sendo utilizada de forma efetiva no transporte de elétrons. Isso implica no aumento da produção de energia durante a fotossíntese (Taiz *et al.*, 2016). Assim, a absorção de água foi suficiente para manter o gradiente solo-atmosfera necessário à abertura estomática nas plantas de milho (evidenciado pela maior g_s), conseqüentemente resultando na maior transpiração, facilitando a entrada de CO_2 e a produção de energia gerada pelo ETR durante o processo (Jiao *et al.*, 2024).

Quando comparado ao Controle, T1 e T5 promoveram aumentos médios de 65% em A e 49% em F_v/F_m e em ETR. Em estudo realizado por Haider *et al.* (2014), avaliando os efeitos fotossintéticos em plantas de milho cultivadas com aplicação de carvão pirolítico adicionado de fertilizantes minerais (em solo arenoso de baixa fertilidade química), foram constatadas melhorias nas variáveis fotossintéticas, com aumento de 7% em F_v/F_m e E e aumento de 57% em ETR quando comparado ao Controle. As melhorias foram devido ao carvão pirolítico reduzir os acúmulos de substâncias solúveis nas folhas, de modo a aumentar o potencial osmótico, reduzir a resistência estomática e, por conseguinte, melhorar as trocas gasosas.

Um fator importante para a melhor eficiência nas trocas gasosas, especialmente no tocante a g_s e E , é a significativa elevação da capacidade de água disponível para as plantas ao adicionar carvão pirolítico no solo (Tabela 6), tanto no tratamento constituído somente com carvão pirolítico, quanto na mistura com os fertilizantes minerais. O carvão pirolítico pode ter efeito estimulante nas relações hídricas solo-planta, de forma a promover o aumento do conteúdo relativo de água no solo e o potencial osmótico foliar, diminuindo a resistência estomática, conseqüentemente aumentando a E e estimulando as trocas gasosas foliares (Haider *et al.*, 2014). Esses aspectos podem ter influenciado o resultado obtido em T5.

Entretanto, nota-se que a g_s e a E em T3 foram menores do que nos demais tratamentos (Figura 8 B e E), condição que pode ter sido influenciada pela absorção de nutrientes e água. As variáveis g_s e E reduzidas podem ter sido resultantes do maior conteúdo de água disponível para as plantas, visto que as propriedades do carvão pirolítico de bagaço de caju o caracterizam como hidrofílico (Fregolente *et al.*, 2023), além de que durante o

desenvolvimento da pesquisa, o solo foi mantido na capacidade de campo, atributo que resultou em maior valor para os tratamentos contendo o carvão pirolítico (Tabela 6). O solo nessas condições pode levar a limitações de oxigênio devido à maior retenção de água nos poros do carvão pirolítico reduzir o poder de retirada de água das plantas, de modo a acarretar diminuição da condutância hidráulica das raízes e dos estômatos (Liu *et al.*, 2022), e à indução do fechamento desta estrutura. Em condições mais severas, as limitações de oxigênio resultam em alterações no metabolismo da planta e em seus processos bioquímicos, gerando danos oxidativos e danos à eficiência fotossintética (Ashraf, 2012).

He *et al.* (2020) verificaram que, no geral, as pesquisas envolvendo uso de carvão pirolítico para plantas C3 apresentam resultados significativamente maiores para as propriedades fotossintéticas em comparação com plantas C4 como o milho. Para as espécies C3, os resultados podem chegar a um aumento de 24,9% para *A* e 19,8% para *E*, por exemplo, em relação à C4. Teoricamente, isso ocorre porque plantas C4 apresentam características mais “vantajosas”, como via fotossintética catalisada pela enzima PEPC, a qual possibilita maximizar a carboxilação durante o processo fotossintético, levando à menor evidência de benefícios após uso do carvão pirolítico quando comparado a C3. Todavia, neste estudo esse argumento não pode ser utilizado para os resultados obtidos em T3 (100% CP), visto que suas trocas gasosas foram limitadas, sem diferir de T0, representando prejuízo para a planta.

Em estudo realizado por Wang *et al.* (2021) a aplicação de fertilizantes minerais no solo, associados ao uso do carvão pirolítico de palha de milho em 10 t ha⁻¹, levou ao melhor rendimento do amendoim, aumentando significativamente *Fv/Fm*, *gs* e *E*. Isso foi explicado pela melhoria nas propriedades físico-químicas do solo e o aumento no acúmulo de nitrogênio devido à reação do material carbonáceo no solo. Mesmo utilizando dose menor do que o trabalho citado, o presente estudo também constatou que a adição de carvão pirolítico de bagaço de caju e fertilizantes minerais (T5) promoveu melhorias nas mesmas variáveis de trocas gasosas, diferentemente do resultado obtido pelo carvão pirolítico aplicado sem a adição de fertilizantes.

O uso do carvão pirolítico associado a fertilizantes nitrogenados pode aumentar a eficiência nas trocas gasosas, todavia doses excessivas desse material carbonáceo (como 90 t ha⁻¹) podem ser prejudiciais às características fotossintéticas e podem limitar o acúmulo de nutrientes pelas plantas, fator que pode estar associado à alta relação C/N no solo após adição do carvão pirolítico, levando à imobilização do N (Guo *et al.*, 2021). Portanto, pode-se inferir que no tratamento T5, a dose de 1,5 t ha⁻¹ utilizada juntamente à adubação mineral neste estudo

foi adequada para assegurar a nutrição da planta, mesmo reduzindo as doses dos fertilizantes minerais.

O nitrogênio em quantidades adequadas para as culturas é um fator fundamental para manter boas condições de fotossíntese e de produtividade, visto que o mesmo está relacionado à produção de pigmentos fotossintéticos, os quais estão diretamente associados à eficiência das trocas gasosas, em especial a clorofila *a* (Xu *et al.*, 2024). A maneira como esse nutriente é distribuído dentro do sistema fotossintético determina a sua eficiência de uso durante a fotossíntese (Dai *et al.*, 2024). A associação do carvão pirolítico e do fertilizante nitrogenado (ureia) em T5 pode ter favorecido o acúmulo e distribuição de N foliar, de modo a promover a eficiência na produção de pigmentos e na realização das trocas gasosas, fator que aparentemente não ocorreu com a aplicação do carvão pirolítico de forma isolada (T3). Para T2, a quantidade de N adicionado no solo fora bastante elevada (Tabela 4), mas a sua absorção parece ter sido satisfatória para a alocação do nutriente dentro do sistema fotossintético, de forma a contribuir para a obtenção de valores altos para *A*, *Fv/Fm* e *ETR*. De modo distinto a T2, a mistura de carvão hidrotérmico e fertilizantes minerais (T4) não favoreceu as trocas gasosas nas plantas de milho, pois os valores para tais variáveis foram mais baixos, semelhantes aos valores obtidos para T3.

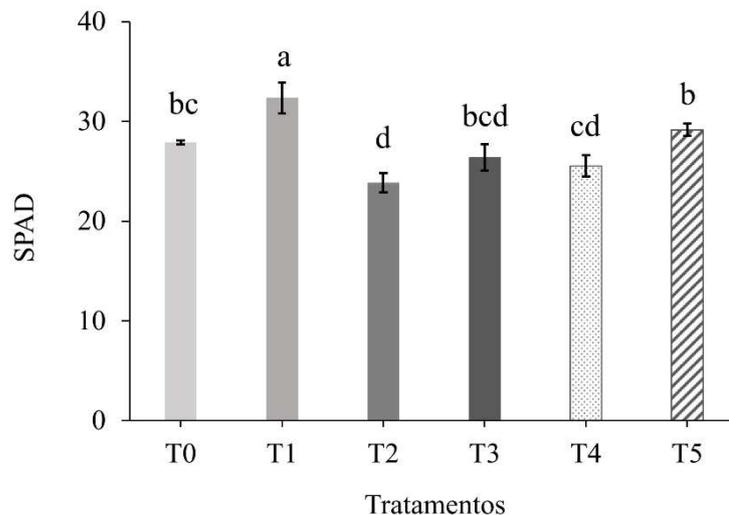
4.2 Índice SPAD, teores de clorofila e carotenoides

As respostas para o índice Soil Plant Analysis Development (SPAD) apresentaram significância estatística para o teste F da análise de variância (apêndice A, Tabela 7). O maior valor SPAD (32,37) foi observado em plantas submetidas ao tratamento 100% FM (T1), seguido pelo valor 29,17 encontrado nas plantas submetidas à mistura 50% FM + 50% CP (T5). Os tratamentos Controle (T0) e 100% CP (T3) não diferiram do tratamento T5 e do 50% FM + 50% CH (T4). O tratamento T4, por sua vez, não diferiu do 100% Hidrotérmico (T2), que apresentou menor média SPAD, de 23,85 (Figura 9).

O índice SPAD avalia o potencial de desenvolvimento vegetal e tem como base de medida a absorbância/reflectância dos comprimentos de onda vermelho e infravermelho-próximo (entre 650 e 940 nm) pela clorofila presente nas folhas (Shibaeva; Mamaev; Sherudilo, 2020), sendo um método indireto de avaliação do teor desse pigmento. Quanto maior o valor SPAD, maior a concentração de clorofila e, conseqüentemente, maior a quantidade de pigmentos fotossintéticos. Desse modo, o índice SPAD foi consistente com o tratamento T1,

que se destacou como um dos que apresentaram maior taxa fotossintética (Figura 8). Entretanto, os demais tratamentos que também se destacaram quanto a taxa fotossintética (T2 e T5) não apresentaram os maiores valores do índice SPAD (Figura 9).

Figura 9 – Índice SPAD das plantas de milho aos 39 dias após a emergência em resposta à aplicação dos tratamentos.



Tratamentos: T0 – Controle; T1 – 100% FM; T2 – 100% CH; T3 – 100% CP; T4 – 50% FM + 50% CH; T5 – 50% FM + 50% CP. As médias seguidas de diferentes letras indicam diferença significativa para o teste de Duncan a 5% de probabilidade. As barras apresentam o erro padrão da média.

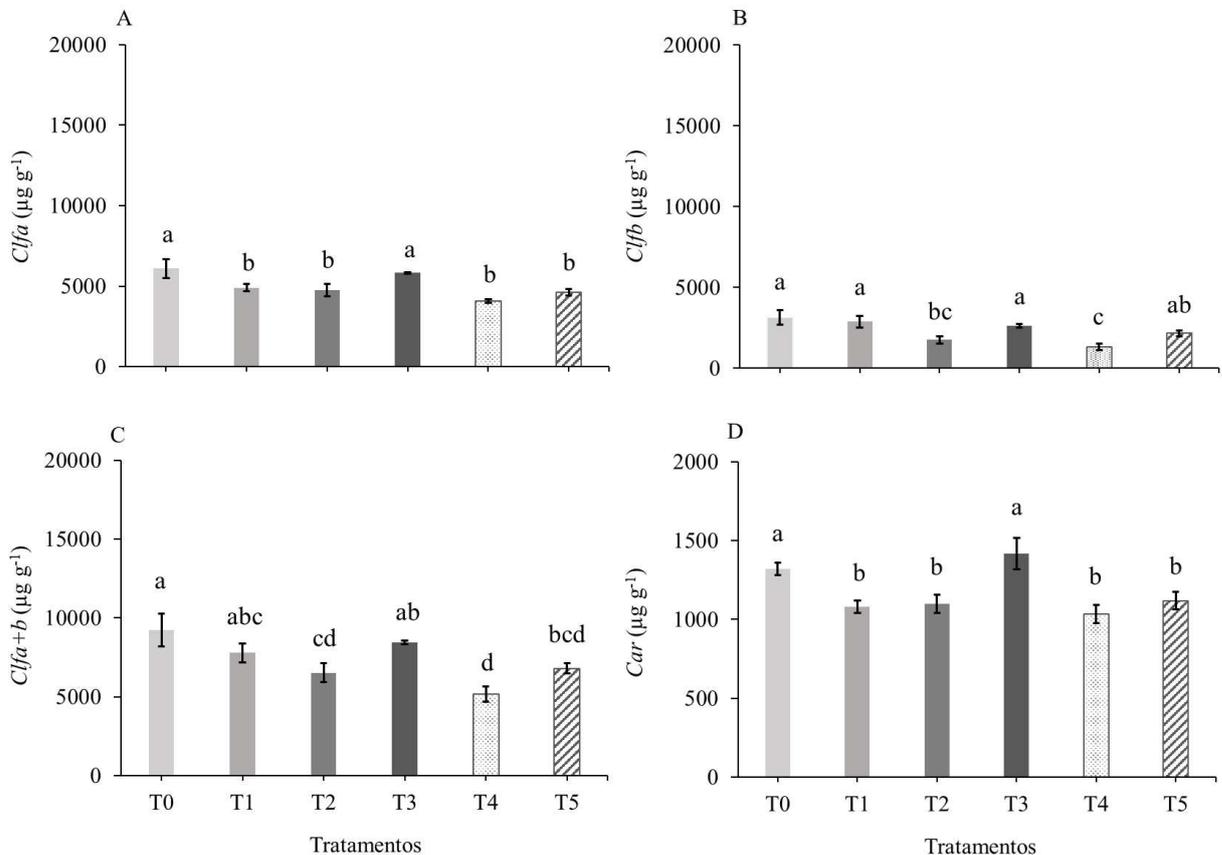
Fonte: autora.

O fato do índice SPAD ter sido maior somente em um dos tratamentos que apresentaram maior taxa fotossintética pode estar relacionado à precisão do medidor SPAD. O método indireto tende a ser menos preciso para as leituras de pigmentos quando comparado ao método direto, tendo em vista que sua leitura pode variar pela distribuição desuniforme de clorofila na planta. Um exemplo disso é o que ocorre nas leituras feitas em folhas com clorose internerval devido à deficiência de nutrientes. A clorose pode ocasionar efeito de desvio de luz, prejudicando a leitura de reflectância da folha (Shibaeva; Mamaev; Sherudilo, 2020).

Em relação à quantificação direta dos pigmentos fotossintéticos, o teste F da ANOVA foi significativo para clorofilas *a* e *b*, clorofila total e carotenoides (Tabela 7, Apêndice A). Para o teor de clorofila *a* (*Clfa*), os maiores valores (6.092,86 e 5.828,59 $\mu\text{g g}^{-1}$) foram observados nas plantas submetidas aos tratamentos T0 e T3, respectivamente (sem diferença significativa entre si). Os demais tratamentos não diferiram significativamente e o

menor resultado foi $4.075,55 \mu\text{g g}^{-1}$, apresentado por T4 (Figura 10 A). A clorofila *b* (*Clfb*) não apresentou distribuição normal dos dados e foi submetida à transformação Box-Cox por meio da equação $Clfb = Clfb^{0,3}$. Os maiores resultados para essa variável foram observados para os tratamentos T0, T1, T3 e T5 (sem diferença significativa entre esses tratamentos), com os valores $3.147,76$; $2.893,33$; $2.630,52$ e $2.168,05 \mu\text{g g}^{-1}$, respectivamente. Já o teor de *Clfb* em T2 não diferiu significativamente do encontrado em T4 e T5. O T4 apresentou o menor teor de *Clfb*, com $1,337,68 \mu\text{g g}^{-1}$ (Figura 10 B).

Figura 10 - Clorofila *a* (A), clorofila *b* (B), clorofila total (C) e carotenoides (D) de plantas de milho aos 41 dias após a emergência em resposta à aplicação dos tratamentos.



Tratamentos: T0 – Controle; T1 – 100% FM; T2 – 100% CH; T3 – 100% CP; T4 – 50% FM + 50% CH; T5 – 50% FM + 50% CP. As médias seguidas de diferentes letras indicam diferença significativa para o teste de Duncan a 5% de probabilidade. As barras apresentam o erro padrão da média.

Fonte: autora.

Os tratamentos T0, T1 e T3 não diferiram significativamente quanto ao teor de clorofila total (*Clfa+b*) e apresentaram as maiores médias, respectivamente: $9.240,62$, $7.791,31$ e $8.459,12 \mu\text{g g}^{-1}$. T1 e T3 não diferiram significativamente do T5, enquanto T1 também não diferiu do T2 que, por sua vez, não diferiu do T4 e do T5 (Figura 10 C). Para os carotenoides

(*Car*), não houve diferença significativa entre T0 e T3, que apresentaram as maiores médias (1.320,35 e 1.419,05 $\mu\text{g g}^{-1}$, respectivamente). Os demais tratamentos não diferiram entre si e T4 apresentou o menor valor: 1.034,49 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Figura 10 D).

O teor de clorofila é utilizado como parâmetro para avaliação da qualidade das plantas e relaciona-se positivamente ao processo de fotossíntese (Xu *et al.*, 2024). A clorofila *a* é responsável pela absorção de comprimentos de onda luminosa e está presente nos centros de reação dos fotossistemas I e II, onde inicia o transporte de elétrons que leva à produção de ATP e NADPH, as principais moléculas de energia utilizadas na fase escura da fotossíntese (Croce *et al.*, 2011). A clorofila *b* funciona como pigmento acessório e se restringe ao processo de absorção da luminosidade (Croce *et al.*, 2011). Em relação aos carotenoides, estes também são pigmentos acessórios e atuam juntamente às clorofilas, absorvendo energia luminosa e funcionam como antioxidantes e precursores hormonais em órgãos vegetais que não realizam fotossíntese (Maoka, 2019).

Os tratamentos T0, T1, T3 e T5 foram os que mais se destacaram quanto aos teores de pigmentos fotossintéticos. Desses tratamentos, T1 e T5 se destacaram também quanto aos parâmetros fotossintéticos (Figura 8), indicando que a adubação feita com a mistura de fertilizantes minerais e carvão pirolítico favoreceu aspectos relacionados ao desenvolvimento, assim como a qualidade das plantas de milho. Em estudo realizado com aplicação de carvão pirolítico (produzido a partir de casca de arroz e galhos de seringueira) que foi adicionado de fertilizante mineral para a cultura do milho, foi observada maior absorção de nitrogênio, elevando a concentração de pigmentos fotossintéticos que, por sua vez, aumentaram a biomassa vegetal (Lee *et al.*, 2021).

Já T0 e T3, apesar de terem se destacado quanto aos teores de pigmentos fotossintéticos, apresentaram menores valores para as trocas gasosas em relação aos demais tratamentos, especialmente *A* e *Fv/Fm* (Figura 8). O conteúdo de clorofila está associado à fotossíntese e ao rendimento da cultura, mas esses fatores podem ser prejudicados a depender das condições ambientais, nutricionais e genéticas da planta (Xiong *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2021). Supõe-se que T0 e T3 tenham sido limitados quanto às trocas gasosas devido ao estresse nutricional, já que em T0 não houve adubação e em T3 houve apenas a aplicação de carvão pirolítico, cujos nutrientes não devem ter sido mineralizados em tempo hábil para favorecer o desenvolvimento das plantas (El-Naggar *et al.*, 2018).

O processo de “envelhecimento” do carvão pirolítico gera um efeito de longo prazo, com a alteração dos grupos funcionais em sua superfície, de modo que reduz a adsorção de nutrientes no solo e os torna mais disponíveis para as plantas (Cong *et al.*, 2023). O

desenvolvimento vegetal observado em T0 e T3 foi resultante da reserva de nutrientes presente no solo degradado (Tabela 1), evidenciando a importância da suplementação de nutrientes minerais por meio da adubação para promover o crescimento das plantas e manter um estoque adequado de nutrientes no solo.

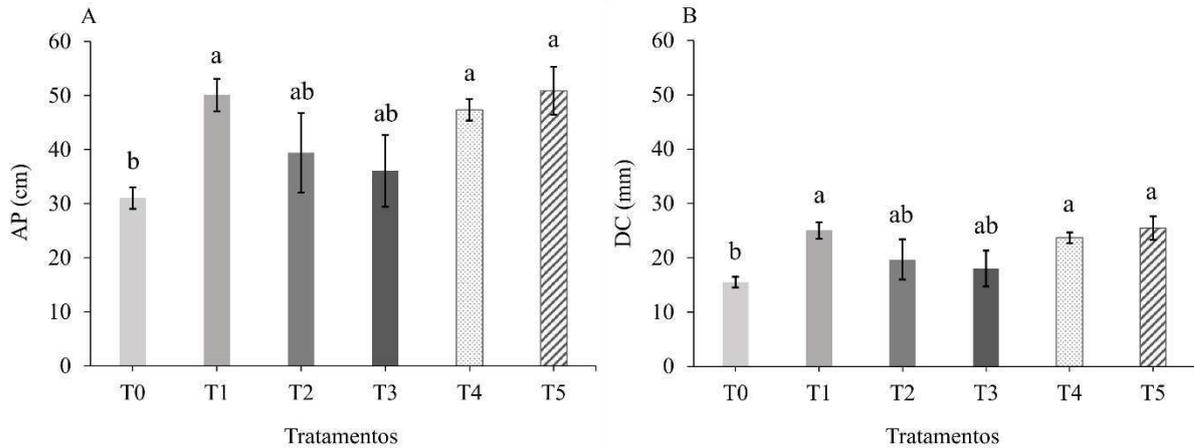
Os resultados obtidos em T0 e T3 para carotenoides podem estar relacionados ao suprimento inadequado de nutrientes minerais. Estresses ambientais, como a deficiência nutricional, leva ao aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), que incluem radicais livres, moléculas reativas e íons. Em concentrações elevadas, essas EROs causam danos moleculares, exigindo controle por meio da produção de antioxidantes, como os carotenoides, no metabolismo vegetal (Gill; Tuteja, 2010).

Os tratamentos envolvendo adubação somente com carvão hidrotérmico (T2) e com a mistura de fertilizantes minerais e carvão hidrotérmico (T4) proporcionaram valores mais baixos para clorofila *b* e clorofila total (Figura 10 B e 10 C). Fornes *et al.* (2017) também constataram significativa redução no teor de clorofila em estudo com cultivar de tomate tratado com carvão hidrotérmico de resíduo florestal e fibra de coco. Todavia, em outra pesquisa pôde-se observar que o carvão hidrotérmico de palha de canola e lodo de esgoto atuou de forma positiva no desenvolvimento de plantas de crisântemo, elevando a altura e o teor de clorofila (Xu *et al.*, 2024). Então, nota-se que o potencial do carvão hidrotérmico aplicado como fonte de nutriente às plantas depende da espécie cultivada e da biomassa utilizada como matéria-prima, devendo haver as variações em decorrência do tipo de solo em que os insumos são aplicados.

4.3 Altura da planta, diâmetro do colmo e área foliar

A análise de variância (ANOVA) para incremento de altura da planta (AP), diâmetro do colmo (DC) e área foliar (AF) foi significativa para o teste F (Tabela 8, Apêndice A). Para o incremento de altura das plantas de milho (Figura 11 A) não houve diferença significativa entre os tratamentos 100% FM (T1), 50% FM + 50% CH (T4) e 50% FM + 50% CP (T5), os quais apresentaram os maiores valores (50,10, 47,37 e 50,90 cm, respectivamente), com destaque para T5 que representou 64% de aumento em AP em relação ao Controle (T0). Os tratamentos em que foi utilizado somente carvão hidrotérmico (T2) e carvão pirolítico (T3) não demonstraram diferença entre si e entre os demais tratamentos. O tratamento T0 resultou no menor incremento de altura (31,07 cm).

