

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE E CONSERVAÇÃO
DA NATUREZA

Hanna Turetti Cardinot

Vai um cafezinho? Potenciais efeitos da adição de borra de café como fertilizante na germinação e desenvolvimento de *Handroanthus chrysotrichus* (Mart. Ex.) Mattos (Bignoniaceae)

Juiz de Fora

2025

Hanna Turetti Cardinot

**Vai um cafezinho? Potenciais efeitos da adição de borra de café como fertilizante na
germinação e desenvolvimento de *Handroanthus chrysotrichus* (Mart. Ex.) Mattos
(Bignoniaceae)**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Biodiversidade e
Conservação da Natureza, da
Universidade Federal de Juiz de Fora
como requisito parcial à obtenção do
título de Mestre em Biodiversidade e
Conservação da Natureza. Área de
concentração: Biodiversidade

Orientador: Prof. Dr. André Megali Amado

Coorientador: Dr. Cristiano Ferrara de Resende

Juiz de Fora

2025

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Turetti Cardinot, Hanna.

Vai um cafezinho? Potenciais efeitos da adição de borra de café como fertilizante na germinação e desenvolvimento de *Handroanthus chrysotrichus* (Mart. Ex.) Mattos (Bignoniaceae) / Hanna Turetti Cardinot. -- 2025.

41 p.

Orientador: André Megali Amado

Coorientador: Cristiano Ferrara Resende

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Biológicas. Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação da Natureza, 2025.

1. contaminante emergente. 2. gestão de resíduos. 3. restauração ambiental. I. Megali Amado, André, orient. II. Ferrara Resende, Cristiano, coorient. III. Título.

Hanna Turetti Cardinot

Vai um cafézinho? Potenciais efeitos da adição de borra de café como fertilizante na germinação e desenvolvimento de *Handroanthus crysotrichus* (Mart. Ex.) Mattos (Bignoniaceae)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação da Natureza da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Biodiversidade e Conservação da Natureza. Área de concentração: Comportamento, Ecologia e Sistemática.

Aprovada em 16 de janeiro de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. André Megali Amado - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Cristiano Ferrara de Resende
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Fábio Roland Ferreira da Silva
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dra. Catarina da Fonseca Lira
Instituto de Pesquisa Jardim Botânico do Rio de Janeiro

Juiz de Fora, 18/12/2024.



Documento assinado eletronicamente por **André Megali Amado, Professor(a)**, em 16/01/2025, às 12:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Catarina da Fonseca Lira, Usuário Externo**, em 16/01/2025, às 15:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fábio Roland Ferreira da Silva, Professor(a)**, em 16/01/2025, às 16:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cristiano Ferrara de Resende, Usuário Externo**, em 16/01/2025, às 17:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2165487** e o código CRC **1AACAD8E**.

RESUMO

Os contaminantes emergentes, como a cafeína, são persistentes em ambientes aquáticos, solos e ar, apresentando resistência aos métodos convencionais de tratamento de resíduos. Presente em café, chá e medicamentos, a cafeína pode apresentar toxicidade para organismos vegetais e animais. O consumo global de café e o descarte inadequado de subprodutos, como a borra de café, contribuem para a introdução desse composto no ambiente. Rica em compostos orgânicos e nutrientes, a borra de café é utilizada como fertilizante, podendo alterar propriedades físico-químicas do solo e afetar o crescimento vegetal. Este estudo avaliou os efeitos da borra de café e da cafeína na germinação e no desenvolvimento de *Handroanthus chrysotrichus* (Mart. Ex.) Mattos (ipê-amarelo), espécie nativa da Mata Atlântica. Foram realizados quatro tratamentos: CAF (borra de café), DCAF (borra descafeinada), NPK (fertilizante comercial) e controle (solo puro), aplicados em 48 potes com 288 sementes, acompanhadas por 240 dias. Foram analisadas a porcentagem e o tempo médio de germinação, o índice de velocidade de germinação e a porcentagem de estabelecimento das plântulas. Na germinação, C, CAF e DCAF apresentaram desempenho semelhante, enquanto NPK apresentou valores inferiores. A presença de cafeína no tratamento CAF associou-se a sinais de estresse e redução do crescimento inicial das mudas. Os resultados indicam que a borra de café apresenta efeito duplo: fornece nutrientes, mas a cafeína pode causar efeitos fitotóxicos, comprometendo o desenvolvimento inicial das mudas de *H. chrysotrichus*. O uso da borra de café como insumo agrícola requer avaliação criteriosa, visando minimizar riscos e maximizar benefícios ambientais.

Palavras-chave: Gestão de Resíduos; Contaminantes Emergentes; Fitotoxicidade.

