

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE

**INTERAÇÃO BIOCHAR E ADUBAÇÃO NA NUTRIÇÃO E CRESCIMENTO
INICIAL DE ERVA MATE (*Ilex paraguariensis* A. ST. HIL)**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

IGOR FELIPE ZAMPIER

**IRATI - PR
2023**

IGOR FELIPE ZAMPIER

**INTERAÇÃO BIOCHAR E ADUBAÇÃO NA NUTRIÇÃO E CRESCIMENTO
INICIAL DE ERVA MATE (*Ilex paraguariensis* A. ST. HIL)**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável dos Recursos Florestais, para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Fabrício William de Ávila - UNICENTRO

Orientador

Profa. Dra. Katia Cylene Lombardi - UNICENTRO

Coorientadora

IRATI - PR

2023

Catálogo na Publicação
Rede de Bibliotecas da UNICENTRO

Z26i Zampier, Igor Felipe
Interação biochar e adubação na nutrição e crescimento inicial de erva mate (*Ilex paraguariensis* A. ST. HIL) / Igor Felipe Zampier. -- Irati, 2023.
x, 53 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável dos Recursos Florestais, 2023.

Orientador: Fabrício William de Ávila
Coorientadora: Katia Cyrene Lombardi
Banca examinadora: Fabrício William de Ávila, Andre Eduardo Biscaia de Lacerda, João Ronaldo Freitas de Oliveira, Katia Cyrene Lombardi

Bibliografia

1. Biocarvão. 2. Condicionador de solo. 3. Nutrição mineral de plantas. 4. Nutrientes. 5. Elementos benéficos. 6. Contaminantes. I. Título. II. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais.

CDD 634.9

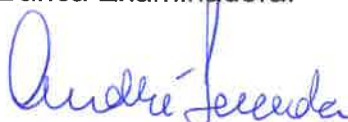
TERMO DE APROVAÇÃO

Defesa Nº 168

Igor Felipe Zampier

"INTERAÇÃO BIOCHAR E ADUBAÇÃO NA NUTRIÇÃO E CRESCIMENTO INICIAL DE ERVA MATE (*Ilex paraguariensis* A. ST. HIL)".

Dissertação aprovada em 20/06/2023, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, pela seguinte Banca Examinadora:



Dr. André Eduardo Biscaia de Lacerda
Embrapa Florestas
Primeiro Examinador



Prof. Dr. João Ronaldo Freitas de Oliveira
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Segundo Examinador



Profª. Dra. Kátia Cyrene Lombardi
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Terceira Examinadora



Prof. Dr. Fabricio William de Ávila
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Orientador e Presidente da Banca Examinadora

Irati - PR
2023

Dedico este trabalho aos meus filhos, João Miguel e Lorenzo, e aos meus alunos por acreditar que a educação é um caminho certo para a garantia do futuro melhor.

AGRADECIMENTOS

À Deus, supremo onipresente;

Ao meu orientador Professor Fabrício William de Ávila pela determinação de não ter me abandonado;

À minha coorientadora Professora Katia Cylene Lombardi, pelo incentivo e apoio;

À Erva-mate Bitumirim, pela colaboração;

À UNICENTRO e ao Colégio Florestal de Irati, pela estrutura conhecimento;

Aos bolsistas e alunos do CEFEP e da UNICENTRO pela ajuda;

Ao Elisson Girardi pela determinação em concluir este trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.2. Objetivos Específicos.....	3
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
3.1 A erva-mate.....	4
3.2. Adubação na erva-mate.....	6
3.3. Macronutrientes e micronutrientes.....	8
3.4. Cobertura do solo e matéria orgânica.....	11
3.5. Biochar.....	12
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
5.1 Avaliação de crescimento.....	21
5.2. Teores foliares de nutrientes, elementos benéficos e contaminantes.....	32
6. CONCLUSÕES.....	45
7. REFERÊNCIAS.....	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de ocorrência natural da erva-mate.....4

Figura 2. Imagem georreferenciada da localização do viveiro de produção de mudas de espécies florestais do Centro Estadual Florestal de Educação Profissional Presidente Costa e Silva (CEFEP), situado na periferia da área urbana do município de Irati, região Centro-Sul do estado do Paraná, Brasil (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).....16

Figura 3. Imagens realizadas durante a instalação e condução do experimento: preparo do substrato (mistura do biochar com o solo nas diferentes proporções), enchimento dos vasos com o substrato, instalação do experimento (transplântio das mudas para os vasos) e condução das plantas de erva-mate na casa de vegetação do viveiro do Colégio Florestal (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).....19

Figura 4. Incremento em altura de parte aérea (A) e diâmetro de coleto (B) em plantas de erva-mate avaliadas em quatro épocas (0, 60, 120 e 180 DAT), em função de tratamentos de adubação (sem e com adubação do substrato) (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).....25

Figura 5. Pesos úmido e seco de folhas (Fig. A e B), caule + ramos (Fig. C e D), parte aérea (folhas + caule + ramos) (Fig. E e F) e raiz (Fig. G e H), em erva-mate avaliada aos 180 DAT, em função de tratamentos de adubação (sem e com) e de doses de biochar (0, 10, 30 e 50%) (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).....28

Figura 6. Teores foliares de macronutrientes (K, P, Ca, Mg, S e N), determinada em plantas de erva-mate aos 180 DAT, em função de tratamentos de adubação (sem e com) e de doses de biochar (0, 10, 30 e 50%) (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).....34

Figura 7. Teores foliares de micronutrientes (Mn, B, Mo, Zn, Cu, Ni e Fe), em erva mate avaliada aos 180 DAT, em função de tratamentos de adubação (sem e com) e de doses de biochar (0, 10, 30 e 50%) (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).....38

Figura 8. Teores foliares de elementos benéficos (Al, Si, Se, V e Na), em erva-mate avaliada aos 180 DAT, em função de tratamentos de adubação (sem e com) e de doses de biochar (0, 10, 30 e 50%) (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).....41

Figura 9. Teores foliares de contaminantes (Cd, Cr e Pb), em erva-mate avaliada aos 180 DAT, em função de tratamentos de adubação (sem e com) e de doses de

biochar (0, 10, 30 e 50%) (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).....43

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Resultado da análise química e granulométrica do solo realizada previamente à instalação do experimento (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).....17
- Tabela 2.** Resultado da análise físico-química do biochar (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).....18
- Tabela 3.** Quadrados médios da análise de variância (ANOVA) para altura de parte aérea e diâmetro de coleto em plantas de erva-mate avaliadas aos 0, 60, 120 e 180 DAT, em função dos fatores “adubação” e “biochar” e da interação entre os fatores “adubação × biochar” (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).....21
- Tabela 4.** Altura de parte aérea (em centímetros) e diâmetro de coleto (em milímetros) em plantas de erva-mate avaliadas em quatro épocas (0, 60, 120 e 180 DAT), em função de tratamentos de adubação (sem e com adubação do substrato) e tratamentos de proporções de substituição do solo pelo biochar na composição do substrato (0, 10, 30 e 50% de biochar) (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).....22
- Tabela 5.** Quadrados médios da análise de variância (ANOVA) para pesos úmido e seco de folhas, caule + ramos, parte aérea (folhas + caule + ramos) e raiz, em plantas de erva-mate avaliadas aos 180 DAT, em função dos fatores “adubação” e “biochar” e da interação entre os fatores “adubação × biochar” (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).....27
- Tabela 6.** Quadrados médios da análise de variância (ANOVA) para teores foliares de macronutrientes (K, P, Ca, Mg, S e N) e micronutrientes (Mn, B, Mo, Zn, Cu, Ni e Fe), em plantas de erva-mate avaliadas aos 180 DAT, em função dos fatores “adubação” e “biochar” e da interação entre os fatores “adubação × biochar” (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).....33
- Tabela 7.** Quadrados médios da análise de variância (ANOVA) para teores foliares de elementos benéficos (Al, Si, Se, V e Na) e contaminantes (Cd, Cr e Pb), em plantas de erva-mate avaliadas aos 180 DAT, em função dos fatores “adubação” e “biochar” e da interação entre os fatores “adubação × biochar” (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).....40

RESUMO

ZAMPIER, I. F. **Interação biochar e adubação na nutrição e crescimento inicial de erva mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil).**

Esse estudo objetivou estudar os efeitos da adubação mineral associada com doses de biochar (0, 10, 30 e 50% em mistura com o solo) sobre o crescimento inicial e o estado nutricional da erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil.). O biochar foi obtido da pirólise de uma mistura de resíduos de pinus e eucalipto oriundos de indústrias madeireiras da região. Realizaram-se medições de diâmetro de coleto e altura de parte aérea das plantas aos 0, 60, 120 e 180 dias após plantio. No final, as plantas foram colhidas e avaliaram-se a produção de biomassa de parte aérea e radicular e determinaram-se os teores foliares de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), micronutrientes (Mn, B, Mo, Zn, Cu, Ni e Fe), elementos benéficos (Al, Si, Se, V e Na) e contaminantes (Cd, Cr e Pb). A adubação mineral NPK de plantio foi essencial para o adequado crescimento da erva-mate. Por outro lado, não houve efeitos positivos do biochar sobre o crescimento da erva-mate, independentemente da realização da adubação. A dose de 10% de biochar não afetou o crescimento das plantas; porém, as doses de 30 e 50% causaram toxidez. Os teores foliares de K, Ca, Mg, S, B e Mo foram aumentados com as doses de biochar, enquanto o teor foliar de Mn foi diminuído. Ainda, as doses de biochar reduziram os teores foliares de Al e Cd. Assim, o biochar utilizado neste experimento, pelo menos a curto prazo, não substitui a adubação mineral, nem de forma parcial, para o adequado crescimento inicial da erva-mate. Contudo, a sua utilização em dosagens de até 10%, visando o condicionamento do solo, não traz prejuízo para o desenvolvimento da erva-mate, além de apresentar potencial de incrementar os teores foliares de parte dos nutrientes e diminuir o teor foliar do contaminante Cd.

Palavras-chave: biocarvão, condicionador de solo, nutrição mineral de plantas, nutrientes, elementos benéficos, contaminantes.

ABSTRACT

This study aimed to study the effects of NPK mineral fertilization associated with doses of biochar (0, 10, 30 and 50% mixed with soil) on the initial growth and nutritional status of yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil.). The biochar was obtained from the pyrolysis of a mixture of pine and eucalyptus residues from wood industries of the region. Measurements of stem diameter and shoot height were taken at 0, 60, 120 and 180 days after planting. In the end, the plants were harvested, and the production of shoot and root biomass was evaluated. Foliar contents of macronutrients (N, P, K, Ca, Mg and S), micronutrients (Mn, B, Mo, Zn, Cu, Ni and Fe), beneficial elements (Al, Si, Se, V and Na) and contaminants (Cd, Cr and Pb) were determined. NPK mineral fertilization at planting was essential for adequate growth of yerba mate. On the other hand, there were no positive effects of biochar on the yerba mate growth, regardless of fertilization. The 10% biochar dose did not affect plant growth; however, doses of 30 and 50% caused toxicity. Foliar contents of K, Ca, Mg, S, B and Mo were increased with biochar doses, while foliar content of Mn was decreased. Also, biochar doses reduced foliar Al and Cd contents. Thus, the biochar used in this experiment, at least in the short term, does not replace mineral fertilization, even partially, for adequate initial growth of yerba mate. However, its use in dosages up to 10%, aiming at soil conditioning, does not harm the development of yerba mate and has the potential to increase foliar contents of some nutrients and reduce foliar Cd content.

Keywords: biochar, soil conditioner, plant mineral nutrition, nutrients, beneficial elements, contaminants.

1. INTRODUÇÃO

A erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil.) é uma espécie arbórea nativa da América do Sul, que tem grande importância econômica, social e ambiental na região. Ela é cultivada principalmente na Argentina, Paraguai e Brasil, sendo usada para fazer bebidas como chimarrão, chá e tererê. Além disso, a erva-mate tem propriedades benéficas para a saúde, como antioxidantes, estimulantes e diurética, sendo usada também como matéria-prima de inúmeros produtos, como cosméticos, corantes e tinturas, apresentando potencial de mercado internacional.

A espécie se adapta bem aos solos ácidos e de baixa fertilidade natural da região subtropical da América do Sul, e que pode ser explorada de forma sustentável em sistemas agroflorestais. Entretanto, em cultivos comerciais, a adubação é uma prática importante para estimular o crescimento inicial da planta e melhorar a produtividade e a qualidade do produto colhido, que no caso da erva mate geralmente é formado por folhas e ramos finos.

Por outro lado, maior parte da cadeia produtiva da erva-mate enfrenta diversos desafios para se manter competitiva no mercado. Um deles é a baixa renda e o baixo nível tecnológico dos pequenos produtores rurais, que representam a maior parte do cultivo da espécie. Esses agricultores, muitas vezes, não dispõem de recursos financeiros e técnicos para realizar o adequado manejo da adubação, dentre outros tratamentos silviculturais, o que compromete sua sustentabilidade.

O biochar, também conhecido como biocarvão, é um material carbonizado obtido a partir da pirólise de resíduos orgânicos, como madeira, casca de arroz, esterco, entre outros. O uso do biochar na agricultura tem sido objeto de diversos estudos científicos, que buscam avaliar seus efeitos em diferentes culturas e condições edafoclimáticas. Ele pode ser usado como um condicionador de solo, melhorando suas propriedades físicas, químicas e biológicas. A literatura cita que o biochar pode promover o crescimento vegetal de várias maneiras, como aumentando a retenção de água e nutrientes, neutralizando a acidez, fornecendo carbono orgânico e estimulando a atividade microbiana do solo.

Sabe-se que a eficiência do biochar no crescimento das plantas depende

da origem do material que é pirolisado, da espécie vegetal que será cultivada e das condições edafoclimáticas. Na região Sul do Brasil, as florestas plantadas de pinus e eucalipto ocupam grandes áreas e sua exploração geram grandes quantidades de resíduos nas indústrias madeireiras, que potencialmente podem ser utilizados

na produção de biochar, resultando em menor custo de obtenção para os produtores de erva-mate da região.

Neste sentido, o possível uso de biochar oriundo de resíduos de pinus + eucalipto (galhos, fustes, etc.), visando substituir, mesmo que de forma parcial, a adubação mineral NPK de plantio, seria de grande relevância para os produtores de erva-mate da região Sul do Brasil. Porém, ainda são raros os resultados de pesquisas que buscaram avaliar de forma direta os efeitos do biochar na nutrição mineral da erva-mate. Ressalta-se que, além dos nutrientes de planta, o biochar pode também influenciar na absorção radicular de outros elementos, como os benéficos para o crescimento vegetal e os contaminantes.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar o crescimento inicial e o estado nutricional de plantas de erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil.) sob efeitos da adubação e de biochar obtido da pirólise de resíduos de pinus e eucalipto.

2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar o incremento de diâmetro de coleto e altura de parte aérea ao longo de 180 dias e determinar a produção de biomassa de folhas, caule+ramos e raízes em plantas de erva-mate, em função do fornecimento da adubação mineral NPK e de proporções de biochar;
- Analisar os teores foliares de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), micronutrientes (Mn, B, Mo, Zn, Cu, Ni e Fe), elementos benéficos (Al, Si, Se, V e Na) e contaminantes (Cd, Cr e Pb) em plantas de erva-mate, em função dos tratamentos de adubação mineral NPK e de doses de biochar.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. A erva-mate

A erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. H.) tem uma grande importância na América do Sul. No ano de 2021 o maior produtor de erva-mate foi a Argentina com aproximadamente 841 mil toneladas, em segundo lugar o Brasil produziu 558 mil toneladas e em terceiro lugar o Paraguai produziu 116 mil toneladas (FAO, 2023). No Brasil, durante o ano de 2021, os principais estados produtores foi o Rio Grande do Sul com 242 mil toneladas, o Paraná com 238 mil toneladas, Santa Catarina com 77 mil toneladas, e os demais estados tiveram menor expressividade. No Paraná, os três municípios com as maiores produções são São Mateus do Sul, Cruz Machado e Bituruna, com aproximadamente 48,46 e 30 mil toneladas, respectivamente (IBGE, 2023).

A erva-mate é uma espécie nativa da América do Sul, cuja área de ocorrência está apresentada na Figura 1. O nome científico *Ilex paraguariensis* foi assim classificado pelo viajante e pesquisador francês Auguste de Saint – Hilaire, no início do século XIX (VALDUGA et al., 1997).



Figura 1. Área de ocorrência natural da erva-mate.

Fonte: Oliveira e Rotta (1983) adaptado por Rossa (2013), imagem do Google Earth (2013).

O cultivo tradicional de erva-mate é capaz de subsidiar emprego e renda em toda a cadeia produtiva. No estado do Paraná, a maior parte da produção é proveniente de áreas nativas ou com sombreamento. A espécie desenvolve-se bem em locais de sub-bosque, o que ajuda a exploração na forma consorciada em Floresta Ombrófila Mista (DANIEL, 2009). É uma das espécies que está em sistema agroflorestal mais antigos da região Sul do Brasil (TRAUTENMÜLLER et al., 2016), favorecendo um cultivo sustentável. Pois, na exploração da erva-mate, realiza-se a coleta de partes da planta, basicamente os ramos e folhas, ocorrendo posteriormente a rebrota, realizando-se assim a colheita em ciclos consecutivos na mesma árvore.

A erva-mate pertence à família botânica Aquifoliaceae (PASINATO, 2003), grupo das Angiospermas (VALDUGA et al., 1997). A copa é de porte baixo, no entanto, pode variar de acordo com o manejo adotado. Ao nível comercial, tem-se preconizado por cultivares de erva-mate de porte menor, oriundas de melhoramento genético, que variam entre 3 a 5 metros, porém encontram-se árvores em florestas com 25 metros de altura (CARVALHO, 2003), podendo atingir 100 anos (GREGIANINI e WINGE, 2000). Apresenta folhas perenes, simples, alternadas com características subcoriáceas a coriáceas. Devido à ausência de pelos em suas folhas, recebe a denominação de folhas glabras, com coloração verde-escuro em sua face adaxial e verde-claro na face abaxial. As margens das folhas são serrilhadas com nervuras laterais visíveis (OLIVA, 2007).