Figura 11 - Variação de altura em cm (A) e diâmetro do colmo em mm (B) das plantas de milho aos 35 dias após a emergência em resposta à aplicação dos tratamentos.



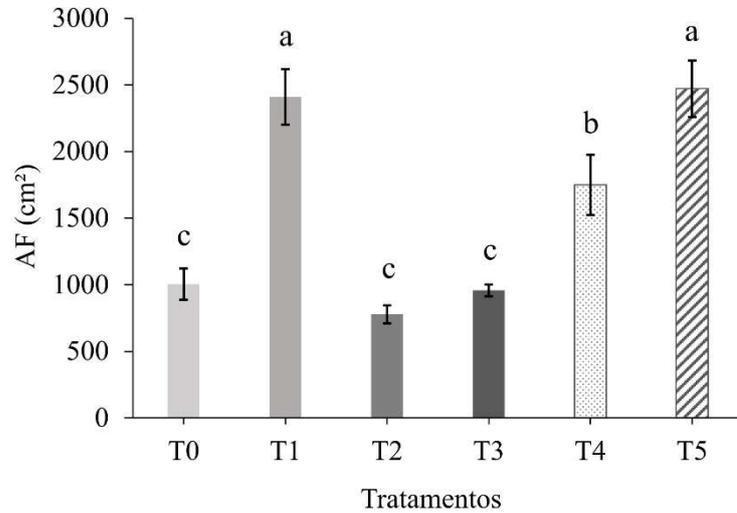
Tratamentos: T0 – Controle; T1 – 100% FM; T2 – 100% CH; T3 – 100% CP; T4 – 50% FM + 50% CH; T5 – 50% FM + 50% CP. As médias seguidas de diferentes letras indicam diferença significativa para o teste de Duncan a 5% de probabilidade. As barras apresentam o erro padrão da média.

Fonte: autora.

No tocante ao incremento no diâmetro do colmo (DC), os resultados foram semelhantes aos obtidos para AP (Figura 11 B). Os tratamentos envolvendo somente os fertilizantes minerais e a mistura entre estes e carvão hidrotérmico/pirolítico, não diferiram entre si e apresentaram os maiores valores, com 25,05 mm para T1; 23,68 mm para T4 e 25,45 mm para T5. Da mesma forma, quando comparados a T0, os tratamentos T1 e T5 obtiveram destaque, aumentando o diâmetro do colmo das plantas em 61 e 64%, respectivamente. Para T2, houve incremento de 19,71 mm no diâmetro do colmo e para T3, 18,03 mm. Esses tratamentos não diferiram significativamente entre si e do T0 que resultou em incremento de 15,53 mm.

Os tratamentos T1 e T5 resultaram em maiores valores para área foliar (AF), sem diferença significativa entre si (Figura 12), com 2.409,50 cm² para o primeiro, e 2.471,33 cm² para o segundo, que representou aumento de 146% em contraponto ao Controle. Para T4 a área foliar média foi de 1.750,83 cm², diferindo de todos os outros tratamentos, seguido por índices de área foliar ainda mais baixos, com T0, T2 e T3, que não diferiram entre si. Os tratamentos T2 e T3 demonstraram, ainda, uma considerável redução de AF na ordem de 23 e 5%, respectivamente, quando comparados ao T0.

Figura 12 - Área foliar em cm² das plantas de milho aos 41 dias após a emergência em resposta à aplicação dos tratamentos.



Tratamentos: T0 – Controle; T1 – 100% FM; T2 – 100% CH; T3 – 100% CP; T4 – 50% FM + 50% CH; T5 – 50% FM + 50% CP. As médias seguidas de diferentes letras indicam diferença significativa para o teste de Duncan a 5% de probabilidade. As barras apresentam o erro padrão da média.

Fonte: autora.

É notável que para as variáveis AP, DC e AF os tratamentos que resultaram em maiores valores foram aqueles com adição de fertilizantes minerais (T1) e com a mistura entre esses e carvão pirolítico (T5). Em relação à mistura dos carvões com os fertilizantes, o pirolítico sobressaiu-se em relação ao hidrotérmico, visto que para alcançar resultados semelhantes entre esses, a dose do pirolítico fora bem menor devido ao maior teor de nutrientes que possui (Tabela 3), o que indica maior economia (no que concerne a custos de produção e de aplicação). Os melhores resultados de AP, DC e AF observados para os tratamentos T1 e T5 são coerentes com os melhores resultados de atributos fotossintéticos observados para esses mesmos tratamentos (Figura 8).

Em estudo, plantas de milho responderam de forma positiva à aplicação da mistura de fertilizante mineral NPK e carvão pirolítico de resíduo de espiga de milho (com pirólise a 500 °C) em solo arenoso, com aumento de altura e área foliar em relação ao controle e à aplicação feita somente com fertilizante mineral ou somente carvão pirolítico. O tratamento envolveu o uso de 300 kg ha⁻¹ de fertilizante mineral NPK + 20 t ha⁻¹ de carvão pirolítico e irrigação visando manter a capacidade de campo, o qual resultou 160,48 cm de altura e 609,76 cm² de área foliar aos 98 dias após a semeadura (Faloye *et al.* 2019). Para a pesquisa citada, foram aplicados valores bem mais elevados para a adubação do milho quando comparados ao

uso de fertilizantes minerais para suprimento de N, P e K e à dose de carvão pirolítico aplicada no presente estudo (Tabelas 4 e 5), além de que os nutrientes presentes no carvão pirolítico de espiga de milho constam menor teor em relação ao carvão pirolítico de bagaço de caju. Os autores atribuíram os resultados benéficos ao milho a fatores como aumento do pH e melhoria no uso da água pelas plantas, que podem ser associados às melhorias obtidas em T5 no presente estudo.

O tratamento T2 resultou em plantas pouco desenvolvidas em relação à AP e DC, mas para AF, as médias foram acentuadamente reduzidas quando comparadas aos demais tratamentos (Figura 12). O milho manifesta boas respostas à adição de nitrogênio em doses adequadas, podendo apresentar melhorias na formação de clorofila, no índice de área foliar, aumento de biomassa, rendimento da cultura e outras variáveis (Hammad *et al.*, 2022). Contudo, ainda que o nitrogênio tenha sido fornecido de forma excessiva em T2 (Tabela 4), ele pode ter ficado indisponibilizado após a aplicação do carvão hidrotérmico, o que impede a absorção de N adequada para o milho, gerando um desenvolvimento reduzido.

A incorporação do carvão hidrotérmico no solo pode imobilizar o N, especialmente quando a relação C/N do material carbonáceo é alta, pois os microrganismos do solo utilizam o nitrogênio disponível para realizar o consumo do carbono que está presente em grande quantidade (Bargmann *et al.*, 2014b). Para o carvão hidrotérmico de bagaço de caju, a relação C/N é de 28,83, de acordo com a caracterização do material (Fregolente *et al.*, 2023), sendo considerada uma relação média, em que a proporção de imobilização é equivalente ao processo de mineralização (Stevenson, 1986). Portanto, durante o período de condução do experimento, o N desse material carbonáceo pode ter permanecido imobilizado, mas provavelmente seria mineralizado ao longo do tempo.

Além disso, o uso de carvão hidrotérmico como adubo também pode ter causado efeito fitotóxico, impedindo o crescimento adequado do milho. Durante a CHT, alguns compostos, como os fenóis, são hidrolisados e permanecem na água de processo, de forma que acabam ficando adsorvidos na superfície do material carbonáceo. Mesmo que tenha sido efetuada a lavagem do carvão hidrotérmico após sua produção, a presença deste tipo de composto e outros como ácidos orgânicos e aldeídos, podem ter efeitos negativos, prejudicando a germinação e o crescimento das plantas e das raízes (Bargmann *et al.*, 2013).

Em estudo utilizando a cultivar de milho híbrido BRS 2022, a mesma utilizada no presente trabalho, foram obtidas respostas significativas para AP e DC a partir da aplicação de diferentes doses de carvão pirolítico de cama de frango (pirólise a 350 °C) em Argissolo. A maior altura foi de 219,2 cm, com 8,1 t ha⁻¹ de carvão pirolítico e o maior diâmetro foi de 20,4

mm, com $10,1 \text{ t ha}^{-1}$ do mesmo carvão, ambos aos 83 dias após semeadura (Mendes *et al.*, 2021). Esse resultado é contrário ao que foi obtido no tratamento T3 (100% CP), que proporcionou o menor incremento de altura, excetuando o tratamento T0. Isso deve estar relacionado, principalmente, às diferenças de matéria-prima e às diferenças entre as quantidades aplicadas dos materiais carbonáceos. A cama de frango utilizada no referente trabalho apresentou, para os macronutrientes K, Ca e Mg, as respectivas porcentagens: 1,8, 5,04 e 1,28%, valores substancialmente maiores quando comparados ao carvão pirolítico de bagaço de caju, que apresentou as porcentagens de 0,8, 0,2 e 0,5% para os mesmos nutrientes. Quanto às doses, o valor de apenas de 3 t ha^{-1} de carvão pirolítico de bagaço de caju é contrastante com as doses mencionadas anteriormente.

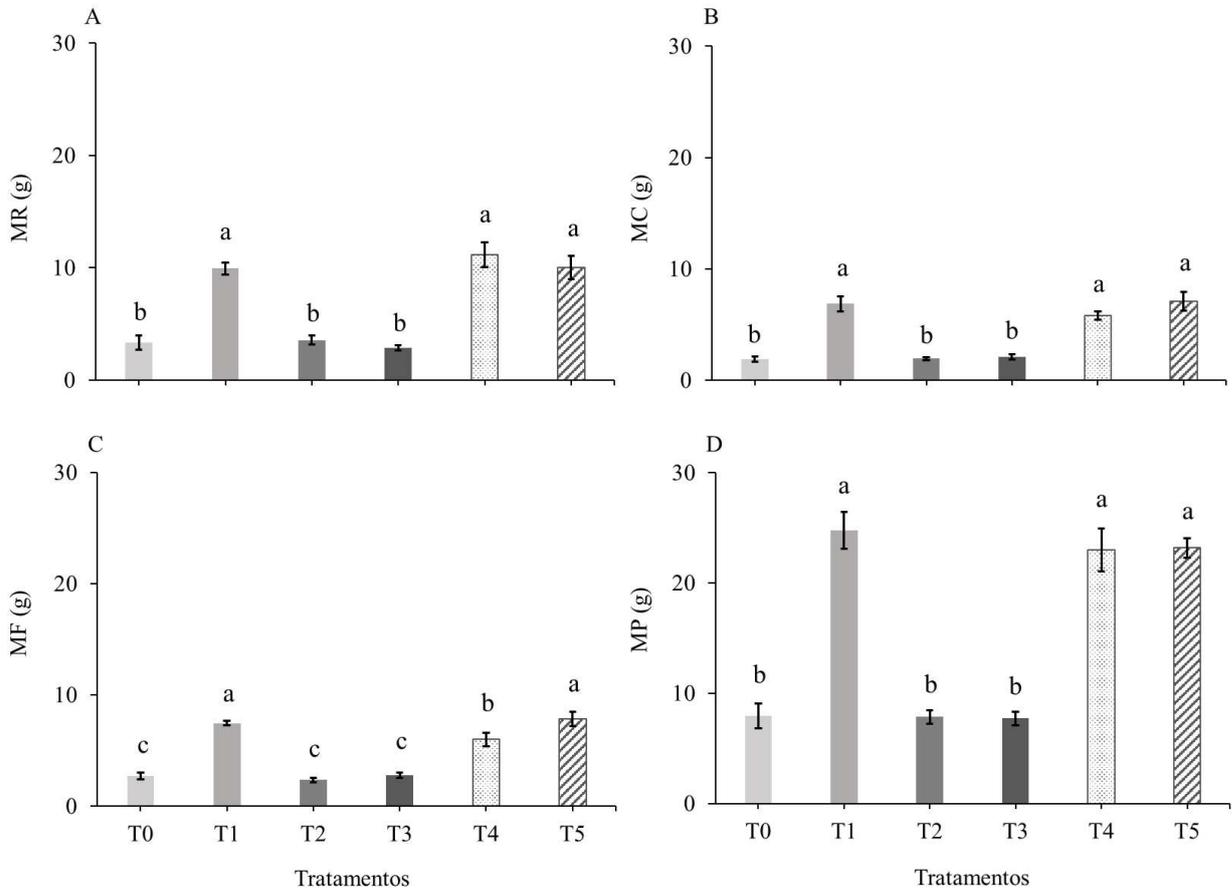
É interessante observar que os tratamentos envolvendo adubação somente com fertilizantes minerais (T1) e a mistura entre estes e carvão pirolítico (T5) apresentam valores semelhantes, em que T5 representa aumento de somente 1,6% para AP e DC e de 2,6% para AF em relação a T1. Enquanto isso, apesar de não diferir desses tratamentos em AP e DC, T4 apresentou valores mais baixos e, no que concerne o resultado de AF para esse tratamento, houve consonância com os resultados obtidos para trocas gasosas (Figura 8) e pigmentos fotossintéticos (Figura 10), com valores significativamente menores em relação aos resultados obtidos para T5, visto que a redução da AF em T4 resulta em menor área para interceptação de luz para o processo fotossintético (Tóth *et al.*, 2002).

Os carvões hidrotérmicos geralmente apresentam conteúdo inferior de macronutrientes em relação ao carvão pirolítico (Khosravi *et al.*, 2022). Todavia, eles podem servir como coadjuvante dos fertilizantes minerais, promovendo a liberação lenta dos nutrientes e reduzindo a perda destes por escoamento superficial (Fang *et al.*, 2018). Desse modo, embora a dose aplicada de T4 tenha representado quantidade adequada de macronutrientes (Tabela 4), esses podem não ter ficado prontamente disponíveis, tendo em vista a possibilidade de imobilização (Bargmann *et al.*, 2014b), havendo, ainda, a possibilidade de que o material continuasse agindo no solo de forma a contribuir para a nutrição do milho a longo prazo (Khosravi *et al.*, 2024).

4.4 Biomassa seca e razões alométricas

O teste F da análise de variância identificou efeito significativo para biomassa seca da planta e razões alométricas, exceto para razão entre massa seca do colmo e massa seca total da planta (RMC), como demonstrado na Tabela 8 do apêndice A. Os tratamentos que derivaram os valores mais elevados de massa seca de raiz (MR) foram T1 (9,94 g), T4 (11,18 g) e T5 (10,03 g), os quais não apresentaram diferença significativa entre si. Os demais tratamentos, T0, T2 e T3, também não diferiram significativamente entre si e apresentaram menores massas radiculares. O T3 apresentou a menor massa radicular, com 2,85 g (Figura 13 A). Observa-se que, comparado ao tratamento T0 (Controle), T3 (100% CP) foi o único a limitar o valor de massa seca da raiz, com redução de 14,67%.

Figura 13 - Massa seca da raiz (A), massa seca do colmo (B), massa seca da folha (C) e massa seca total (D) das plantas de milho, em gramas, aos 41 dias após a emergência em resposta à aplicação dos tratamentos.



Tratamentos: T0 – Controle; T1 – 100% FM; T2 – 100% CH; T3 – 100% CP; T4 – 50% FM + 50% CH; T5 – 50% FM + 50% CP. As médias seguidas de diferentes letras indicam diferença significativa para o teste de Duncan a 5% de probabilidade. As barras apresentam o erro padrão da média.

Fonte: autora.

Em relação à massa seca do colmo (MC), os resultados se mostraram semelhantes à MR, de modo que os tratamentos T1, T4 e T5 não diferiram significativamente, assim como os tratamentos T0, T2 e T3 (Figura 13 B). A maior massa observada foi para 50% FM + 50% CP (T5), resultando 7,08 g, o que representa um aumento de 274,6% em relação ao Controle (T0). A menor massa seca do colmo foi obtida em T0 (1,89 g).

Para a massa seca de folhas (MF), os maiores valores foram observados em T1 e T5 (7,45 e 7,84 g, respectivamente), que não diferiram significativamente (Figura 13 C). O tratamento T5 se destacou novamente, com ganho de 188,2% na MF em relação a T0. Diferindo significativamente dos outros tratamentos, T4 apresentou o valor de 5,99 g para a massa seca de folhas, enquanto T0, T2 e T3 não diferiram entre si. O T2 (100% CH) resultou a menor média, com 2,36 g, de forma que reduziu a MF em 13,2% quando comparado a T0.

Na análise da massa seca total das plantas de milho (MP), os tratamentos T1, T4 e T5 promoveram os maiores valores (24,77, 22,99 e 23,19 g, de modo respectivo), sem diferença significativa entre si. Já os tratamentos T0, T2 e T3 resultaram nos menores valores de MP e não apresentaram diferença significativa entre si. Em relação ao Controle, o tratamento T1 (100% FM) resultou em ganho de 211,57% de massa seca de plantas (Figura 13 D).

A produção de biomassa pelas plantas foi destacada nos tratamentos T1 e T5, o que está coerente ao que foi observado para esses tratamentos quanto às variáveis fotossintéticas, nas quais esses tratamentos apresentaram maiores médias, ressaltando os resultados de *A*, *g_s* e ETR (Figura 8). De mesmo modo, as respostas para biomassa estão em harmonia com o que foi obtido para as medidas de AP, DC e AF (Figuras 11 e 12). Esses resultados ilustram que os tratamentos 100% FM (T1) e 50% FM + 50% CP (T5) foram responsáveis pelas maiores respostas de crescimento e desenvolvimento das plantas de milho.

No geral, os tratamentos contendo somente adição de carvão hidrotérmico e carvão pirolítico apresentaram valores baixos para biomassa seca sem que houvesse diferença estatística em relação ao tratamento Controle. Diversas pesquisas constataram que a aplicação de carvão pirolítico resultou em ganhos de altura, biomassa e rendimento para o milho, mas as respostas de incremento ou redução nessas variáveis, tanto para o milho, quanto para outras culturas, é dependente de fatores como o material de origem do carvão pirolítico e o tipo de solo (Premalatha *et al.*, 2023).

O resultado obtido para biomassa após a aplicação do tratamento 100% CP difere dos resultados obtidos por Cong. *et al.* (2023), em que houve significativo incremento de altura e de biomassa (em 22%) para o milho cultivado em solo arenoso adicionado de carvão pirolítico. No entanto, outros estudos verificaram que não houve diferença significativa nos parâmetros de crescimento de plantas adubadas com esse material carbonáceo, a exemplo da pesquisa realizada por Keller *et al.* (2023), na qual o feijão do tipo pinto (*Phaseolus vulgaris*) e o sorgo sudão (*Sorghum x drummondii*) não apresentaram ganhos em altura e biomassa em duas estações de cultivo após aplicação de diferentes doses de carvão pirolítico com adição de fertilizante nitrogenado e fosfatado. Inclusive, esse resultado difere do que foi observado com o uso do tratamento em que foi utilizado fertilizantes minerais e carvão pirolítico (T5) no presente estudo, visto que houve respostas positivas nas variáveis de crescimento.

A respeito do carvão hidrotérmico, Wagner e Kaupenjohann (2014) obtiveram resultados que concordam com os dados obtidos para T2. Foram verificadas reduções na biomassa de forma ainda mais intensa do que no presente estudo (redução de 1,26%), com diminuição de até 50% da biomassa de plantas de aveia desenvolvidas em solo adubado com

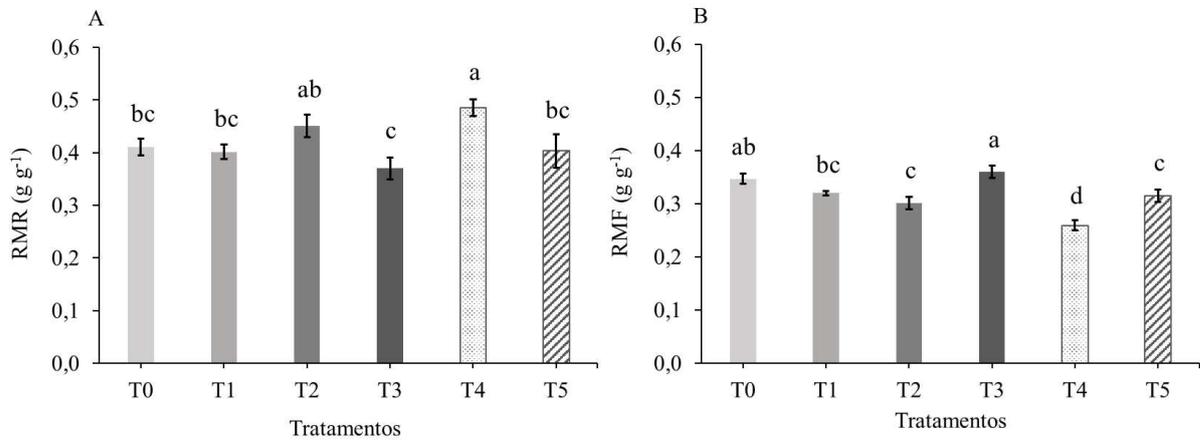
carvão hidrotérmico produzido a partir de resíduo de madeira de choupo (*Populus sp.*). Os autores atribuíram essa resposta ao nitrogênio em quantidade limitada no solo após aplicação do material, visto que há a probabilidade de imobilização do N, como comentado anteriormente.

Apesar da reduzida biomassa, foi verificado que T2 obteve bons resultados para trocas gasosas, sem diferir dos tratamentos T1 e T5 (Figura 8), que resultaram em maiores valores para biomassa seca. Um fator que pode ter influenciado essa resposta é a concentração interna de CO₂ na planta (C_i), variável que não obteve significância no teste F da ANOVA, mas apresentou maiores valores para T1, T2 e T5 quando comparado a T0, T3 e T4 (Tabela 11, Apêndice B). Quando a C_i é mais baixa, implica dizer que o consumo interno de oxigênio nas plantas é maior, o que leva à redução na concentração de carbono nas plantas e redução da taxa fotossintética (Pereira *et al.*, 2020). Como T2 obteve maiores valores de C_i, isso pode ter influenciado seus resultados mais elevados para trocas gasosas.

Ademais, valores elevados nas trocas gasosas podem indicar um aumento na produção de biomassa, embora essa relação nem sempre ocorra de forma proporcional. Dependendo das características ambientais, ajustes fisiológicos no metabolismo vegetal podem ocorrer, a exemplo da alocação de carbono, que pode influenciar mais significativamente o incremento de biomassa do que a própria fotossíntese (Luo *et al.*, 1997).

A partir da Figura 14 são apresentadas as razões alométricas, que permitem entender como as plantas alocaram recursos para garantir sua sobrevivência. Na relação entre massa seca das raízes e massa seca total das plantas (RMR), o valor mais elevado (0,49 g g⁻¹) foi observado no tratamento composto por adubação mineral e carvão hidrotérmico (T4), representando aumento de 19,51% em relação ao Controle (T0). A RMR para o tratamento T2 (0,45 g g⁻¹) não diferiu do tratamento T4 e nem dos valores observados em T0, T1 e T5. O menor valor de RMR foi observado em T3, adubação 100% CP, o qual também não diferiu de T0, T1 e T5, totalizando 0,37 g g⁻¹.