ABSTRACT

Emerging contaminants, such as caffeine, persist in aquatic environments, soils, and air, exhibiting resistance to conventional wastewater treatment methods. Present in coffee, tea, and pharmaceuticals, caffeine may be toxic to both plant and animal organisms. The global increase in coffee consumption and the improper disposal of by-products, such as spent coffee grounds (SCG), contribute to the introduction of this compound into the environment. Rich in organic compounds and nutrients, SCG is used as a fertilizer, potentially altering the soil's physicochemical properties and affecting plant growth. This study evaluated the effects of SCG and caffeine on the germination and development of *Handroanthus chrysotrichus* (Mart. ex.) Mattos, a native species of the Atlantic Forest. Four treatments were applied: CAF (SCG), DCAF (decaffeinated SCG), NPK (commercial fertilizer), and C (control), in 48 pots with 288 seeds, monitored for 240 days. Parameters analyzed included germination percentage, mean germination time, germination speed index, and seedling establishment percentage. In terms of germination, C, CAF, and DCAF showed similar performance, whereas NPK yielded lower values. The presence of caffeine in the CAF treatment was associated with signs of stress and reduced initial growth. The results indicate that SCG exerts a dual effect: providing nutrients, but caffeine may cause phytotoxic effects, compromising early development. The use of SCG as an agricultural input requires careful assessment to minimize risks and maximize environmental benefits.

Keywords: Waste Management; Emerging Contaminant; Phytotoxicity

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, expresso minha sincera gratidão aos meus pais, Alex e Simone, por jamais medirem esforços ao me apoiar e incentivar a buscar a superação contínua. Ao meu irmão, Ives, meu agradecimento por sua crença inabalável em meu potencial.

Meus mais profundos agradecimentos são direcionados aos meus orientadores, Professores Dr. André e Dr. Cristiano, por todos os ensinamentos, atenção dedicada e paciência demonstrada ao longo desta trajetória. Agradeço, igualmente, aos Professores Dr. Fabrício Alvim e Dr. Paulo Peixoto pela colaboração essencial e pelo suporte técnico fornecido a este trabalho.

Estendo meu reconhecimento às amigas Layla e Yumi, que ofereceram suporte inestimável de amizade e parceria, tanto nas atividades laboratoriais quanto fora delas.

Meus agradecimentos se estendem também aos professores e colaboradores do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação da Natureza, cuja dedicação enriqueceu minha formação acadêmica e forneceu a base necessária para a realização deste estudo.

Por fim, sou grato(a) ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), agências que, por meio do suporte financeiro, viabilizaram a execução deste projeto.

SUMÁRIO

1.Introdução.....	1
2. Metodologia.....	5
2.1 - Desenho experimental	5
2.2 - Determinação da liberação de nutrientes a partir da borra de café	5
2.3 – Germinação, estabelecimento e crescimento do ipê-amarelo.....	6
2.4 – Procedimentos analíticos	9
2.6- Análises estatísticas	11
3. Resultados.....	13
3.1 - Determinação da liberação de nutrientes a partir da borra de café	13
3.2 - Efeitos da aplicação da borra de café na germinação das sementes e estabelecimento das plântulas	13
3.3. Efeitos da borra de café no desenvolvimento das mudas	15
4. Discussão	20
4.1. A presença de borra de café ao solo não afeta a germinação de sementes do ipê-amarelo	21
4.2. A aplicação de borra de café apresentou resultado negativo ao desenvolvimento das mudas.....	23
5. Referências	29

1. INTRODUÇÃO

O termo “contaminantes emergentes” foi introduzido pela comunidade científica para destacar a existência de substâncias poluentes de grande relevância atual (Montagner et al., 2017) e se refere àqueles poluentes recém-detectados em água, solo e/ou ar, que não são regulamentados pelas normas ambientais e tampouco removidos pelos tratamentos tradicionais em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). O termo se destacou após o livro "Primavera Silenciosa" (1962), de Rachel Carson, alertar a comunidade sobre o uso do pesticida DDT (Sauvé & Desrosiers, 2014). Produtos farmacêuticos, hormônios, resíduos de antibióticos e microplásticos são exemplos de compostos pertencentes a esse grupo (Montagner et al., 2017). Esses contaminantes se acumulam no ambiente devido majoritariamente ao descarte inadequado pelos seres humanos, sendo considerados como marcadores antropogênicos (Buerge et al., 2003, 2006; Moore et al., 2008) e cada vez mais detectados em locais aonde não chegariam sem a intervenção humana (Montagner et al., 2017). A cafeína, uma substância pertencente à família das xantinas, é um dos psicoativos mais consumidos no mundo (Diogo et al., 2013) e está presente em produtos cotidianos, como café, chás, bebidas energéticas, chocolates e fármacos (Buerge et al., 2003). As concentrações de cafeína no ambiente **são** suficientes para a determinação de sua toxicidade, visto que são determinadas por suas características padrões, como pH ácido e compostos fenólicos. Estudos demonstraram efeitos letais e/ou prejudiciais da presença de cafeína no desenvolvimento de seres vivos, como por exemplo em peixes, anfíbios e outros organismos aquáticos (Moore et al., 2008; Yeh et al., 2012; Dos Santos et al., 2022, Cervera-Mata et al., 2018). Devido à suposta baixa taxa de remoção da cafeína nas ETEs e à ausência de regulamentação específica sobre destinação de seu descarte, é importante destacar que podem ocorrer impactos cumulativos e de longo prazo, inclusive para os seres humanos (Bernegossi et al., 2021).