Naturalmente, a erva-mate é cultivada em solos ácidos e de baixa fertilidade natural, mas em cultivos implantados a fertilidade do solo deve ser manejada (SANTIN et al. 2014). A exploração da erva-mate é uma das atividades não madeireiras de grande relevância oriunda dos produtos florestais comercializados no país (CARVALHO, 2003).

O consumo de erva-mate ocorre principalmente por folhas e ramos, sendo consumidas principalmente na forma de chimarrão, chá e tererê. Essas bebidas se diferenciam pela forma de preparo e preferência por região. Segundo Silveira et al. (2016) o chimarrão é a infusão parcial da erva-mate com água quente, o tererê o consumo é através da infusão com água fria e, por fim, o chá mate é preparado por meio da infusão total de erva-mate em água quente.

A valorização dos produtos oriundos da erva-mate tem aumentado nos

últimos anos. Segundo Henrique et al. (2014), isso se deve aos inúmeros compostos químicos que fazem parte da composição da erva-mate. O referido autor cita que de suas folhas podem ser obtidos produtos com diversos usos, como: indústrias de alimentos, medicamentos, bebidas e suplemento alimentares, devido às suas propriedades antioxidante, estimulante e diurética. Ademais, pode ser extraído dessa espécie, insumos para as indústrias de cosméticos, corantes e tinturas, sendo considerado um produto com mercado internacional promissor (ROSSA, 2013).

3.2. Adubação na erva-mate

A fertilização é crucial para o crescimento saudável dos ervais. Estudos mostram que a erva-mate responde fortemente à fertilização e que os níveis de nutrientes retirados do solo pela cultura são comparáveis aos níveis retirados pelo milho e soja. A aplicação de calcário na erva-mate tem como objetivo principal fornecer os macronutrientes Ca e Mg, em vez de corrigir o solo, já que a espécie é tolerante à acidez (WENDLING; SANTIN, 2015).

Nos ervais nativos, o solo é continuamente enriquecido pela cobertura de folhas e outros vegetais que se decompõem lentamente. Em adição, nos ervais cultivados em terra fértil e protegida contra erosão, a produção pode permanecer alta por um longo período. No entanto, a excessiva exportação de nutrientes da área com colheitas sucessivas de folhas e galhos, o solo perde sua fertilidade natural com o tempo e precisa de intervenção com a fertilização para a manutenção da produtividade da erva-mate (BRAGAGNOLO et al., 1980).

Para Lourenço et al. (1997), é necessário ajustar a relação entre o nível de rendimento das plantações, com o nível nutricional do solo e da planta, a fim de manter e incrementar a produtividade e a conservação dos recursos do solo e da planta.

Neste contexto, o fato de a erva-mate ocorrer naturalmente em ambiente de mata fez do extrativismo o principal modelo de exploração da cultura. Nesse modelo de cultivo, a ciclagem de nutrientes do ambiente nativo era suficiente para manter produtivo os esparsos indivíduos de erva-mate colhidos a cada 3-4 anos (CARVALHO, 2003). Esse tipo de manejo foi mantido até o final da década de 80, porém, com o avanço da fronteira agrícola, incentivou-se a drástica redução das áreas de ervais nativos. Conseqüentemente, no intuito de atender à demanda por

matéria-prima, parte dos ervais nativos foi manejada, retirando-se outras espécies

presentes e introduzindo novas plantas de erva-mate, originando cultivos mais adensados (DA CROCE; FLOSS, 1999).

Dos anos 90 em diante surgiram cultivos de erva-mate a pleno sol com alta densidade de plantas (ANDRADE, 1999). À medida que se aumentou a quantidade de plantas por área, reduziu-se o intervalo entre colheitas, sendo o de 12 e 18 meses os mais praticados (DA CROCE; FLOSS, 1999; CARVALHO, 2003).

Essas mudanças na estrutura de condução e manejo de cultivos intensificaram a exportação de nutrientes da área, sem que houvesse preocupação em repô-los. O fator nutricional talvez seja o que mais tenha contribuído na redução de mais de 60% da produtividade brasileira nos últimos 22 anos (IBGE, 2015). Neste sentido, Segundo Penteadó Junior e Goulart (2019), independentemente da forma de cultivo, há a necessidade de adubar o solo, pois a matéria-prima do erval, composta por folhas e galhos finos, retira do solo uma quantidade considerável de nutrientes. Esses nutrientes precisam ser repostos com a adubação periódica.

As concentrações de minerais são específicas não somente para a espécie, idade e tecido, como também dependem do ambiente. Vários fatores influenciam o conteúdo de minerais nas plantas, sendo o genético o principal (MALAVOLTA, 1980). Nas árvores, os nutrientes podem ser armazenados nos seus diferentes compartimentos em função das necessidades fisiológicas imediatas ou como reserva para uso posterior, em outros órgãos (CAMARGO; SILVA, 1975).

Outro fator importante a ser considerado são os solos aptos para o plantio da erva-mate, aqueles que apresentam textura argilosa, com boa profundidade e drenagem adequada. A espécie ocorre naturalmente em solos de baixa fertilidade, com altos teores de alumínio e pH baixo (MEDRADO et al., 2000). No entanto, a erva-mate se desenvolve bem nessas condições, desde que a umidade e os níveis de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) no solo sejam adequados (WENDLING; SANTIN, 2015).

Conseqüentemente, a fertilização dos solos cultivados com erva-mate é necessária para atividades comerciais, incluindo colheitas e venda de matéria-prima, independentemente de serem manejadas de forma convencional ou

orgânica. A erva-mate raramente é encontrada em areias quartzosas (solos com menos de 15% de argila) e não ocorre em solos encharcados (hidromórficos). No entanto, pode ser encontrada esparsamente em solos rasos. Os efeitos negativos

dos solos rasos nos plantios são agravados em períodos de seca, podendo levar à morte das plantas (MEDRADO et al., 2000).

Em relação à época de adubação para erva-mate, Sosa (1994) recomenda os meses de agosto e setembro, com fertilizante mineral e orgânico, respectivamente. O plantio de leguminosas de inverno, como adubo verde, pode compensar o empobrecimento das qualidades físicas e químicas do solo, em termos de suprimento de N e matéria orgânica.

Em espécies florestais de regiões de clima tropical e subtropical, normalmente, os nutrientes mais limitantes ao crescimento são o N e o P (VENTURIN et al., 1999). Segundo Reissmann et al. (1983), o suprimento de N, K, Ca e Mg para a erva-mate foram satisfatórias em relação ao estado nutricional quando comparado aos níveis de outras folhosas. Os autores constataram baixos teores de P nas folhas e hastes, o que consideraram ser uma característica nutricional da espécie, e não um caso de deficiência.

A recomendação de adubação irá indicar, com base na análise de solo, quanto de cada nutriente deverá ser aplicado. O técnico então deverá calcular quanto do adubo formulado disponível deverá ser aplicado (PENTEADO JUNIOR; GOULART, 2019). Para Lasserre (1973), após pesquisa com fertilizantes minerais, efetuou-se diversas combinações entre os nutrientes N, P e K em doses de 80 kg ha⁻¹ de N, 75 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 80 kg ha⁻¹ de K₂O. Os maiores rendimentos foram obtidos sempre com a presença da adubação nitrogenada.

A adubação da erva-mate proposta por Wendling e Santin (2015) é dividida em três fases: 1º) Adubação de Plantio, realizada no plantio com a adubação de cova e em cobertura pós-plantio, até a primeira poda; 2º) Adubação de Formação de Copa, realizada após a primeira e até a terceira colheita, dividida em duas partes: formação 1, da primeira até a segunda colheita, e formação 2, da segunda até a terceira colheita; e 3º) Adubação de Produção, realizada após a terceira colheita.

3.3. Macronutrientes e micronutrientes

Os nutrientes minerais de planta são classificados em dois grupos: macronutrientes e micronutrientes. Os macronutrientes são nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S); e os micronutrientes

são ferro (Fe), Manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu), cloro (Cl), molibdênio (Mo), boro (B) e níquel (Ni) (FAQUIN, 2005).

Os macronutrientes são os nutrientes absorvidos pelas plantas em maiores quantidades e, em função do manejo da adubação, são subdivididos em primários ou principais (N, P e K) e secundários (Ca, Mg e S). Os micronutrientes são os nutrientes absorvidos pelas plantas em menores quantidades. Esta divisão (macro e micronutrientes) não significa que um nutriente seja mais importante do que outro, apenas que eles são necessários em quantidades e concentrações diferentes (BARROS, 2020). Existem também os elementos não essenciais para as plantas, portanto não são considerados nutrientes, mas que podem ser benéficos para determinadas espécies sob condições de estresses biótico e/ou abiótico. Como exemplos de elementos benéficos têm-se silício (Si), sódio (Na), selênio (Se) e vanádio (V). Para o enraizamento de miniestacas e desenvolvimento inicial das plantas em produção clonal de mudas de erva-mate, o benefício do alumínio (Al) também tem sido proposto (FERNANDES et al., 2018; RICARDI, 2020).

Segundo a Sociedade Brasileira Ciência do Solo (2004), a adubação com os macronutrientes N, P e K deve atender às necessidades das plantas nas diferentes fases do estabelecimento do erval e, portanto, seguirá critérios próprios para cada fase.

Em experimento de casa de vegetação, utilizando vasos cheio de solo, verificou-se que mudas de erva-mate responderam positivamente à adubação com P, em solo pobre no nutriente, sendo que o crescimento foi beneficiado até a dose de 447,5 mg kg⁻¹ de P. Por outro lado, doses isoladas de N e K superiores a 100 mg kg⁻¹ mostraram ação depressiva sobre as mudas de erva-mate. Assim, o desbalanço de nutrientes no solo é um dos principais fatores limitantes ao crescimento vegetal (SANTIN et al., 2008).

Uma condição importante para obter mudas de qualidade é escolher substratos que atendam à demanda de nutrientes das espécies (CHAVES et al., 2006). Por isso, é essencial fornecer nutrientes, principalmente N e P, pois sua falta prejudica o crescimento vegetal (FAGERIA, 2008). Além disso, levando em conta as características do solo e do clima das áreas destinadas à implantação florestal, o uso de espécies nativas pode aumentar as chances de sucesso em

práticas de recuperação de áreas degradadas (LAMB et al., 2005).

A adubação no plantio da erva-mate deve seguir a análise do solo. Os fertilizantes devem ser colocados na cova ou na linha de plantio e misturados ao solo; enquanto a adubação em pós-plantio deve ser feita a lanço ou em filete contínuo sobre a superfície do solo (WENDLING; SANTIN, 2015).

Reissmann e Prevedello (1992) observaram correlações positivas entre a calagem e as concentrações foliares de K, Ca, Mg e Fe em mudas de erva-mate cultivadas sob condições de casa de vegetação. Constataram-se baixo teor foliar de P, o que parece ser característica da espécie, como já foi comentado neste tópico. Verificaram-se também que doses crescentes de calcário promovem a redução no crescimento de erva-mate. Atenção especial foi observada para o baixo teor foliar de Cu e alto teor foliar de Zn que ultrapassou 100 mg kg⁻¹. Segundo os autores, a erva-mate pode ser uma espécie pouco eficiente na absorção de Fe, diante dos sintomas de clorose nas folhas mais novas.

A adubação de reposição é indicada para suprir os nutrientes exportados pela exploração florestal, devendo ser aplicada após a colheita. Segundo a recomendação da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (1994), a adubação fosfatada de reposição deve ser feita na dosagem máxima de 120 kg ha⁻¹ P₂O₅, quando o teor de P no solo for alto; e na reposição de K deve ser aplicado 60 kg ha⁻¹ de K₂O ou menos quando o teor de K no solo for alto. A calagem visando a correção da acidez não é recomendada para a cultura de erva-mate, pela sua adaptação a condições de acidez do solo; neste caso a calagem é recomendada apenas para fornecer Ca e Mg em solos deficientes nestes nutrientes.

Cabe mencionar que na fase inicial do crescimento, a maior parte dos nutrientes está contida nas folhas e conforme Haag (1985), à medida que a idade aumenta, ocorre uma redistribuição de nutrientes de órgãos senescentes para regiões de crescimento da árvore. Há também aumento da taxa de acúmulo de nutrientes na planta após o fechamento das copas (GONÇALVES; MELLO, 2000).

É muito importante seguir as épocas de aplicação dos adubos. O intervalo de três meses, entre a adubação e a colheita, deve ser cumprido, pois adubar antes da colheita piora a qualidade da erva-mate colhida e diminui o seu valor de mercado (WENDLING; SANTIN, 2015).

Além disso, a adubação orgânica também pode ser utilizada, especialmente associada com a adubação mineral. Segundo Sosa (1994), a

adubação orgânica propiciou maiores índices de crescimento em plantas de erva-
mate, para todas as

variáveis morfológicas consideradas. Em adição, teores adequados de matéria orgânica no solo são favoráveis ao desenvolvimento da cultura. Neste sentido, o autor observou que o rendimento de matéria seca de plantas de erva-mate se relacionou positivamente com os níveis de matéria orgânica, N e Mg do solo.

3.4. Cobertura do solo e matéria orgânica

Para preservar o solo e garantir o lucro dos cultivos de erva-mate, é fundamental o manejo adequado da cobertura do solo, pois protege o solo da erosão, contribui no controle de plantas daninhas, reduz os custos com roçadas e capinas, além de fornecer matéria orgânica ao solo e, conseqüentemente, contribuir para a manutenção do potencial produtivo do solo (PHILIPPOVSKY et al., 2000). A cobertura do solo também reduz a variação de temperatura do solo, reduzindo a evaporação e, conseqüentemente, incrementando a disponibilidade hídrica para as plantas de erva-mate (MEDRADO, 2002).

O uso de coberturas vivas e /ou mortas do solo é a base do manejo agroflorestal sustentável, sendo utilizados espécies vegetais de rápido crescimento para produção de fitomassa. O manejo adequado da cobertura pode proporcionar melhoria de atributos físicos, químicos e biológicos do solo (NEVES et al., 2006).

Para Zambier (2001), um dos fatores mais importantes para obtenção de um erval produtivo está diretamente relacionado com a reposição dos nutrientes exportados por ocasião da poda, com objetivo de manter o equilíbrio entre a produção e a fertilidade do solo. Realizar esta reposição de forma eficaz e com baixo custo, é objeto de discussões em relação à erva-mate. Por outro lado, em ervais nativos, a deposição de serapilheira e restos vegetais é muito alta, conferindo equilíbrio dinâmico à fertilidade do solo.

No entanto, a implantação da cobertura do solo não garante todos os benefícios que esta pode trazer ao erval. Tais benefícios ocorrerão, em sua plenitude, somente se as demais práticas de manejo forem atendidas, como época de plantio, poda e adubação (LOURENÇO; MEDRADO, 1998).

A utilização de fertilizantes químicos no manejo da adubação permite adicionar doses de nutrientes prontamente disponíveis que são facilmente quantificados. Contudo, nos adubos de natureza orgânica os nutrientes

encontram-se em baixas concentrações e, ainda, em grande parte estão na forma orgânica, que precisam ser previamente mineralizados no solo para então ser passíveis de absorção pelas raízes das plantas. Neste sentido, a incorporação de resíduos de plantas e/ou animais ao solo, em condições de umidade e aeração favoráveis, resulta em um processo de decomposição efetuado pelos microrganismos. Como resultado dessa intensa decomposição da matéria orgânica, haverá liberação de elementos químicos, como N, P, K, Ca e Mg, os quais deixam a forma orgânica imobilizada e passam à forma mineralizada, disponível às plantas (KIEHL, 1985).

Diferentemente dos fertilizantes industrializados solúveis, o uso de fontes orgânicas como fonte de nutrientes exerce efeito de amplo espectro, sendo que a matéria orgânica adicionada também atua benéficamente nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (COSTA, 1994). A matéria orgânica é fonte de energia para a vida heterotrófica do solo, constitui no maior reservatório de N, P, S e outros nutrientes e influencia no pH e capacidade de troca de cátions (CTC) do solo (CARVALHO, 2003).

É de fundamental importância que as espécies utilizadas como coberturas verdes sejam adequadamente manejadas conforme recomendações específicas para cada espécie. Também há a possibilidade do uso de consórcio de diferentes espécies, de preferência de família diferentes, possibilitando a ciclagem de nutrientes das camadas mais profundas do solo para a superfície (LIMA FILHO et al., 2014).

Para Penteado Junior e Goulart (2019), em sistemas de produção com erva-mate, podem-se usar várias espécies de plantas de coberturas. Nas entrelinhas das erva-mates, pode-se cultivar culturas anuais e forrageiras, que trazem renda nos primeiros anos e melhoram as condições do solo, ao longo do ciclo do erval.

Em termos de propriedades físicas, a matéria orgânica torna o solo mais friável e atua como agente cimentante na sua estruturação. A presença de matéria orgânica corrige a falta ou o excesso de aeração e drenagem, aumenta a capacidade de infiltração e retenção de água, e é importante como tampão nas mudanças bruscas na acidez, alcalinidade e salinidade (KIEHL, 1985).

3.5. Biochar

O biochar (ou biocarvão) é um material originário de vegetais, animais e carvão vegetal ou mineral rico em carbono orgânico, resistente à degradação química-biológica e pode ser observado em biomassa de microrganismos. Consiste em um dos produtos do processo de pirólise, cuja produção é dada através da degradação térmica de uma determinada biomassa em ambiente com concentrações deficientes (ou ausentes) de oxigênio e com temperaturas variando entre 300 e 900° C (BATISTA et al., 2018).