Figura 14 - Razões entre massa seca de raízes e massa seca total (A) e massa seca foliar e massa seca total (B) das plantas de milho aos 41 dias após a emergência em resposta à aplicação dos tratamentos.



Tratamentos: T0 – Controle; T1 – 100% FM; T2 – 100% CH; T3 – 100% CP; T4 – 50% FM + 50% CH; T5 – 50% FM + 50% CP. As médias seguidas de diferentes letras indicam diferença significativa para o teste de Duncan a 5% de probabilidade. As barras apresentam o erro padrão da média.

Fonte: autora.

Para a razão entre a massa seca das folhas e a massa seca total da planta (RMF), o tratamento 100% CP (T3) resultou em maior valor ($0,36 \text{ g g}^{-1}$) e não diferiu do Controle (T0), com $0,35 \text{ g g}^{-1}$, que, por sua vez, não diferiu da adubação 100% FM (T1). Os tratamentos T2 e T5 não diferiram significativamente entre si e de T1 (Figura 14 B). Por fim, o tratamento 100% CH (T4) apresentou a menor média ($0,26 \text{ g g}^{-1}$), representando redução de 25,7% na RMF em relação a T0.

As razões alométricas são importantes para avaliar a distribuição de recursos realizada pelas plantas (Zhao *et al.*, 2019), de modo que esse parâmetro pode fornecer dados para a compreensão do crescimento relativo de um órgão vegetal em relação a outro. A taxa de crescimento de órgãos vegetativos geralmente ocorre em escala isométrica, mas a alocação dos metabólitos e nutrientes essenciais entre os órgãos da planta podem variar de acordo com modificações ambientais e fatores abióticos (Niklas; Enquist, 2002).

Constatou-se que T2 e T4 proporcionaram a maior quantidade de recursos (alocação de massa) para o crescimento das raízes (Figura 14 A). Ambos os tratamentos contêm carvão hidrotérmico que, em muitos casos, pode apresentar características hidrofóbicas e criar barreiras para o acesso à água pela planta (Titirici *et al.*, 2012), como é o caso do carvão hidrotérmico de bagaço de caju (Fregolente *et al.*, 2023). Desse modo, é possível que tenha havido alguma dificuldade inicial na disponibilidade hídrica, o que influenciou as plantas de milho darem preferência à destinação de recursos para o crescimento das raízes em detrimento à parte aérea, na tentativa de promover maior absorção de água, conforme explanado por Karlova *et al.*

(2021). Possivelmente o maior desenvolvimento das raízes nesses tratamentos impossibilitou problemas de ordem hidráulica, de forma que a atividade fotossintética não foi afetada de forma negativa, especialmente para T2, que apresentou elevada fotossíntese líquida juntamente aos tratamentos T1 e T5 (Figura 8 A).

A hidrofobicidade do carvão hidrotérmico pode ter gerado uma reação de defesa ao déficit hídrico nas plantas do tratamento 100% CH (T2), pois apesar de não diferir de T1 e T5 nos resultados de transpiração e condutância estomática, T2 apresentou os menores valores para os parâmetros mencionados (Figura 8), o que pode indicar que as plantas estavam tentando reduzir a perda de água (Grassi; Magnani, 2005). Entretanto, a redução desses parâmetros deveria suscitar alguma diminuição da taxa fotossintética, visto que o fato de limitar a abertura dos estômatos limita a difusão de CO₂ nos cloroplastos e sua taxa de assimilação na fotossíntese (He *et al.*, 2024). Supostamente, isso não ocorreu em razão do provável equilíbrio mantido entre o investimento na produção de novas raízes e a demanda hídrica da planta, o que pode ter impedido que esta tivesse a absorção de água prejudicada. Outro aspecto importante a ser considerado é a eficiência fotossintética de plantas como o milho – plantas do metabolismo C₄, com considerável otimização na captura e conversão da luminosidade, o que pode facilitar a fotólise da água para a síntese de ATP e NADPH, de forma a contribuir para a fixação de CO₂ no ciclo de Calvin (Schluter; Weber, 2020).

Um fator importante quanto as trocas gasosas em T2 é que, possivelmente, o aumento de sua eficiência na fotossíntese, mesmo sem haver elevados teores de clorofila (Figura 10), ocorreu para alocar mais recursos para o crescimento radicular. Contudo, como foi verificado, ainda que as plantas do T2 tenham demonstrado elevada eficiência fotossintética, foram apresentados diminutos valores nas variáveis biométricas (Figuras 11 e 12) e de biomassa seca (Figura 13). Apesar de o processo fotossintético ser responsável pelo estímulo do crescimento vegetal, não é sempre que a fotossíntese eficiente irá promover o aumento da biomassa, pois pequenas modificações na partição do C assimilado, principalmente em se tratando de crescimento e espessamento da área foliar, podem gerar mudanças significativas no crescimento da planta como um todo, causando a redução da sua biomassa (Weraduwege *et al.*, 2015).

As plantas do T3 destinaram mais recursos para a produção de biomassa foliar em relação à biomassa total da planta (Figura 14 B) com 0,36 g g⁻¹, valor correlato à sua fração ocupada pelas raízes (Figura 14 A), com 0,37 g g⁻¹. Esse aspecto representa um certo equilíbrio na distribuição de fotoassimilados no crescimento da planta, como destacado por Jin *et al.* (2024) avaliando o desenvolvimento do algodoeiro sob efeito de carvão pirolítico de palha de

trigo aplicado em dose de 4,86 t ha⁻¹. Os autores identificaram significativa melhora na proporção da alocação de carbono fotossintético e nutrientes nos órgãos reprodutivos e em todos os estádios de crescimento da cultura.

Apesar do T3 ter apresentado maior alocação de recursos para a produção de folhas, isso não refletiu em maior área foliar (Figura 12) e apresentou reduzida fotossíntese, eficiência fotossintética e condutância estomática (Figura 8). O aumento da biomassa seca da folha pode ocorrer ao passo que a área foliar diminui, pois esta variável aumenta mais lentamente em relação à biomassa foliar, fenômeno conhecido como “retornos decrescentes” (Chen *et al.*, 2023). Ademais, muitas vezes a partição de carbono pode promover incremento da espessura das folhas, que pode ser correlacionada ao aumento da biomassa foliar (Weraduwage *et al.*, 2015).

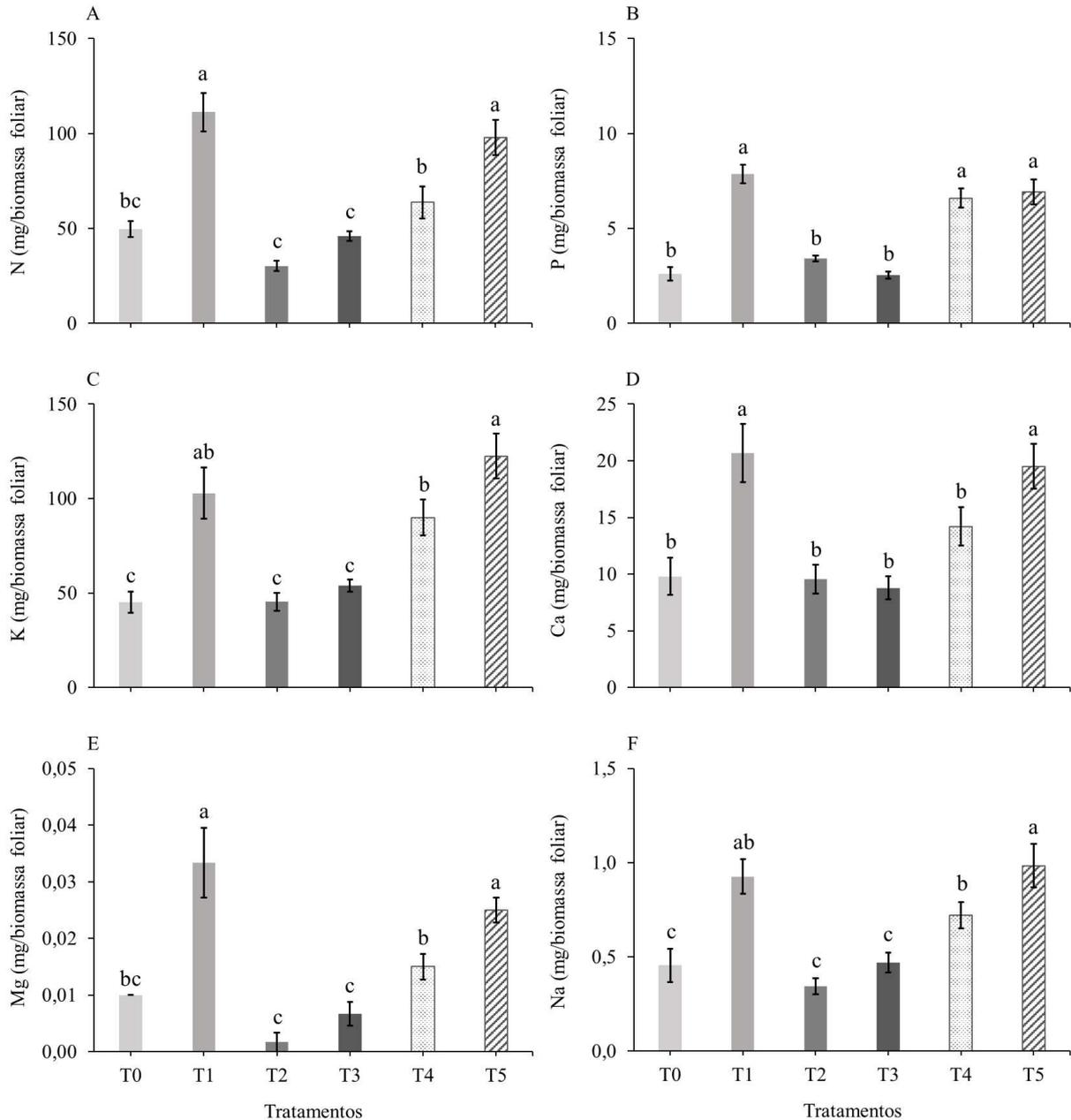
Novotny *et al.* (2015) identificaram que estudos com carvões utilizaram quantidades inviáveis desse material no solo, compreendendo taxas de aplicação superiores a 2% com base em massa. Entretanto, taxas de aplicação até 2% promoveram efeitos positivos em relação ao crescimento e desenvolvimento das plantas e aos atributos físicos e químicos do solo, especialmente em solos arenosos. Nesta pesquisa, a dose de 3 t ha⁻¹ é equivalente a 0,1% de carvão pirolítico adicionado em solo franco arenoso, o que pode ter representado uma dose efetivamente limitada. Possivelmente, efeitos mais pronunciados de T3 nas plantas teriam sido observados com o uso de porcentagens próximas a 1%, por exemplo, o que equivaleria cerca de 30 t ha⁻¹.

A quantidade de carvão pirolítico testada foi definida com o objetivo de ofertar as quantidades de P requeridas pela cultura do milho, visto que esse nutriente é bastante limitado em solos de regiões de clima tropical devido à sua baixa mobilidade e ao processo de adsorção em coloides minerais no solo (Vinha *et al.*, 2021). Alguns outros benefícios que os materiais carbonáceos trazem ao solo quando aplicados em doses mais altas, como a melhor retenção de água, podem não ter sido expressivos neste estudo, de modo a não favorecer o desenvolvimento das plantas. Além disso, pondera-se o fato de que os nutrientes presentes nos carvões podem não ter ficado biodisponíveis às plantas logo após a aplicação do material ao solo.

4.5 Macro e micronutrientes da biomassa foliar

O teste F da ANOVA (Tabela 9, apêndice A) demonstrou significância estatística para o acúmulo dos macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), para o acúmulo de sódio (Na) e para o acúmulo dos micronutrientes ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn) e manganês (Mn) na biomassa foliar. Para o nitrogênio na biomassa (Figura 15 A), os maiores acúmulos foram alcançados nos tratamentos 100% FM (T1) e 50% FM + 50% CP (T5), sem diferença estatística entre si, apresentando os valores de 111,28 e 97,76 mg biomassa foliar⁻¹, respectivamente. O menor acúmulo foi demonstrado por 100% CH (T2), com o valor de 30,27 mg biomassa foliar⁻¹, sem apresentar diferença estatística em relação aos tratamentos Controle (T0) e 100% CP (T3).

Figura 15 - Teores dos macronutrientes nitrogênio (A), fósforo (B), potássio (C), cálcio (D) e magnésio (E) e teor de sódio (F) na biomassa foliar das plantas de milho aos 41 dias após a emergência em resposta à aplicação dos tratamentos.



Tratamentos: T0 – Controle; T1 – 100% FM; T2 – 100% CH; T3 – 100% CP; T4 – 50% FM + 50% CH; T5 – 50% FM + 50% CP. As médias seguidas de diferentes letras indicam diferença significativa para o teste de Duncan a 5% de probabilidade. As barras apresentam o erro padrão da média.

Fonte: autora.

Os maiores valores de acúmulo de fósforo em $\text{mg biomassa foliar}^{-1}$ (Figura 15 B) foram observados nos tratamentos T1 (7,87), T4 (6,60) e T5 (6,93), sem apresentar diferença significativa entre si. O tratamento T3 contou com o menor acúmulo (2,53) e não diferiu de T0 e T2. Para o potássio, o T5 apresentou a maior média (Figura 15 C), com o acúmulo de 122,48 $\text{mg biomassa foliar}^{-1}$, enquanto o menor acúmulo foi de 44,97 $\text{mg biomassa foliar}^{-1}$, apresentado

pelo Controle. Em relação ao acúmulo de cálcio, as maiores médias foram apresentadas por T1 e T5 (Figura 15 D), sem diferirem entre si, com os respectivos valores 20,70 e 19,52 mg biomassa foliar⁻¹. Os demais tratamentos não apresentaram diferença significativa entre si.

O acúmulo de magnésio foi mais substancial para T1 e T5 (Figura 15 E), sem haver diferença significativa entre estes tratamentos, seguido por T4, que não diferiu de T0, que, por sua vez, não diferiu de T2 e T3. Para o sódio, o maior acúmulo foi apresentado por T5 (Figura 15 F), com 0,98 mg biomassa foliar⁻¹, sem apresentar diferença significativa em relação a T1. O menor acúmulo de sódio na biomassa foliar foi observado para T2, que não diferiu dos tratamentos T0 e T3.

Os tratamentos envolvendo fertilizantes minerais aplicado de forma isolada e adicionado de carvão pirolítico (T1 e T5, respectivamente) não diferiram entre si para nenhum resultado de acúmulo de macronutrientes e de sódio, além de apresentarem as maiores médias para essas variáveis. Desse modo, os resultados obtidos para esses tratamentos em relação às trocas gasosas (Figura 8), variáveis biométricas (Figuras 11 e 12) e massa seca (Figura 13), são condizentes com o maior acúmulo de macronutrientes.

Foi observado que mesmo não contendo os maiores teores de clorofila, T1 e T5 apresentaram elevada eficiência fotossintética, refletindo em aumento da biomassa. Isso deve estar relacionado ao acúmulo de N nas plantas para esses tratamentos, o que favorece o processo fotossintético (Wang *et al.*, 2021). Lee *et al.* (2021) verificaram respostas diferentes em relação ao teor de clorofila em milho adubado com carvão pirolítico e fertilizante mineral. No estudo dos autores citados, esse pigmento foi maior a partir do tratamento realizado com pellet composto por NPK incorporado a carvão pirolítico de mistura de palha e casca de arroz e galhos de seringueira, enquanto o tratamento contendo somente fertilizante mineral apresentou menor teor de clorofila. Entretanto, houve concordância do estudo citado com o presente trabalho em relação ao carvão pirolítico ter favorecido a absorção de nitrogênio pelo vegetal, e, assim, ter elevado a biomassa.

Nos tratamentos com aplicação isolada do carvão hidrotérmico (T2) e carvão pirolítico (T3), observam-se acúmulos inferiores aos apresentados em T1 e T5 para macronutrientes e sódio, sem diferir do T0, o que também está em concordância com os resultados obtidos nas variáveis biométricas e massa seca para T2 e T3 e, ainda, trocas gasosas para T3. O teor de nitrogênio um pouco mais elevado para T3 pode ter influenciado sua maior produção de clorofila, especialmente a clorofila *a*, em relação a T2 (Figura 10 A). Apesar desse fato, a eficiência fotossintética de T3 fora bastante reduzida, enquanto T2 obteve maior eficiência nas trocas gasosas, assemelhando-se aos resultados obtidos nessas variáveis por T1

e T5. Entretanto, ainda assim obteve resultados bastante inferiores em se tratando da biomassa. Como já mencionado, a eficiência fotossintética nem sempre leva ao aumento da biomassa, visto que isso depende da partição do C assimilado (Weraduwege *et al.*, 2015).

Devido aos valores semelhantes de biomassa seca para T2 e T3 (Figura 13 D), considera-se que algum fator pode ter prejudicado a absorção de nutrientes no solo para esses tratamentos, especialmente o nitrogênio, levando ao menor desenvolvimento das plantas. Ainda assim, as plantas tratadas com o carvão pirolítico demonstraram maior absorção de N em relação ao carvão hidrotérmico, pois apesar de T2 aportar quantidade de N no solo acentuadamente maior do que T3 (Tabela 4), resultou em menor acúmulo de N na biomassa. O mesmo comportamento foi observado para T4 e T5, misturas contendo fertilizantes minerais e carvão hidrotérmico, e fertilizantes minerais e carvão pirolítico, respectivamente.

A incorporação de carvão hidrotérmico no solo pode, assim como o carvão pirolítico, promover a imobilização do N, como já mencionado. Bargmann *et al.* (2014b) verificaram que ao adicionar carvão hidrotérmico com relação C/N maior que 16 ao solo, houve menor suprimento de N disponível para as plantas. Os autores associaram esse resultado à probabilidade de que o potencial de imobilização do N no carvão hidrotérmico esteja mais relacionado às suas propriedades químicas do que à sua relação C/N, visto que esse material carbonáceo tende a apresentar menor estabilidade do C, gerando maior biodisponibilidade microbiana e maior potencial para imobilização de N em solo. No presente estudo, pode ter havido imobilização do nitrogênio no tratamento T2 em comparação a T3 devido à tendência de haver maior estabilidade do C no carvão pirolítico em relação ao carvão hidrotérmico (Khosravi *et al.*, 2022). A relação C/N dos materiais carbonáceos provavelmente não foi um fator de efetiva influência na maior disponibilidade de N para T3, visto que os valores dessa relação foram semelhantes, com 28,6 para o carvão pirolítico de bagaço de caju e 28,8 para o carvão hidrotérmico da mesma biomassa (Fregolente *et al.*, 2023).

Outra causa para o menor acúmulo de N nas plantas adubadas com os carvões é a adsorção do elemento na área de superfície específica (ASE) desses materiais. Materiais carbonáceos com partículas de alta área de superfície podem gerar o aumento da adsorção de nitrogênio, de forma a reduzir o amônio disponível no solo (Bargmann *et al.*, 2014b). Conforme caracterização dos materiais carbonáceos de bagaço de caju, o carvão hidrotérmico possui área superficial de $35 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, enquanto o carvão pirolítico possui $70 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (Fregolente *et al.*, 2023). Desse modo, como o carvão pirolítico possui maior ASE, pode-se inferir que além da imobilização, o menor acúmulo de N nesse tratamento pode ter ocorrido também em decorrência da adsorção do nutriente, enquanto o menor acúmulo de de N nas plantas que

cresceram sob a influência exclusiva do carvão hidrotérmico possivelmente ocorreu mais em função da imobilização.

Diversos estudos apontam os carvões como materiais que possuem potencial para o aumento do acúmulo de macronutrientes nas plantas. Entre eles, o carvão pirolítico é comumente relatado como maior provedor da disponibilidade de nutrientes no solo em decorrência de suas características físico-químicas, dentre as quais se destacam a área de superfície, pH e a presença de grupos funcionais que determinam maior adsorção dos macronutrientes (Yin *et al.*, 2022; Al-Nuaimy *et al.*, 2024). Assim, a característica de adsorção de macronutrientes pelos carvões pode ser analisada num contexto positivo de redução de perdas dos nutrientes e disponibilização gradual às plantas.

Na presente pesquisa, mesmo que os tratamentos contendo somente carvão hidrotérmico (T2) e carvão pirolítico (T3) não tenham diferido significativamente quanto ao acúmulo de nutrientes, foi observado que o carvão pirolítico proporcionou maior acúmulo de N, K e Mg nas plantas de milho. No entanto, P e Ca foram mais acumulados pelas plantas em T2 o que pode ter influenciado os parâmetros fotossintéticos para este tratamento (Figura 8). Uma das principais funções do fósforo na planta é a integração da molécula de ATP, pois age no armazenamento e transferência de energia fotossintética, de forma que a quantidade de P movida influencia o desenvolvimento da parte aérea (Saldanha *et al.*, 2017). Portanto, em relação a T3, o maior acúmulo de P em T2 pode ter influenciado seus melhores resultados para fotossíntese, mas não de modo suficiente para aumentar a biomassa da parte aérea neste tratamento (Figura 13).

A estrutura e o tamanho do sistema radicular das plantas são características fundamentais na aquisição de nutrientes (Lyzenga *et al.*, 2023), particularmente para aqueles que são pouco móveis no solo, como P e Ca. Dessa forma, considera-se que o maior aporte de biomassa radicular em relação à biomassa total da planta em T2 (Figura 14 A) foi um importante fator para a maior absorção desses nutrientes. As formas de absorção de nutrientes contam com o processo de difusão, no qual o íon presente na solução do solo passa para uma região mais próxima da raiz por diferença de gradiente de potencial químico; fluxo de massa, correspondente ao transporte dos íons a partir do fluxo de água no solo; e interceptação radicular, em que há o encontro entre raiz e nutriente a partir do crescimento radicular no solo (Reichardt *et al.*, 2020). Um sistema radicular mais desenvolvido promove melhorias na absorção dos nutrientes, principalmente por meio da interceptação radicular, como deve ter ocorrido para T2. A difusão é mais pronunciada para aquisição dos nutrientes P e K, enquanto a interceptação radicular tem grande importância na absorção de Ca.

Para o potássio, não houve diferença de acúmulo entre os carvões aplicados isoladamente (T2 e T3), ainda que o aporte do macronutriente pelo tratamento com carvão hidrotérmico (T2) tenha sido substancialmente maior quando comparado ao tratamento contendo carvão pirolítico (T3) (Tabela 4). O potássio pode ter ficado adsorvido nos grupos funcionais carregados negativamente na superfície dos carvões, tornando-se indisponível para as plantas na solução do solo, dificultando sua absorção, confrontando o que foi relatado por Schimmelpfenning *et al.* (2015).