O café é uma das mais importantes *commodities* do mundo há décadas (Esquivel et al., 2011) e, atualmente, é a segunda bebida mais consumida mundialmente (Caliskan et al., 2020), o que está diretamente relacionado ao crescimento da população mundial (Quadra et al., 2020). Apenas uma pequena fração de cafeína consumida pelos humanos é excretada em sua forma original, ca. 2-3% (Tang-Liu et al., 2023). O descarte de subprodutos do café pode, portanto, constituir uma fonte relevante de cafeína para os ecossistemas. As cafeterias e os domicílios representam a maior parte desse descarte,

originado principalmente dos subprodutos da produção cafeeira, como a borra de café. A borra de café é geralmente descartada em pias e lixos convencionais, sendo posteriormente transportada para aterros sanitários, lixões e/ou sistemas de esgoto doméstico, o que pode resultar na contaminação de mananciais (Bernegossi et al., 2021).

É amplamente reconhecido que as propriedades do café apresentam variações em função de sua diversidade, incluindo a espécie, o local de cultivo, os processos de manipulação e separação para comercialização, as padronizações de qualidade e as mudanças físico-químicas induzidas pela torra e moagem (Vignoli et al., 2011; Navarra et al., 2017). Neste trabalho, foram utilizados como base dos tratamentos apenas cafés comerciais considerados “tradicionais” pela ABIC (Associação Brasileira da Indústria do Café). Os cafés descafeinados também seguiram os mesmos critérios de seleção. O diferencial reside no processo de descafeinização, que pode ser conduzido pelas empresas por meio de diferentes técnicas: extração com solventes orgânicos, processo de água suíço com filtros de carvão e extração com CO₂ supercrítico (Ramalakshmi & Raghavan, 1999; Farah et al., 2006; De Marco et al., 2018). Os processos de retirada da cafeína podem alterar quimicamente o café (Oliveira et al., 2013); todavia, segundo Rodrigues & Bragagnolo (2013), as principais variações observadas são influenciadas pelas espécies de café e seus *blends* (*Coffea robusta* e *Coffea arabica* são espécies comumente utilizadas em misturas para baratear o valor do produto).

Com o aumento contínuo da produção e consumo de café, as concentrações de cafeína nos mananciais também têm aumentado, indicando gerenciamento inadequado dos efluentes (Quadra et al., 2020). A borra de café apresenta grande quantidade de compostos orgânicos (ácidos graxos, lignina, celulose, hemicelulose, e outros polissacarídeos) e nutrientes minerais (nitrogênio, carbono, fósforo, potássio, magnésio, entre outros) (Campos-Vega et al., 2015). Assim, a gestão e descarte inadequado da borra de café também deve contribuir para a eutrofização de mananciais (Pannard et al., 2024). Devido a essas características nutricionais, esse resíduo tem sido popularmente utilizado como fonte de nutrientes (fertilizantes caseiros) para pequenas plantações e, com sua gestão adequada, pode minimizar a chegada e acúmulo da cafeína nos ecossistemas naturais.

Algumas formas de reutilização da borra de café vêm sendo empregadas, como produção de energia-limpa, biodiesel, carvão-vegetal e até mesmo fertilizante orgânico (Kovalcik et al., 2018; Angeloni et al., 2024). O uso da borra de café como fertilizante é amplamente

difundido para o desenvolvimento de plantas (Stylianou et al., 2018), e essa utilização tende a melhorar propriedades do solo, como capacidade de retenção de água, aeração e formação de agregados, além de enriquecer a comunidade microbológica (Bastida et al., 2008; Cervera-Mata et al., 2019). Estudos avaliaram diferentes formas da aplicação da borra de café ao solo, como aplicação direta ou a partir de métodos de compostagem, em diferentes espécies, com destaque para hortaliças (brócolis, girassol, alho-poró, rabanete e alface) (Hardgrove & Livesle, 201; Cervera-Mata et al., 2019).

Com a crescente demanda por projetos de restauração florestal e arborização urbana (Shannon et al., 2023), a aplicação da borra de café como fertilizante orgânico em extensas áreas pode ser vista como alternativa para gestão desses resíduos. No entanto, apenas um estudo apresetnou informações quanto o uso da borra de café como substrato de germinação e crescimento de mudas de uma espécie arbórea, o pinheiro manso (*Pinus pinea*). Foi observado um aumento das concentrações de nutrientes do solo, como nitrogênio (N), potássio (K), magnésio (Mg) e fósforo (P), e uma diminuição de cálcio (Ca), sugerindo maior dificuldade de absorção desse nutriente pela espécie (Caliskan et al., 2020). Esse estudo destacou, ainda, a importância de investigações acerca de potenciais efeitos tóxicos dos compostos presentes na borra de café, como a cafeína.