Para Hagemann et al. (2018), o biochar é um sólido carbonáceo pirogênico. Este material é caracterizado como proveniente da transformação termoquímica da biomassa. Esta transformação pode ser utilizada para obtenção de outros produtos similares que também são classificados como carbonos pirogênicos, como por exemplo o carvão e o carvão ativado.

Solos que receberam adição de biochar apresentaram maior disponibilidade de nutrientes, pois os poros do biochar absorvem água e os nutrientes nela dissolvidos por capilaridade e desorvem água e nutrientes à medida que o solo seca (SCHIMMELPFENNIG; GLASER, 2012). A maior disponibilidade de água e nutrientes estimulam o crescimento das raízes, resultando em uma maior proliferação de radicelas ao redor do biochar. Esta interação entre as raízes e o biochar resulta positivamente no aumento da absorção de nutrientes pelas plantas, otimizando o uso dos adubos (OLMO et al., 2016).

Segundo Lone et al. (2015), o biochar é um potencial condicionador de solo que pode contribuir para melhorar a produtividade agrícola. Sua incorporação no solo induz mudanças nas propriedades físicas como: estrutura, porosidade, distribuição granulométrica e densidade (PETTER, 2010).

O carvão tem como destino o fornecimento de energia térmica com baixa emissão de fumaça e não se leva em consideração o sequestro de carbono. O carvão ativado é utilizado na sorção de contaminantes de meios líquidos e gasosos e pode ser aplicado ao solo, porém, não há a preocupação quanto ao sequestro do carbono e para obter a habilidade de sorvente, passando por um tratamento de oxigenação para aumentar a microporosidade (AHMAD et al., 2014; HAGEMANN et al., 2018). Já o biochar provém da transformação da biomassa utilizando a engenharia de pirólise para obter um produto com alta porosidade e que obtenha carbono estável frente a intemperização (HAGEMANN et al. 2018).

De acordo com Guimarães (2017), o biochar tem estrutura periférica que proporciona a sua reatividade com material orgânico do ambiente e sua estrutura interna garante capacidade de preservação do carbono por milhares de anos. No processo de queima de biomassa para a obtenção de biochar podem ser utilizados os resíduos:

- orgânicos urbanos como podas de árvores e lodo de esgoto;
- agrícolas como sobras de culturas, bagaço e palha oriunda da cana-de-açúcar;
- industriais como as oriundas da indústria de papel e celulose;
- e de origem animal como ossos e esterco.

Nas propriedades químicas do solo o biochar atua na estabilidade e aumento dos estoques de carbono, reduz a lixiviação de nutrientes e diminui a necessidade de irrigação e fornecimento de nutrientes (PETTER, 2010). As interações do biochar com os microrganismos do solo geram alterações de pH e das taxas de decomposição da matéria orgânica (DING et al., 2017).

A influência do biochar nos atributos físicos do solo depende da sua energia livre da superfície que são capazes de interagir com as cargas do solo (BATISTA et al., 2018). Isto resulta na formação de agregados mais estáveis devido às ligações químicas que correm entre os grupos funcionais químicos do biochar e aos colóides orgânicos e minerais do solo. Quando o biochar tem muitas cargas superficiais, tende a melhorar a estruturação do solo e, portanto, o aumento da retenção de água (BATISTA et al., 2018) e melhoria do ambiente para o crescimento de raízes (ŠIMANSKÝ; JURIGA, 2018).

As propriedades eletroquímicas do biochar alteram a agregação do solo pela mudança nas interações das partículas. A adição de biochar em solos de textura mais grosseira ocasiona aumento da superfície específica dos colóides e melhora a estabilidade de agregados. Já em solos de textura mais fina ou que possuam grande quantidade de carbono orgânico, evidencia-se que o biochar diminui o efeito da agregação dos colóides, pelo aumento das forças de repulsão ou pela “diluição” das cargas (PITUELLO et al., 2018).

A porosidade do biochar favorece o crescimento de micorrizas que colonizam e fixam os micélios fortemente às superfícies internas e externas do biochar. A interação do biochar com as micorrizas e a simbiose destas com as raízes melhora a aquisição dos nutrientes pelas plantas, principalmente do P,

porque este é transportado através das hifas para as raízes, evitando a sua oclusão (adsorção específica) nos minerais da fração argila do solo (HAMMER et al., 2014).

Os efeitos do biochar no aumento da disponibilidade de nutrientes e na melhoria da estrutura do solo, que resulta na melhor aquisição de nutrientes pelas plantas, é pronunciada em solos com baixa disponibilidade de nutrientes, menor teor de matéria orgânica e baixa agregação natural. Neste sentido, a adição do biochar pode ter efeito de aumento de cargas e consequente estruturação e disponibilidade de nutrientes em solos naturalmente pobres ou, então, resultar em efeito de “diluição” em solos ricos (PITUELLO et al., 2018).

Conseqüentemente, em geral, o uso de biochar na agricultura tem se mostrado eficaz, pois aumenta a eficiência de uso dos nutrientes pelas plantas e ajuda a economizar na adubação mineral. O produto funciona como reserva de C no solo e ajuda a baixar a concentração de CO₂ na atmosfera, favorecendo a mitigação das mudanças climáticas globais (LEHMANN; JOSEPH, 2009).

Quando o biochar é produzido com intuito de obter um produto alcalino, o pH do solo também é alterado, isto faz com que haja a redução de adsorção de nutrientes (especialmente o P) aos óxidos de Fe e Al, sendo que estes estão presentes em solos intemperizados das regiões tropicais e subtropicais, dando oportunidade para os nutrientes sorvidos pelo biochar e disponibilizados para as plantas (BIEDERMAN; HARPOLE, 2013).

Ainda se discute que o biochar melhora mais a fertilidade do solo e o desenvolvimento vegetal quando é combinado com aplicação de fertilizantes (PETTER, 2010). O biochar pode ser fonte de nutrientes, mas isso varia conforme as características químicas do material (CHAVES et al., 2006). Por isso, o biochar sozinho, com baixa disponibilidade de nutrientes, pode não ser eficiente para o desenvolvimento vegetal, dependendo das condições do solo onde é aplicado.

Indicadores de ciclagem de nutrientes também são aumentados quando o solo recebe a incorporação de biochar. Em geral há maior densidade de biomassa microbiana, aumento dos teores de N, P, K, e carbono total (C-total) do solo. Tais efeitos ocorrem com maior intensidade em solos muito intemperizados e ácidos, porque apresentam melhorias na retenção de água, aumento do pH e redução da lixiviação (BIEDERMAN; HARPOLE, 2013).

Para usar o biochar de forma sustentável, é preciso caracterizar o material,

levando-se em conta as propriedades físico-químicas do solo e as condições climáticas, bem como a gestão da terra, como o tipo de espécie plantada, para saber se há compatibilidade e complementaridade entre esses fatores (VERHEIJEN et al., 2010). Por isso, são fundamentais estudos com espécies nativas e com solos de áreas naturais, que têm baixa fertilidade, para gerar informações que possibilitem o uso do biochar para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado no viveiro de produção de mudas de espécies florestais do Centro Estadual Florestal de Educação Profissional Presidente Costa e Silva (CEFEP), conhecido como Colégio Florestal (latitude 25° 30' 12,705" Sul, longitude 50° 38' 6,347" Oeste, e altitude de 880 m acima do nível do mar), localizado na periferia da área urbana do município de Irati, região Centro-Sul do estado do Paraná, Brasil (Figura 2).



Figura 2. Imagem georreferenciada da localização do viveiro de produção de mudas de espécies florestais do Centro Estadual Florestal de Educação Profissional Presidente Costa e Silva (CEFEP), situado na periferia da área urbana do município de Irati, região Centro-Sul do estado do Paraná, Brasil (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

O experimento foi realizado em casa de vegetação aclimatizada. De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima de Irati é do tipo Cfb, temperado, com verões suaves e geadas fortes e frequentes no inverno. A temperatura máxima média é 24,2 °C e a mínima média é 11,0 °C. A variação térmica média é significativa, sendo janeiro o mês mais quente e julho o mais frio. Janeiro é o mês com mais chuva e agosto o com menos, sem uma estação seca definida. A média mensal de chuva e de umidade relativa do ar são 194 mm e 79,6%, respectivamente (DE ANDRADE et al., 2010).

O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso (DBC), com quatro repetições, em esquema fatorial 2x4, sendo dois tratamentos de adubação mineral (sem e com fornecimento de adubos NPK no plantio) e quatro tratamentos de doses de biochar (0, 10, 30 e 50% de biochar misturado com o solo). Conseqüentemente, o experimento teve 32 unidades experimentais (8 tratamentos × 4 repetições). Cada unidade experimental foi composta por 5 vasos, totalizando 160 vasos, cultivando uma planta de erva-mate por vaso.

A adubação mineral foi realizada durante o enchimento dos vasos com o substrato, aplicando-se as quantidades de 2 g de N, 2 g de P₂O₅ e 1 g de K₂O por vaso (contendo 10 kg de substrato), usando os fertilizantes ureia (45% N), superfosfato triplo (46% P₂O₅) e cloreto de potássio (60% K₂O). Os fertilizantes minerais foram adicionados e homogeneizados com o substrato individualmente em cada vaso. Após o enchimento dos vasos com o substrato e realizada a adubação de plantio (este apenas nos tratamentos com adubação), manteve-se o substrato sempre úmido, mas sem encharcamento (manutenção dos microporos com água e macroporos com aeração).

O substrato usado no cultivo das plantas de erva-mate foi composto basicamente pela mistura de solo+biochar, em diferentes proporções, de acordo com os tratamentos: relação biochar/solo = 0/100 (somente solo - testemunha), 10/90, 30/70 e 50/50.

O solo utilizado foi previamente seco ao ar e peneirado em malha de 7 mm. Uma amostra desse solo foi analisada quimicamente e granulometricamente de acordo com a metodologia descrita em Embrapa (2009), no Laboratório de Solos Florestais da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), *Campus* de Irati, Irati-PR. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultado da análise química e granulométrica do solo realizada previamente à instalação do experimento (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

MO g kg ⁻¹	pH C aCl ₂	Al³⁺ cmol _c dm ⁻³	H+Al cmol _c dm ⁻³	CTC	V% %	m%
38,20	3,8	4,50	13,76	16,93	18,72	41,33
P (Mehlich-1) mg dm ⁻³	K	Ca cmol _c dm ⁻³	Mg	Areia	Silte %	Argila

16,90	0,47	1,40	1,30	4,0	24,0	72,0
-------	------	------	------	-----	------	------

MO = matéria orgânica do solo; H+Al = acidez potencial; CTC = capacidade de troca de cátions a pH 7,0; V% = percentagem de saturação de bases; e m% = percentagem de saturação de alumínio.

O biochar utilizado na composição do substrato foi obtido da pirólise de uma mistura de resíduos de pinus e eucalipto (galhos, fustes, etc.) oriundos de indústrias madeireiras da região. No processo, os resíduos vegetais foram submetidos à temperatura de 400° C por 4-5 dias. Após a obtenção, antes de ser misturado ao solo, o biochar foi peneirado em malha de 7 mm. Abaixo seguem as principais características físico-químicas do biochar utilizado no experimento, que foram determinadas no laboratório Laborsolo, localizada no município de Londrina-PR (Tabela 2).

Tabela 2. Resultado da análise físico-química do biochar.

Parâmetros	Valor
pH (CaCl ₂)	8,60
Carbono orgânico	12,30 %
Condutividade elétrica	5560,00 µs cm ⁻¹
Densidade	0,53 g cm ⁻³
Umidade perdida a 65° C	4,05 %
Capacidade de troca de cátions (CTC)	235 mmol _c kg ⁻¹
Capacidade de retenção de água (CRA)	65,40 %
Relação C/N	11,83 %
Relação CTC/C	19,11%
Relação C/P	4,77 %
Nitrogênio total (N)	1,04 %
Fósforo total (P ₂ O ₅)	2,58 %
Potássio solúvel (K ₂ O)	0,55 %
Cálcio total (Ca)	2,08 %
Magnésio total (Mg)	0,34 %
Enxofre total (S)	0,24 %
Silício total (Si)	N.D.
Boro total (B)	50,84 mg kg ⁻¹
cobre total (Cu)	24,68 mg kg ⁻¹
Ferro total (Fe)	10980,00 mg kg ⁻¹
Manganês total (Mn)	580,10 mg kg ⁻¹
Molibdênio total (Mo)	N.D.
Sódio total (Na)	184,60 mg kg ⁻¹
Níquel total (Ni)	N.D.
Cobalto total (Co)	2,92 mg kg ⁻¹
Zinco total (Zn)	80,44 mg kg ⁻¹

As mudas de erva-mate foram obtidas por propagação seminal. Quando as mudas se apresentaram com altura aproximada de 20 cm (estádio recomendado para plantio no campo), realizou-se o transplante para os vasos de PVC contendo 10 kg de substrato, iniciando-se assim o período experimental.

Durante o período experimental, realizou-se o monitoramento da irrigação diariamente. Não foi realizada adubação de cobertura durante o período experimental. O controle de algas e plantas invasoras, que eventualmente surgiram na superfície do substrato, foram controladas de forma manual. O

monitoramento quanto à incidência de pragas e doenças também foi feita periodicamente, porém não foi necessário nenhum controle a respeito. A Figura 3 mostra imagens das etapas de preparo do substrato, instalação e condução do experimento.



Figura 3. Imagens realizadas durante a instalação e condução do experimento: preparo do substrato (mistura do biochar com o solo nas diferentes proporções), enchimento dos vasos com o substrato, instalação do experimento (transplântio das mudas para os vasos) e condução das plantas de erva-mate na casa de vegetação do viveiro do Colégio Florestal (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

As avaliações de crescimento da erva-mate constaram de medições de diâmetro de coleto, com auxílio de um paquímetro digital, e altura de parte aérea, usando uma régua graduada a partir do coleto da planta em contato com o substrato. As medições de diâmetro de coleto e altura de parte aérea foram realizadas em cinco épocas distintas, aos 0, 60, 120 e 180 dias após o transplântio (DAT).

No final do período experimental (aos 180 DAT), as plantas foram colhidas e separadas em folhas, caule + ramos e raízes (este por meio de peneiramento e lavagem em água corrente). Essas partes foram pesadas em balança digital para obtenção dos respectivos pesos úmidos. No Laboratório de Solos Florestais do Departamento de Engenharia Florestal da UNICENTRO, os materiais de folhas,

caule+ramos e raízes foram secos em estufa com circulação forçada de ar a 58-60° C para determinação dos pesos secos dessas partes.

Para a análise química do tecido foliar, as folhas secas foram moídas em moinho do tipo Wiley. Determinou-se os teores foliares de macronutrientes [nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S)], micronutrientes [manganês (Mn), boro (B), molibdênio (Mo), zinco (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni) e ferro (Fe)], elementos benéficos [alumínio (Al), silício (Si), selênio (Se), vanádio (V) e sódio (Na)] e contaminantes [cádmio (Cd), cromo (Cr) e chumbo (Pb)] (EMBRAPA, 2009; USEPA, 2007).

Para cada variável determinada, o valor obtido por unidade experimental foi sempre oriundo da média de cinco plantas, considerando que foram cultivadas cinco plantas por unidade experimental. A normalidade e homoscedasticidade dos dados obtidos foram testadas pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente, usando o *software* R versão 3.5.1. (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2016). Em sequência, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA, $p \leq 0,05$), em DBC com quatro repetições, considerando o esquema fatorial 2×4 (dois tratamentos de adubação e quatro tratamento de doses de biochar), totalizando 32 unidades experimentais, usando o *software* SISVAR (FERREIRA, 2011). Quando houve diferença significativa, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Avaliações de crescimento

O resumo da análise de variância para os dados de altura de parte aérea e diâmetro de coleto das plantas de erva-mate está apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Quadrados médios da análise de variância (ANOVA) para altura de parte aérea e diâmetro de coleto em plantas de erva-mate avaliadas aos 0, 60, 120 e 180 DAT, em função dos fatores “adubação” e “biochar” e da interação entre os fatores “adubação × biochar” (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

Fontes de Variação		Quadrado médio – Altura de parte aérea			
	GL ¹	0 DAT	60 DAT	120 DAT	180 DAT
Bloco	3	5,1470 *	6,1906 n.s.	21,3131 n.s.	48,8747 n.s.
Adubação (A)	1	0,0703 n.s.	113,1760 ***	658,2099 ***	1479,6800 ***
Biochar (B)	3	0,7853 n.s.	1,2943 n.s.	2,0714 n.s.	8,6627 n.s.
A × B	3	0,9103 n.s.	5,7487 n.s.	15,1351 n.s.	42,6129 n.s.
Resíduo	21	1,5391	3,1023	12,8854	27,2455
CV (%)		6,34	6,56	11,42	14,83
Média		19,55	26,83	31,44	35,21

Fontes de Variação		Quadrado médio – Diâmetro de coleto			
	GL ¹	0 DAT	60 DAT	120 DAT	180 DAT
Bloco	3	1,0180 ***	0,0257 n.s.	0,0281 n.s.	0,2457 n.s.
Adubação (A)	1	0,0205 n.s.	0,2738 n.s.	0,9556 *	2,2738 **
Biochar (B)	3	0,0812 n.s.	0,2804 n.s.	0,2953 n.s.	0,3334 n.s.
A × B	3	0,0851 n.s.	0,0458 n.s.	0,0355 n.s.	0,1530 n.s.
Resíduo	21	0,0869	0,1470	0,1263	0,2113
CV (%)		8,46	8,15	6,95	8,32
Média		3,48	4,70	5,11	5,52

¹ GL = Grau de Liberdade. ***, **, * e n.s. = $p \leq 0,001$, $p \leq 0,01$, $p \leq 0,05$ e $p > 0,05$, respectivamente.