No que concerne aos tratamentos contendo a mistura dos carvões com fertilizantes minerais, os teores de K podem ter ficado mais disponíveis para as plantas devido à maior oferta de K após a aplicação do fertilizante KCl em T4 e T5. O maior acúmulo de K para esses tratamentos pode ter beneficiado seus resultados de trocas gasosas, visto que esse macronutriente desempenha papel fundamental na fisiologia vegetal, de modo a atuar na fotossíntese e translocação de fotoassimilados, regulação osmótica na abertura dos estômatos, influenciando as taxas de transpiração da planta, e auxílio no transporte de água e compostos minerais. Ademais, também tem importância durante estresses abióticos por reforçar defesas antioxidantes e manter a homeostase iônica (Hasanuzzaman *et al.*, 2018).

Para o cálcio, os maiores valores acumulados na biomassa foliar em T5 em detrimento do T4 devem estar associados às diferentes quantidades desse nutriente nos carvões, visto que ambos foram adicionados de fertilizantes minerais, mas somente T5 não diferiu de T1 (100% FM). O maior teor de Ca foi observado para o carvão pirolítico de bagaço de caju, com $1,95 \text{ g kg}^{-1}$, enquanto o carvão hidrotérmico da mesma biomassa apresentou somente $0,39 \text{ g kg}^{-1}$ (Tabela 3).

Os acúmulos de magnésio foliar foram substancialmente maiores para os tratamentos T1 e T5 em relação aos demais e provavelmente estão relacionados à alta adição desse nutriente na forma de MgO (Tabela 5). Essa maior concentração de Mg na biomassa das folhas pode ter contribuído para a eficiência fotossintética de T1 e T5, tendo em vista que o Mg compõe o átomo central dos pigmentos fotossintéticos, sendo um nutriente importante para as trocas gasosas. Além disso, ele é essencial para a atividade da Rubisco (ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase oxigenase), responsável pela fixação de CO_2 atmosférico, e produção da ATP em cloroplastos (Tränkner *et al.*, 2018).

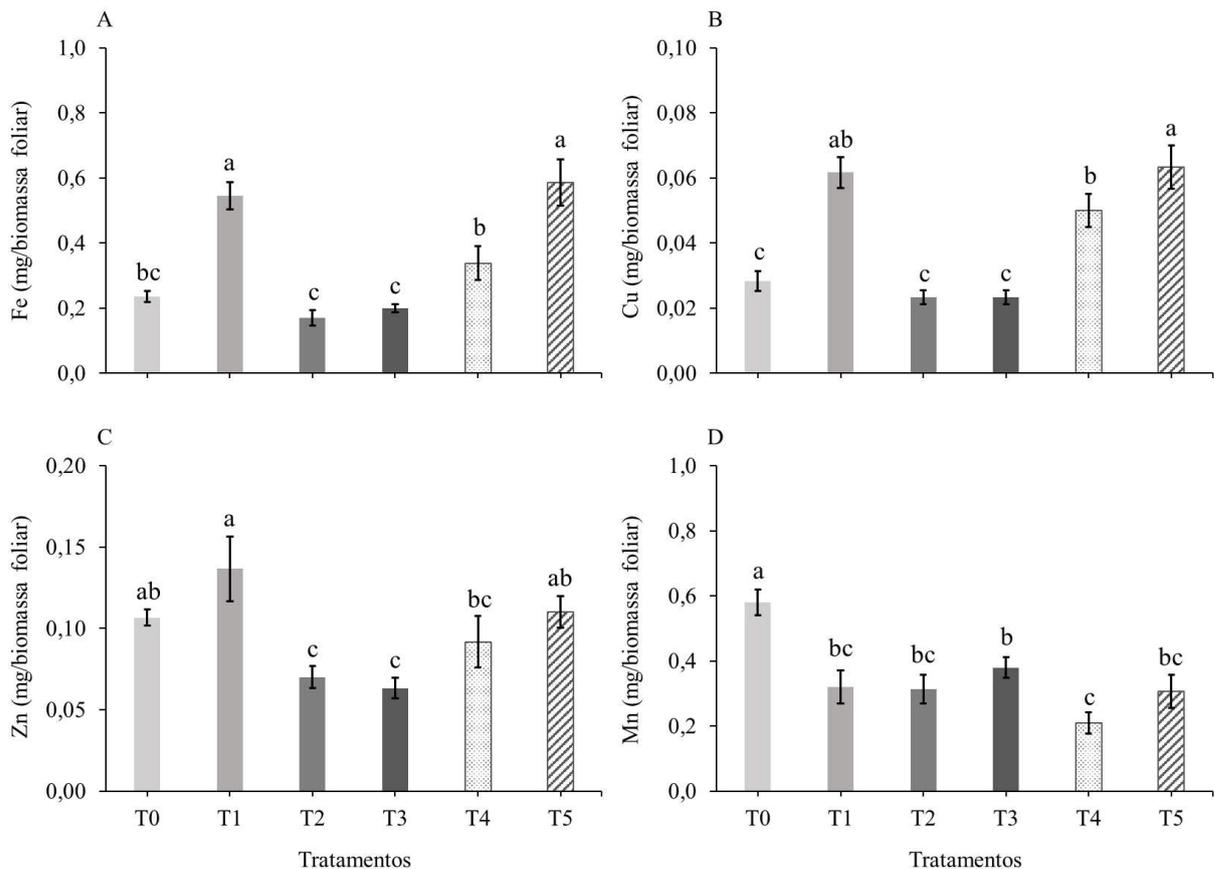
Kloss *et al.* (2014) verificaram que em comparação ao controle (com fertilização nitrogenada), o uso de diferentes carvões pirolíticos associados a fertilizante nitrogenado reduziu a biomassa de plantas de mostarda, ao passo que houve aumento dos nutrientes Ca, P e K e redução dos teores de N e micronutrientes na biomassa. No presente trabalho a biomassa

das plantas que receberam fertilizantes minerais e carvão pirolítico (T5) não diferiu estatisticamente do tratamento em que foi aplicado somente fertilizantes minerais (T1), ou seja, ambos aumentaram o acúmulo de macronutrientes e a biomassa das plantas de milho.

O maior acúmulo de sódio nas plantas dos tratamentos T1, T4 e T5 está associado à presença do elemento no solo e nos carvões (Tabelas 1 e 3). O tratamento composto por fertilizantes minerais e carvão pirolítico (T5) resultou em maior acúmulo de Na quando comparado ao tratamento composto por fertilizantes minerais e carvão hidrotérmico (T4), fato que pode estar relacionado à maior quantidade desse elemento para o carvão pirolítico de bagaço de caju (Tabela 3).

No que concerne ao acúmulo de micronutrientes na biomassa foliar, o maior acúmulo de ferro foi obtido nos tratamentos T1 e T5, sem diferença significativa entre si (Figura 16 A), com as respectivas médias: 0,55 e 0,59 mg biomassa foliar⁻¹. O menor acúmulo de Fe foi apresentado por T2 (0,17 mg biomassa foliar⁻¹) e não diferiu significativamente de T0 e T3.

Figura 16 - Teores dos micronutrientes ferro (A), cobre (B), zinco (C) e manganês (D) na biomassa das plantas de milho aos 41 DAE em resposta à aplicação dos tratamentos.



Tratamentos: T0 – Controle; T1 – 100% FM; T2 – 100% CH; T3 – 100% CP; T4 – 50% FM + 50% CH; T5 – 50% FM + 50% CP. As médias seguidas de diferentes letras indicam diferença significativa para o teste de Duncan a 5% de probabilidade. As barras apresentam o erro padrão da média.

Fonte: autora.

Para o cobre, os tratamentos T1 e T5 apresentaram o maior acúmulo (0,06 mg biomassa foliar⁻¹) e não apresentaram diferença entre si (Figura 16 B). O menor acúmulo foi obtido por T3 (0,02 mg biomassa foliar⁻¹) e não diferiu de T0 e T2. O tratamento T1 apresentou a maior acúmulo foliar de zinco (Figura 16 C), com 0,14 mg biomassa foliar⁻¹, enquanto o menor acúmulo foi verificado em T3 (0,06 mg biomassa foliar⁻¹), que não diferiu de T2 e T4. Por fim, para o manganês, o maior acúmulo foi observado para o Controle (Figura 16 D), com 0,58 mg biomassa foliar⁻¹, seguido por T3 (0,38 mg biomassa foliar⁻¹), que não apresentou diferença significativa em relação aos tratamentos T1, T2 e T5, enquanto T4 apresentou o menor acúmulo (0,21 mg biomassa foliar⁻¹).

Assim como os resultados de acúmulo de macronutrientes, o acúmulo de micronutrientes na biomassa foliar do milho foi maior para os tratamentos T1 e T5, com exceção do manganês, que fora maior para o Controle (T0). Os tratamentos envolvendo a aplicação isolada do carvão hidrotérmico (T2) e do carvão pirolítico (T3) não apresentaram aumento no acúmulo de micronutrientes e, em relação a esses, T0 ainda elevou significativamente o acúmulo de zinco e manganês, possivelmente devido à menor adsorção desses nutrientes no solo sem adição dos carvões.

Nas pesquisas que avaliam o uso do carvão hidrotérmico e do carvão pirolítico como fonte de nutrientes para as plantas, comumente são observados resultados de maior disponibilidade de macronutrientes, enquanto a disponibilidade de micronutrientes tende a ser menos expressiva, o que pode resultar em alterações insignificantes nas concentrações de nutrientes na biomassa (Wagner; Kaupenjohann, 2014; Schimmelpfenning *et al.*, 2015; Mashwani *et al.*, 2024), como pôde ser verificado no presente estudo para o acúmulo de ferro e cobre nas folhas das plantas sob os tratamentos T2 e T3.

Muitas vezes a incorporação de fertilizantes minerais aos materiais carbonáceos é utilizada como estratégia visando elevar a disponibilidade dos nutrientes no solo e favorecer a absorção pelas plantas. Em pesquisa realizada com Espodossolo (solo arenoso com limitações de ordem física e química), a aplicação de fertilizantes minerais juntamente ao carvão pirolítico de resíduo de madeira, na dose de 15 t ha⁻¹, favoreceu o rendimento e a absorção de micronutrientes em plantas de beterraba, enquanto os tratamentos que envolveram a aplicação de fertilizantes sem carvão pirolítico, e do carvão pirolítico de forma isolada, não levaram a efeitos significativos de rendimento e, ainda, o fertilizante mineral causou efeito acidificante no solo (Abedin; Unc, 2020).

Já em outra pesquisa, foi verificado que a adição de carvão hidrotérmico e carvão pirolítico produzidos da mesma matéria-prima (*Miscanthus x giganteus*), com adição de

fertilizante nitrogenado, não promoveu mudanças na produção da biomassa de gramíneas em relação ao controle (sem fertilizante mineral) ao longo de 2 anos, e, apesar de haver aumento na concentração de K na biomassa, não houve incremento nos demais macro e micronutrientes (Schimmelpfenning *et al.* 2015).

No presente estudo, verificou-se que a adição dos fertilizantes minerais aos materiais carbonáceos foi uma estratégia positiva, que possibilitou resultados substanciais para o incremento de micronutrientes nas folhas das plantas de milho. O tratamento envolvendo carvão pirolítico e fertilizantes minerais, T5, aumentou o acúmulo de macro e micronutrientes e a biomassa do milho, resultando em diferença significativa em relação ao Controle, o que indica melhor eficiência no uso dos nutrientes disponíveis no solo. Além disso, o tratamento envolvendo carvão hidrotérmico e fertilizantes minerais, T4, diferiu de T5, mas também favoreceu o aumento do acúmulo de macronutrientes e dos micronutrientes Fe e Cu, promovendo o incremento da biomassa das plantas de milho.

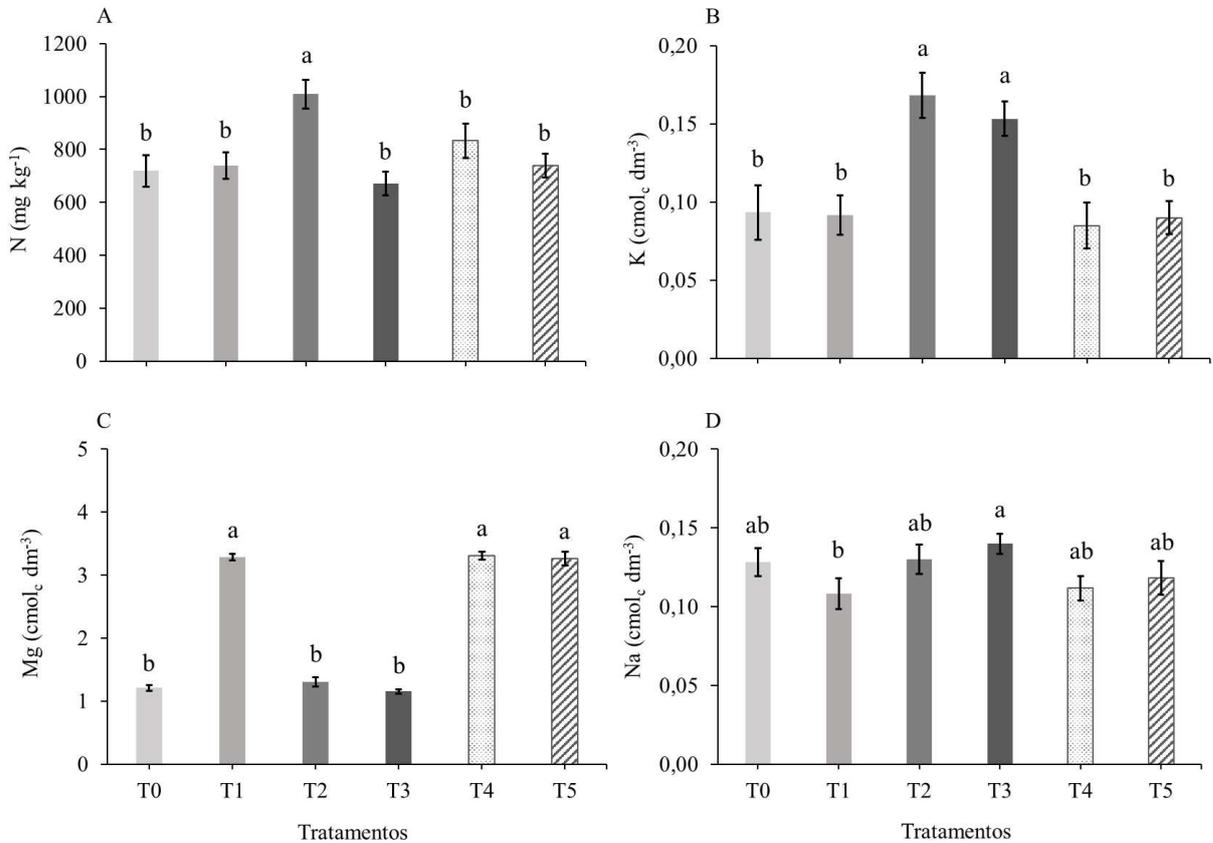
A liberação dos nutrientes por meio dos carvões varia de acordo com diversos fatores. Temperaturas elevadas durante o processo de carbonização hidrotérmica podem reduzir a liberação de macronutrientes ao passo que podem elevar a disponibilidade de micronutrientes, como Cu e Zn (Islam *et al.*, 2021). O pH do solo é outro aspecto de importante relação a disponibilidade dos nutrientes, de modo que os micronutrientes Fe, Mn, Zn e Cu geralmente são mais disponíveis em valores de pH mais baixos (Santos *et al.*, 2020). Portanto, as interações entre o solo e os carvões são variáveis e, como explanado por Joseph *et al.* (2010), são inerentes a fatores como as condições de pirólise e CHT (temperatura, tempo de processamento), a matéria-prima carbonizada, o tipo de solo (classe, teor de areia, silte e argila) e as condições ambientais (temperatura, umidade, luminosidade). Tudo isso culmina nas diferentes disponibilidades de nutrientes e nas diferentes respostas das plantas, de forma a acumular maiores ou menores teores de macro e micronutrientes. Assim, são necessários mais estudos que avaliem a influência de diferentes carvões no aspecto nutricional das culturas agrícolas, pois as pesquisas ainda são incipientes, especialmente para o carvão hidrotérmico.

4.6 Fertilidade do solo

O teste F apresentou significância estatística na análise de variância para os atributos de fertilidade do solo pH, potássio (K), magnésio (Mg), nitrogênio (N), manganês (Mn), acidez potencial (H+Al), soma de bases (SB), CTC efetiva (t), CTC potencial (T), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%) e porcentagem de sódio trocável (PST), enquanto não houve significância para os atributos sódio (Na), cálcio (Ca), fósforo (P), carbono orgânico (CO), ferro (Fe), cobre (Cu) e zinco (Zn). Os resultados estão dispostos na Tabela 10 do apêndice A.

Na Figura 17 A se constata que o teor de N foi maior para o tratamento 100% CH (T2), totalizando 1.009,09 mg kg⁻¹. Não houve diferença significativa para os demais tratamentos e o menor teor de N foi observado para o tratamento 100% CP (T3), com 671,04 mg kg⁻¹. Em relação ao potássio no solo, os tratamentos T2 e T3 resultaram os maiores teores, com 0,17 cmol_c dm⁻³ para o primeiro, classificado como alto teor, e 0,15 cmol_c dm⁻³ para o segundo, classificado como médio teor de K (Embrapa, 2015). Os outros tratamentos não diferiram entre si e contaram com teores mais baixos, mas ainda classificados como teor médio de potássio no solo, totalizando 0,09 cmol_c dm⁻³ (Figura 17 B).

Figura 17 - Teores dos macronutrientes nitrogênio (A), potássio (B), magnésio (C) e sódio (D) no solo aos 41 dias após a emergência das plantas de milho em resposta à aplicação dos tratamentos.



Tratamentos: T0 – Controle; T1 – 100% FM; T2 – 100% CH; T3 – 100% CP; T4 – 50% FM + 50% CH; T5 – 50% FM + 50% CP. As médias seguidas de diferentes letras indicam diferença significativa para o teste de Duncan a 5% de probabilidade. As barras apresentam o erro padrão da média.

Fonte: autora.

Para o macronutriente magnésio, os tratamentos envolvendo fertilizantes minerais (T1) e fertilizantes minerais adicionados de carvão hidrotérmico e carvão pirolítico (T4 e T5, de modo respectivo), apresentaram teores altos, sem haver diferença entre si, resultando em 3,29 (T1), 3,31 (T4) e 3,26 cmol_c dm⁻³ (T5). Os tratamentos T0, T2 e T3 não diferiram significativamente, apresentando valores abaixo dos demais tratamentos, mas ainda assim classificados como teores elevados de Mg no solo, totalizando 1,21, 1,31 e 1,15 cmol_c dm⁻³, respectivamente (Figura 17 C).

Apesar de não demonstrar significância estatística no teste F da ANOVA, o sódio apresentou algumas diferenças no teste de Duncan a 5% de significância. O T3 apresentou maior teor de sódio, constando valor de 0,14 cmol_c kg⁻¹, enquanto T1 apresentou o menor valor, com 0,11 cmol_c kg⁻¹. Os demais tratamentos apresentaram médias que não diferiram de T3 e de T1 (Figura 17 D).

As transformações do nitrogênio no solo são altamente dinâmicas e dependentes de uma série de fatores, como clima, biodiversidade microbiana, práticas de manejo e sistemas de cultivo (Pruthviraj *et al.*, 2024). Sousa *et al.* (2012) em pesquisa realizada com o mesmo solo do presente estudo, verificaram que os teores de nitrogênio total nas áreas de sobrepastejo estavam na faixa de 800 a 1.200 mg kg⁻¹, valores que não se enquadram ao que foi observado para o T0. Provavelmente isso ocorreu devido à diferença da dinâmica desse nutriente entre o solo com cultivo de milho e o solo com a presença dominante de *Aristida setifolia* e *Stylosanthes humilis* (vegetação nativa local).

Com exceção de T2, os tratamentos restantes não diferiram quanto ao teor de N no solo relação ao Controle. A adição de ureia foi feita nos tratamentos T1, T4 e T5, que, além de manifestar redução de N pela absorção pelas plantas, podem ter sofrido algum tipo de perda do nutriente. Após aplicação no solo, esse fertilizante pode apresentar baixa eficiência de uso devido a perdas por processos como lixiviação, volatilização (na forma de NH₃) e desnitrificação. Minato *et al.* (2019) em pesquisa avaliando perdas de N após adubação do milho (segunda safra) com ureia, constataram que solos de menor CTC e menor teor de argila levam menos tempo para atingir grandes taxas de volatilização da amônia, com perdas que variam de 34,04 a 43,15%, chegando a valores diários de 0,9 a 2,91 kg ha⁻¹. Todavia, esse processo é minimizado se houver precipitação após a adubação. Como a ureia foi aplicada na forma diluída nos vasos, pode ter havido redução do efeito de volatilização.

O T2 elevou o teor de nitrogênio em 40,27% em relação a T0, certamente devido ao elevado teor desse nutriente na quantidade de carvão hidrotérmico adicionada no solo, o qual excedeu 307,95 kg ha⁻¹ do valor necessário (Tabela 4). Ainda que T2 tenha constado maior teor de N no solo, apresentou o menor acúmulo de N na biomassa foliar (Figura 15 A) e baixo crescimento da planta (Figura 13), fato que deve estar associado à imobilização do N, como já explanado no item 4.5.

A disponibilidade de N após aplicação de carvão pirolítico ou carvão hidrotérmico é muito variável e influenciada por fatores como tipo de solo e tipo de carvão. Bargmann *et al.* (2014b) verificaram que uma semana após a aplicação de carvão hidrotérmico de diferentes resíduos de biomassa vegetal, houve acentuada redução do nitrato no solo, mas esse foi recuperado após 8 semanas, com aumento que atingiu 82% da sua concentração inicial. Ebrahimi *et al.* (2022) observaram que o carvão hidrotérmico de lodo de esgoto melhorou o teor de fosforo solúvel e nitratos no solo e após 60 dias, o teor de nitrato foi quantificado em 583,2 mg kg⁻¹. Chu *et al.* (2020) também verificaram melhorias no solo após adição de carvão hidrotérmico de lodo de esgoto. A partir do uso desse material, foi possível reduzir a

volatilização da amônia e aumentar a retenção desta em solo adicionado de ureia para cultivo de arroz. Isso ocorreu em razão de propriedades como baixo pH de superfície e grande quantidade de grupos funcionais carboxila presentes no carvão hidrotérmico estudado, os quais, de mesmo modo, são propriedades do carvão hidrotérmico de bagaço de caju.

Entre os tratamentos envolvendo adição de carvão pirolítico, o T5 apresentou aumento do N em relação a T3, certamente devido à adição de ureia no solo, visto que T3 não recebeu fertilizantes minerais e apresentou baixo acúmulo de N pelas plantas (Figura 15 A), promovendo quantidades inadequadas desse nutriente para as variáveis de crescimento (altura, diâmetro e biomassa seca). Portanto, é provável que o uso do carvão pirolítico de bagaço de caju tenha resultado na imobilização do nitrogênio no solo ou, ainda, adsorção deste elemento na sua área de superfície, como mencionado anteriormente (item 4.5).