A Mata Atlântica é um *hotspot* de diversidade, mas encontra-se em condições altamente degradadas (Resende et al., 2018). Sua área original compreendia 15% do território brasileiro, mas foi reduzida para menos de 30% de sua extensão (Resende et al., 2018). A restauração da Mata Atlântica é uma prioridade elevada para recuperação devido à sua alta diversidade de espécies, capacidade de armazenamento de carbono e ao custo de restauração (Strassburg et al., 2020). Assim, é fundamental desenvolver estratégias que favoreçam a restauração da Mata Atlântica e a conservação de espécies. A borra de café usada como fertilizante pode ser uma abordagem interessante para estimular a produtividade primária e também favorecer a sua gestão em áreas urbanas. Isso se justifica, por exemplo, pelo fato de que a aplicação de nitrogênio e fósforo comprovadamente apresenta efeito positivo na produtividade primária em diversos ambientes aquáticos e terrestres (Elser et al., 2007). Contudo, ainda não existem informações claras sobre os efeitos da borra de café em espécies arbóreas nativas da Mata Atlântica que possam embasar tais estratégias.

A espécie arbórea *Handroanthus chrysotrichus* (Mart ex.) Mattos (Bignoniaceae), popularmente conhecida como Ipê-Amarelo, é nativa da Mata Atlântica e amplamente

utilizada em projetos de restauração ambiental e urbanização (Neves, 2020), devido a sua beleza, rápido crescimento e tamanho médio (Lorenzei, 1962). Consequentemente, a espécie é uma promissora candidata para avaliações quanto à aplicação da borra de café como potencial fertilizante durante sua germinação e processo de estabelecimento e, por isso, foi selecionada como organismo modelo para esse estudo.

O objetivo deste trabalho é compreender os efeitos da borra de café e da cafeína sob a germinação das sementes e o desenvolvimento de mudas de Ipê-Amarelo (*H. chrysotrichus* (Mart. Ex.) Mattos. Uma vez que a borra de café pode liberar grandes quantidades de nutrientes (e.g. nitrogênio e fósforo), pode-se esperar que sua aplicação possa ter efeito positivo para o crescimento das mudas. Por outro lado, a liberação da cafeína pode apresentar efeitos fitotóxicos, desencadeando problemas no metabolismo e no crescimento vegetal (Cervera-Mata et al., 2019; 2021; 2022; Cruz et al. 2012; Mohanpuria & Yadav, 2009; Kasongo et al., 2013; Caliskan et al., 2019). Como o resultado líquido dessas relações ainda não foi investigado, é necessário o entendimento do balanço final dessas interações.

2. METODOLOGIA

2.1 - DESENHO EXPERIMENTAL

Foi realizado um experimento de germinação de sementes e monitoramento do crescimento de plântulas do Ipê Amarelo (*H. chrysotrichus*) sob quatro tratamentos distintos: CAF – solo adicionado de borra de café; DCAF – solo adicionado de borra de café descafeinado; NPK – solo adicionado de fertilizante comercial NPK; e controle – solo sem adições. Para a composição dos tratamentos com adição de borra de café (CAF – borra de café comum e DCAF – borra de café descafeinado), foram utilizados 3,6 kg de borra recém produzida de cada tipo de café. Para a determinação da quantidade de borra a ser adicionada, foi realizado experimento adicional descrito adiante.

O solo utilizado na montagem do experimento como substrato base e controle foi coletado no NIASSA (Núcleo de Integração Acadêmica para a Sustentabilidade e Socioambiental, Fazenda Experimental da UFJF (S 21° 35.168', W 043°33.453'), localizado no Município de Ewbank da Câmara – MG, às margens do reservatório de Chapéu D'Uvas, com a remoção da serrapilheira e aproximadamente 30 cm de profundidade após superfície. Após coletado, o solo foi seco, peneirado e misturado com areia na proporção (3:2, p/p). Esse solo tem seu perfil classificado como LATOSSOLO.

Para os tratamentos com adição de borra de café, estas foram coletadas de diferentes marcas e locais, antes do início do experimento, e mantidas sob refrigeração. A borra para o café descafeinado foi coletada de uma única marca e tipo. Para o tratamento NPK (controle positivo), foi utilizado NPK 10:10:10 (composição de 10% de nitrogênio [N₂] total, 10% de pirofosfato [P₂O₆] solúvel em citrato neutro de amônio [CNA] e água, e, 10% de óxido de potássio [K₂O] solúvel em água.), da marca Fertipar Sudeste®. As sementes de Ipê-Amarelo, por sua vez, foram adquiridas de um fornecedor certificado em novembro de 2023.