As avaliações de crescimento foram realizadas em quatro épocas (0, 60, 120 e 180 DAT). A época 0 DAT representa as avaliações realizadas no dia da instalação do experimento. Como as mudas foram de origem seminal, no dia da instalação do experimento havia pequenas variações quanto à altura das mudas, resultando em efeito significativo de blocos na análise de variância aos 0 DAT. Entretanto, essa pequena variação de crescimento entre os diferentes blocos não foi mais significativa nas avaliações subsequentes (aos 60, 120 e 180 DAT).

Houve efeito significativo do fator “adubação” sobre a altura de parte aérea aos 60 ($p \leq 0,001$), 120 ($p \leq 0,001$) e 180 ($p \leq 0,001$) DAT e diâmetro de coleto aos 120 ($p \leq 0,05$) e 180 ($p \leq 0,01$) DAT. Porém, essas variáveis não foram significativamente afetadas pelo fator “biochar” e nem pela interação entre os

fatores “biochar x adubação”, em nenhuma das quatro épocas de avaliação.

A Tabela 4 apresenta os dados de altura de parte aérea e diâmetro de coleto, obtidos nas quatro épocas de avaliação, em função dos tratamentos de adubação e das diferentes concentrações de biochar.

Tabela 4. Altura de parte aérea (em centímetros) e diâmetro de coleto (em milímetros) em plantas de erva-mate avaliadas em quatro épocas (0, 60, 120 e 180 DAT), em função de tratamentos de adubação (sem e com adubação do substrato) e tratamentos de proporções de substituição do solo pelo biochar na composição do substrato (0, 10, 30 e 50% de biochar) (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

Época de avaliação	Biochar (%)	Altura de parte aérea (cm)			Diâmetro de coleto (mm)		
		Sem adubação	Com adubação	Média	Sem adubação	Com adubação	Média
0 DAT	0	19,28	19,58	19,43	3,43	3,33	3,38
	10	19,28	19,20	19,24	3,58	3,31	3,44
	30	20,10	19,05	19,58	3,52	3,46	3,49
	50	19,75	20,20	19,98	3,50	3,73	3,62
	Média	19,60	19,51		3,51	3,46	
60 DAT	0	23,62	29,02	26,32	4,36	4,56	4,46
	10	26,22	28,37	27,30	4,58	4,81	4,69
	30	25,56	28,02	26,79	4,57	4,90	4,74
	50	24,40	29,44	26,92	4,93	4,90	4,92
	Média	24,95 B	28,71 A		4,61	4,79	
120 DAT	0	24,77	37,64	31,20	4,78	4,99	4,89
	10	27,45	36,39	31,92	4,80	5,33	5,06
	30	26,78	34,88	30,83	5,00	5,32	5,16
	50	28,61	34,98	31,79	5,18	5,52	5,35
	Média	26,90 B	35,97 A		4,94 B	5,29 A	
180 DAT	0	26,01	45,47	35,74	5,14	5,44	5,29
	10	28,64	43,38	36,01	5,03	5,89	5,46
	30	27,94	39,45	33,69	5,42	5,73	5,57
	50	31,04	39,74	35,39	5,44	6,12	5,78
	Média	28,41 B	42,01 A		5,26 B	5,79 A	

Quando significativo pela ANOVA, médias seguidas da mesma letra, maiúscula na linha (comparando os tratamentos de adubação), não diferem entre si (teste de Tukey, $p \leq 0,05$).

Assim, dentro de cada tratamento de adubação, as diferentes concentrações no solo de biochar, originário de resíduos de pinus e eucalipto, não modificou a altura de parte aérea e o diâmetro de coleto da erva-mate, sendo que as variações de valores foram de pequena magnitude, não sendo estatisticamente significativa ($p > 0,05$).

Em acordo com esses resultados, Barros et al. (2019) estudaram diferentes composições de substrato para a produção de mudas de *Eucalyptus urograndis*, avaliando doses de 25, 50 e 100% de um biochar obtido a partir de serragem de espécies nativas, produzido em indústrias madeireiras da região de Sinop-MT. Os autores observaram que as diferentes proporções de biochar utilizadas na composição do substrato não influenciou na altura da parte aérea e diâmetro do coleto das mudas de eucalipto.

Da mesma forma, Zanetti et al. (2003), trabalhando com formação de mudas do porta-enxerto de limoeiro 'cravo' em ambiente protegido, também não verificou diferença no diâmetro de caule com a utilização de substratos associados com biochar. Apesar de não observar efeitos positivos do biochar, os autores salientam que as vantagens do biochar são bastante conhecidas em diversas espécies, dosagens e em condições climáticas diferentes.

Por outro lado, Soares et al. (2021) avaliaram diferentes proporções de biochar (0%, 7,5%, 15%, 22,5% e 30%) na composição do substrato para a produção de mudas de *Sapindus saponaria* L. Os autores reportaram que a utilização do biochar no substrato resultou em decréscimo no crescimento, na altura total, diâmetro do colo, volume de raiz e comprimento de raiz das mudas.

O biochar é um produto a base de resíduos vegetais e animais produzido através de pirólise, sendo que o método de pirólise e a temperatura empregada influenciam no produto final (MUKOME et al., 2013). Assim, infere-se que a ausência de efeitos positivos sobre o crescimento da erva-mate se deve à origem do biochar, idade das plantas e às condições edafoclimáticas às quais as plantas foram submetidas.

Neste trabalho é importante enfatizar que o principal objetivo foi verificar o potencial do biochar em fornecer nutrientes no solo para o crescimento inicial da erva-mate, sendo que ainda há poucos relatos na literatura a respeito. Acredita-se que o biochar pode fornecer nutrientes para o solo, no entanto é um fator dependente das características químicas de cada tipo de biochar (MUKOME et al., 2013; LIMA et al., 2015). Ressalta-se que durante o período experimental as plantas foram adequadamente irrigadas, não resultando em estresse hídrico em nenhum momento. Há vários trabalhos na literatura que mostram que o biochar possui alta capacidade de adsorver moléculas de água que, posteriormente, em caso de estresse hídrico, contribui para o fornecimento de água para as plantas,

sendo um dos principais benefícios reportados do biochar na produção vegetal (BARONTI et al., 2014; LIANG et al., 2014; NDEDE et al., 2022; SANTOS et al., 2022).

A adubação mineral NPK de plantio foi fundamental para o crescimento inicial da erva-mate, pois, o fornecimento dos fertilizantes no solo (ureia, superfosfato triplo e cloreto de potássio), previamente ao transplante das mudas, elevou a altura de parte aérea em 15, 34 e 48 % nas medições realizadas aos 60, 120 e 180 DAT, respectivamente, e o diâmetro de coleto em 7 e 10 % nas medições feitas aos 120 e 180 DAT, respectivamente.

Como não houve efeito significativo dos tratamentos de biochar sobre a altura de parte aérea e diâmetro de coleto, a taxa de incremento dessas variáveis ao longo do período experimental foi realizada considerando apenas os tratamentos de adubação, adotando os valores médios obtidos em cada tratamento de doses de biochar. Assim, baseado nas avaliações feitas nas quatro épocas, foi feito ajuste de regressão linear e quadrática para o incremento de altura de parte aérea e diâmetro de coleto, obtendo-se modelos com elevado coeficiente de determinação ($R^2 \geq 98\%$) e com significância menor que 1% de probabilidade de erro ($p \leq 0,01$) (Figura 4).

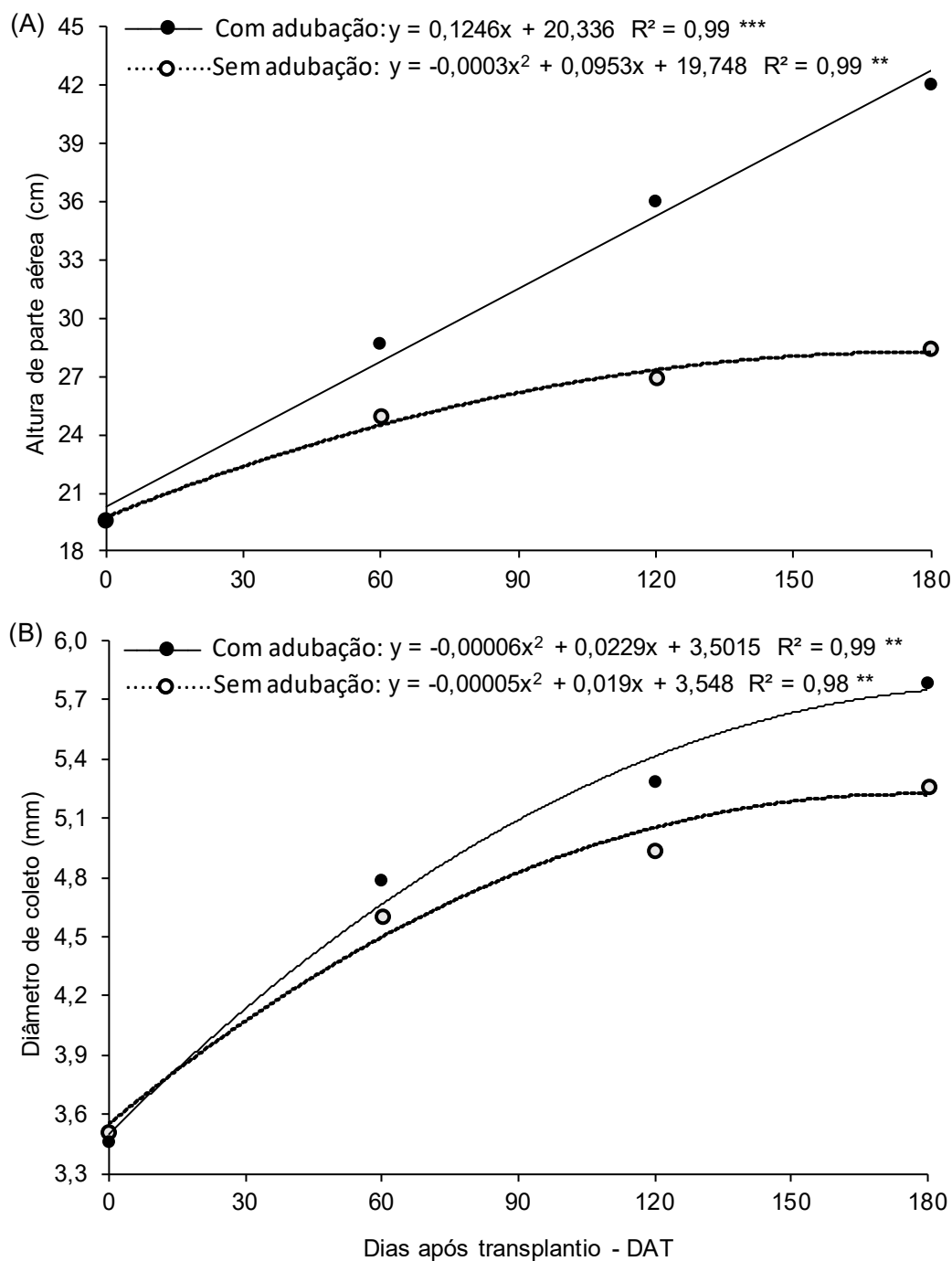


Figura 4. Incremento em altura de parte aérea (A) e diâmetro de coleto (B) em plantas de erva-mate avaliadas em quatro épocas (0, 60, 120 e 180 DAT), em função de tratamentos de adubação (sem e com adubação do substrato) (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

*** e ** representam $p \leq 0,001$ e $p \leq 0,01$, respectivamente.

No dia da instalação do experimento, a altura de parte aérea e diâmetro de coleto das plantas foram próximas: altura média = 19,60 e 19,51 cm para

tratamentos sem e com adubação, respectivamente; e diâmetro de coleto médio = 3,51 e 3,46 mm para tratamentos sem e com adubação, respectivamente. Porém,

o incremento em altura de parte aérea ocorreu de forma linear para os tratamentos com adubação e de forma quadrática para os tratamentos sem adubação. Conseqüentemente, no final do período experimental, a altura das plantas com adubação (altura média = 42,01 cm) foram em média 48% maior que nas plantas sem adubação (altura média = 24,97 cm).

Por outro lado, para o diâmetro de coleto, o incremento foi quadrático para ambos os tratamentos de adubação; neste caso, no final do período experimental, a diferença de valores entre tratamentos com e sem adubação foi de 6%. Assim, verificou-se que a deficiência nutricional prejudicou mais o crescimento em altura que o crescimento em diâmetro de coleto das plantas de erva-mate.

Dessa forma, fica evidente que a dependência da erva-mate pelos nutrientes fornecidos com a adubação mineral NPK de plantio foi aumentando ao longo do tempo, conforme foi elevando a demanda das plantas pelos nutrientes do solo. O estresse nutricional que ocorreu nas plantas sob tratamentos sem adubação foi visivelmente verificado ao longo do período experimental, evidenciado pelas folhas cloróticas e, principalmente, pelo menor crescimento em altura de parte aérea.

Ceconi et al. (2007) avaliaram diferentes doses da adubação fosfatada (0, 90, 180, 270, 360, 450, 540 e 630 mg kg⁻¹ de P) no crescimento inicial da erva-mate cultivada em vasos com solo sob condições de casa de vegetação. Foram realizadas medições de altura de parte aérea, diâmetro de colo, biomassa acima do solo, biomassa radicular e biomassa total. O melhor desenvolvimento das mudas de erva-mate foi observado nas doses de 360 e 450 mg kg⁻¹ de P. No mesmo sentido, Barbosa et al. (2018) também encontraram forte influência da adubação fosfatada no crescimento de clones de erva-mate, mostrando a importância do P para a fase inicial de crescimento da espécie. Porém, o incremento de crescimento foi menor em solo com maior disponibilidade inicial de P ou com outra limitação nutricional.

O resumo da análise de variância para os dados de pesos úmido e seco de folhas, caule + ramos, parte aérea (folhas + caule + ramos) e raiz das plantas de erva-mate colhidas aos 180 DAT está apresentado na Tabela 5. Diferentemente do crescimento em altura de parte aérea e diâmetro de coleto, todas as variáveis analisadas para a produção de biomassa, tanto com base em peso úmido quanto

em peso seco, foram significativamente afetadas por ambos os fatores estudados

de forma isolada (“adubação” e “biochar”), bem como pela interação entre estes fatores (“adubação × biochar”).

Tabela 5. Quadrados médios da análise de variância (ANOVA) para pesos úmido e seco de folhas, caule + ramos, parte aérea (folhas + caule + ramos) e raiz, em plantas de erva-mate avaliadas aos 180 DAT, em função dos fatores “adubação” e “biochar” e da interação entre os fatores “adubação × biochar” (UNICENTRO, Irati- PR, 2023).

Fontes de Variação		Quadrado médio – Peso úmido			
GL ¹	Folhas	Caule + ramos	Parte área	Raiz	
Bloco	3	30,6749 ^{n.s.}	14,9783 ^{n.s.}	80,0788 ^{n.s.}	38,5345 ^{n.s.}
Adubação (A)	1	2262,9628 ^{***}	1292,7341 ^{***}	6976,4625 ^{***}	8694,5188 ^{***}
Biochar (B)	3	246,4414 ^{***}	112,8765 ^{***}	690,4292 ^{***}	970,5580 ^{***}
A × B	3	135,2264 ^{***}	86,4452 ^{***}	437,4228 ^{***}	133,7136 [*]
Resíduo	21	13,6884	7,1064	29,8924	36,4330
CV (%)		17,88	23,35	17,03	10,73
Média		20,70	11,41	32,11	56,26

Fontes de Variação		Quadrado médio – Peso seco			
GL ¹	Folhas	Caule + ramos	Parte área	Raiz	
Bloco	3	3,7997 [*]	1,8493 ^{n.s.}	10,4641 [*]	10,3298 ^{n.s.}
Adubação (A)	1	337,3503 ^{***}	225,1972 ^{***}	1113,8020 ^{***}	664,0279 ^{***}
Biochar (B)	3	43,3665 ^{***}	20,2640 ^{***}	122,7785 ^{***}	53,4953 ^{**}
A × B	3	20,0322 ^{***}	13,9934 ^{***}	67,2274 ^{***}	47,8847 [*]
Resíduo	21	0,8037	0,6885	2,4270	11,7495
CV (%)		11,45	18,39	12,62	27,36
Média		7,83	4,51	12,34	12,53

¹ GL = Grau de Liberdade. ^{***}, ^{**}, ^{*} e ^{n.s.} = $p \leq 0,001$, $p \leq 0,01$, $p \leq 0,05$ e $p > 0,05$, respectivamente.

A Figura 5 apresenta os resultados obtidos de pesos úmido e seco de folhas, caule + ramos, parte aérea e raiz das plantas de erva-mate aos 180 DAT. Como todas as variáveis de produção de biomassa foram afetadas pela interação “adubação × biochar”, a comparação estatística das médias foi feita considerando a interação entre os fatores.