No que diz respeito ao potássio, T2 e T3 resultaram nos maiores teores desse nutriente no solo. Apesar de não diferir de T2, as plantas de milho do tratamento T3 apresentaram maior acúmulo de K nas folhas (Figura 15 C). De mesmo modo, a adição de carvão pirolítico aos fertilizantes minerais no tratamento T5 deve ter contribuído para a maior concentração de K nas folhas quando comparado aos outros tratamentos envolvendo fertilizantes minerais e a mistura destes com carvão hidrotérmico (T1 e T4, respectivamente).

Em estudo realizado por Ro *et al.* (2016), ao utilizar carvão pirolítico e carvão hidrotérmico da mesma biomassa (esterco de suínos), houve aumento da disponibilidade de nutrientes em solo arenoso, sendo que para o K o carvão pirolítico aumentou o teor desse elemento 10 vezes mais que o carvão hidrotérmico. Biliás *et al.* (2023) evidenciaram que o carvão pirolítico pode aumentar a disponibilidade do potássio no solo e favorecer a absorção pelas plantas, mas isso depende de alguns fatores, como a quantidade desse nutriente presente na biomassa pirolisada e área superficial do carvão pirolítico. Assim, os resultados do presente estudo podem estar relacionados ao maior teor de K no carvão pirolítico de bagaço de caju (Tabela 3) e à maior área superficial em relação ao carvão hidrotérmico (Fregolente *et al.*, 2023), fatores que possivelmente favoreceram a disponibilidade de K no solo para a absorção das plantas.

O potássio fica ligado a argilas e materiais orgânicos, ou seja, em partículas menores do solo. Todavia, a sua perda pode ocorrer por meio de trocas catiônicas na superfície do solo, como a troca por Ca^{2+} e Mg^{2+} , movendo o K^+ para a solução do solo (Goulding *et al.*, 2021), visto que sua carga é menor e, portanto, apresenta menor capacidade de ficar retido. O baixo teor do K em T1 pode ter ocorrido devido às trocas catiônicas por elementos de maior

carga, pois esse tratamento teve adição de fertilizantes minerais (com o KCl como fonte de potássio) sem nenhuma adição de componente orgânico.

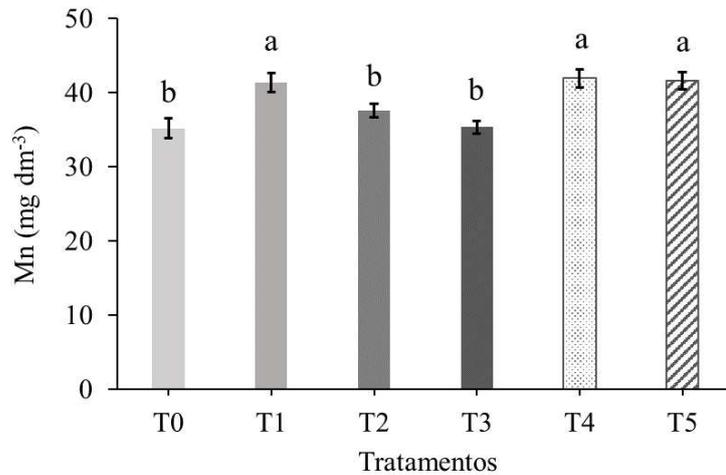
O teor de magnésio no solo para os tratamentos envolvendo fertilizantes minerais (T1, T4 e T5) foi mais elevado do que o teor apresentado para os tratamentos envolvendo a adubação com o carvão hidrotérmico e o pirolítico aplicados de forma isolada (T2 e T3, respectivamente). Presume-se que a incorporação de quantidade equivalente a mais de uma tonelada por hectare de óxido de magnésio (MgO) nos tratamentos com fertilizantes minerais (Tabela 5) foi a causa da elevação do Mg no solo. A adição de MgO foi feita visando aumentar a proporção Ca:Mg para 9:3, conforme recomendação por Novais *et al.* (2007).

Gondek *et al.* (2018) observaram que o uso de carvões obtidos por pirólise de esterco suíno e cama de frango foi eficiente para elevar a disponibilidade de K, Mg e P no solo quando comparados às matérias-primas aplicadas sem passarem pelo processo pirolítico. O aumento dos nutrientes ocorreu de forma proporcional ao aumento da dose aplicada no solo e isso foi decorrente da maior carga desses elementos obtida por meio da carbonização dos materiais, os quais já apresentavam significativo conteúdo de macronutrientes. No estudo citado, os valores de Mg para os carvões variaram entre 10,1 e 13,7 g kg⁻¹, enquanto o carvão pirolítico de bagaço de caju apresentou 4,5 g kg⁻¹ e o carvão hidrotérmico obteve teor ainda menor, com apenas 0,5 g kg⁻¹ (Tabela 3), o que pode explicar o baixo teor desse nutriente no solo para os tratamentos T2 e T3.

Em relação ao teor de sódio no solo, o teste F da ANOVA não apresentou significância, mas o teste de Duncan a 5% de probabilidade foi significativo, de modo que o gráfico do teor de Na foi demonstrado na Figura 17 D. Apenas T1 diferiu de T3, enquanto ambos não diferiram dos demais. O menor teor de Na no solo para T1 pode ter ocorrido em virtude da absorção desse elemento pelas plantas de milho, como demonstrado no acúmulo na biomassa foliar (Figura 15 F). Além disso, em T1 não houve aporte adicional de Na por meio dos carvões.

Para o micronutriente manganês, os tratamentos T1, T4 e T5 não diferiram entre si e resultaram em maior teor do elemento no solo, com os respectivos valores: 41,35, 41,97 e 41,62 mg dm⁻³ (Figura 18). Os tratamentos T0, T2 e T3 não diferiram entre si e resultaram nos teores mais baixos de Mn no solo.

Figura 18 - Teor do micronutriente manganês no solo aos 41 dias após a emergência das plantas de milho em resposta à aplicação dos tratamentos.



Tratamentos: T0 – Controle; T1 – 100% FM; T2 – 100% CH; T3 – 100% CP; T4 – 50% FM + 50% CH; T5 – 50% FM + 50% CP. As médias seguidas de diferentes letras indicam diferença significativa para o teste de Duncan a 5% de probabilidade. As barras apresentam o erro padrão da média.

Fonte: autora.

O solo sem adubação (T0) parece ter disponibilizado manganês mais facilmente para absorção pelas plantas em comparação com os outros tratamentos. Nesse tratamento, observou-se maior acúmulo de manganês na biomassa foliar (Figura 16 D) e menor teor desse micronutriente no solo (Figura 18). Isso pode ser atribuído ao pH do solo estudado (Tabela 1), pois a acidez promove maior disponibilidade de Mn (Silva; Berti, 2022). Nos tratamentos com aplicação de carvão hidrotérmico e carvão pirolítico de forma isolada (T2 e T3, respectivamente), não houve diferença significativa em relação a T0 quanto ao teor de Mn no solo, mas o acúmulo deste micronutriente na biomassa foliar foi significativamente menor. Isso sugere que os carvões não alteraram o teor de Mn no solo e que este pode ter ficado adsorvido nos carvões, tornando-se indisponível para absorção pelas plantas.

Muitas vezes a aplicação de materiais carbonáceos pode não causar diferenças significativas na disponibilidade de micronutrientes no solo para a absorção pelas plantas, visto que os macronutrientes presentes na matéria-prima carbonizada estão em maior quantidade e se tornam ainda mais concentrados após o processo de carbonização (Wagner; Kaupenjohann, 2014; Schimmelpfenning *et al.*, 2015). Como pode ser observado na Tabela 3, os valores de micronutrientes presentes no carvão hidrotérmico e pirolítico de bagaço de caju são diminutos em relação aos macronutrientes.

Alguns estudos demonstraram, ainda, redução de micronutrientes no solo após adubação com carvão pirolítico. Ippolito *et al.* (2015) produziram carvão pirolítico ácido a partir de *Panicum virgatum* objetivando redução do pH de um solo alcalino para aumentar a disponibilidade de micronutrientes. O aumento das doses do carvão pirolítico implicaram o aumento de Zn e Mn fitodisponíveis. Todavia, a disponibilidade desses nutrientes para as plantas foi reduzida com o decorrer do tempo, assim como Fe e Cu, supostamente devido às espécies minerais insolúveis sofrerem precipitação.

Kloss *et al.* (2014) constataram que o uso de carvão pirolítico associado a fertilizantes minerais em solos localizados em região de clima temperado reduziu o rendimento de plantas de mostarda e cevada, assim como perceberam notáveis diminuições nos teores de Cu, Fe, Zn e Mn. Quanto ao carvão hidrotérmico, em muitos casos, a aplicação de temperaturas elevadas no processo de carbonização hidrotérmica pode reduzir o teor de macronutrientes (N, P e K) ao passo que elevam o teor de micronutrientes (Cu e Zn) (Islam *et al.*, 2021). O uso do carvão hidrotérmico pode não modificar as concentrações de micronutrientes como Cu e Zn, mas pode causar efeitos negativos no crescimento de plantas de aveia devido imobilização do N (Wagner; Kaupenjohann, 2014).

Apesar dos efeitos negativos ou não significativos dos materiais carbonáceos na disponibilidade de micronutrientes, a realização de tratamentos dos carvões com o uso de aditivos pode trazer resultados positivos nesse sentido. Em experimento caracterizando carvões hidrotérmicos de resíduo da indústria canavieira, foi observado que macro e micronutrientes presentes no carvão podem ser melhor disponibilizados para a absorção pelas plantas a partir do modo de produção. Foi verificado que temperaturas mais elevadas na carbonização hidrotérmica (230 °C) resultaram na maior adsorção de macro e micronutrientes, além de que o uso do aditivo H₃PO₄ na produção elevou a adsorção de Cu, Zn e Mn, enquanto FeCl₂ influenciou a maior adsorção de Fe no carvão hidrotérmico (Silva *et al.*, 2017).

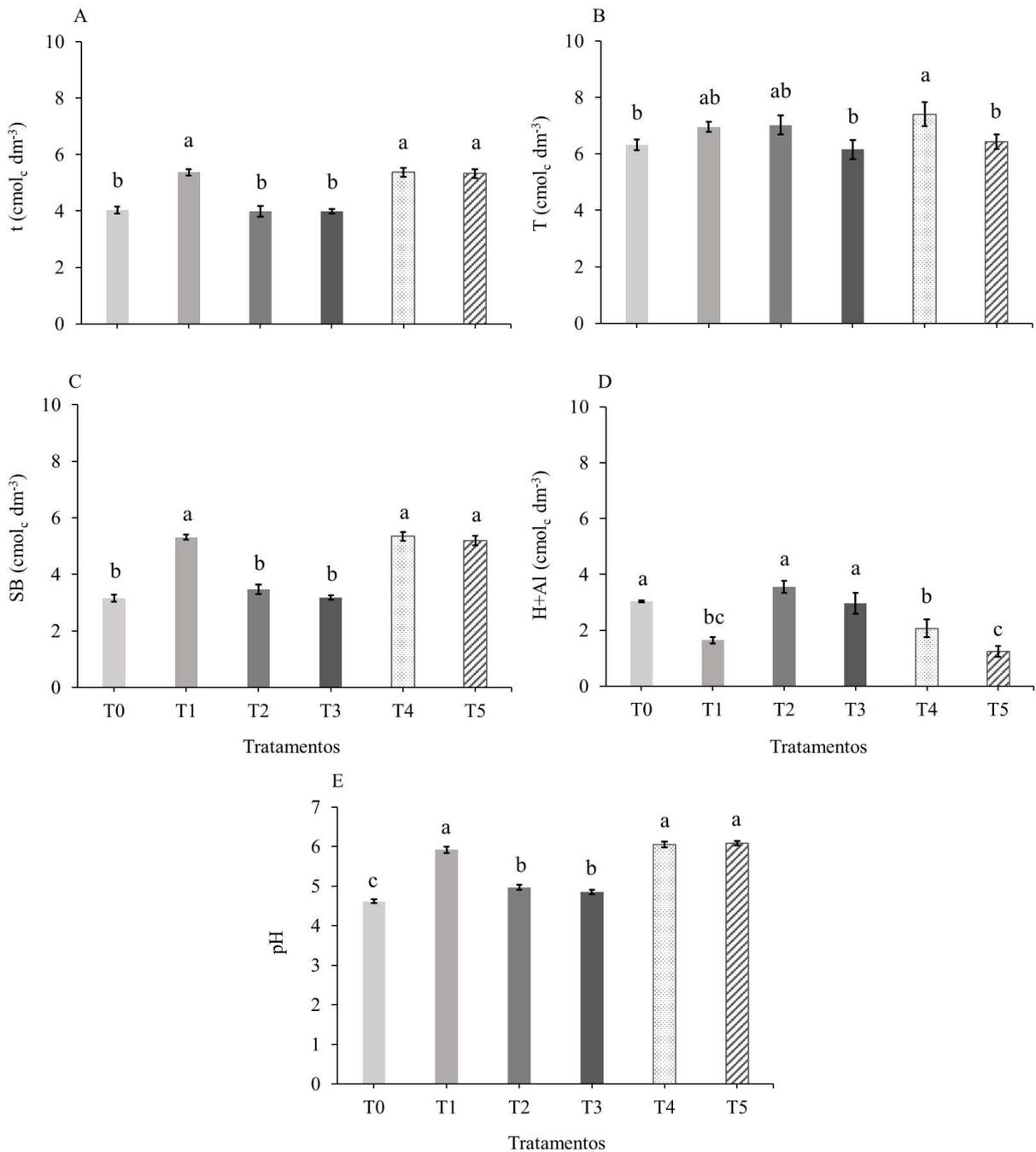
Diante desses aspectos, pode-se dizer que os materiais carbonáceos têm potencial para fornecer micronutrientes para o desenvolvimento de plantas. Contudo, em relação ao carvão pirolítico, os estudos geralmente concentram-se em avaliar a influência desse material na redução de componentes tóxicos em áreas contaminadas (Nascimento *et al.*, 2023). Para o carvão hidrotérmico ainda há poucos estudos em que tenham sido avaliadas as relações entre esse material e a liberação de micronutrientes no solo para a absorção pelas plantas.

Entretanto, diante do que é apresentado na literatura, o que se pode afirmar é o quão variável são os efeitos dos carvões no solo e que uma série de fatores contribuem para possibilitar ou impossibilitar a liberação de micronutrientes e a absorção desses pelas plantas.

A partir desse fato, é importante a realização de pesquisas que avaliem como diferentes carvões podem influenciar as propriedades químicas de diferentes tipos de solo e condições ambientais diversas. No presente estudo, considerando as condições físico-químicas de um Planossolo em desertificação, diante das condições climáticas e da cultura implantada, não foram identificadas respostas positivas ou negativas para o teor de micronutrientes no solo a partir da aplicação de carvão pirolítico e carvão hidrotérmico de bagaço de caju.

Foram observados maiores valores para CTC efetiva (t) do solo para T1, T4 e T5 com valor médio de $5,35 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, sem diferença significativa entre si. Os tratamentos T0, T2 e T3 não diferiram entre si e apresentaram os valores mais baixos de t (Figura 19 A). Em relação à CTC total, o maior valor foi resultante do tratamento T4, com $7,41 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, o qual não diferiu de T1 e T2. Esses, por sua vez, não diferiram de T0, T3 e T5 (Figura 19 B). De modo geral, todos os tratamentos apresentaram significativo potencial para ampliar a capacidade de retenção de cátions do solo e todos os valores apresentados são classificados como médios para CTC total (Embrapa, 2015).

Figura 19 - Valores de CTC efetiva (A), CTC total (B), soma de bases (C), acidez potencial (D) e pH (E) no solo aos 41 dias após a emergência das plantas de milho em resposta à aplicação dos tratamentos.



Tratamentos: T0 – Controle; T1 – 100% FM; T2 – 100% CH; T3 – 100% CP; T4 – 50% FM + 50% CH; T5 – 50% FM + 50% CP. As médias seguidas de diferentes letras indicam diferença significativa para o teste de Duncan a 5% de probabilidade. As barras apresentam o erro padrão da média.

Fonte: autora.

Na Figura 19 C, observa-se que as maiores médias para soma de bases (SB) ocorreram para T1, T4 e T5 que não diferiram entre si. Os demais tratamentos (T0, T2 e T3) apresentaram valores mais baixos para SB e não diferiram entre si. Para acidez potencial os tratamentos T0, T2 e T3 não diferiram entre si e apresentaram os maiores valores: 3,04 cmol_c

dm^{-3} , $3,55 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $2,97 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, de modo respectivo. Os tratamentos T1, T4 e T5 demonstraram menor acidez potencial (Figura 19 D). O pH do solo foi menor em T0, com valor de 4,62. Os tratamentos T2 e T3 não diferiram entre si com pH médio de 4,91. Por fim, T1, T4 e T5 resultaram em maiores valores, sem diferirem entre si, com média de 6,02 para o pH do solo (Figura 19 E).

Os tratamentos que envolvem fertilizantes minerais (T1, T4 e T5) aumentaram a CTC efetiva em 33% em relação ao Controle, resultados que são proporcionais ao observado para soma de bases (Figura 19 C). Para a CTC potencial, o tratamento T4 foi o único a apresentar valor significativamente maior do que o observado para T0. O maior valor de SB para T1, T4 e T5 influenciou o aumento do pH para os mesmos, especialmente para T5, o qual apresentou pH 31,77% maior do que observado no Controle (Figura 19 E). A causa para isso deve ter sido a maior presença do cátion trocável Mg^{+2} no solo para tais tratamentos, visto que o uso de fertilizantes contendo esse nutriente possibilitam a redução da acidez do solo e a melhor disponibilidade de macro e micronutrientes como o Mn (Dash *et al.*, 2023), assim como pôde ser observado o maior teor desse micronutriente para T1, T4 e T5 (Figura 18).

Em regra, se a pirólise é feita sob condições de temperatura mais elevada, a tendência é de ocorrer aumento do pH e redução do teor de alumínio no carvão pirolítico, o que influencia sua atividade no pH do solo (Ippolito *et al.*, 2015; Butnan *et al.*, 2015; Almutairi *et al.*, 2023). Quanto ao carvão hidrotérmico, a tendência é a mesma, quanto maior a temperatura no processo de carbonização, maior a possibilidade de ter como produto um carvão hidrotérmico alcalino. Todavia, é sabido que esse material não é muito utilizado visando neutralização da acidez do solo, visto que geralmente apresenta pH ácido (Fang *et al.*, 2015). O carvão pirolítico de bagaço de caju foi produzido a $500 \text{ }^\circ\text{C}$ de pirólise e apresentou pH de 9,61, enquanto o carvão hidrotérmico da mesma biomassa, apresentou pH de 4,98 (Tabela 3), devido à sua temperatura de CHT ($211 \text{ }^\circ\text{C}$).

Entretanto, o pH dos carvões pode ter sido pouco eficiente para elevar o pH do solo, já que os materiais carbonáceos aplicados de forma isolada diferiram do Controle, mas o aumento do pH foi pouco efetivo. Mesmo havendo incremento no teor de K no solo, não houve incremento no teor de Mg (Figura 17 B e C), e os teores de Ca não apresentaram significância estatística na ANOVA (Tabela 10, Apêndice A), de forma que não houve o aumento da SB e da CTC para os tratamentos 100% CH (T2) e 100% CP (T3) e, ainda, apresentaram elevada acidez potencial. Para T2, a acidez pode ter sido influenciada pelo elevado teor de nitrogênio no solo (Figura 17 A), visto que quando em excesso, esse nutriente causa acidez e prejudica a produtividade da biomassa (Kimmel *et al.*, 2020). Ao observar o pH de T1, T4 e T5, verifica-

se aumento em relação ao Controle, de forma a contribuir para a melhor disponibilidade de nutrientes, favorecendo o desenvolvimento das plantas desses tratamentos (Faloye *et al.*, 2019), como observado nos resultados de trocas gasosas (Figura 8), altura (Figura 11) e biomassa seca (Figura 13).

Em relação aos tratamentos envolvendo carvão pirolítico (T3 e T5), o pH pode ter influenciado no conteúdo de N no solo. Qian *et al.* (2023) constataram que solo com faixa de pH entre 4,5 e 6,4 favoreceu a imobilização de N na forma de amônio após adição de carvão pirolítico, devido à inibição do processo de nitrificação autotrófica dos microrganismos. Os tratamentos T3 e T5 estão dentro dessa faixa de pH (Figura 19 E) e podem ter passado pela mesma dinâmica do carvão pirolítico no solo.

O valor de pH também pode ter influenciado o conteúdo de Mn do solo. Em solos com pH abaixo de 5,5 (ácido) ocorre a redução de óxidos a Mn^{+2} , forma de manganês disponível para as plantas (Millaleo *et al.*, 2010). Desse modo, o pH ácido do Controle pode ter favorecido a disponibilidade de Mn no solo, o qual foi absorvido pelas plantas de milho, resultando em maior acúmulo de Mn na biomassa foliar (Figura 16 D), levando, portanto, à redução do conteúdo desse micronutriente no solo (Figura 8). As concentrações foliares de Mn para a maioria das culturas agrícolas estão dentro de uma ampla faixa, variando de 30 a 500 mg kg⁻¹, o que indica que o valor demonstrado no Controle não é considerado tóxico para as plantas (Millaleo *et al.*, 2010). Já os tratamentos que demonstraram maior elevação do pH do solo (T1, T4 e T5) podem ter dificultado a disponibilidade desse micronutriente para as plantas, resultando em menor teor absorvido.

Diante dos resultados discutidos, pode-se enfatizar novamente que as características intrínsecas do carvão e do solo a ser adubado podem interferir de forma positiva ou negativa em relação à fertilidade. No presente estudo, foi possível constatar que para haver mais efeitos positivos na fertilidade do Planossolo degradado, foi necessária a adição de fertilizantes minerais aos carvões em suas respectivas doses aplicadas.

São comumente encontrados trabalhos que relatam resultados de aumento na CTC do solo após a adição de materiais carbonáceos, especialmente quando se trata da adição de carvão pirolítico (Al-Nuaimy *et al.*, 2024; Ding *et al.*, 2016; Gondek *et al.*, 2018; Lahori *et al.*, 2024). A alta porosidade e área de superfície do material carbonáceo, a qual contém grupos carbonila, carboxila e fenólicos aumentam a CTC, além de também influenciar a elevação do pH do solo. Com isso, há redução nas perdas de nutrientes por lixiviação e maior disponibilidade de nutrientes como Ca, Mg e K para absorção pelas plantas. (Mohan *et al.*, 2018; Al-Nuaimy *et al.*, 2024).

Em estudo realizado por Domingues *et al.* (2020) foi observado que após nove meses de incubação, os resultados de CTC no solo foram melhores mediante aplicação de carvões produzidos em temperaturas mais amenas (350 a 450 °C). Além disso, o aumento da CTC foi mais dependente da CTC do próprio carvão pirolítico e da sua taxa de aplicação do que da reação de elevação do pH do solo após adição do material carbonáceo. Também é importante mencionar que carvões produzidos a partir da pirólise a 750 °C das matérias-primas bagaço de cana e serragem de eucalipto promoveu redução da CTC do solo em virtude dos baixos valores de CTC desses carvões.