2.2 - DETERMINAÇÃO DA LIBERAÇÃO DE CAFEÍNA E NUTRIENTES A PARTIR DA BORRA DE CAFÉ

Para a estimativa dos teores de carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P) contidos nas borras de café adicionadas aos tratamentos, foram selecionadas 5 marcas de café

disponíveis em mercados locais e de alta adesão de consumo, seguindo a Associação Brasileira da Indústria do Café – ABIC (2023) (denominadas, aleatoriamente, de A, B, C, D e E), e um café descafeinado (F). Todos os cafés selecionados apresentam selo da ABIC. Todas as amostras de café foram preparadas conforme instruções dos fabricantes (100 mL de água fervente misturada a cerca de 8 g de café em coador de papel número 100). Com as borras de café restantes desse processo, foram extraídos lixiviados pela passagem de 100 mL de água destilada imediatamente após a preparação inicial. O lixiviado foi, então, diluído 100 x, e a borra de café foi seca em estufa aberta em 30 °C por aproximadamente 2 horas, para diminuição da umidade. Os teores de carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P) e cafeína (CAF) também foram determinados no lixiviado produzido.

2.3 – GERMINAÇÃO, ESTABELECIMENTO E CRESCIMENTO DO IPÊ-AMARELO

Para o plantio das sementes, foram utilizados potes escuros de 1 litro, com britas ao fundo, para a drenagem de água. A montagem dos tratamentos seguiu as proporções apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Descrição da composição e proporção dos substratos.

Tratamento	Detalhamento	Composição	Proporção
C	Solo NIASSA	Solo/Areia	2:1 (600g:300g)
CAF	Borra de café com cafeína	Solo/Areia/Borra de café	3:2:1 (450g:300g:150g)
DCAF	Borra de café descafeinado	Solo/Areia/Borra de café descafeinado	3:2:1 (450g:300g:150g)
NPK	Fertilizante químico	Solo/Areia/NPK 10:10:10	595g:300g:5g

C = controle; CAF = cafeína; DCAF = descafeinado; NPK = NPK 10:10:10.

Cada tratamento foi conduzido em 12 vasos (réplicas), sendo que em cada vaso foram colocadas seis sementes de ipê-amarelo, dispostas de forma padronizada. Ao todo, foram estabelecidos 48 vasos, com um total de 288 sementes. Os vasos foram distribuídos aleatoriamente em uma bancada, em um arranjo de 4x12

O experimento foi realizado ao longo de 240 dias, entre 20 de novembro de 2023 e 17 de julho de 2024, na casa de vegetação da Estação Experimental de Cultivo e Manutenção de Plantas, do Departamento de Botânica da UFJF. As condições experimentais incluíram irrigação automática diária às 8:00h, temperatura média de 23 °C (INMET, 2024), umidade relativa do ar média de 76,6% (INMET, 2024) e fotoperíodo ambiental. O pH do solo foi monitorado semanalmente em cada vaso, com a utilização de uma sonda Instrutherm PHD-3000, com intervalo de detecção de 3,5 a 9,0 e resolução de 0,5.

. Foram consideradas germinadas as sementes que apresentaram a protusão da plúmula (Figuras 1b e 1c) e estabelecidas aquelas plântulas que permaneceram viáveis por no mínimo 30 dias após o início do experimento.

A partir desses resultados, foram calculados o índice de velocidade de germinação, o tempo médio de germinação e a porcentagem de germinação, conforme metodologias descritas por Labouriau (1983) e Maguire (1962).

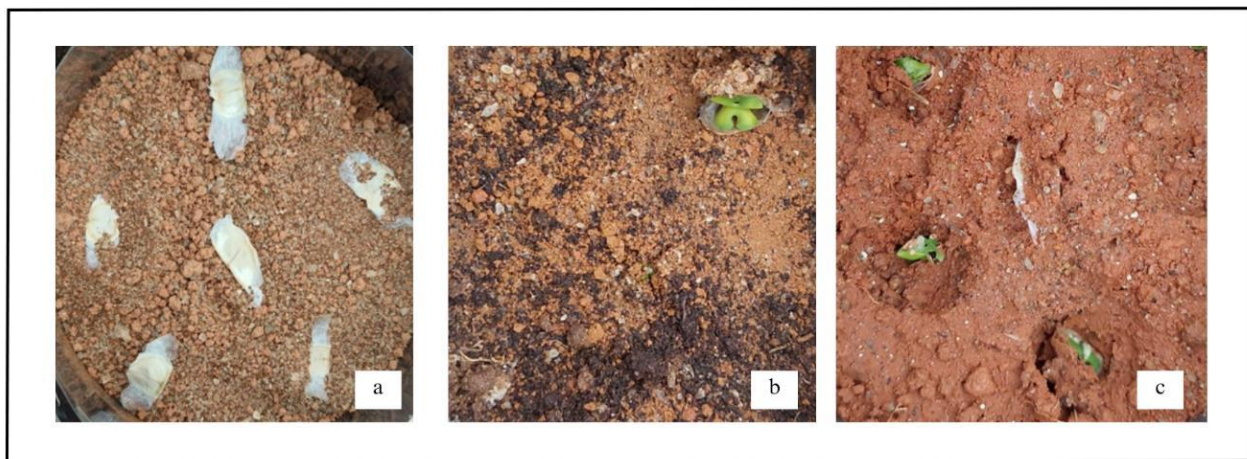


Figura 1 – (a) Disposição das sementes nos potes no início do experimento; (b) e (c) Protusão da plúmula em diferentes estágios de desenvolvimento.