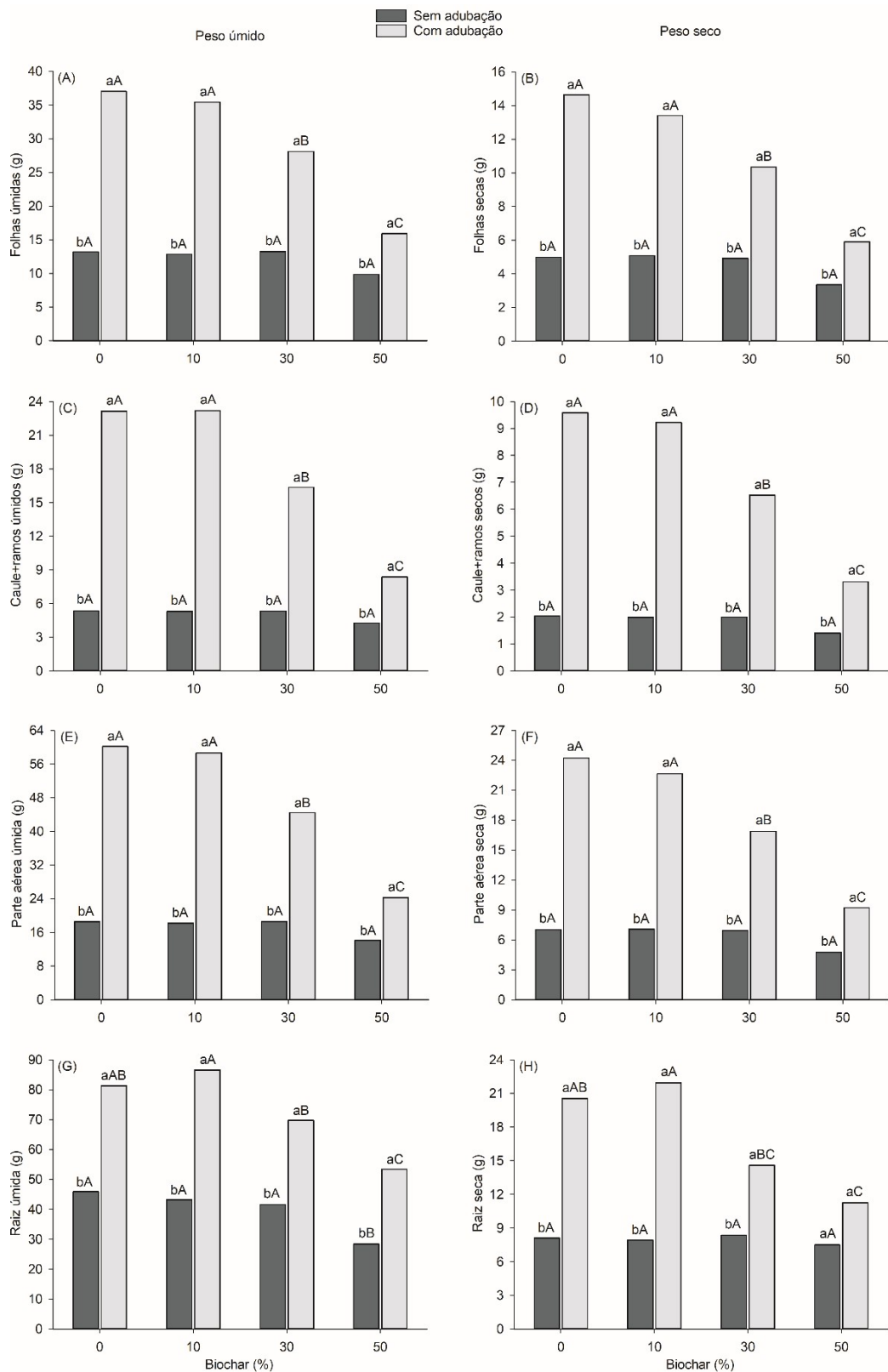


Figura 5. Pesos úmido e seco de folhas (Fig. A e B), caule + ramos (Fig. C e D), parte aérea (folhas + caule + ramos) (Fig. E e F) e raiz (Fig. G e H), em erva-mate avaliada aos 180 DAT, em função de tratamentos de adubação (sem e com) e de doses de biochar (0, 10, 30 e 50%) (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

Médias seguidas da mesma letra, minúscula, comparando os tratamentos de adubação dentro de cada dose de biochar, e maiúscula, comparando as doses de biochar dentro de

cada tratamento de adubação, não diferem entre si (teste de Tukey, $p \leq 0,05$)

Os valores das variáveis de biomassa úmida e seca tiveram variação parecida, ou seja, variaram proporcionalmente em função dos tratamentos de adubação e de doses de biochar; exceto para a biomassa de raiz.

Na parte aérea, os pesos úmidos de folhas, caule e ramos foram, em média, 2,6 vezes maiores que os pesos secos; enquanto nas raízes, houve maior concentração de água nos tecidos, com os pesos úmidos sendo, em média, 4,7 vezes maior que os pesos secos.

Quanto aos efeitos do biocarvão, a mistura de 10% de biochar no solo não modificou significativamente nenhuma variável analisada de produção de biomassa, úmida ou seca, independentemente dos tratamentos de adubação.

Porém, a partir da dose de 30% de biochar, os tratamentos que receberam adubação apresentaram diminuição na biomassa acumulada. Assim, em comparação com a testemunha (0% de biochar), a dose de 30% de biochar reduziu os pesos úmido e fresco, respectivamente, em 24 e 29% (folhas), 29 e 32% (caule + ramos), 26 e 30% (parte aérea) e 14 e 29% (raiz).

O efeito tóxico do biochar sobre a produção de biomassa das plantas adubadas foi mais forte na maior dose. Neste caso, sob a dose de 50% de biochar, as reduções de pesos úmido e fresco foram, respectivamente, de 57 e 60% (folhas), 64 e 65% (caule + ramos), 60 e 62% (parte aérea) e 34 e 45% (raiz), em comparação com a testemunha.

Quando não se realizou a adubação, o desenvolvimento das plantas foi tão negativamente afetado que o efeito tóxico das maiores doses de biochar foi pouco evidenciado, não sendo estatisticamente significativa (exceto o peso úmido de raiz, o qual a dose 50% de biochar foi significativamente menor que as demais doses).

Segundo Mbagwu e Picollo (1997) apud Petter et al. (2012), altas doses de biochar podem resultar em redução no crescimento das plantas em função da deficiência induzida de nutrientes pelo aumento de pH, pela deficiência induzida de nitrogênio em função da alta relação C/N e ainda em função da sensibilidade de algumas plantas ao pH elevado. Dessa forma, Petter et al. (2012) relataram que a adição de 7,5% de biochar ao substrato Germinar® resultou em melhor

desenvolvimento de mudas de eucalipto; porém, doses acima de 15% proporcionaram efeitos contrário, resultando em diminuição na qualidade das mudas de eucalipto.

Pluchon et al. (2014) conduziram um experimento em estufa com dois tipos de solos contrastantes comuns da Suécia. Eles avaliaram a influência de nove tipos de biochar e um controle (sem biochar) na produção de biomassa de mudas de quatro espécies de árvores (*Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Betula pubescens* e *Populus tremula*). O biochar utilizado foi obtido a partir de madeira de nove espécies de plantas lenhosas boreais. Os autores concluíram que a adição de biochar teve efeitos neutros ou positivos no crescimento das mudas, variando conforme a origem do material. Biochar com altas concentrações de fósforo e alta capacidade de troca catiônica tiveram os efeitos mais positivos. Outra importante observação foi que as mudas de angiospermas foram mais sensíveis à adição de biochar que as gimnospermas. Por fim, os autores finalizaram o trabalho concluindo que as mudas foram mais responsivas à correção de biochar para o solo com menores níveis de fósforo e P-total.

Em um trabalho realizado na Zâmbia, Chidumayo (1994) testou o uso de biochar originário de resíduos agrícolas junto ao substrato destinado à produção de mudas de sete espécies arbóreas a partir de sementes. O autor encontrou que o biochar teve efeito positivo no crescimento de seis espécies, enquanto em uma espécie (*Isobertinia angolensis*) o efeito do biochar foi negativo, diminuindo o crescimento.

Diversos trabalhos têm apontado que os efeitos do biochar no crescimento vegetal podem variar quanto à espécie, condições edafoclimáticas, idade das plantas e quanto à origem do biochar. Neste sentido, Lima et al. (2016) salientam que o potencial do biochar está diretamente relacionado às características físico-químicas do material, devido principalmente ao seu material de origem, assim como condições de pirólise.

Como ocorreu para o crescimento em altura e diâmetro de coleto, a produção de biomassa de parte aérea e raiz da erva-mate foi altamente dependente da adubação mineral NPK de plantio. Considerando os tratamentos que não receberam biochar (visto que maiores doses de biochar afetaram negativamente a produção de biomassa), verificou-se que a ausência de

adubação reduziu os pesos úmido e seco, respectivamente, em 64 e 66% (folhas), 77 e 79% (caule + ramos), 69 e 71% (parte aérea) e 44 e 60% (raiz).

Outros trabalhos também têm mostrado efeitos positivos da adubação mineral sobre o crescimento inicial da erva-mate (SANTIN et al., 2008; WALTER et

al., 2022). Corroborando com os resultados dessa pesquisa, Zavistanovicz et al. (2017) avaliaram a eficiência de substratos alternativos em combinação com a adubação de base na produção de mudas de erva-mate. Avaliaram-se cinco formulações de substratos combinadas com dois tipos de adubação (usando fertilizantes NPK tradicionais e fertilizante de liberação controlada), mais uma testemunha sem adubação. Os autores observaram que as adubações utilizadas no experimento favoreceram positivamente o crescimento da parte aérea e raízes das mudas.

Da mesma forma, Santin et al. (2013) observaram que a erva-mate cresce bem em solos com altos teores de P, mas, a maximização do crescimento das plantas depende também da adequada disponibilidade de N, K e Ca. Os autores conduziram o trabalho em casa de vegetação, cultivando a erva-mate em vasos com solo, testando combinações de doses de P (0, 100, 200, 400 e 600 mg dm⁻³ de P₂O₅) e doses de N e K (0, 50 e 100 mg dm⁻³ de N e K₂O). Concluíram-se que a ordem decrescente de macronutrientes mais exigidos e que mais contribuíram para o crescimento inicial da parte aérea da erva-mate foi P>N>K>Mg>Ca. Porém, para o crescimento de raízes, a ordem foi P>N>Ca>K>Mg.

Ainda, analisando os tratamentos sem biochar, em relação a produção de matéria seca total (100%), para as plantas que receberam adubação, as proporções da quantidade de matéria seca acumulada nas diferentes partes da erva-mate foram: 33% (folhas), 21% (caule + ramos) e 46% (raiz). Porém, a ausência de adubação afetou um pouco essas proporções, diminuindo o acúmulo de biomassa no caule + ramos e aumentando nas raízes, como segue: 33% (folhas), 13% (caule + ramos) e 54% (raiz). No geral, o acúmulo de matéria seca pela erva-mate avaliada aos 180 DAT seguiu a seguinte ordem: raiz > folhas > caule + ramos.

Neste caso, para os tratamentos que não receberam biochar, verificou-se que a quantidade de matéria seca produzida entre a parte aérea e raiz foram parecidas, variando um pouco entre tratamentos com e sem adubação. Neste caso, a deficiência nutricional aumentou o acúmulo de biomassa de raiz em detrimento ao acúmulo de biomassa de parte aérea, mais especificamente, de biomassa de caule + ramos.

Em adição, além da ausência de adubação, a maior produção de biomassa

de raiz em detrimento à biomassa de parte aérea foi fortemente evidente quando houve efeito tóxico de altas doses de biochar. Sob 50% de biochar, com adubação

verificou-se a seguinte proporção de acúmulo de biomassa: 29% (folhas), 16% (caule + ramos) e 55% (raiz); e sem adubação as proporções foram: 27% (folhas), 12% (caule + ramos) e 61% (raiz).

Assim, sob estresse de deficiência nutricional e, especialmente, sob estresse de toxidez de biochar, a produção de biomassa de raiz da erva-mate é aumentada em detrimento à produção de biomassa de raiz.

Como considerações finais para as avaliações de crescimento das plantas, conclui-se que a adubação mineral NPK de plantio é essencial para o adequado crescimento da erva-mate. O biochar obtido a partir da pirólise de resíduos de pinus

+ eucalipto, pelo menos a curto prazo, não substitui a adubação mineral, nem de forma parcial. Por outro lado, a aplicação de doses baixas do biochar no solo (até 10%) não prejudicou o crescimento da erva-mate, porém doses elevadas causou toxidez. Assim, embora neste trabalho foi mostrado que o biochar utilizado nesse experimento não possui potencial em melhorar o crescimento inicial da erva-mate, a sua utilização em baixas dosagens não deve ser ignorada, pois o biochar é cientificamente conhecido como um ótimo condicionador de solo, especialmente no que tange as propriedades físicas do solo.

5.2. Teores foliares de nutrientes, elementos benéficos e contaminantes

A Tabela 6 apresenta o resumo da análise de variância para os dados obtidos de teores foliares de macronutrientes e micronutrientes.

Dentre os macronutrientes de planta (K, P, Ca, Mg, S e N), o teor de K foi a única variável afetada significativamente pela interação entre os fatores “adubação × biochar”, enquanto os teores de P, Ca, Mg e S foram significativamente afetados pelos fatores “adubação” e “biochar” mas de forma isolada, ou seja, sem interação significativa ($p > 0,05$) entre eles. O N foi o único macronutriente cujo teor foliar não foi significativamente ($p > 0,05$) influenciado por nenhum dos fatores estudados.

Quanto aos micronutrientes (Mn, B, Mo, Zn, Cu, Ni e Fe), o teor de Mn foi a única variável significativamente afetada pela interação entre os fatores. Os teores de B e Mo foram significativamente influenciados por ambos os fatores

(“adubação” e “biochar”) de forma isolada, sem interação significativa; enquanto os teores de Zn, Cu e Ni foram significativamente afetados apenas pelo fator “adubação”. O Fe foi o único micronutriente cujo teor foliar não foi significativamente influenciado por nenhum dos fatores estudados.

Tabela 6. Quadrados médios da análise de variância (ANOVA) para teores foliares de macronutrientes (K, P, Ca, Mg, S e N) e micronutrientes (Mn, B, Mo, Zn, Cu, Ni e Fe), em plantas de erva-mate avaliadas aos 180 DAT, em função dos fatores “adubação” e “biochar” e da interação entre os fatores “adubação × biochar” (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

Macronutrientes					
Quadrado médio – K, P e Ca					
Fontes de Variação	GL¹	K	P	Ca	
Bloco	3	1,9994 ^{n.s.}	0,0699 ^{n.s.}	0,1127 ^{n.s.}	
Adubação (A)	1	6,0204 [*]	1,4492 ^{***}	5,9685 ^{***}	
Biochar (B)	3	29,8140 ^{***}	3,3854 ^{***}	1,2497 ^{**}	
A × B	3	22,7268 ^{***}	0,3040 ^{n.s.}	0,1915 ^{n.s.}	
Resíduo	21	1,5050	0,1143	0,2496	
CV (%)		10,33	23,85	10,50	
Média		11,87	1,42	4,76	
Quadrado médio – Mg, S e N					
Fontes de Variação	GL¹	Mg	S	N	
Bloco	3	0,1250 ^{n.s.}	0,0964 ^{n.s.}	26,1362 ^{n.s.}	
Adubação (A)	1	16,0744 ^{***}	0,1830 [*]	6,8265 ^{n.s.}	
Biochar (B)	3	1,5479 [*]	0,2929 ^{**}	1,9007 ^{n.s.}	
A × B	3	0,7739 ^{n.s.}	0,0692 ^{n.s.}	12,7147 ^{n.s.}	
Resíduo	21	0,4105	0,0367	13,8596	
CV (%)		11,91	24,28	24,18	
Média		5,38	0,79	15,40	
Micronutrientes					
Quadrado médio – Mn, B, Mo e Zn					
Fontes de Variação	GL¹	Mn	B	Mo	Zn
Bloco	3	22454,6147 ^{n.s.}	2,2123 ^{n.s.}	0,0570 ^{n.s.}	640,5835 ^{***}
Adubação (A)	1	461287,3288 ^{***}	2414,9512 ^{***}	1,4070 ^{***}	2835,9863 ^{***}
Biochar (B)	3	1185721,8373 ^{***}	233,7490 ^{**}	4,4861 ^{***}	154,6222 ^{n.s.}
A × B	3	130007,6640 ^{***}	15,4255 ^{n.s.}	0,0690 ^{n.s.}	15,2604 ^{n.s.}
Resíduo	21	14358,6932	37,1036	0,0939	60,8098
CV (%)		17,68	16,93	23,69	17,82
Média		677,82	35,99	1,29	43,76
Quadrado médio – Cu, Ni e Fe					
Fontes de Variação	GL¹	Cu	Ni	Fe	
Bloco	3	9,9060 ^{n.s.}	0,8226 [*]	683325,1130 ^{***}	
Adubação (A)	1	44,0391 ^{**}	6,6886 ^{***}	111312,9540 ^{n.s.}	
Biochar (B)	3	8,4631 ^{n.s.}	0,2939 ^{n.s.}	43484,3831 ^{n.s.}	
A × B	3	1,8460 ^{n.s.}	0,2401 ^{n.s.}	94891,1148 ^{n.s.}	
Resíduo	21	5,9696	0,2084	70479,1074	
CV (%)		17,82	23,77	41,89	
Média		13,71	1,92	633,72	

¹ GL = Grau de Liberdade. ***, **, * e n.s. = $p \leq 0,001$, $p \leq 0,01$, $p \leq 0,05$ e $p > 0,05$, respectivamente.

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos para os teores foliares de macronutrientes, em g kg^{-1} , determinados nas plantas de erva-mate aos 180 DAT. Como houve efeito significativo da interação “adubação × biochar” para o teor de

K, para esta variável a comparação estatística das médias foi feita considerando a interação entre os fatores. Para os demais macronutrientes, as médias foram estatisticamente comparadas de forma independente para cada fator (“adubação” e “biochar”).