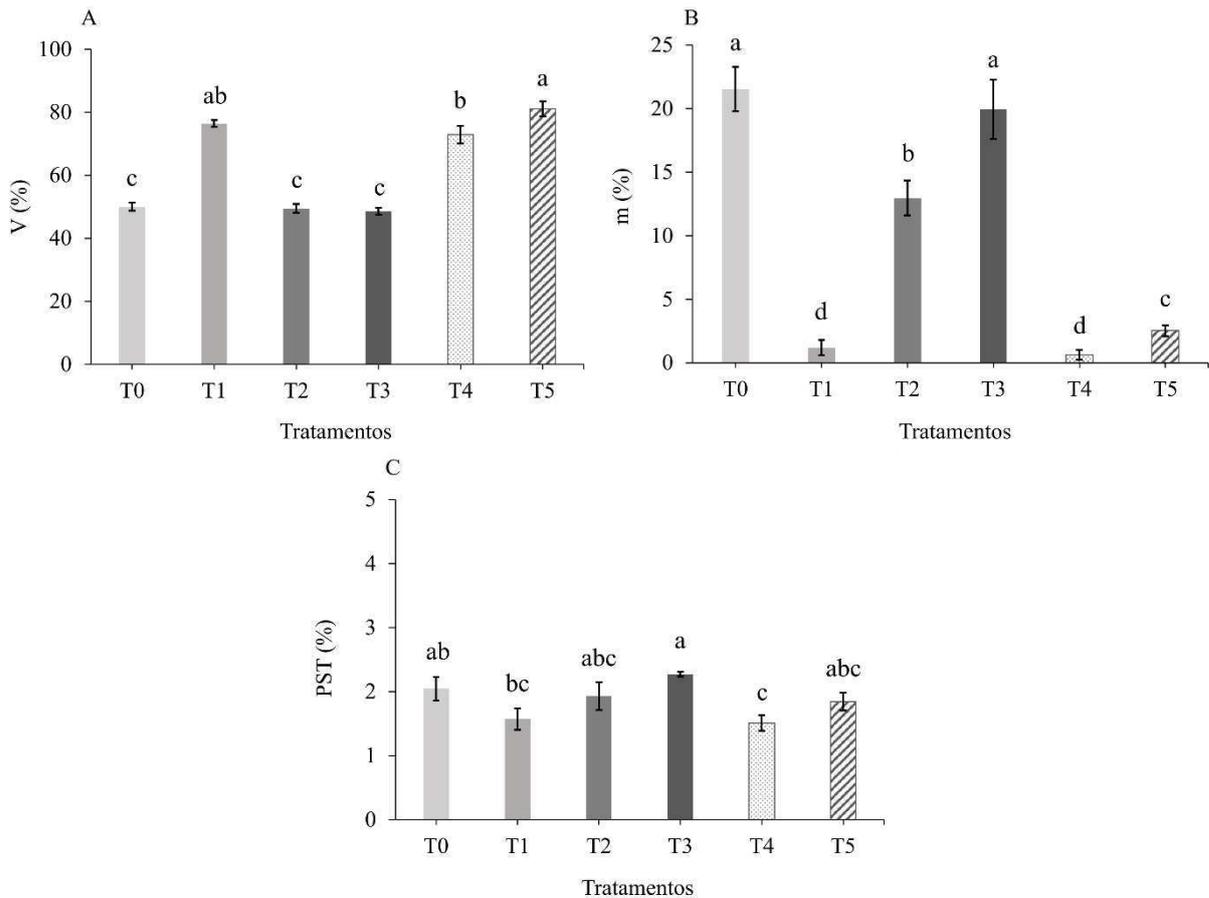
Considerando o exposto no parágrafo anterior, o pH do solo em T3 pode ter sido pouco alterado em relação a T0 devido à baixa taxa de aplicação do carvão pirolítico de bagaço de caju. Além disso, esse carvão pirolítico foi produzido a 500 °C e possui CTC baixa, de apenas 3,51 cmol_c kg⁻¹ (Tabela 3), valor inferior ao mencionado no estudo de Domingues *et al.* (2020), cujo maior valor de CTC foi de 72 cmol_c kg⁻¹ para carvão pirolítico de casca de café produzido a 450 °C.

Em pesquisa realizada por Ebrahimi *et al.* (2022) também foi constatada a influência da temperatura do processo termoquímico na relação entre carvão hidrotérmico e CTC do solo. Os autores relataram que a adição de carvão hidrotérmico de lodo produzido a 180 °C foi efetiva para aumentar a CTC de solo franco-arenoso, melhorando a retenção de cátions livres. Porém, o carvão hidrotérmico da mesma biomassa produzido a uma temperatura de 240 °C levou a valores baixos da CTC. Isso provavelmente decorreu do aumento da imobilização e/ou lixiviação de cátions trocáveis, ou ainda pela redução de grupos funcionais contendo oxigênio durante a carbonização hidrotérmica.

Desse modo, a CHT do bagaço de caju a 211 °C pode ter promovido a redução de grupos funcionais que auxiliariam na retenção de cátions no solo, o que explica T2 não ter diferido de T0 no que concerne a CTC do solo, assim como SB. É importante destacar que a estimativa dos valores de CTC foi realizada com base em cálculos que consideram os valores de soma de bases e acidez, ou seja, esse atributo não foi determinado diretamente por análise laboratorial. Dessa forma, os maiores teores de Mg advindos da aplicação de MgO nos tratamentos com fertilizantes minerais influenciaram os resultados mais elevados de CTC em T1, T4 e T5, enquanto T2 e T3, que não receberam a adição desses fertilizantes, contaram com teores mais baixos. No entanto, esses resultados poderiam ser diferentes caso a CTC fosse determinada por meio de análises que envolvem a retirada efetiva de cátions do complexo de troca do solo.

A saturação por bases foi maior valor em T5, com 81,06%, o que representou aumento de 62,14% dessa variável em comparação ao Controle. O T1 não diferiu de T5 e T4 e os tratamentos T0, T2 e T3 não diferiram entre si, tendo T3 apresentado a menor saturação por bases: 48,58% (Figura 20 A).

Figura 20 - Valores de saturação por bases (A), saturação por alumínio (B) e porcentagem de sódio trocável (C) no solo aos 41 dias após a emergência das plantas de milho em resposta à aplicação dos tratamentos.



Tratamentos: T0 – Controle; T1 – 100% FM; T2 – 100% CH; T3 – 100% CP; T4 – 50% FM + 50% CH; T5 – 50% FM + 50% CP. As médias seguidas de diferentes letras indicam diferença significativa para o teste de Duncan a 5% de probabilidade. As barras apresentam o erro padrão da média.

Fonte: autora.

Os resultados de saturação por alumínio não apresentaram distribuição normal e foram submetidos à transformação Box-Cox a partir da equação $m\% = m\%^{0,3}$. Foram verificadas baixas porcentagens de m% (Embrapa, 2015) para todos os tratamentos (Figura 20 B), mas as maiores porcentagens foram observadas em T0 e T3, com 21,53% para o primeiro e 19,95% para o segundo. Os tratamentos T1 e T4 não diferiram entre si e apresentaram os menores valores de m%, em que T4 foi responsável por redução de 97% desse atributo em relação ao Controle. O T2 diferiu dos demais tratamentos, assim como T5. Os resultados para

porcentagem de sódio trocável foram baixos (Embrapa, 2015) para todos os tratamentos (Figura 20 C). O maior percentual de sódio trocável (PST) foi obtido em T3, com 2,27%. O tratamento T0 não diferiu dos demais tratamentos, exceto de T4, que apresentou a menor PST (1,51%).

Os tratamentos com aplicação isolada de carvão hidrotérmico (T2) e carvão pirolítico (T3) não diferiram do Controle em relação à saturação por bases (V%), resultando nos menores valores. Isso condiz com a maior saturação por alumínio (m%) e acidez potencial (H+Al) para os mesmos tratamentos (Figura 19 D), enquanto o oposto foi observado para os demais tratamentos. Como já destacado, há dinamismo variável entre os carvões e os atributos do solo como pH, CTC, SB e acidez. Zhao *et al.* (2015) constataram que o uso de carvão pirolítico e carvão pirolítico envelhecido (por um período de 4 meses) aumentou o pH do solo, mas a CTC não foi modificada. Em relação às bases trocáveis e saturação por bases, o carvão pirolítico envelhecido proporcionou maiores valores. Ademais, os autores relataram que o carvão pirolítico pode ser utilizado para corrigir a acidez do solo, mas que se este sofrer envelhecimento de curto prazo antes de ser aplicado, pode reduzir sua eficácia nesse aspecto.

Desse modo, considera-se que avaliações de longo prazo acerca dos efeitos dos carvões de bagaço de caju no solo estudado seriam importantes para confirmar melhorias dos atributos químicos como CTC, V% e pH. Para respostas a curto prazo, pode-se dizer que a aplicação de fertilizantes minerais junto aos carvões é uma estratégia eficiente, considerando o Planossolo estudado em processo de desertificação, visto que para os tratamentos T4 e T5 houve o aumento dos valores dos parâmetros citados e o aumento nas bases trocáveis, favorecendo o acúmulo de nutrientes na biomassa foliar (Figura 15) e o desenvolvimento das plantas de milho.

A saturação por alumínio mais elevada para T0, T2 e T3, além do resultado de acidez potencial, pode ter influenciado a redução da biomassa para esses tratamentos quando comparado àqueles envolvendo a mistura entre os carvões e os fertilizantes minerais (Figura 13). A inibição do crescimento de plantas e, conseqüentemente, do conteúdo de biomassa, pode ser um reflexo da acidez e de elevadas concentrações de alumínio no carvão pirolítico advindo do processo de carbonização em temperaturas mais amenas, como pirólise com variação até 600 °C (Novotny *et al.*, 2015). Quando a pirólise é feita mediante temperatura mais elevada, a tendência é de aumento do pH e redução do teor de alumínio no carvão pirolítico (Ippolito *et al.*, 2015; Butnan *et al.*, 2015; Almutairi *et al.*, 2023).

A caracterização dos carvões mostrou maior conteúdo de Al para o carvão pirolítico do que para o carvão hidrotérmico (Tabela 3), o que pode explicar a maior m% para T3 em relação a T2. Porém, no presente estudo, presume-se que o maior contribuinte para o aumento da m% para T0, T2 e T3 foi o conteúdo de Al presente no solo estudado, de 0,54 cmol_c kg⁻¹

(Tabela 1), interpretado como teor médio desse elemento no solo (Embrapa, 2015). Os materiais carbonáceos aplicados de forma isolada (T2 e T3) não aumentaram substancialmente as bases trocáveis no solo, o que pode estar relacionado ao maior teor de Al nesses tratamentos em relação ao teor desse elemento para T1, T4 e T5, resultando em menor desenvolvimento das plantas de milho.

A porcentagem de sódio trocável (PST) foi interpretada como baixa para todos os tratamentos, de modo que não foi um fator considerado como prejudicial ao crescimento das plantas em T0, T2 e T3. O tratamento T3 apresentou o maior valor de PST devido ao maior teor de Na inerente ao carvão pirolítico (Tabela 3). Em estudo com diferentes doses de carvão pirolítico de poda de cajueiro em solo arenoso foi observado aumento da PST com as doses de carvão pirolítico (Pimenta *et al.*, 2019). Os autores associaram esse resultado ao aumento de Na e redução de Ca e Mg no solo, os quais podem ter sido deslocados dos sítios de troca para a solução do solo, sofrendo lixiviação. No presente estudo foram obtidas respostas distintas, pois o carvão pirolítico e o carvão hidrotérmico de bagaço de caju não elevaram o conteúdo de Na em comparação ao Controle, assim como não diferiram deste no que concerne ao conteúdo de Mg no solo, por isso a PST continuou reduzida para T2 e T3.

Diante dos resultados apresentados, pôde-se constatar que para as variáveis de crescimento e desenvolvimento das plantas de milho e para os atributos de fertilidade do Planossolo estudado, classificado como degradado, tendo em vista o seu processo de desertificação, os tratamentos em que foi aplicado o carvão hidrotérmico e o carvão pirolítico associado aos fertilizantes minerais (T4 e T5, respectivamente) geraram resultados mais eficientes em relação aos carvões aplicados de forma isolada. Dentre os carvões, o pirolítico associado aos fertilizantes (T5) demonstrou resultados semelhantes aos observados para o tratamento em que foi utilizado somente os fertilizantes minerais (T1).

Com base na tabela de preços dos fertilizantes comercializados fornecida pela Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2024), foi calculada a média de preço para ureia, superfosfato triplo e cloreto de potássio e, a partir da quantidade utilizada desses insumos em cada tratamento, foi obtido o valor gasto e o valor economizado em T4 e T5 comparados a T1, demonstrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Preço médio dos fertilizantes minerais, de acordo com a quantidade aplicada em cada tratamento em que houve adição desses, valor total gasto e valor total economizado para cada tratamento.

Tratamento	Ureia	Preço	SPT	Preço	KCl	Preço	Total	Economia	
	kg/ha	R\$	kg/ha	R\$	kg/ha	R\$	R\$	R\$	%
T1	155,55	434,07	173,91	535,57	83,33	201,07	1.170,70	-	-
T4	0	0	86,96	267,80	36,01	86,89	354,69	816,01	69,70
T5	61,95	172,87	86,96	267,80	59,16	142,75	583,42	587,28	50,16

Tratamentos: T1 – 100% FM; T4 – 50% FM + 50% CH; T5 – 50% FM + 50% CP. SPT: superfosfato triplo. KCl: cloreto de potássio.

Fonte: autora.

É possível verificar que para os tratamentos com carvão hidrotérmico (T4) e pirolítico (T5), a economia com o uso de fertilizantes fornecedores de nitrogênio, fósforo e potássio é de 69,70 e 50,16%, respectivamente. Desse modo, o uso dos carvões levou à redução da necessidade de uso dos fertilizantes e, conseqüentemente, reduziu os custos com este insumo, o que gera um impacto socioeconômico positivo para os trabalhadores rurais. Ademais, conforme já discutido, os materiais carbonáceos continuam a atuar no solo ao longo do tempo, promovendo benefícios físicos, químicos e biológicos de forma duradoura. Esse efeito representa uma vantagem adicional em relação aos fertilizantes minerais aplicados isoladamente, especialmente em solos degradados, contribuindo para a sua regeneração.

5 CONCLUSÃO

O carvão hidrotérmico e o carvão pirolítico de bagaço de caju, quando aplicados isoladamente, não favoreceram o crescimento e desenvolvimento do milho, assim como não foram efetivos para melhorar atributos químicos do solo degradado estudado.

A adição de fertilizantes minerais ao carvão hidrotérmico e ao carvão pirolítico proporcionou benefícios em curto prazo para trocas gasosas, variáveis biométricas, biomassa e acúmulo de nutrientes nas plantas de milho e para os atributos de fertilidade do solo, especialmente CTC efetiva, pH e saturação por bases.

O carvão pirolítico adicionado aos fertilizantes minerais resultou em melhorias para as variáveis da planta e do solo de maneira mais evidenciada do que o observado para o carvão hidrotérmico.

A aplicação dos carvões ao solo possibilitou a redução do uso de fertilizantes minerais, diminuindo os custos com esses insumos, fator que gera um impacto socioeconômico positivo para o(a) agricultor(a). Além disso, o uso contínuo dos carvões, a longo prazo, pode promover melhorias físicas, químicas e biológicas no solo degradado, contribuindo para sua regeneração gradual no decorrer do tempo.

REFERÊNCIAS

- ABDELRAHMAN, M. A. E. An overview of land degradation, desertification and sustainable land management using GIS and remote sensing applications. **Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali**, [s.l.], v. 34, n. 3, p. 767-808, 4 abr. 2023
- ABDULLAH, N.; TAIB, R. M.; AZIZ, N. S. M.; OMAR, M. R.; DISA, N. M. Banana pseudo-stem biochar derived from slow and fast pyrolysis process. **Heliyon**, [s.l.], v. 9, n. 1, p. 1-15, jan. 2023.
- ABEDIN, J.; UNC, A. Addition of biochar to acidic boreal podzolic soils enhances micronutrient availability and crop productivity. **Open Agriculture**, [s.l.], v. 5, n. 1, p. 188-201, 1 jan. 2020.
- ABRAFRUTAS - Associação Brasileira dos Produtores Exportadores de Frutas e Derivados. **O Brasil é o terceiro maior produtor de frutas no mundo**. 2019. Disponível em: <https://abrafrutas.org/2019/03/07/brasil-e-o-terceiromaior-produtor-de-frutas-do-mundo-diz-abrafrutas/>. Acesso em: 18 fev. 2023.
- ALENCAR, P. G.; ESPINDOLA, G. M.; CARNEIRO, E. L. N. C. Dwarf cashew crop expansion in the Brazilian semiarid region: assessing policy alternatives in pio ix, piauí. **Land Use Policy**, [s.l.], v. 79, p. 1-9, dez. 2018.
- ALMUTAIRI, A. A.; AHMAD, M.; RAFIQUE, M. I.; AL-WABEL, M. I. Variations in composition and stability of biochars derived from different feedstock types at varying pyrolysis temperature. **Journal Of The Saudi Society Of Agricultural Sciences**, [s.l.], v. 22, n. 1, p. 25-34, jan. 2023.
- AL-NUAIMY, M. N. M.; AZIZI, N.; NURAL, Y.; YABALAK, E. Recent advances in environmental and agricultural applications of hydrochars: a review. **Environmental Research**, [s.l.], v. 250, p. 117923, jun. 2024.
- ARAÚJO, A.C.; ARAÚJO, A.C. Limites e perspectivas no manejo dos recursos naturais na agricultura do semiárido Brasileiro. *In*: ANDRADE, D. F. **Semiárido Brasileiro**. 1 ed. Belo Horizonte: Poisson, 2019. p. 43-48. Disponível em: https://www.poisson.com.br/livros/semiario/volume3/Semiarido_vol3.pdf#page=43. Acesso em: 20 fev. 2023.
- ASAI, H.; SAMSON, B. K.; STEPHAN, H. M.; SONGYIKHANGSUTHOR, K.; HOMMA, K.; KIYONO, Y.; INOUE, Y.; SHIRAIWA, T.; HORIE, T. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos. **Field Crops Research**, [s.l.], v. 111, n. 1-2, p. 81-84, mar. 2009.
- ASHRAF, M. A. Waterlogging stress in plants: a review. **African Journal Of Agricultural Research**, [s.l.], v. 7, n. 13, p. 1976-1981, 5 abr. 2012.
- AZEEM, M.; HAYAT, R.; HUSSAIN, Q.; AHMED, M.; PAND, G.; TAHIRA, M. I.; IMRANE, M.; IRFANB, M.; HASSAN, M. Biochar improves soil quality and N₂-fixation

and reduces net ecosystem CO₂ exchange in a dryland legume-cereal cropping system. **Soil & Tillage Research**, [s.l.], v. 186, p. 172-182, mar. 2019.

BARACUHY, J. G. V.; FURTADO, D. A.; FRANCISCO, P. R. M. **Tecnologias de convivência com o Semiárido Brasileiro**. Campina Grande: EDUFPG, 2017. 130 p.
Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Paulo-Roberto-Francisco/publication/317084102_TECNOLOGIAS_DE_CONVIVENCIA_COM_O_SEMI_ARIDO_BRASILEIRO/links/5924a349aca27295a8c2b49e/TECNOLOGIAS-DE-CONVIVENCIA-COM-O-SEMIARIDO-BRASILEIRO.pdf. Acesso em: 18 fev. 2023.

BARGMANN, I.; MARTENS, R.; RILLIG, M. C.; KRUSE, A.; KÜCKE, M. Hydrochar amendment promotes microbial immobilization of mineral nitrogen. **Journal Of Plant Nutrition And Soil Science**, [s.l.], v. 177, n. 1, p. 59-67, 15 nov. 2014a.

BARGMANN, I.; RILLIG, M. C.; BUSS, W.; KRUSE, A.; KUECKE, M. Hydrochar and Biochar Effects on Germination of Spring Barley. **Journal Of Agronomy And Crop Science**, [s.l.], v. 199, n. 5, p. 360-373, 2 abr. 2013.

BARGMANN, I.; RILLIG, M. C.; KRUSE, A.; GREEF, J.; KÜCKE, M. Effects of hydrochar application on the dynamics of soluble nitrogen in soils and on plant availability. **Journal Of Plant Nutrition And Soil Science**, [s.l.], v. 177, n. 1, p. 48-58, 19 nov. 2014b.

BILIAS, F.; KALDERIS, D.; RICHARDSON, C.; BARBAYIANNIS, N.; GASPARATOS, D. Biochar application as a soil potassium management strategy: a review. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 858, p. 159782, fev. 2023.

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.

BROWN, T. R.; WRIGHT, M. M.; BROWN, R. C. Estimating profitability of two biochar production scenarios: slow pyrolysis vs fast pyrolysis. **Biofuels, Bioproducts And Biorefining**, [s.l.], v. 5, n. 1, p. 54-68, 7 dez. 2010.

BUTNAN, S.; DEENIK, J. L.; TOOMSAN, B.; ANTAL, M. J.; VITYAKON, P. Biochar characteristics and application rates affecting corn growth and properties of soils contrasting in texture and mineralogy. **Geoderma**, [s.l.], v. 237-238, p. 105-116, jan. 2015.

CHEN, S.; LI, J.; SUN, J.; ZHONG, Q.; HU, D.; CHENG, D. “Diminishing returns” and leaf area-biomass scaling of ferns in subtropical ecosystems. **Frontiers In Plant Science**, Denmark, v. 14, p. 01-10, 27 jun. 2023.

CHOJNACKA, K.; SKRZYPCZAK, D.; SZOPA, D.; IZYDORCZYK, G.; MOUSTAKAS, K.; WITEK-KROWIAK, A. Management of biological sewage sludge: fertilizer nitrogen recovery as the solution to fertilizer crisis. **Journal Of Environmental Management**, [s.l.], v. 326, p. 116602, jan. 2023.

CHU, Q.; XUE, L.; SINGH, B. P.; YU, S.; MÜLLER, K.; WANG, H.; FENG, Y.; PAN, G.; ZHENG, X.; YANG, L. Sewage sludge-derived hydrochar that inhibits ammonia volatilization, improves soil nitrogen retention and rice nitrogen utilization. **Chemosphere**, [s.l.], v. 245, p. 125558, abr. 2020.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Relatório de Insumos Agropecuários**. 2024. Disponível em:

<https://consultaweb.conab.gov.br/consultas/consultaInsumo.do;jsessionid=8169D69831E66CC29D038CADF53F4D55?method=acaoListarConsulta>. Acesso em: 13 nov. 2024.

CONG, M.; HU, Y.; SUN, X.; YAN, H.; YU, G.; TANG, G.; CHEN, S.; XU, W.; JIA, H. Long-term effects of biochar application on the growth and physiological characteristics of maize. **Frontiers In Plant Science**, [s.l.], v. 14, p. 01-15, 14 jun. 2023.