O Tempo Médio de Germinação (TMG) foi avaliado em cada tratamento, com base nas contagens diárias de sementes germinadas até o trigésimo dia após a semeadura. O TMG é calculado segundo Labouriau (1983), com o resultado expresso em dias:

$$TMG = \frac{\sum(ti \times ni)}{\sum ni}$$

Onde:

- t_i é o tempo (dias) no qual a i -ésima semente germinou;
- n_i é o número de sementes que germinaram no tempo t_i .

A partir da contagem das primeiras plântulas, realizadas no sétimo dia após a semeadura, foi calculado o Índice de Velocidade de Germinação (IVG), utilizando a fórmula de Maguire (1962):

$$IVG = G1/N1 + G2/N2 + \dots + Gn/Nn$$

Onde:

- $G1, G2, \dots, Gn$ = número de plântulas germinadas na primeira, segunda, até última contagem;
- $N1, N2, \dots, Nn$ = número de dias desde a primeira, segunda até a última contagem.

Com os dados das sementes germinadas, foram calculados a porcentagem de germinação (G%), o número total de sementes germinadas e número de plântulas estabelecidas para cada tratamento.

A partir do dia 02/02/2024, pelos 135 dias seguintes, foram feitas observações e análises temporais do desenvolvimento das mudas. Observações semanais incluíram coleta de dados de altura a partir do solo até a gema apical (APS), diâmetro do caule na altura do solo (DAS) e número de folhas (NF). Para obter a APS, foi utilizada uma régua; para o DAS, foi utilizado um paquímetro digital (precisão de 0,1 mm). Observações das condições morfológicas, como ocorrência de predação e presença de gramíneas, também foram feitas e anotadas em planilha.

Nos potes que tiveram mais de um indivíduo estabelecido, foram retiradas as plântulas sobressalentes. No tratamento NPK, os potes em que não houve germinação ou

que apresentaram mortalidade total das plântulas receberam transplante de indivíduos excedentes de outros potes do mesmo tratamento.

Análises fisiológicas do índice SPAD e fluorescência da clorofila *a*, não destrutivas, foram feitas nas folhas em 3 momentos diferentes, referentes ao início, meio e fim do experimento (respectivamente, nas datas 06/02/2024, 13/03/2024 e 16/07/2024). Para determinar o índice SPAD nos diferentes tratamentos, foram feitas 5 medidas nas lâminas de folhas completamente expandidas, na região mediana das folhas, utilizando o clorofilômetro SPAD-502 (Konica Minolta). Para a avaliação do desempenho fotoquímico dos tratamentos, foram feitas análises da indução da fluorescência transiente da clorofila *a*, utilizando o fluorímetro portátil Handy-Pea (Hansatech). As análises foram feitas no período da manhã, entre 8h e 10h. As folhas selecionadas foram adaptadas ao escuro por, no mínimo, 20 minutos, utilizando-se cliques foliares apropriados. Após o período de adaptação, foi emitido um pulso saturante sobre a folha. A partir dos dados obtidos com os equipamentos SPAD e HandyPea, foram avaliados o índice SPAD e a eficiência do fotossistema II. O índice SPAD está associado à estimativa da quantidade de clorofila presente no local medido da folha, sendo seus valores diretamente proporcionais. A eficiência do fotossistema II foi analisada por meio dos parâmetros de fluorescência: F_0 (fluorescência basal), F_m (fluorescência máxima, atingida na saturação dos centros de reação) e F_v (fluorescência variável, representando a eficiência máxima do fotossistema II, onde $F_v = F_m - F_0$). Para quantificar a eficiência fotoquímica, foram calculadas as razões F_v/F_m e F_0/F_m .

Ao fim dos 240 dias de experimento, foram feitas análises do comprimento radicular e aéreo, número de folhas, área e comprimento foliar, massa fresca radicular e aérea.

2.4 – PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS

As análises químicas foram realizadas com o lixiviado imediatamente após a coleta, e a caracterização da borra de café seca foi conduzida em paralelo. O Carbono Orgânico Dissolvido (COD), o Nitrogênio Total (TN) e a cafeína (CAF) foram determinados no lixiviado, enquanto o Carbono Orgânico (CO), foi analisado na borra seca.

Para COD e NT no lixiviado, utilizou-se o módulo TNM-1 acoplado ao analisador de Carbono Orgânico Total (TOC-V CPN, Shimadzu). O CO da borra seca foi determinado no módulo de sólidos (SSM-5000) do mesmo aparelho, por meio de combustão em alta temperatura. O Fósforo Total dissolvido (PT) foi mensurado espectrofotometricamente (Lambda 365 UV/VI, Perkin Elmer) empregando-se o método do azul de molibdênio (Wetzel e Likens, 1991).