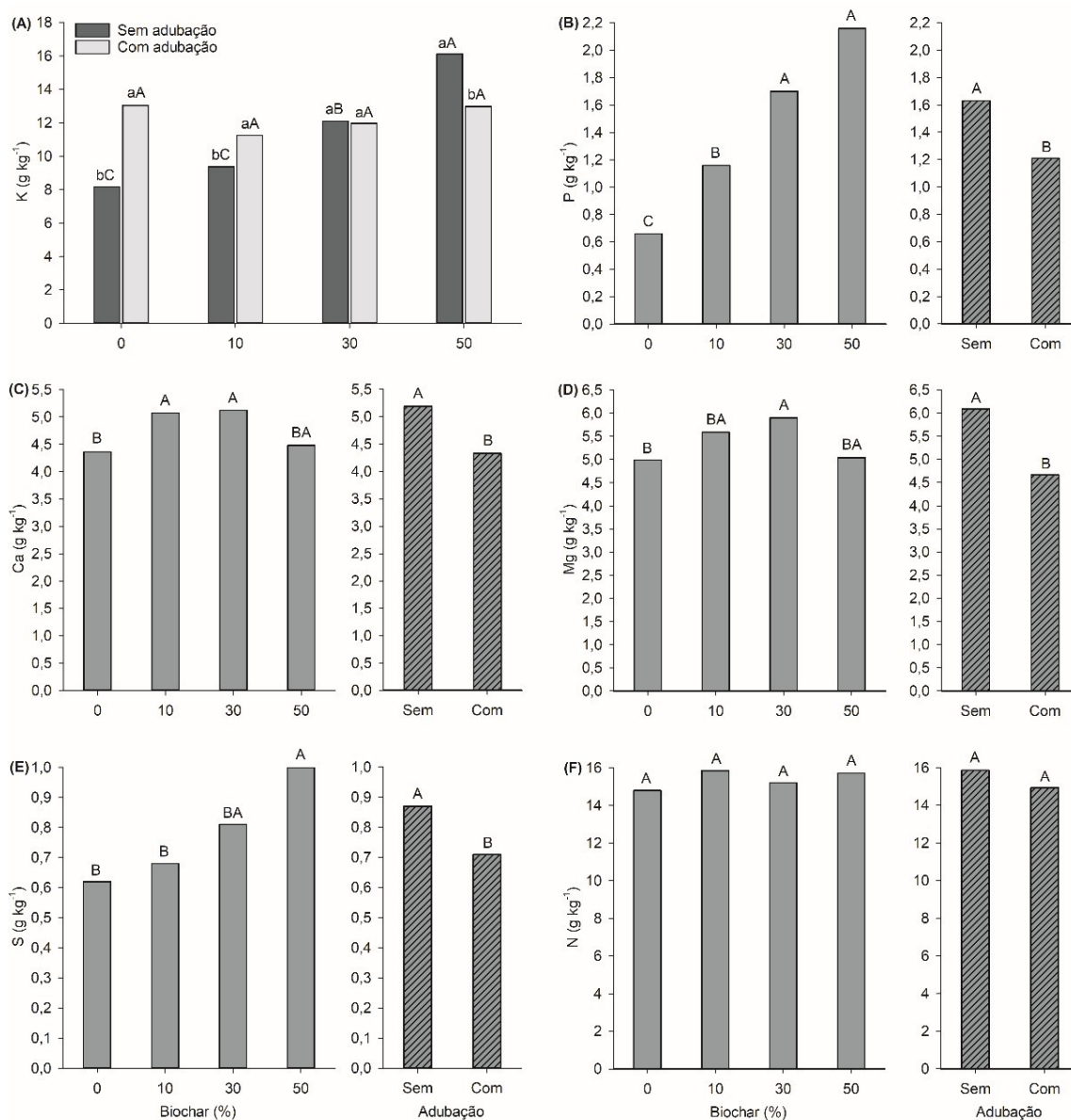


Figura 6. Teores foliares de macronutrientes (K, P, Ca, Mg, S e N), determinada em plantas de erva-mate aos 180 DAT, em função de tratamentos de adubação (sem e com) e de doses de biochar (0, 10, 30 e 50%) (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

Em teor de K (Fig. A), médias seguidas da mesma letra, minúscula, comparando os tratamentos de adubação dentro de cada dose de biochar, e maiúscula, comparando as doses de biochar dentro de cada tratamento de adubação, não diferem entre si; e para os teores de P (Fig. B), Ca (Fig. C), Mg (Fig. D), S (Fig. E) e N (Fig. F), médias seguidas da mesma letra, comparando as doses de biochar e de tratamentos de adubação de forma independente, não diferem entre si (teste de Tukey, $p \leq 0,05$).

As doses de biochar, originário de resíduos de pinus + eucalipto, afetaram de forma diferenciada o teor foliar de K, de acordo com os tratamentos de adubação. Sem adubação, o teor de K variou entre 8,17 g kg⁻¹ (0% biochar) e 16,11 g kg⁻¹ (50% biochar), havendo acréscimos significativos a partir da dose de 30% de biochar. Neste caso, em comparação com a testemunha (0% de biochar), o teor de K das folhas foi elevado em 48 e 97% nas doses de 30 e 50% de biochar, respectivamente. Porém, com adubação mineral, as doses de biochar não alteram significativamente o teor foliar de K, obtendo-se o valor médio de 12,31 g kg⁻¹ (Figura 6A).

O K foi o único macronutriente cujo teor foliar foi maior com o fornecimento da adubação mineral NPK de plantio. Analisando os tratamentos sem biochar, a ausência da adubação reduziu significativamente o teor de K em 37%, mesmo com as plantas produzindo menor quantidade de biomassa foliar, ou seja, essa redução não foi resultante do “efeito de diluição” no nutriente no tecido foliar. Assim, possivelmente o K foi um nutriente extremamente limitante para o crescimento inicial das plantas de erva-mate que não foram adubadas (Figura 6A).

Em trabalho realizado com plantas de erva-mate adulta, Santin et al. (2014) observaram que galhos grossos exportam grandes quantidades de K, assim quando removidos da área, deve-se fazer uma adubação de manutenção. Outra conclusão desse trabalho é que a adubação a base de K pouco influencia a relação matéria fresca/seca de erva-mate comercial.

O teor foliar de P variou entre 0,66 g kg⁻¹ (0% biochar) e 2,16 g kg⁻¹ (50% biochar), havendo acréscimos significativos a partir da dose de 30% de biochar. Neste caso, as doses de 30 e 50% de biochar aumentaram o teor de P em 158 e 227%, respectivamente, em comparação com a testemunha (Figura 6B).

O teor de foliar de Ca foi significativamente maior nas doses intermediárias de biochar, variando entre 4,36 g kg⁻¹ (0% biochar) e 5,12 g kg⁻¹ (30% biochar). Em comparação com a testemunha, as doses de 10 e 30% de biochar elevaram o teor de Ca em 16 e 17%, respectivamente (Figura 6C).

O teor foliar de Mg teve comportamento parecido com o teor foliar de Ca, sendo maior nas doses intermediárias de biochar, variando entre 4,99 g kg⁻¹ (0% biochar) e 5,90 g kg⁻¹ (30% biochar). Neste caso, a dose de 30% de biochar

resultou em significativo acréscimo de 18% de teor de Mg (Figura 6D).

O teor foliar de S variou entre 0,62 g kg⁻¹ (0% biochar) e 1,05 g kg⁻¹ (50% biochar), uma variação significativa de 70%. Porém, embora as doses de biochar tendeu a aumentar o teor de S, apenas na maior dose (50%) foi observado diferença significativa em relação à testemunha (Figura 6E).

Assim, os teores foliares de P, Ca, Mg e S, tiveram comportamentos parecidos, aumentado os valores com a aplicação das doses de biochar, independentemente dos tratamentos de adubação mineral.

Lima et al. (2016) observaram que o uso biochar na composição do substrato de mudas de angico também elevou o teor foliar de Mg. Ainda, o teor foliar de Ca foi 23% maior com a interação entre as doses de biochar e as maiores doses de P. Ainda para os teores foliares de P, Ca, Mg e S, a adubação mineral NPK de plantio diminuiu os teores desses nutrientes nas folhas da erva-mate aos 180 DAT. Sob ausência de adubação, os teores de P, Ca, Mg e S foram elevados significativamente em 35, 20, 30 e 21%, respectivamente, em relação aos tratamentos que receberam adubação (Figuras 6B, 6C, 6D e 6E).

Neste caso, o incremento de teores de P, Ca, Mg e S na ausência de adubação foi devido ao “efeito de concentração”; pois, as plantas não adubadas apresentaram menor produção de matéria seca, que resultou em aumento de concentração desses nutrientes no tecido foliar. Por outro lado, com a adubação, houve maior produção de matéria seca, resultando no “efeito de diluição” desses nutrientes no tecido foliar, diminuindo os teores foliares. Possivelmente, esses macronutrientes não foram fortemente limitantes para o crescimento das plantas de erva-mate, pois seus teores foliares aumentaram nas plantas que tiveram menor crescimento.

O teor foliar de N não foi significativamente modificado com os efeitos dos tratamentos de doses de biochar e adubação. O teor de N nas folhas da erva-mate foi em média 15,40 g kg⁻¹ (Figura 6F).

Neste caso, podemos supor que, junto com o K, o N foi também um nutriente limitante para o desenvolvimento da erva-mate submetida ao tratamento sem adubação. Pois, a menor produção de matéria seca não resultou em “efeito de concentração” de N no tecido foliar. Assim, dentre os macronutrientes, o K foi o

nutriente mais limitante, seguido pelo N, para o crescimento das plantas de erva-mate cultivadas sem adubação mineral NPK de plantio.

A Figura 7 apresenta os resultados para os teores foliares de micronutrientes, em mg kg^{-1} , nas plantas de erva-mate aos 180 DAT. Para o teor de Mn, devido ao efeito significativo da interação “adubação × biochar”, as médias foram estatisticamente comparadas considerando a interação. Quanto aos demais micronutrientes, as médias foram estatisticamente comparadas de forma independente para cada fator.

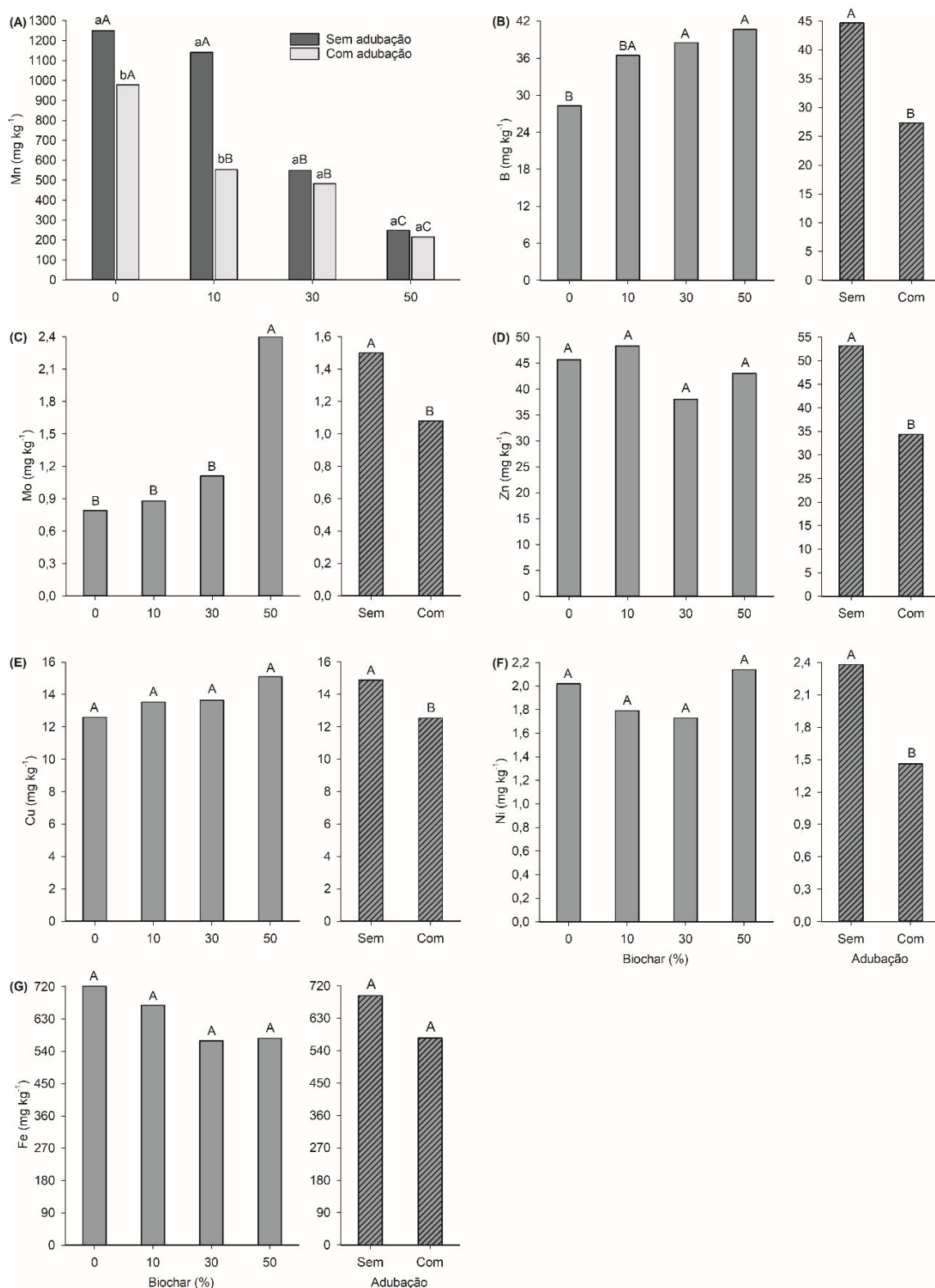


Figura 7. Teores foliares de micronutrientes (Mn, B, Mo, Zn, Cu, Ni e Fe), em erva-mate avaliada aos 180 DAT, em função de tratamentos de adubação (sem e com) e de doses de biochar (0, 10, 30 e 50%) (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

Em teor de Mn (Fig. A), médias seguidas da mesma letra, minúscula, comparando os tratamentos de adubação dentro de cada dose de biochar, e maiúscula, comparando as doses de biochar dentro de cada tratamento de adubação, não diferem entre si; e para os teores de B (Fig. B), Mo (Fig. C), Zn (Fig. D), Cu (Fig. E), Ni (Fig. F) e Fe (Fig. G), médias seguidas da mesma letra, comparando as doses de biochar e de tratamentos de adubação de forma isolada, não diferem

entre si (teste de Tukey, $p \leq 0,05$).

O teor foliar de Mn diminuiu consideravelmente com a aplicação do biochar, que foi dependente dos tratamentos de adubação. Sem adubação, o teor de Mn variou entre 1250,86 mg kg⁻¹ (0% biochar) e 249,30 mg kg⁻¹ (50% biochar), havendo decréscimos significativos a partir da dose de 10% de biochar. Neste caso, em comparação com a testemunha, o teor de Mn reduziu em 9, 56 e 80% sob doses de 10, 30 e 50% de biochar, respectivamente. Com adubação, o teor de Mn variou entre 979,54 mg kg⁻¹ (0% biochar) e 215,49 mg kg⁻¹ (50% biochar), com diminuições significativas a partir da dose de 30% de biochar. Assim sendo, em relação à testemunha, o teor de Mn diminuiu em 51 e 78% sob doses de 30 e 50% de biochar, respectivamente. Além do biochar, a adubação também reduziu o teor foliar de Mn. Neste sentido, considerando o tratamento testemunha (0% biochar), verificou-se que a ausência da adubação aumentou o teor de Mn em 28% (Figura 7A).

Ao contrário do Mn, os teores foliares de B e Mo aumentaram com a aplicação de biochar, de forma independente dos tratamentos de adubação. O teor de B variou entre 28,29 mg kg⁻¹ (0% biochar) e 40,65 mg kg⁻¹ (50% biochar), aumentando significativamente em 36 e 44% nas doses de 30 e 50% de biochar, respectivamente, em relação à testemunha. O teor de Mo apresentou faixa entre 0,79 mg kg⁻¹ (0% biochar) e 2,40 mg kg⁻¹ (50% biochar), elevando significativamente em 204% na maior dose de biochar (50%), em comparação com a testemunha. Por outro lado, diferentemente do biochar, a adubação diminuiu os teores foliares de B e Mo. Neste caso, sem o fornecimento da adubação, os teores de B e Mo foram elevados em 64 e 39%, respectivamente (Figuras 7B e 7C).

Os teores foliares dos demais micronutrientes (Zn, Cu, Ni e Fe) não variaram de forma significativa com as doses de biochar. Os teores médios de Zn, Cu, Ni e Fe foram 43,76, 13,71, 1,92 e 633,72 mg kg⁻¹, respectivamente. No entanto, a adubação diminuiu os teores foliares desses micronutrientes, exceto do Fe cuja variação não foi estatisticamente significativa. Assim sendo, na ausência da adubação os teores de Zn, Cu e Ni foram significativamente elevados em 55, 19 e 62%, respectivamente (Figuras 7D, 7E, 7F e 7G).

Da mesma forma que foi comentado para os macronutrientes P, Ca, Mg e S, possivelmente o decréscimo dos teores de micronutrientes com a adubação foi,

em maior parte, influenciado pelo “efeito de diluição” e não pela menor absorção radicular. Pois, a adubação elevou a produção de matéria seca que, conseqüentemente, resultou em diluição dos micronutrientes absorvidos no tecido foliar. Por outro lado, na ausência da adubação houve menor produção de matéria seca, resultando em “efeito de concentração” dos micronutrientes absorvidos no tecido foliar.

O resumo da análise de variância para os dados de teores foliares de elementos benéficos (Al, Si, Se, V e Na) e contaminantes (Cd, Cr e Pb) está apresentado na Tabela 7. Dentre os elementos benéficos analisados, o fator “biochar” afetou significativamente o teor de Al; entretanto, os demais elementos não foram influenciados pelos fatores estudados. Quanto aos contaminantes analisados, o teor de Cd foi significativamente afetado pela interação entre os fatores, enquanto os teores de Cr e Pb não foram significativamente alterados pelos fatores.

Tabela 7. Quadrados médios da análise de variância (ANOVA) para teores foliares de elementos benéficos (Al, Si, Se, V e Na) e contaminantes (Cd, Cr e Pb), em plantas de erva-mate avaliadas aos 180 DAT, em função dos fatores “adubação” e “biochar” e da interação entre os fatores “adubação × biochar” (UNICENTRO, Irati- PR, 2023).