CROCE, R. Chlorophyll-Binding Proteins of Higher Plants and Cyanobacteria. In: EATON-RYE, J., TRIPATHY, B., SHARKEY, T. **Advances in Photosynthesis and Respiration**, Groningen, The Netherlands: Springer, Dordrecht, 2011, p. 127-149.

DAI, W.; WANG, X.; ZHUANG, M.; SUN, J.; SHEN, Y.; XIA, Z.; WU, T.; JIANG, R.; LI, A.; BI, F. Responses of photosynthesis-related genes in *Sargassum horneri* to high temperature stress. **Marine Pollution Bulletin**, [s.l.], v. 199, p. 115944, fev. 2024.

DASH, M.; THIYAGESHWARI, S.; SELVI, D.; RAJAN, K.; V, H. J. K. A controlled experiment to verify the effect of magnesium fertilizers on soil pH and available soil nutrients in acid soil of Nilgiris, India. **Journal Of Applied And Natural Science**, [s.l.], v. 15, n. 3, p. 1119-1126, 19 set. 2023.

DAVID, A. O. Restoration of Soil Organic Carbon a Reliable Sustenance for a Healthy Ecosystem. In: TURAN, M.; YILDIRIM, E. **New Generation of Organic Fertilizers**, London, UK: IntechOpen, 2022, p. 1-15.

DEMPSTER, D. N.; GLEESON, D. B.; SOLAIMAN, Z. M.; JONES, D. L.; MURPHY, D. V. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with Eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil. **Plant And Soil**, [s.l.], v. 354, n. 1-2, p. 311-324, 30 nov. 2011.

DIAO, T.; LIU, R.; MENG, Q.; SUN, Y. Microplastics derived from polymer-coated fertilizer altered soil properties and bacterial community in a Cd-contaminated soil. **Applied Soil Ecology**, [s.l.], v. 183, p. 104694, mar. 2023.

DING, Y.; LIU, Y.; LIU, S.; LI, Z.; TAN, X.; HUANG, X.; ZENG, G.; ZHOU, L.; ZHENG, B. Biochar to improve soil fertility. A review. **Agronomy For Sustainable Development**, France, v. 36, n. 2, p. 1-18, 30 mai. 2016.

DOMINATI, Estelle; PATTERSON, Murray; MACKAY, Alec. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. **Ecological economics**, [s.l.], v. 69, n. 9, p. 1858-1868, 2010.

DOMINGUES, R. R.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A.; SPOKAS, K. A.; MELO, L. C. A.; TRUGILHO, P. F.; VALENCIANO, M. N.; SILVA, C. A. Enhancing Cation Exchange Capacity of Weathered Soils Using Biochar: feedstock, pyrolysis conditions and addition rate. **Agronomy**, [s.l.], v. 10, n. 6, p. 824, 11 jun. 2020.

EBRAHIMI, M.; FRIEDL, J.; VAHIDI, M.; ROWLINGS, D. W.; BAI, Z.; DUNN, K.; O'HARA, I. M.; ZHANG, Z. Effects of hydrochar derived from hydrothermal treatment of

sludge and lignocellulose mixtures on soil properties, nitrogen transformation, and greenhouse gases emissions. **Chemosphere**, [s.l.], v. 307, p. 135792, nov. 2022.

ELIASSON, K.; WEST, C. D.; CROFT, S. A.; GREEN, J. M. H. A spatially explicit approach to assessing commodity-driven fertilizer use and its impact on biodiversity. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 382, p. 135195, jan. 2023.

EL-NAGGAR, A.; SHAHEEN, S. M.; OK, Y. S.; RINKLEBE, J. Biochar affects the dissolved and colloidal concentrations of Cd, Cu, Ni, and Zn and their phytoavailability and potential mobility in a mining soil under dynamic redox-conditions. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 624, p. 1059-1071, maio 2018.

EMBRAPA. Guia Prático para Interpretação de Resultados de Análises de Solo. 1. ed. Aracaju, SE: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1042994/guia-pratico-para-interpretacao-de-resultados-de-analises-de-solos>. Acesso em: 20 jul. 2024.

FALOYE, O. T.; ALATISE, M. O.; AJAYI, A. E.; EWULO, B. S. Effects of biochar and inorganic fertiliser applications on growth, yield and water use efficiency of maize under deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 217, p. 165-178, 2019.

FAN, P.; LI, J.; CHEN, P.; WEI, D.; ZHANG, Q.; JIA, Z.; HE, C.; ULLAH, J.; WANG, Q.; RUAN, Y.. Mitigating soil degradation in continuous cropping banana fields through long-term organic fertilization: insights from soil acidification, ammonia oxidation, and microbial communities. **Industrial Crops And Products**, [s.l.], v. 213, p. 118385, 2024.

FANG, J.; GAO, B.; CHEN, J.; ZIMMERMAN, A. R. Hydrochars derived from plant biomass under various conditions: Characterization and potential applications and impacts. **Chemical Engineering Journal**, [s.l.], v. 267, p. 253 - 259, 2015.

FANG, J.; ZHAN, L.; OK, Y. S.; GAO, B. Minireview of potential applications of hydrochar derived from hydrothermal carbonization of biomass. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, [s.l.], v. 57, p. 15-21, 2018.

FORNES, F.; BELDA, R. M.; CÓRDOVA, P. F.; CEBOLLA-CORNEJO, J. Assessment of biochar and hydrochar as minor to major constituents of growing media for containerized tomato production. **Journal Of The Science Of Food And Agriculture**, [s.l.], v. 97, n. 11, p. 3675-3684, 2017.

FREGOLENTE, L. G.; MIGUEL, T. B. A. R.; DE CASTRO MIGUEL, E.; DE ALMEIDA MELO, C.; MOREIRA, A. B.; FERREIRA, O. P.; BISINOTI, M. C. Toxicity evaluation of process water from hydrothermal carbonization of sugarcane industry by-products. **Environmental Science and Pollution Research**, [s.l.], v. 26, p. 27579-27589, 2019.

FREGOLENTE, L. G.; DOS SANTOS, J. V.; VINCI, G.; PICCOLO, A.; MOREIRA, A. B.; FERREIRA, O. P.; BISINOTI, M. C.; SPACCINI, R. Insights on molecular characteristics of hydrochars by ¹³C-NMR and off-line TMAH-GC/MS and assessment of their potential use as plant growth promoters. **Molecules**, [s.l.], v. 26, n. 4, p. 1026, 2021.

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

FUNKE, A.; ZIEGLER, F. Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, London, v. 4, p. 160 - 177, 2010.

GEE, G. W.; BAUDER, J.W. Particle Size Analysis. *In*: KLUTE, A. **Methods of soil Analysis**. pt. 1. 2. ed. American Society of Agronomy, Madison, 1986. p. 383-411.

GILBERT, N. Environment: the disappearing nutrient. **Nature**, [s.l.], v. 461, n. 7265, p. 716-718, 7 out. 2009.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology And Biochemistry**, [s.l.], v. 48, n. 12, p. 909-930, dez. 2010.

GLASER, B.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. **Naturwissenschaften**, [s.l.], v. 88, n. 1, p. 37-41, jan. 2001.

GONDEK, K.; MIERZWA-HERSZTEK, M.; KOPEĆ, M.; MRÓZ, T. The Influence of Biochar Enriched with Magnesium and Sulfur on the Amount of Perennial Ryegrass Biomass and Selected Chemical Properties and Biological of Sandy Soil. **Communications In Soil Science And Plant Analysis**, [s.l.], v. 49, n. 11, p. 1257-1265, 16 abr. 2018.

GONZAGA, M. I. S.; MACKOWIAK, C. L.; COMERFORD, N. B.; MOLINE, E. F. V.; SHIRLEY, J. P.; GUIMARAES, D. V. Pyrolysis methods impact biosolids-derived biochar composition, maize growth and nutrition. **Soil And Tillage Research**, [s.l.], v. 165, p. 59-65, jan. 2017.

GOULDING, K.; MURRELL, T. S.; MIKKELSEN, R. L.; ROSOLEM, C.; JOHNSTON, J.; WANG, H.; ALFARO, M. A. Outputs: Potassium Losses from Agricultural Systems. *In*: Murrell, T.S.; Mikkelsen, R.L.; Sulewski, G.; Norton, R.; Thompson, M.L. **Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops**, Cham, Switzerland, Springer, 2020, p. 75-97.

GRASSI, G.; MAGNANI, F. Stomatal, mesophyll conductance and biochemical limitations to photosynthesis as affected by drought and leaf ontogeny in ash and oak trees. **Plant, Cell & Environment**, [s.l.], v. 28, n. 7, p. 834-849, 2005.

GÜLEÇ, F.; RIESCO, L. M. G.; WILLIAMS, O.; KOSTAS, E. T.; SAMSON, A.; LESTER, E. Hydrothermal conversion of different lignocellulosic biomass feedstocks – Effect of the process conditions on hydrochar structures. **Fuel**, [s.l.], v. 302, p. 121166, out. 2021.

GUO, H.; WHITE, J. C.; WANG, Z.; XING, B. Nano-enabled fertilizers to control the release and use efficiency of nutrients. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, [s.l.], v. 6, p. 77-83, 2018.

GUO, L.; YU, H.; KHARBACH, M.; WANG, J. The Response of Nutrient Uptake, Photosynthesis and Yield of Tomato to Biochar Addition under Reduced Nitrogen Application. **Agronomy**, Basel, v. 11, n. 8, p. 1598, 11 ago. 2021.

HAIDER, G.; KOYRO, H. W.; AZAM, F.; STEFFENS, D.; MÜLLER, C.; KAMMANN, C. Biochar but not humic acid product amendment affected maize yields via improving plant-soil moisture relations. **Plant And Soil**, Switzerland, v. 395, n. 1-2, p. 141-157, 21 out. 2014.

HAMMAD, H. M.; CHAWLA, M. S.; JAWAD, R.; ALHUQAIL, A.; BAKHAT, H. F.; FARHAD, W.; KHAN, F.; MUBEEN, M.; SHAH, A. N.; LIU, K. Evaluating the Impact of Nitrogen Application on Growth and Productivity of Maize Under Control Conditions. **Frontiers In Plant Science**, [s.l.], v. 13, p. 1-11, 18 maio 2022.

HASANUZZAMAN, M.; BHUYAN, M.; NAHAR, K.; HOSSAIN, M.; MAHMUD, J.; HOSEN, M.; MASUD, A.; MOUMITA; FUJITA, M. Potassium: a vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses. **Agronomy**, [s.l.], v. 8, n. 3, p. 1-29, 12 mar. 2018.

HE, C.; GIANNIS, A.; WANG, J. Conversion of sewage sludge to clean solid fuel using hydrothermal carbonization: hydrochar fuel characteristics and combustion behavior. **Applied Energy**, [s.l.], v. 111, p. 257-266, 2013.

HE, J.; NG, K.; QIN, L.; SHEN, Y.; RAHARDJO, H.; WANG, C. L.; KEW, H.; CHUA, Y. C.; POH, C. H.; GHOSH, S. Photosynthetic gas exchange, plant water relations and osmotic adjustment of three tropical perennials during drought stress and re-watering. **Plos One**, Singapore, v. 19, n. 2, p. 1-22, 28 fev. 2024.

HE, Y.; YAO, Y.; JI, Y.; DENG, J.; ZHOU, G.; LIU, R.; SHAO, J.; ZHOU, L.; LI, N.; ZHOU, X. Biochar amendment boosts photosynthesis and biomass in C3 but not C4 plants: a global synthesis. **GCB Bioenergy**, [s.l.], v. 12, n. 8, p. 605-617, 6 jul. 2020.

IBRAHIM, M.; KHAN, S.; HAO, X.; LI, G. Biochar effects on metal bioaccumulation and arsenic speciation in alfalfa (*Medicago sativa* L.) grown in contaminated soil. **International journal of environmental science and technology**, [s.l.], v. 13, p. 2467-2474, 2016.

ILYAS, M.; ARIF, M.; AKHTAR, K.; RIAZ, M.; WANG, H. Diverse feedstock's biochars as supplementary K fertilizer improves maize productivity, soil organic C and KUE under semiarid climate. **Soil and Tillage Research**, [s.l.], v. 211, p. 105015, 2021.

IPECE - INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Perfil básico municipal - 2017 - Fortaleza**. IPECE, 2017. Disponível em: https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Fortaleza_2017.pdf. Acesso em: 27 mar. 2023.

IPPOLITO, J. A.; DUCEY, T. F.; CANTRELL, K. B.; NOVAK, J. M.; LENTZ, R. D. Designer, acidic biochar influences calcareous soil characteristics. **Chemosphere**, [s.l.], v. 142, p. 184-191, 2016.

ISLAM, M. A.; LIMON, M. S. H.; ROMIĆ, M.; ISLAM, M. A. Hydrochar-based soil amendments for agriculture: a review of recent progress. **Arabian Journal Of Geosciences**, [s.l.], v. 14, n. 2, p. 102, jan. 2021.

JIAO, Q.; BAI, H.; ZADA, A.; HU, X. Intrinsic Signaling Pathways and key Regulatory Factors of Stomatal Development. **Journal Of Plant Biology**, [s.l.], v. 67, n. 3, p. 185-194, 29 abr. 2024.

JIN, W.; LIU, Z.; WANG, Q.; CHENG, Z.; ZHANG, Y.; CAO, N.; HU, W.; ZHOU, Z.; MENG, Y.; ZHAO, W. Straw-derived biochar incorporation improves seedcotton yield and fiber quality by optimizing photosynthetic carbon and nutrients partitioning and boll formation patterns. **Industrial Crops And Products**, [s.l.], v. 214, p. 118617, ago. 2024.

JOSEPH, S. D.; ARBESTAIN, M. C.; LIN, Y. MUNROE, P.; CHIA, C.; HOOK, JM; ZWIETEN, L. V.; KIMBER, S.; COWIE, A.; SINGH, B.; LEHMANN, J.; FOIDL, N.; SMERNIK, R. J.; AMONETTE, J. E. An investigation into the reactions of biochar in soil. **Australian Journal of Soil Research**, Australia, v. 48, n. 7, p. 501-515, 2010.

KAMBO, H. S.; DUTTA, A. A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 45, p. 359-378, 2015.

KARLOVA, R.; BOER, D.; HAYES, S.; TESTERINK, C. Root plasticity under abiotic stress. **Plant Physiology**, [s.l.], v. 187, n. 3, p. 1057-1070, 30 ago. 2021.

KELLER, L.; IDOWU, O. J.; ULERY, A.; OMER, M.; BREWER, C. E. Short-Term Biochar Impacts on Crop Performance and Soil Quality in Arid Sandy Loam Soil. **Agriculture**, Basel, v. 13, n. 4, p. 782, 29 mar. 2023.

KHASANOV, S.; KULMATOV, R.; LI, F.; VAN AMSTEL, A.; BARTHOLOMEUS, H.; ASLANOV, I.; SULTONOV, K.; KHOLOV, N.; LIU, H.; CHEN, G. Impact assessment of soil salinity on crop production in Uzbekistan and its global significance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s.l.], v. 342, p. 108262, 2023.

KHOSRAVI, A.; YUAN, Y.; LIU, Q.; ZHENG, H.; HASHEMI, M.; TANG, Y.; XING, B. Hydrochars as slow-release phosphorus fertilizers for enhancing corn and soybean growth in an agricultural soil. **Carbon Research**, [s.l.], v. 3, n. 1, p. 7, 24 jan. 2024.

KHOSRAVI, A.; ZHENG, H.; LIU, Q.; HASHEMI, M.; TANG, Y.; XING, B. Production and characterization of hydrochars and their application in soil improvement and environmental remediation. **Chemical Engineering Journal**, [s.l.], v. 430, p. 133142, fev. 2022.

KIMMEL, K.; FUREY, G. N.; HOBBIE, S. E.; ISBELL, F.; TILMAN, D.; REICH, P. B. Diversity-dependent soil acidification under nitrogen enrichment constrains biomass productivity. **Global Change Biology**, [s.l.], v. 26, n. 11, p. 6594-6603, 18 set. 2020.

KLOSS, S.; ZEHETNER, F.; DELLANTONIO, A.; HAMID, R.; OTTNER, F.; LIEDTKE, V.; SCHWANNINGER, M.; GERZABEK, M. H.; SOJA, G. Characterization of slow pyrolysis biochars: effects of feedstocks and pyrolysis temperature on biochar properties.

Journal of environmental quality, [s.l.], v. 41, n. 4, p. 990-1000, 2012.

KLOSS, S.; ZEHETNER, F.; WIMMER, B.; BUECKER, J.; REMPT, F.; SOJA, G. Biochar application to temperate soils: effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 177, n. 1, p. 3-15, 2014.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. *In*: KLUTE, A. **Methods of Soil Analysis. pt. 1. Physical and Mineralogical Methods**. 2. ed. American Society of Agronomy, Madison, 1986. Cap. 26, p. 635-662.

KUMAR, N.; SAMOTA, S. R.; VENKATESH, K.; TRIPATHI, S. C. Global trends in use of nano-fertilizers for crop production: advantages and constraints - A review. **Soil And Tillage Research**, [s.l.], v. 228, p. 105645, abr. 2023.

LAL, R. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. **Sustainability**, [s.l.], v. 7, n. 5, p. 5875-5895, 2015.

LAHORI, A. H.; AHMED, S. R.; MIERZWA-HERSZTEK, M.; AFZAL, M.; AFZAL, A.; BANO, S.; MUHAMMAD, M. T.; AQSA, A.; VAMBOL, V.; VAMBOL, S. Comparative role of charcoal, biochar, hydrochar and modified biochar on bioavailability of heavy metal(loid)s and machine learning regression analysis in alkaline polluted soil. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 930, p. 172810, jun. 2024.

LEE, Y. L.; AHMED, O. H.; WAHID, S. A.; AZIZ, Z. F. A. Biochar Tablets with and without Embedded Fertilizer on the Soil Chemical Characteristics and Nutrient Use Efficiency of *Zea mays*. **Sustainability**, Basel, v. 13, n. 9, p. 4878, 27 abr. 2021.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. 2 ed. New York: Routledge, 2015. 944 p.

LI, F.; JIANG, Z.; JI, W.; CHEN, Y.; MA, J.; GUI, X.; ZHAO, J.; ZHOU, C. Effects of hydrothermal carbonization temperature on carbon retention, stability, and properties of animal manure-derived hydrochar. **International Journal Of Agricultural And Biological Engineering**, [s.l.], v. 15, n. 1, p. 124-131, 2022.

LIBRA, J. A.; RO, K. S.; KAMMANN, C.; FUNKE, A.; BERGE, N. D.; NEUBAUER, Y.; TITIRICI, M. M.; FÜHNER, C.; BENS, O.; KERN, J.; EMMERICH, K. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. **Biofuels**, [s.l.], v. 2, n. 1, p. 71-106, 2011.

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

LIU, C.; WANG, Q.; MÄKELÄ, A.; HÖKKÄ, H.; PELTONIEMI, M.; HÖLTTÄ, T. A model bridging waterlogging, stomatal behavior and water use in trees in drained peatland. **Tree Physiology**, [s.l.], v. 42, n. 9, p. 1736-1749, 6 abr. 2022.

- LÓPEZ-NORONHA, R.; SOUZA, Z. M.; SOARES, M. D. R.; CAMPOS, M. C. C.; FARHATE, C. V. V.; OLIVEIRA, S. R. M. Soil carbon stock in archaeological black earth under different land use systems in the Brazilian Amazon. **Agronomy Journal**, [s.l.], v. 112, n. 5, p. 4437-4450, 2020.
- LUO, Y.; CHEN, J. L.; REYNOLDS, J. F.; FIELD, C. B.; MOONEY, H. A. Disproportional increases in photosynthesis and plant biomass in a Californian grassland exposed to elevated CO₂: a simulation analysis. **Functional Ecology**, [s.l.], v. 11, n. 6, p. 696-704, out. 1997
- LYZENGA, W. J.; LIU, Z.; OLUKAYODE, T.; ZHAO, Y.; KOCHIAN, L. V.; HAM, B. Getting to the roots of N, P, and K uptake. **Journal Of Experimental Botany**, USA, v. 74, n. 6, p. 1784-1805, 27 jan. 2023.
- MAOKA, Takashi. Carotenoids as natural functional pigments. **Journal Of Natural Medicines**, [s.l.], v. 74, n. 1, p. 1-16, 1 out. 2019.
- MASHWANI, Z.; YOUNAS, Z.; RAHMAN, U.; IKRAM, M.; RAJA, N. I. Biochar and micronutrients availability: problem and future prospects. *In*: FAHAD, S.; ADNAN, M.; ZHOU, R.; NAWAZ, T.; SAUD, S. **Biochar-Assisted Remediation Of Contaminated Soils Under Changing Climate**, [s.l.], 2024, p. 101-127.
- MATOS, T. T. S.; FORNARI, M. R.; MANGRICH, A. S.; SCHULTZ, J.; BATISTA, E. M. C. C.; RIBEIRO, R. O. C.; ROMÃO, L. P. C.; YAMAMOTO, C. I.; GRASEL, F. S.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; BITTENCOURT, J. A. Low temperature production of biochars from different biomasses: Effect of static and rotary lab reactors and application as soil conditioners. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s.l.], v. 9, n. 4, p. 105472, 2021.
- MAU, V.; ARYE, G.; GROSS, A. Wetting properties of poultry litter and derived hydrochar. **Plos One**, Australia, v. 13, n. 10, p. 1-15, 26 out. 2018.
- MAZOYER, M.; ROUDART, L. **História das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea**. São Paulo: Editora da UNESP; Brasília, DF: NEAD, 2010.
- MENDES, J. S.; CHAVES, L. H. G.; FERNANDES, J. D.; TITO, G. A.; GUERRA, H. O. C. Development and production of maize as a function of biochar rates. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 42, n. 62, p. 3707-3720, 8 out. 2021.
- MENDONÇA, E. S.; MATOS, E.S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa, Minas Gerais, Departamento de Solos, UFV, 2005.
- MEURER, E. J. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 2, p. 65-91.
- MILLALEO, R.; DIAZ, M. R.; IVANOV, A. G.; MORA, M. L.; ALBERDI, M. MANGANESE AS ESSENTIAL AND TOXIC ELEMENT FOR PLANTS: TRANSPORT, ACCUMULATION AND RESISTANCE MECHANISMS. **Journal Of Soil Science And Plant Nutrition**, [s.l.], v. 10, n. 4, p. 470-481, 2010.

MINATO, E. A.; BESEN, M. R.; CASSIM, B. M. A. R.; MAZZI, F. L.; INOUE, T. T.; BATISTA, M. A. Modeling of Nitrogen Losses Through Ammonia Volatilization in Second-season Corn. **Communications In Soil Science And Plant Analysis**, [s.l.], v. 50, n. 21, p. 2733-2741, 21 out. 2019.

MOHAN, D.; ABHISHEK, K.; SARSWAT, A.; PATEL, M.; SINGH, P.; PITTMAN, C. U. Biochar production and applications in soil fertility and carbon sequestration - a sustainable solution to crop-residue burning in India. **RSC advances**, [s.l.], v. 8, n. 1, p. 508-520, 2018.