A quantificação da cafeína foi realizada por cromatografia líquida de fase reversa (HPLC), utilizando uma coluna Supelcosil® C18 250x4,6 mm, 5 µm) e detecção por absorvância a 275nm em um sistema Waters. A análise HPLC foi conduzida sob condições isocráticas a 40 °C, com fase móvel composta por 88% de solução de fosfato de potássio (0,02 mol/L, ajustado a pH 3,0 com ácido fosfórico, e filtrada por membrana de poliamida de 0,2 µm) e 12% de acetonitrila. O volume injetado foi de 30µL e a vazão da fase móvel estabelecida em 1mL/min. Amostras contendo cafeína foram filtradas através de filtro de seringa de nylon de 0,45µm antes da injeção.

As concentrações dos nutrientes analisados (CO, COD, NT, PT) foram empregadas como base para o cálculo do aporte de nutrientes no experimento de germinação e desenvolvimento (Tabela 2, Resultados).

Para as medidas de massa fresca da parte aérea e radicular das plantas, o material foi pesado imediatamente após a coleta, utilizando balança analítica de 5 casas decimais (Shimadzu). Foram tiradas fotos padronizadas (figura 2 e 3) de todas as amostras e as medidas de comprimento e área foliar foram feitas a partir do software *ImageJ*.

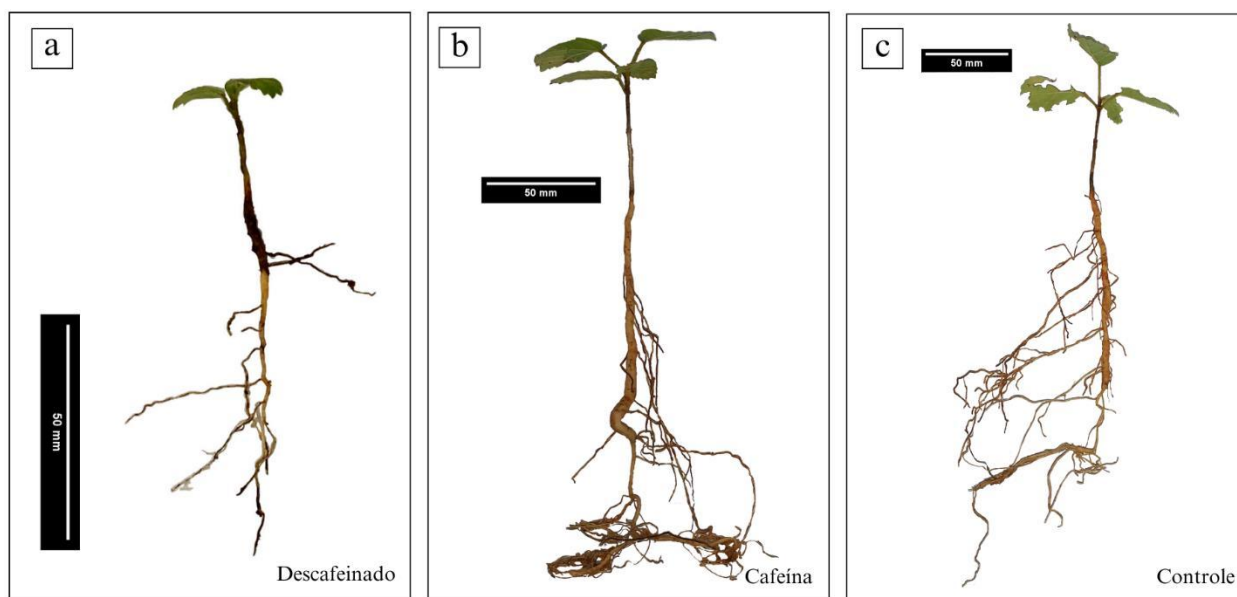


Figura 2 – Fotografias padronizadas das plantas completas, com escalas (50 mm), representando os tratamentos: (a) descafeinado, (b) cafeína e (c) controle.