		Elementos benéficos				
		Quadrado médio – Al, Se, Si, Na e V				
Fontes de Variação	GL¹	Al	Si	Se	V	Na
Bloco	3	954656,0420 **	86093,2516 n.s.	1,4912 n.s.	3,7453 **	125,1352 n.s.
Adubação (A)	1	279998,8944 n.s.	9001,4653 n.s.	7,1442 n.s.	1,3489 n.s.	63,7320 n.s.
Biochar (B)	3	678162,4038 *	62672,8776 n.s.	3,1926 n.s.	0,1726 n.s.	178,1653 n.s.
A × B	3	92330,7763 n.s.	32271,7970 n.s.	1,0239 n.s.	0,8832 n.s.	12,5953 n.s.
Resíduo	21	186193,5217	39321,0617	3,0165	0,8060	102,7964
CV (%)		38,31	13,64	30,03	46,54	15,30
Média		1126,22	1453,84	5,78	1,93	66,25
		Contaminantes				
		Quadrado médio – Cd, Cr e Pb				
Fontes de Variação	GL¹	Cd	Cr	Pb		
Bloco	3	0,0058 n.s.	0,8707 **	0,0834 n.s.		
Adubação (A)	1	0,0480 **	0,3925 n.s.	0,0759 n.s.		
Biochar (B)	3	0,0419 ***	0,3250 n.s.	0,0679 n.s.		
A × B	3	0,0121 *	0,3449 n.s.	0,0466 n.s.		
Resíduo	21	0,0038	0,1765	0,0714		
CV (%)		34,45	27,76	45,18		
Média		0,18	1,51	0,59		

¹ GL = Grau de Liberdade. ***, **, * e n.s. = $p \leq 0,001$, $p \leq 0,01$, $p \leq 0,05$ e $p > 0,05$, respectivamente.

A Figura 8 mostra os dados obtidos para os teores foliares de elementos benéficos, em mg kg^{-1} , nas plantas de erva-mate aos 180 DAT. Como não houve significância da interação “adubação × biochar”, para todos os elementos analisados as médias de cada fator estão apresentadas de forma independente.

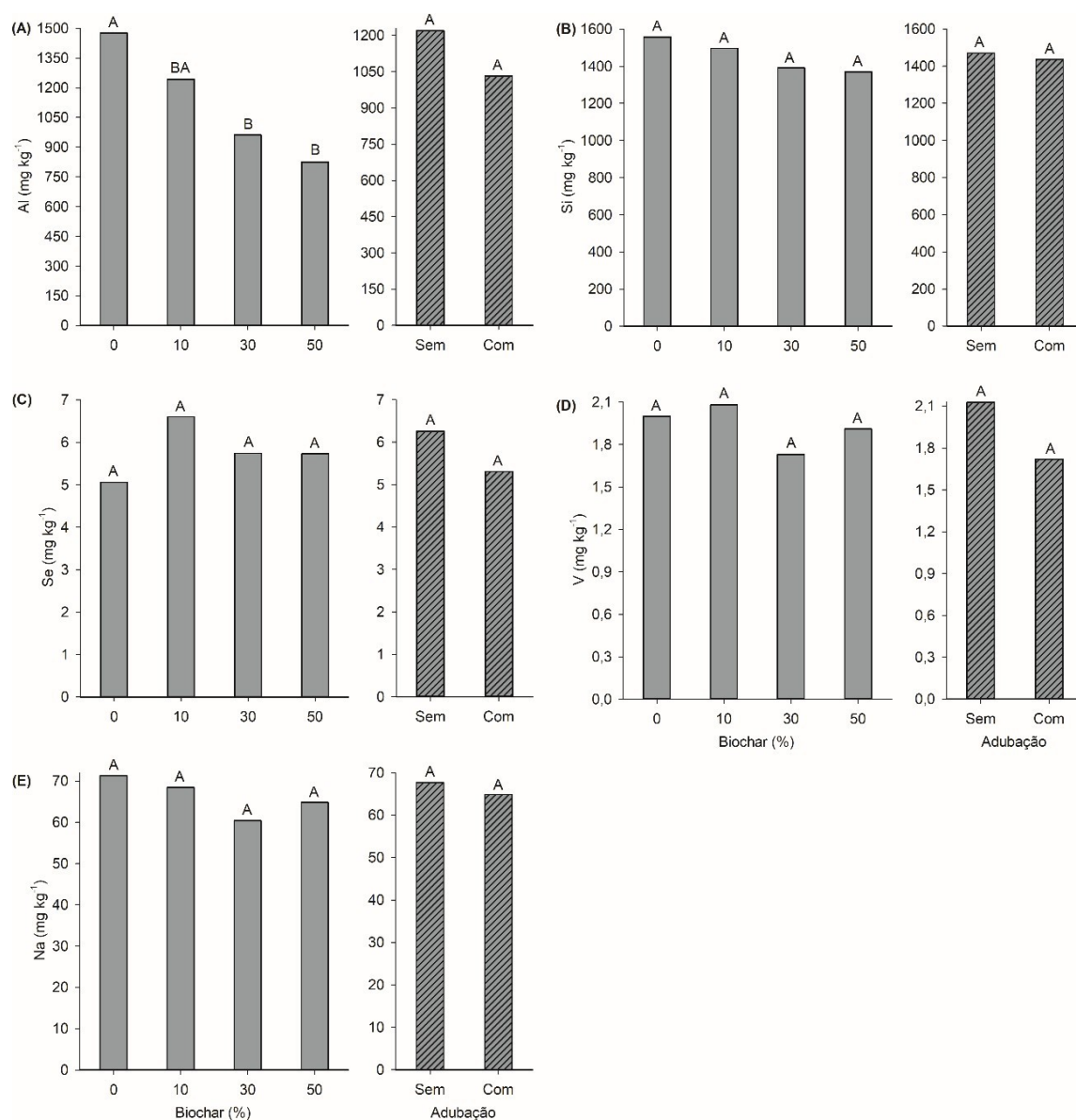


Figura 8. Teores foliares de elementos benéficos (Al, Si, Se, V e Na), em erva-mate avaliada aos 180 DAT, em função de tratamentos de adubação (sem e com) e de doses de biochar (0, 10, 30 e 50%) (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

Em teores de Al (Fig. A), Si (Fig. B), Se (Fig. C), V (Fig. D) e Na (Fig. E), médias seguidas da mesma letra, comparando as doses de biochar e de tratamentos de adubação de forma isolada, não diferem entre si (teste de Tukey, $p \leq 0,05$).

Dentre os cinco elementos benéficos analisados, apenas o teor foliar de Al foi influenciado pelo biochar, independentemente dos tratamentos de adubação.

O teor de Al variou entre $1476,56 \text{ mg kg}^{-1}$ (0% biochar) e $824,68 \text{ mg kg}^{-1}$

(50% biochar), sendo que as doses de 30 e 50% de biochar reduziram significativamente o teor de Al em 35 e 44%, respectivamente. Quanto à adubação, esta não alterou significativamente o teor de Al das folhas da erva-mate (Figura 8A).

O Al é um elemento conhecido como tóxico para as plantas em elevadas concentrações, sendo amplamente distribuídos nos solos ácidos das regiões tropicais e subtropicais do mundo (RAIJ, 2011). Contudo, a erva-mate é uma espécie nativa dos solos ácidos da região Sul da América do Sul, possuindo alta tolerância aos efeitos nocivos do Al (PENTEADO JUNIOR; GOULART, 2019). Por outro lado, o fornecimento de baixas doses de Al no meio de crescimento foi mostrado ser benéfico para o enraizamento de miniestacas em produção clonal de erva-mate (RICARDI, 2020).

Os teores foliares Si, Se, V e Na não foram significativamente modificados pelas doses de biochar e nem pelos tratamentos de adubação, obtendo-se os seguintes valores médio: 1453,84; 5,78; 1,93 e 66,25 mg kg⁻¹, respectivamente (Figuras 8B, 8C, 8D e 8E).

Diferentemente dos nutrientes, os elementos benéficos, ou também denominados como elementos úteis, não são considerados essenciais para as plantas, mas a sua presença no meio pode trazer benefícios para o desenvolvimento de algumas espécies, principalmente no que tange a amenização de alguma(s) condição(ões) desfavorável(is) do meio, como o estímulo do Al sobre o enraizamento inicial e tolerância ao estresse em baixas concentrações, efeitos do Si na amenização de estresses bióticos e abióticos, aumento da atividade antioxidante da planta na presença de Se, e substituição parcial das funções do K pelo Na na planta (FERNANDES et al., 2018; HANUS-FAJERSKA et al., 2021; LOPES et al., 2017; RICARDI, 2020).

A Figura 9 apresenta os resultados para os teores foliares dos contaminantes analisados, em mg kg⁻¹, nas plantas de erva-mate aos 180 DAT. Considerando que para o teor de Cd houve significância para a interação “adubação × biochar”, a comparação estatística das médias foi feita considerando a interação entre os fatores. Para os teores de Cr e Pb, cada fator (“adubação” e “biochar”) está apresentado de forma independente.

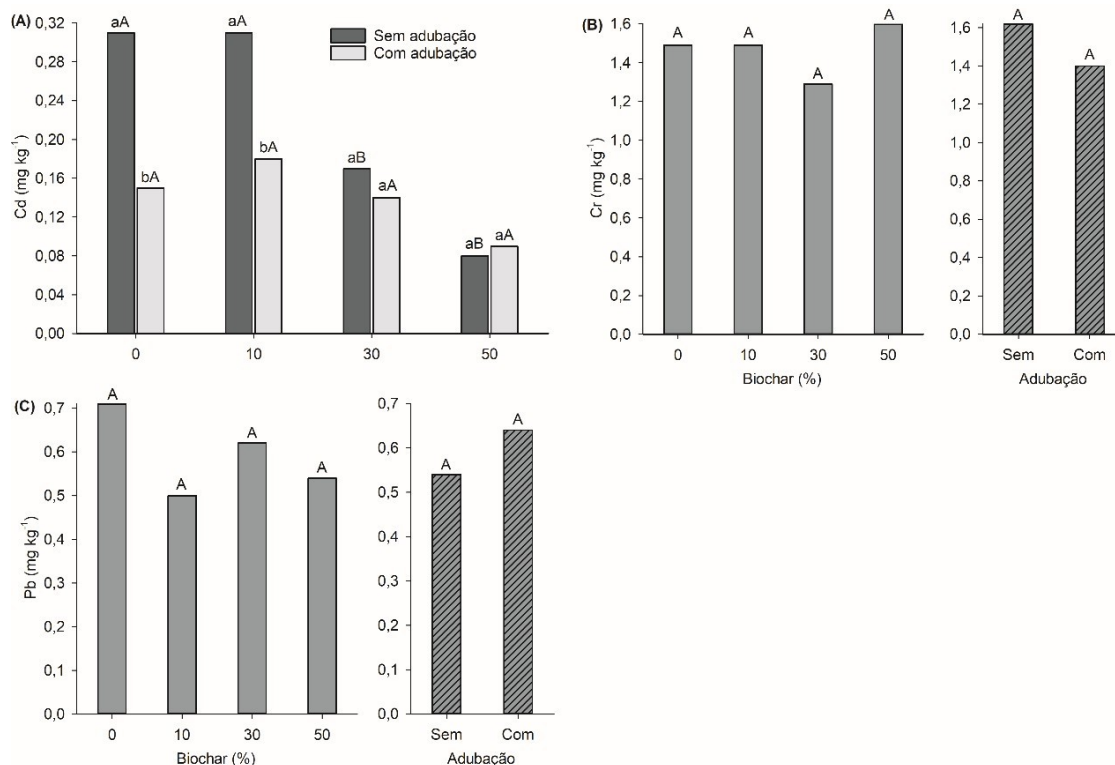


Figura 9. Teores foliares de contaminantes (Cd, Cr e Pb), em erva-mate avaliada aos 180 DAT, em função de tratamentos de adubação (sem e com) e de doses de biochar (0, 10, 30 e 50%) (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

Em teor de Cd (Fig. A), médias seguidas da mesma letra, minúscula, comparando os tratamentos de adubação dentro de cada dose de biochar, e maiúscula, comparando as doses de biochar dentro de cada tratamento de adubação, não diferem entre si; e para os teores de Cr (Fig. B) e Pb (Fig. C), médias seguidas da mesma letra, comparando as doses de biochar e de tratamentos de adubação de forma isolada, não diferem entre si (teste de Tukey, $p \leq 0,05$).

Dos três contaminantes estudados nesta pesquisa, apenas o Cd foi significativamente modificado com os tratamentos. Sem adubação, o teor foliar de Cd variou entre 0,31 mg kg⁻¹ (0% biochar) e 0,08 mg kg⁻¹ (50% biochar), verificando reduções significativas de 44 e 73% nas doses de 30 e 50% de biochar, respectivamente. Entretanto, com adubação, o teor de Cd não variou significativamente com as doses de biochar, apresentando média de 0,14 mg kg⁻¹. Verificou-se também que, nos tratamentos testemunha e com 10% de biochar, as plantas adubadas apresentaram significativamente menor teor de Cd que as plantas não adubadas. Neste caso, este resultado foi possivelmente devido ao “efeito de diluição” do elemento no tecido vegetal como consequência do maior crescimento das plantas adubadas, conforme já foi comentado para os nutrientes (Figura 9A).

Os teores foliares Cr e Pb não foram significativamente alterados com as doses de biochar e nem pelos tratamentos de adubação. Os valores médios

obtidos para esses dois contaminantes foram 1,51 e 0,59 mg kg⁻¹, respectivamente (Figuras 9B e 9C).

Os contaminantes Cd, Cr e Pb não apresentam nenhuma função conhecida no metabolismo vegetal e, pelo contrário, são considerados tóxicos para as plantas, mesmo em baixas concentrações. Nessa pesquisa foi mostrado que a aplicação de biochar no solo, de forma positiva, não aumentou o teor desses contaminantes nos tecidos foliares da erva-mate, mesmo quando o biochar foi misturado em altas proporções no solo.

O Cd e o Pb são contaminantes considerados altamente perigosos para o ambiente e saúde humana, classificados na sétima e segunda posição da lista de prioridade de substâncias perigosas da Agência para Substâncias Tóxicas e Registro de Doença (ATSDR, 2022).

O Cr, por sua vez, é também um importante poluente ambiental devido à sua ampla aplicação industrial. No ambiente, este elemento é encontrado em vários estados de oxidação, sendo as formas mais comuns o Cr(III) e o Cr(VI). O Cr(III) é menos tóxicos para os vegetais e é considerado benéfico para os mamíferos em baixas concentrações. No entanto, o Cr(VI) é altamente tóxico para as plantas e animais, mesmo em baixas concentrações, sendo um potente agente carcinogênico em humanos.

Neste sentido, o acúmulo de Cd, Cr e Pb no tecido vegetal em altas concentrações, além de poder causar toxidez diminuindo o potencial produtivo das plantas, resulta em alto risco de transferência desses elementos nocivos para o organismo animal e humano por meio da cadeia alimentar.

6. CONCLUSÕES

A adubação mineral NPK de plantio foi essencial para o adequado crescimento da erva-mate. Por outro lado, não houve efeitos positivos do biochar sobre o crescimento da erva-mate, independentemente da realização da adubação. A dose de 10% de biochar no solo não afetou o crescimento das plantas; porém, as doses de 30 e 50% causaram toxidez nas plantas que receberam adubação.

Os teores foliares de N e Fe não foram significativamente influenciados pelos tratamentos. Contudo, os teores foliares de K, Ca, Mg, S, B e Mo foram aumentados com as doses de biochar, enquanto o teor foliar de Mn foi diminuído. Por outro lado, as plantas que receberam adubação apresentaram menores teores foliares para a maioria dos nutrientes. O K foi o único nutriente cujo teor foliar foi significativamente incrementado com a adubação mineral NPK de plantio. Possivelmente, o K, seguido pelo N, foram os nutrientes mais limitantes para o crescimento das plantas de erva-mate não adubadas.

O Al foi o único elemento benéfico influenciado pelos tratamentos, cujo teor foliar foi reduzido com as doses de biochar. Os teores foliares de Si, Se, V e Na não foram significativamente afetados pelos tratamentos. Da mesma forma, dentre os contaminantes determinados, o teor foliar de Cd foi reduzido com as doses de biochar e adubação, enquanto os teores foliares de Cr e Pb não foram afetados pelos tratamentos.

Assim, neste trabalho foi mostrado que o biochar obtido a partir da pirólise de resíduos de pinus + eucalipto, pelo menos a curto prazo, não substitui a adubação mineral, nem de forma parcial, para o adequado crescimento inicial da erva-mate. Entretanto, a sua utilização em dosagens de até 10%, visando o condicionamento do solo, não traz prejuízo para o desenvolvimento da erva-mate, além de apresentar potencial de aumentar os teores foliares de parte dos nutrientes e diminuir o teor foliar do contaminante Cd.

7. REFERÊNCIAS

AHMAD, M. et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. **Chemosphere**, v. 99, p. 19-33, 2014.

ANDRADE, F. M. **Diagnóstico da cadeia produtiva da *Ilex paraguariensis* St. Hill, erva-mate**. São Mateus do Sul: FUNBIO, 1999.

ATSDR - THE AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. **ATSDR's Substance Priority List**. 2022. <https://www.atsdr.cdc.gov/spl/index.html>

BARBOSA, J. Z.; MOTTA, A. C. V.; CONSALTER, R.; POGGERE, G. C.; SANTIN, D.; WENDLING, I. Plant growth, nutrients and potentially toxic elements in leaves of yerba mate clones in response to phosphorus in acid soils. **Anais Da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n.1, p. 557–571, 2018.

BARONTI, S. et al., Impact of biochar application on plant water relations in *Vitis vinifera* (L.). **European Journal of Agronomy**, v. 53, p. 38– 44, 2014.

BARROS J. F. C. **Fertilidade do solo e nutrição das plantas. Manual de fitotecnia**. Évora, 2020.

BARROS, D. L.; REZENDE, F. A.; CAMPOS, A. T. Production of Eucalyptus urograndis plants cultivated with activated biochar. **Revista Brasileira Ciências Agrárias**, v. 14, n. 2, p. 1–6, 2019.