MOHAN, D.; SARSWAT, A.; OK, Y. S.; PITTMAN, C. U. Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent - A critical review. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 160, p. 191-202, 2014.

NASCIMENTO, C. M.; MENDES, W. S.; SILVERO, N. E. Q.; POPPIEL, R. B.; SAYÃO, V. M.; DOTTO, A. C.; SANTOS, N. V.; AMORIM, M. T. A.; DEMATTÊ, J. A. M. Soil degradation index developed by multitemporal remote sensing images, climate variables, terrain and soil attributes. **Journal Of Environmental Management**, [s.l.], v. 277, p. 111316, 2021.

NASCIMENTO, I. V.; FREGOLENTE, L. G.; PEREIRA, A. P. A; NASCIMENTO, NASCIMENTO, C. D. V.; MOTA, J. C. A.; FERREIRA, O. P.; SOUSA, H. H. F.; SILVA, D. G. G.; SIMÕES, L. R.; SOUZA FILHO, A.G. Biochar as a carbonaceous material to enhance soil quality in drylands ecosystems: a review. **Environmental Research**, [s.l.], v. 233, p. 116489, set. 2023.

NIKLAS, K. J.; ENQUIST, B. J. On the Vegetative Biomass Partitioning of Seed Plant Leaves, Stems, and Roots. **The American Naturalist**, [s.l.], v. 159, n. 5, p. 482-497, mai. 2002.

NIZAMUDDIN, S.; BALOCH, H. A.; GRIFFIN, G. J.; MUBARAK, N. M.; BHUTTO, A. W.; ABRO, R.; MAZARI, S. A.; ALI, B. S. An overview of effect of process parameters on hydrothermal carbonization of biomass. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 73, p. 1289-1299, jun. 2017.

NOGUEIRA, F. R. B.; SIMÕES, S. V. D. Uma abordagem sistêmica para a agropecuária e a dinâmica evolutiva dos sistemas de produção no Nordeste semi-árido. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 22, n. 2, p. 1-6, abr.-jun., 2009.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F.N. Fósforo. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**, Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 471-550.

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

PAN-Brasil. **Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca**: PAN-Brasil. 2004. In: Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. Disponível em:

https://antigo.mma.gov.br/estruturas/sedr_desertif/_arquivos/pan_brasil_portugues.pdf.
Acesso em: 17 out. 2024.

PARIYAR, P.; KUMARI, K.; JAIN, M. K.; JADHAO, P. S. Evaluation of change in biochar properties derived from different feedstock and pyrolysis temperature for environmental and agricultural application. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 713, p. 136433, abr. 2020.

PEREIRA, M. O.; NAVROSKI, M. C.; LOPES, M. C.; PEREIRA, A. M. M.; NASCIMENTO, B.; LOVATEL, Q. C.; FONSECA, P. H.T.; SCHILISTING, T.; ARRUDA, L. M.; ANDRADE, R. S. Influência da variação luminosa em *Cedrela fissilis*. **Engenharia Florestal: Desafios, Limites e Potencialidade**, [s.l.], p. 519-528, 2020.

PIMENTA, A. S.; MIRANDA, N. O.; CARVALHO, M. A. B.; SILVA, G. G. C.; OLIVEIRA, E. M. M. Effects of biochar addition on chemical properties of a sandy soil from northeast Brazil. **Arabian Journal Of Geosciences**, [s.l.], v. 12, n. 3, p. 1270, 19 jan. 2019.

PREMALATHA, R. P.; BINDU, J. P.; NIVETHA, E.; MALARVIZHI, P.; MANORAMA, K.; PARAMESWARI, E.; DAVAMANI, V. A review on biochar's effect on soil properties and crop growth. **Frontiers In Energy Research**, India, v. 11, p. 1, 30 jun. 2023.

PRUTHVIRAJ, N.; MURALI, K.; CHAITANYA, A.; HARISH, M. C.; KARTHIK, A. N. "Exploring the Dynamics of Nitrogen from Conventional Manures in the Soil Plant Atmosphere Continuum: a comprehensive review". **Communications In Soil Science And Plant Analysis**, [s.l.], v. 55, n. 11, p. 1690-1701, 3 mar. 2024.

QIAN, X.; LI, Q.; CHEN, H.; ZHAO, L.; WANG, F.; ZHANG, Y.; ZHANG, J.; MÜLLER, C.; YI, Z. Enhancing Soil Nitrogen Retention Capacity by Biochar Incorporation in the Acidic Soil of Pomelo Orchards: the crucial role of ph. **Agronomy**, Basel, v. 13, n. 8, p. 2110, 11 ago. 2023.

RAIJ, B. V.; DE ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. How Plants Absorb Nutrients from the Soil. **Soil, Plant And Atmosphere**, [s.l.], p. 313-330, 17 ago. 2020.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; VENEGAZ, V. H. A. 5ª Aproximação - **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa: Editora UFV, 1999.

RO, K. S.; NOVAK, J. M.; JOHNSON, M. G.; SZOGI, A. A.; LIBRA, J. A.; SPOKAS, K. A.; BAE, S. Leachate water quality of soils amended with different swine manure-based amendments. **Chemosphere**, [s.l.], v. 142, p. 92-99, jan. 2016.

SAIFULLAH.; DAHLAWI, S.; NAEEM, A.; RENGEL, Z.; NAIDU, R. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: challenges and opportunities. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 625, p. 320-335, jun. 2018.

- SALDANHA, E. C. M.; ROCHA, M. E. L.; ARAUJO, J. L. S.; ALVES, J. D. N.; MARIANO, D. C.; OKUMURA, R. S. Adubação fosfatada na cultura do milho no nordeste paraense. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Londrina, v. 16, n. 4, p. 441-448, 8 mar. 2018.
- SANTOS, F. D.; FANTINEL, R. A.; WEILER, E. B.; CRUZ, J. C. Fatores que afetam a disponibilidade de micronutrientes no solo. **Tecno-Lógica**, Santa Cruz do Sul, v. 25, n. 2, p. 272-278, 5 jul. 2021.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBREAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- SATO, M. K.; LIMA, H. V.; COSTA, A. N.; RODRIGUES, S.; MOONEY, S. J.; CLARKE, M.; PEDROSO, A. J. S.; MAIA, C. M. B. F. Biochar as a sustainable alternative to açai waste disposal in Amazon, Brazil. **Process Safety And Environmental Protection**, [s.l.], v. 139, p. 36-46, jul. 2020.
- SCHIMMELPFENNIG, S.; KAMMANN, C.; MOSER, G.; GRÜNHAGE, L.; MÜLLER, C. Changes in macro and micronutrient contents of grasses and forbs following *Miscanthus x giganteus* feedstock, hydrochar and biochar application to temperate grassland. **Grass And Forage Science**, [s.l.], v. 70, n. 4, p. 582-599, 5 fev. 2015.
- SCHLÜTER, U.; WEBER, A. P. M. Regulation and Evolution of C4Photosynthesis. **Annual Review Of Plant Biology**, [s.l.], v. 71, n. 1, p. 183-215, 29 abr. 2020.
- SETIAWAN, A.; ZAKARYA, M.; ALCHALIL, A.; NUR, T. Experimental Investigation and Simulation of Slow Pyrolysis Process of Arabica Coffee Agroindustry Residues in a Pilot-Scale Reactor. **Journal Of Ecological Engineering**, [s.l.], v. 23, n. 8, p. 259-268, 1 ago. 2022.
- SHAHID, M. K.; KASHIF, A.; CHOI, Y.; VARJANI, S.; TAHERZADEH, M. J.; ROUT, P. R. Circular bioeconomy perspective of agro-waste-based biochar. *In*: **Biomass, Biofuels, Biochemicals**. India: Elsevier, 2022. p. 223-243.
- SHI, Z.; WEN, M.; ZHAO, Y.; WANG, C. Vermitoxicity of aged biochar and exploring potential damage factors. **Environment International**, [s.l.], v. 172, p. 107787, fev. 2023.
- SHIBAEVA, T. G.; MAMAIEV, A. V.; SHERUDILO, E. G. Evaluation of a SPAD-502 Plus Chlorophyll Meter to Estimate Chlorophyll Content in Leaves with Interveinal Chlorosis. **Russian Journal Of Plant Physiology**, [s.l.], v. 67, n. 4, p. 690-696, jul. 2020.
- SHINDE, R.; SHAHI, D. K.; MAHAPATRA, P.; SINGH, C. S.; NAIK, S. Kumar; THOMBARE, N.; SINGH, A. K. Management of crop residues with special reference to the on-farm utilization methods: a review. **Industrial Crops And Products**, [s.l.], v. 181, p. 114772, jul. 2022.
- SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

SILVA F.G.; DUTRA W.F.; DUTRA A.F.; OLIVEIRA I.M.; FILGUEIRAS L.M.B.; MELO A.S. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em plantas de berinjela sob lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, p. 946-952, 2015.

SILVA, C. C.; MELO, C. A.; SOARES JUNIOR, F. H.; MOREIRA, A. B.; FERREIRA, O. P.; BISINOTI, M. C. Effect of the reaction medium on the immobilization of nutrients in hydrochars obtained using sugarcane industry residues. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 237, p. 213-221, ago. 2017.

SOHI, S.P.; KRULL, E.; LOPEZ-CAPEL, E.; BOL, R. A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil. In: SPARKS, D. L. **Advances In Agronomy**, Delaware, 2010, p. 47-82.

SOUSA, F. P.; FERREIRA, T. O.; MENDONÇA, E. S.; ROMERO, R.E.; OLIVEIRA, J. G. B. Carbon and nitrogen in degraded Brazilian semi-arid soils undergoing desertification. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s.l.], v. 148, p. 11-21, fev. 2012.

STEEN-OLSEN K.; WEINZETTEL, J.; CRANSTON, G.; ERCIN, A. E.; HERTWICH, E. G. Carbon, Land, and Water Footprint Accounts for the European Union: Consumption, Production, and Displacements through International Trade. **Environmental Science & Technology**, [s.l.], v. 46, n.20, p. 10883-10891, 2012.

STEVENSON, F. J. **Cycles of soil-carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur and micronutrients**. New York, John Wiley & Sons, 1986. 380p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2016.

TASKIN, E.; BUENO, C. C.; ALLEGRETTA, I.; TERZANO, R.; ROSA, A. H.; LOFFREDO, E. Multianalytical characterization of biochar and hydrochar produced from waste biomasses for environmental and agricultural applications. **Chemosphere**, [s.l.], v. 233, p. 422-430, out. 2019.

TÁVORA, G. S. G.; TURETTA, A. P. D.; SILVA, A. S.; SIMÕES, B. F. T.; NEHREN, U. Trade-offs and synergies in agricultural landscapes: a study on soil-related ecosystem services in the brazilian atlantic rainforest. **Environmental And Sustainability Indicators**, [s.l.], v. 16, p. 100205, dez. 2022.

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

TITIRICI, M. M.; WHITE, R. J.; FALCO, C.; SEVILLA, M. Black perspectives for a green future: hydrothermal carbons for environment protection and energy storage. **Energy & Environmental Science**, [s.l.], v. 5, n. 5, p. 6796, 2012.

TÓTH, V. R.; MÉSZÁROS, I.; VERES, S.; NAGY, J. Effects of the available nitrogen on the photosynthetic activity and xanthophyll cycle pool of maize in field. **Journal Of Plant Physiology**, [s.l.], v. 159, n. 6, p. 627-634, jan. 2002.

TRÄNKNER, M.; TAVAKOL, E.; JÁKLI, B. Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection. **Physiologia Plantarum**, Scandinavia, v. 163, n. 3, p. 414-431, 20 jun. 2018.

VINHA, A. P. C.; CARRARA, B. H.; SOUZA, E. F. S.; SANTOS, J. A. F.; ARANTES, S. A. C. M. ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM SOLOS DE REGIÕES TROPICAIS. **Nativa**, [s.l.], v. 9, n. 1, p. 30-35, 10 fev. 2021.

WAGNER, A.; KAUPENJOHANN, M. Suitability of biochars (pyro- and hydrochars) for metal immobilization on former sewage-field soils. **European Journal Of Soil Science**, [s.l.], v. 65, n. 1, p. 139-148, 25 set. 2013.

WANG, T.; ZHAI, Y.; ZHU, Y.; LI, C.; ZENG, G. A review of the hydrothermal carbonization of biomass waste for hydrochar formation: process conditions, fundamentals, and physicochemical properties. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 90, p. 223-247, jul. 2018.

WANG, S.; ZHENG, J.; WANG, Y.; YANG, Q.; CHEN, T.; CHEN, Y.; CHI, D.; XIA, G.; SIDDIQUE, K. H. M.; WANG, T. Photosynthesis, Chlorophyll Fluorescence, and Yield of Peanut in Response to Biochar Application. **Frontiers In Plant Science**, [s.l.], v. 12, p. 1-14, 31 mai. 2021.

WELLBURN, A. R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 144, p.307-314, 1994.

WERADUWAGE, S. M.; CHEN, J.; ANOZIE, F. C.; MORALES, A.; WEISE, S. E.; SHARKEY, T D. The relationship between leaf area growth and biomass accumulation in *Arabidopsis thaliana*. **Frontiers In Plant Science**, [s.l.], v. 6, p. 1-21, 9 abr. 2015.

XIONG, X.; LI, J.; SU, P.; DUAN, H.; SUN, L.; XU, S.; SUN, Y.; ZHAO, H.; CHEN, X.; DING, D. Genetic dissection of maize (*Zea mays* L.) chlorophyll content using multi-locus genome-wide association studies. **BMC Genomics**, [s.l.], v. 24, n. 1, p. 1-19, 10 jul. 2023.

XU, C. L.; LI, A.; XU, X.; YANG, Z.; WANG, G.; CHENG, Z.; ZHANG, S.; LI, T.; PU, Y.; LV, G. Co-hydrothermal carbonization of rape straw and industrial sewage sludge – Applications of hydrochar for N and P adsorptions and for agricultural/horticultural purposes. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 451, p. 142154, abr. 2024.

YADAV, S. P. S.; BHANDARI, S.; BHATTA, D.; POUDEL, A.; BHATTARAI, S.; YADAV, P.; GHIMIRE, N.; PAUDEL, P.; PAUDEL, P.; SHRESTHA, J. Biochar application: a sustainable approach to improve soil health. **Journal Of Agriculture And Food Research**, [s.l.], v. 11, p. 100498, mar. 2023.

YIN, S.; ZHANG, X.; SUO, F. YOU, X.; YUAN, Y.; CHENG, Y.; ZHANG, C. LI, Y. Effect of biochar and hydrochar from cow manure and reed straw on lettuce growth in an acidified soil. **Chemosphere**, [s.l.], v. 298, p. 134191, jul. 2022.

ZHANG, L.; JING, Y.; CHEN, C.; XIANG, Y.; RASHTI, M. R.; LI, Y.; DENG, Q.; ZHANG, R. Effects of biochar application on soil nitrogen transformation, microbial

functional genes, enzyme activity, and plant nitrogen uptake: a meta-analysis of field studies. **GCB Bioenergy**, [s.l.], v. 13, n. 12, p. 1859-1873, 9 out. 2021.

ZHANG, Y.; YE, C.; SU, Y.; PENG, W.; LU, R.; LIU, Y.; HUANG, H.; HE, X.; YANG, M.; ZHU, S. Soil Acidification caused by excessive application of nitrogen fertilizer aggravates soil-borne diseases: evidence from literature review and field trials. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s.l.], v. 340, p. 108176, dez. 2022.

ZHANG, H.; VORONEY, R. P.; PRICE, G.W. Effects of temperature and processing conditions on biochar chemical properties and their influence on soil C and N transformations. **Soil Biology And Biochemistry**, [s.l.], v. 83, p. 19-28, abr. 2015.

ZHANG, Y.; WANG, J.; FENG, Y. The effects of biochar addition on soil physicochemical properties: a review. **Catena**, [s.l.], v. 202, p. 105284, jul. 2021.

ZHAO, R.; COLES, N.; KONG, Z.; WU, J. Effects of aged and fresh biochars on soil acidity under different incubation conditions. **Soil And Tillage Research**, [s.l.], v. 146, p. 133-138, mar. 2015.

ZHAO, N.; YU, G.; WANG, Q.; WANG, R.; ZHANG, J.; LIU, C.; HE, N. Conservative allocation strategy of multiple nutrients among major plant organs: from species to community. **Journal Of Ecology**, [s.l.], v. 108, n. 1, p. 267-278, 7 ago. 2019.

**APÊNDICE A – RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA OS ATRIBUTOS
ANALISADOS**

Tabela 8 – Resumo da análise de variância (ANOVA) para as variáveis fotossíntese líquida (*A*), condutância estomática (*gs*), concentração intercelular de CO₂ (*Ci*), eficiência do fotossistema II (*Fv/Fm*), taxa de transporte de elétrons (*ETR*), transpiração (*E*), concentração intercelular de CO₂ (*Ci*), relação entre a quantidade de CO₂ externa e interna (*Ci/Ca*), eficiência instantânea do uso da água (*A/E*), eficiência de carboxilação (*A/Ci*), índice SPAD, clorofila *a* (*Clfa*), clorofila *b* (*Clfb*), clorofila total (*Clfa+b*) e carotenoides (*Car*).

Variáveis	Valor F	CV% ¹
<i>A</i>	4,61**	22,67
<i>gs</i>	3,33*	25,23
<i>Ci</i>	0,75 ^{ns}	21,99
<i>Fv/Fm</i>	5,37**	22,10
<i>ETR</i>	8,61**	17,80
<i>E</i>	3,80**	21,23
<i>Ci</i>	0,75 ^{ns}	21,99
<i>Ci/Ca</i>	0,75 ^{ns}	21,95
<i>A/E</i>	1,36 ^{ns}	28,29
<i>A/Ci</i>	0,92 ^{ns}	26,89
SPAD	8,07**	9,39
<i>Clfa</i>	5,82**	15,42
<i>Clfb</i> ²	7,24**	8,88
<i>Clfa+b</i>	6,03**	20,06
<i>Car</i>	6,20**	12,83

¹CV: Coeficiente de Variação; ²*Clfb* foi submetido à transformação Box-Cox para *Clfb*^{0,3}; ** e *: significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; ^{ns}: não significativo.

Fonte: autora.

Tabela 9 – Resumo da análise de variância (ANOVA) para as variáveis altura da planta (AP), diâmetro do colmo (DC), área foliar (AF), massa seca da raiz (MR), massa seca do colmo (MC), massa seca da folha (MF), massa seca da planta (MP), razão da massa da raiz (RMR), razão da massa do colmo (RMC) e razão da massa da folha (RMF).

Variáveis	Valor F	CV% ¹
AP	2,98*	27,28
DC	2,98*	27,28
AF	21,60**	25,57
MR	29,48**	26,08
MC	27,25**	28,09
MF	36,64**	21,11
MP	48,42**	19,41
RMR	3,76**	12,23
RMC	1,62 ^{ns}	11,85
RMF	12,31**	7,84

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

Fonte: autora.

Tabela 10 – Resumo da análise de variância (ANOVA) para os acúmulos de sódio (Na), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), nitrogênio (N), fósforo (P), ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn) e manganês (Mn) na biomassa foliar das plantas de milho.

Atributos	Valor F	CV% ¹
Na	10,96**	30,43
K	13,73**	28,55
Ca	8,84**	31,64
Mg	15,44**	48,54
N	20,72**	25,62
P	31,03**	21,17
Fe	18,55**	29,62
Cu	19,13**	25,42
Zn	5,26**	30,24
Mn	8,50**	29,74

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

Fonte: autora.

Tabela 11 – Resumo da análise de variância (ANOVA) para os atributos de fertilidade do solo pH, sódio (Na), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), nitrogênio (N), fósforo (P), carbono orgânico (CO), ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn), acidez potencial (H+Al), soma de bases (SB), CTC efetiva (t), CTC total (T), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%) e porcentagem de sódio trocável (PST) do solo cultivado com milho sob diferentes tratamentos envolvendo adubação com fertilizantes minerais, carvão hidrotérmico, carvão pirolítico e a mistura de cada um dos carvões com fertilizantes minerais.

Atributos	Valor F	CV% ¹
pH	111,66**	2,88
Na	1,84 ^{ns}	17,80
K	7,33**	29,45
Ca	0,48 ^{ns}	11,45
Mg	275,35**	7,40
N	5,17**	16,73
P	1,96 ^{ns}	20,12
CO ²	1,45 ^{ns}	40,35
Fe	0,78 ^{ns}	17,81
Cu ²	1,56 ^{ns}	18,42
Zn	1,02 ^{ns}	19,78
Mn	7,73**	7,24
H+Al	14,32**	24,17
SB	64,08**	7,92
t	28,59**	7,29
T	2,62*	10,91
V%	70,04**	7,08
m% ²	50,16**	33,89
PST	3,39*	20,55

¹CV: Coeficiente de Variação; ²CO, Cu e m% foram submetidos à transformação Box-Cox para CO^{0,3}, Cu^{0,3} e m^{0,3} + 0,5; ** e *: significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; ^{ns}: não significativo.
Fonte: autora.

**APÊNDICE B – MÉDIAS DAS VARIÁVEIS NÃO SIGNIFICATIVAS PELO TESTE F
DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA**

Tabela 12 – Médias obtidas por cada tratamento nas variáveis de trocas gasosas: concentração intercelular de CO₂ (Ci), relação entre a quantidade de CO₂ externa e interna (Ci/Ca), eficiência instantânea do uso da água (A/E), eficiência de carboxilação (A/Ci); na variável razão entre massa seca do colmo e massa seca total da planta (RMC) e nos atributos de fertilidade do solo: sódio (Na), cálcio (Ca), fósforo (P), carbono orgânico (CO), ferro (Fe), cobre (Cu) e zinco (Zn) que não foram significativos pelo teste F da ANOVA.

Variáveis	Tratamentos					
	T0	T1	T2	T3	T4	T5
Ci	179,80	216,03	202,54	178,80	188,67	205,76
Ci/Ca	0,45	0,54	0,51	0,45	0,47	0,52
A/E	5,36	6,17	7,36	7,33	7,83	6,60
A/Ci	0,10	0,13	0,14	0,12	0,13	0,13
RMC	0,24	0,28	0,25	0,27	0,26	0,28
Na	0,13	0,11	0,13	0,14	0,11	0,12
Ca	1,71	1,81	1,84	1,74	1,80	1,70
P	3,71	4,83	4,78	3,93	4,26	3,84
CO ¹	0,93	0,87	1,00	0,85	0,90	0,86
Fe	366,10	379,70	355,97	408,93	346,07	396,19
Cu ¹	0,60	0,70	0,70	0,67	0,61	0,54
Zn	1,11	1,23	1,22	1,02	1,25	1,08

Tratamentos: T0 – Controle; T1 – 100% FM; T2 – 100% CH; T3 – 100% CP; T4 – 50% FM + 50% CH; T5 – 50% FM + 50% CP. ¹: CO e Cu foram submetidos à transformação Box-Cox para CO^{0,3} e Cu^{0,3}.

Fonte: autora.