BATISTA, E. M. C. C. et al. Effect of surface and porosity of biochar on water holding capacity aiming indirectly at preservation of the Amazon biome. **Nature**, v. 8, p. 10677, 2018.

BIEDERMAN, L. A.; HARPOLE, W. S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. **GCB bioenergy**, v. 5, n. 2, p. 202-214, 2013.

BRAGAGNOLO, N.; PAN, W.; KOSLOWSKI FILHO, L. **Manual técnico de erva-mate**. Curitiba: Associação de Crédito Rural do Paraná, 1980.

CAMARGO, P. N.; SILVA, O. **Manual de adubação foliar**. São Paulo: La Libreria e Herba, 1975.

CARVALHO, P. E. R. Espécies Arbóreas Brasileiras: Coleção Espécies Arbóreas Brasileiras, vol. 1. **Brasília: Embrapa Informações Tecnológica**; Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2003.

CECONI, D. E.; POLETTO, I.; LOVATO, T.; MUNIZ, M. F. B. Exigência nutricional de mudas de erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) à adubação fosfatada. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 1, p. 25-32, 2007.

CHAVES, L. de L. B.; CARNEIRO, J. G. de A.; BARROSO, D. G. Crescimento de mudas de angico vermelho produzidas em substrato fertilizado, constituído de resíduos agro-industriais. **Scientia Forestalis**, v.72, p.49-56, 2006.

CHIDUMAYO, E. N. Effects of wood carbonization on soil and initial development of seedlings in miombo woodland, Zambia. **Forest Ecology and Management**, v. 70, p. 353-357, 1994.

COSTA, S. G. **A erva-mate**. Curitiba: Cientia et Labor, 1994.

DA CROCE, D. M.; FLOSS, P. A. Recuperação dos ervais nativos pelo método de decepa. **Agropecuária Catarinense**, v. 9, n. 4, p. 19-21, 1996.

DANIEL, O. **Erva-mate: sistema de produção e processamento industrial**. Dourados, MS: UFGD; UEMS, 2009. 288 p.

DE ANDRADE, A. R.; ROSEGHINI, W. F. F.; DE ASSIS MENDONÇA, F. Análise do campo térmico da cidade de Irati/PR: primeiros experimentos para a definição do clima urbano. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.6, 57-78, 2010.

DING, Y., LIU, Y. G., LIU, S. B., HUANG, X. X., LI, Z. W., TAN, X. F., ZHOU, L. Potential benefits of biochar in agricultural soils: a review. **Pedosphere**, v.27, n.4, 645-661, 2017.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, Brazil: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

FAGERIA, N. K. **The use of nutrients in crop plants**. New York: CRC Press, 2008. 428p.DOI:10.1201/9781420075113

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSTAT Database. 2021**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>>. Acesso 10 de maio de 2023.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: Universidade Federal de Lavras -UFLA, FAEPE, 2005.

FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. de; SANTOS, L. A. (ed.). **Nutrição mineral de plantas**. 2 ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2018. p. 563- 597.

FERREIRA, D. F. **Sisvar: a computer statistical analysis system**. **Ciência e Agrotecnologia**, v.35, 1039-1042, 2011.

GONÇALVES, J. L. M.; MELLO, S. L. M. O sistema radicular das árvores. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed) **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2000. p. 1-57.

GREGIANINI, T. S.; WINGE, H. Variabilidade de proteínas de reserva em populações naturais de erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil., Aquifoliaceae). In: Congresso Sul-Americano da Erva-mate, 2.; Reunião Técnica da Erva-Mate, 3. 2000, Encantado. **Anais...** Porto Alegre: Edição dos Organizadores, 2000. p. 373-380.

GUIMARÃES, R. S. **Efeito do biocarvão e pó de serra na disponibilidade de nutrientes, crescimento e na produção de milho (*Zea mays* L.) em Latossolo Amarelo distrófico na Amazônia Central**. Dissertação (Mestrado em Agricultura no Trópico Úmido). Instituto Nacional de Pesquisas Amazônicas, Manaus, Amazonas, Brasil, p. 79. 2017. <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/5356>

HAAG, H. P. **Ciclagem de nutrientes em florestas tropicais**. Campinas: Fundação Cargil, 1985. 144p.

HAGEMANN, N. et al. Activated Carbon, Biochar and Charcoal: Linkages and Synergies across Pyrogenic Carbon's ABCs. **Water**, v. 10, n. 2, p. 182, 2018.

HAMMER, E. C. et al. A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 77, p. 252-260, 2014.

HANUS-FAJERSKA, E.; WISZNIEWSKA, A.; KAMIŃSKA, I. A dual role of vanadium in environmental systems—beneficial and detrimental effects on terrestrial plants and humans. **Plants**, v. 10, n. 6, p. 1110, 2021.

HENRIQUE, F. A.; CANTERI, M. H. G.; AYALA, L. A. C.; KOVALESKI, J. L. Análise de mercado da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. H.) no Brasil. **Anais**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Produção. Ponta Grossa - PR. 2014.

IBGE. **Produção agrícola municipal**. [2015]. Disponível em: <Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=106&z=p&o=28> >. Acesso em: 10 abr. 2015. <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção Agrícola Municipal**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>>. Acesso em 09 de maio 2023.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1985.

LAMB, D.; ERSKINE, P. D.; JOHN, A.; PARROTTA, J. A. Restoration of degraded Tropical Forest landscapes. **Science**, v.310, p.1628-1632, 2005. DOI: 10.1126/science.1111773. <https://doi.org/10.1126/science.1>.

LASSERRE, E. N. **Abonos en yerba mate**. Cerro Azul: Estacion Experimental Agropecuária, 1973. (Informe Técnico, 19)

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for Environmental Management: An Introduction. **Science and Technology**, v.1, p.1-12, 2009.

LIANG, F.; LI, G.; LIN, Q.; ZHAO, X. Crop yield and soil properties in the first 3 years after biochar application to a calcareous soil. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 13, p. 25-532, 2014.

LIMA FILHO, O. F.; AMBROSANO, E. J.; ROSSI, F.; CARLOS, J. A. D. (Ed.).

Adução verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática. Brasília, DF: Embrapa, 2014.

LIMA, S. L.; MARIMON JUNIOR, B. H.; MELO-SANTOS, K. S.; REIS, S. M.; PETTER, F. A.; VILAR, C. C.; MARIMON, B. S. Biochar no manejo de nitrogênio e fósforo para a produção de mudas de angico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 2, p. 120-131, 2016.

LIMA, S. L.; TAMIOZZO, S.; PALOMINO, E. C.; PETTER, F. A.; MARIMON-JUNIOR, B. H. Interactions of biochar and organic compound for seedlings production of *Magonia pubescens* A. St. Hil. **Revista Árvore**, v.39, p. 655-661, 2015.

LONE, A. H.; NAJAR, G. R.; GANIE, M. A.; SOFI, J. A.; ALI, T. Biochar for Sustainable Soil Health: A Review of Prospects and Concerns. **Pedosphere**, 25, p.639-653, 2015. doi:10.1016/S1002- 0160(15)30045-X

LOPES, G.; ÁVILA, F. W.; GUILHERME, L. R. G. Selenium behavior in the soil environment and its implication for human health. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, p. 605-615, 2017.

LOURENÇO, R. S. et al. Avaliação de níveis de nitrogênio sobre a produção de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) em Fernandes Pinheiro-PR, em latossolo vermelho escuro. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 34, p. 75-98, jan./jun. 1997.

LOURENÇO, R. S.; MEDRADO, M. J. S. **Cobertura morta na produção de erva-mate**. Colombo: EMBRAPA-CNPQ, 1998. 15 p. (EMBRAPA-CNPQ. Circular técnica, 30).

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980.

MBAGWU, J. S. C.; PICCOLO, A. Effects of humic substances from oxidized coal on soil chemical properties and maize yield. In: DROZD, J.; GONET, S. S.; SENESI, N.; WEBER, J. (Ed.) The role of humic substances in the ecosystems and in environmental protection. IHSS, Polish Society of Humic Substances, Wroclaw, Poland, 1997. p. 921-925.

MEDRADO, M. J. S. **Uso de coberturas verdes de solo nas entrelinhas de erva-mate**. Colombo: Embrapa Florestas, 2002. 7 p. (Embrapa Florestas. Comunicado técnico, 84).

MEDRADO, M. J. S.; LOURENÇO, R. S.; RODIGHIERI, H. R.; DEDECEK, R. A.; PHILIPPOVSKI, J. F.; CORREA, G. **Implantação de ervais**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 26 p. (Embrapa Florestas. Circular técnica, 41).

MUKOME, F. N. D.; ZHANG, X.; SILVA, L. C. R.; SIX, J.; PARIKH, S. J. Use of chemical and physical characteristics to investigate trends in biochar feedstocks. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.61, p.2196-2204, 2013.

NDEDE, E. O.; KUREBITO, S.; IDOWU, O.; TOKUNARI, T. JINDO, K. The potential of biochar to enhance the water retention properties of sandy agricultural soils. **Agronomy**, v. 12, n. 311, p. 1-12, 2022.

NEVES, C. S. V. J.; FELLER, C.; KOUAKOUA, E. Efeito do manejo do solo e da matéria orgânica solúvel em água quente na estabilidade de agregados de um latossolo argiloso. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.5, p.1410-1415, 2006.

OLIVA, O. V. **Composição química e produtividade de procedências e progênies de erva-mate (*Ilex paraguariensis* st. hil.) cultivadas em latossolo vermelho distrófico no município de Ivaí – PR.** Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná - UFPR. Curitiba, Paraná, p. 81. 2007.

OLMO, M. et al. Changes in soil nutrient availability explain biochar's impact on wheat root development. **Plant and Soil**, v. 399, n. 1-2, p. 333-343, 2016.

PASINATO, R. **Aspectos etnoentomológicos, socioeconômicos e ecológicos relacionados à cultura na erva-mate (*Ilex paraguariensis*) no município de Salto do Lontra, Paraná, Brasil.** 2003. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agrossistemas). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Esalq, Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, 125 p. 2003.

PENTEADO JUNIOR, J. F.; GOULART, I. C. G. dos R. **Erva 20: Sistema de produção de erva-mate.** Brasília: Embrapa, 2019. 152 p.

PETTER, F. A. **Biomassa carbonizada como condicionador de solo: aspectos agrônômicos do seu uso em solos de cerrado.** Tese de Doutorado, UFG, Ano de Obtenção. 2010. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias). Universidade Federal de Goiás - UFG, Goiânia, Goiás, p. 130. 2010.

PETTER, F. A.; ANDRADE, F. R.; MARIMON JUNIOR, B. H.; GONCALVES, L. G. V.; SOUZA, T. R. S. Biochar como condicionador de substrato para a produção de mudas de eucalipto. **Revista Caatinga (UFERSA. Impresso)**, v. 25, p. 44-51, 2012.

PHILIPPOVSKY, J. F.; MEDRADO, M. J. S.; DEDECEK, R. A. Produtividade da ervamate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) influenciada pelo uso de diferentes coberturas verdes do solo em Ponta Grossa/PR. **In: Congresso Sul-Americano de Erva-mate, 2.; Reunião Técnica da Erva-mate, 3., 2000, Porto Alegre. Anais...** Porto Alegre: Ed. dos Organizadores, 2000. p. 286-289.

PITUELLO, C. et al. Effects of biochar on the dynamics of aggregate stability in clay and sandy loam soils. **European journal of soil science**, v. 69, n. 5, p. 827-842, 2018.

PLUCHON, N.; GUNDALE, M. J.; NILSSON, M. C.; KARDOL, P.; WARDLE, D. A. Stimulation of boreal tree seedling growth by wood-derived charcoal: effects of charcoal properties, seedling species and soil fertility. **Functional Ecology**, v. 28, p. 766–775, 2014.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2016.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011. 420 p.

REISSMANN, C. B. et al. Bio-elementos em folhas e hastes de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hill.) sobre Cambissolos na região de Mandirituba - PR. **Floresta**, Curitiba, v. 14. n. 2, p. 49-54, 1983.

REISSMANN, C. B.; PREVEDELLO, B. M. S. Influência da calagem no crescimento e na composição química foliar da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.). In: [Edição especial: Anais do congresso nacional sobre essências nativas, conservação da biodiversidade, 2.,. 1992, São Paulo]. Revista do Instituto Florestal, São Paulo, v. 4, n. único, parte 4, 1992. p. 625-629.

RICARDI, A. C. **Qualidade de mudas clonais de erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St.- Hil.) com uso de alumínio e cálcio no substrato**. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual do Centro-Oeste - UNICENTRO, Guarapuava, Paraná, p. 71. 2020.

ROSSA, Ü. B. **Produtividade e compostos foliares de erva-mate sob efeitos de luminosidade e fertilização**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, Paraná, p. 208. 2013.

SANTIN, D.; BENEDETTI, E. L.; BASTOS, M. C.; KASEKER, J. F.; REISSMANN, C. B.; BRONDANI, G. E.; BARROS, N. F. Crescimento e nutrição de erva-mate influenciados pela adubação nitrogenada, fosfatada e potássica. **Ciência Florestal**, v. 23; p. 363-375, 2013.

SANTIN, D.; BENEDETTI, E. L.; BRONDANI, G. E. REISSMANN, C. B. ORRUTEA, A. G.; ROVEDA, L. F. Nitrogênio, fósforo e potássio no crescimento de mudas de erva-mate. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 9, n. 1, p. 59-66, 2008.

SANTIN, D.; BENEDETTI, E. L.; BARROS, N. F.; ALMEIDA, I. C.; LEAL, G. P.; FONTES, L.; NEVES, J. C. L.; WENDLING, I.; REISSMANN, C. B. Effect of potassium fertilization on yield and nutrition of yerba mate (*Ilex paraguariensis*). **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.38, p.1469-1477, 2014.

SANTOS, J. A.; GONZAGA, M. I. S.; ALMEIDA, A. Q.; SILVA, A. J.; SANTOS, J. C. J.; LIMA, I. S. Characterization, water retention and availability of different types of biochar from animal and plant origin. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 5, e48411528360, 2022.

SCHIMMELPFENNIG, S.; GLASER, B. One step forward toward characterization: some important material properties to distinguish biochars. **Journal of Environment Quality**, v. 41, n. 4, p. 1001, 2012.

SEAB Paraná. Erva-mate – Prospecção tecnológica da cadeia produtiva.

Documento Executivo. Curitiba, p. 27, 1997.

SILVEIRA, T. F.; MEINHARTA, A. D.; SOUZA, T. C. L.; FILHO, J. T.; GODOY, H. T. Phenolic compounds from yerba mate based beverages – A multivariate optimisation. **Food Chemistry**. v. 190, n. 1, p. 1159-1167, 2016.

ŠIMANSKÝ, V.; JURIGA, M. Effect of biochar on soil structure – review. **Acta fytotechn zootech**, v. 21, n. 1, p. 11-19, 2018

SOARES, D. C. O.; LIMA, S. F.; LIMA, A. P. L.; PAULA, J. A. F. Uso do biochar e de bioestimulante na produção e qualidade de mudas de *Sapindus saponaria* L. **Ciência Florestal**, v.31. 2021.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004. 400 p.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. 2 ed. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Estadual Paraná, 2019. 289 p.

SOSA, A. D. Fertilizacion química, abonos, requerimientos nutricionales. In: Curso de Capacitacion en Producción de Yerba Mate, 2, 1994, Cerro Azul. Curso... Cerro Azul: INTA, 1994. p.68-90

TRAUTENMÜLLER, J. W.; BORELLA, J.; LAMBRECHT, F. R.; VALERIUS, J.; COSTA JUNIOR, S.; LESCHEWITZ, R. Influência de composto orgânico no desenvolvimento de *Ilex paraguariensis* St. Hilaire. **Advances in Forestry Science**, Cuiabá, v.3, n.4, p.55-58, 2016.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Microwave assisted acid digestion of sediments sludge, soils, and oils**. EPA SW 846:3051A. 2017.

VALDUGA, E.; De FREITAS, R. J. S.; REISSMANN, C. B.; NAKASHIMA, T. Caracterização química da folha de *Ilex paraguariensis* St. Hil. e de algumas espécies utilizadas na adulteração do mate. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v.15, n.1, p.25-36, 1997.

VENTURIN, N. et al. Adubação mineral do angicoamarelo (*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub.). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 3, p. 441-448, mar. 1999.

VERHEIJEN, F. G. A.; JEFFERY, S.; BASTOS, A. C.; VAN DER VELDE, M.; DIAFAS, I. **Biochar Application to Soils – A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions**, European Commission, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2010.

WALTER, L. S.; GONÇALVES, M. F.; KRATZ, D.; FRAGOSO, R. O.; STUEPP, C.

A. Growth and Quality of Yerba Mate Seedlings Affected by Fertilizer Doses in South Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology** (ONLINE), v. 65, p. e22210394, 2022.

WENDLING, I.; SANTIN, D. **Propagação e nutrição de erva-mate**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. 195 p.

ZAMBIER A. C. **Avaliação dos níveis de nutrientes, cafeína e taninos após adubação mineral e orgânica, e sua relação com a produtividade na erva-mate (*Ilex paraguariensis* St Hil.)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, Paraná. 2001.

ZANETTI, M., CAZETTA, J. O., MATTOS JÚNIOR, D., CARVALHO S. A. Uso de subprodutos de carvão vegetal na formação do porta-enxerto limoeiro 'cravo' em ambiente protegido. **Revista Brasileira Fruticultura**, v. 25, p. 508-512. 2003.

ZAVISTANOVICZ, T. C.; ARAUJO, M. M.; AIMI, S. C.; FLORES, R.; BERGHETTI, Á. L.; DEPONTI, G. Morphophysiological responses of *Ilex paraguariensis* seedlings to different substrates and fertilizations. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, n. 2, p. 111-115, 2017.