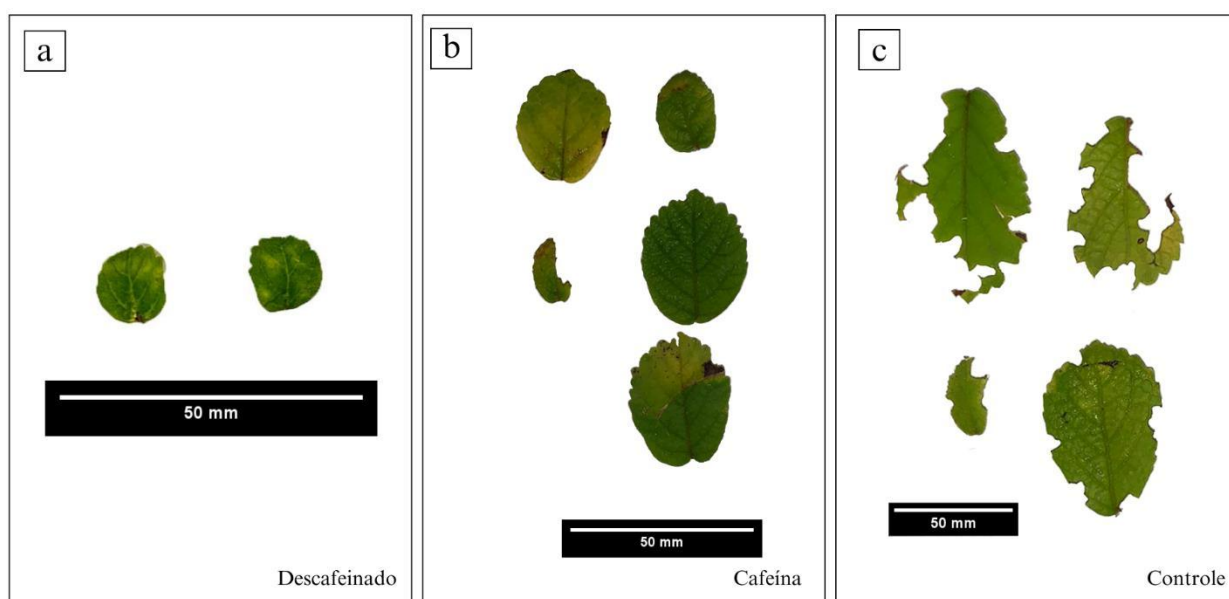


Figura 3 – Fotografias padronizadas das folhas, com escalas (50 mm), dos tratamentos: (a) descafeinado, (b) cafeína e (c) controle.

2.6- ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para a avaliação do efeito dos tratamentos sobre a germinação, i.e., comparação das médias de G%, TMG, IVG e E%, foram realizados teste de análises de variâncias

(ANOVA) e teste pós-hoc de Tukey HSD. Foi adotado um nível de significância de $p < 0,05$. Valores de p entre 0,05 e 0,1 foram considerados marginalmente significativos.

Para as análises dos dados morfológicos e fisiológicos ao longo do experimento, foram feitas regressões lineares para cada réplica (vasos) entre as variáveis mensuradas e o tempo (dia) de cada tratamento. Então, foi feito teste ANOVA one-way seguido de teste pós-hoc de Tukey HSD entre os coeficientes angulares das equações lineares dos tratamentos. Os resultados obtidos indicam taxas de cada variável, como taxa de crescimento, taxa de aumento do nº de folhas e taxa de crescimento de caule (através do diâmetro a altura do solo; DAS). As variáveis fisiológicas de índice SPAD e fluorescência da clorofila *a* foram comparadas entre os tratamentos pelo teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis e *post-hoc* de Dunn. Os dados de comprimento aéreo, radicular, massa fresca, comprimento e área foliar foram analisados estatisticamente a partir dos testes de Kruskal-Wallis e *post-hoc* de Dunn, devido à não normalidade dos dados. Foram considerados significativos os valores de $p < 0,05$. Valores de p entre 0,05 e 0,1 foram considerados marginalmente significativos. Todos os testes estatísticos foram realizados no software JMP[®] versão 18.0.1.

3. RESULTADOS

3.1 - DETERMINAÇÃO DA LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES E CAFEÍNA A PARTIR DA BORRA DE CAFÉ

Nos cafés com cafeína (CAF), as borras apresentaram 43,16% de carbono orgânico (CO), enquanto nos cafés descafeinados (DCAF) o valor foi de 46,08% de CO. Em relação ao carbono orgânico dissolvido (COD) e ao nitrogênio total (NT) lixiviados a partir das borras de café, os cafés com cafeína mostraram concentrações mais altas do que os descafeinados. O fósforo total (PT) apresentou concentrações relativamente altas, sendo maior no tratamento DCAF (Tabela 2). As concentrações de cafeína liberadas durante a lixiviação foram de 1,94mg/L no tratamento CAF e 0,65mg/L no DCAF. Com base na aplicação de 150g de borra por tratamento, o aporte total de cafeína foi estimado em 0,8mg para o CAF e 0,16mg para o DCAF.

Tabela 2 - Valores médios ($\pm$ desvio padrão) dos nutrientes presentes nos cafés com cafeína (CAF) e descafeinado (DCAF) CO – Carbono Orgânico; %P.S – Porcentagem de Peso Seco; COD – Carbono Orgânico Dissolvido; NT – Nitrogênio Total; PT – Fósforo Total.

Nutrientes	CAF	DCAF
CO (% P.S)	43,16 $\pm$ 9,71	46,08 $\pm$ 1,42
COD (mg/L)	19,89 $\pm$ 5,41	9,89 $\pm$ 0,30
NT (mg/L)	1,94 $\pm$ 0,78	0,65 $\pm$ 0,05
PT (mg/L)	281,77 $\pm$ 175,56	292,97 $\pm$ 2,34

3.2 -EFEITOS DA APLICAÇÃO DA BORRA DE CAFÉ NA GERMINAÇÃO DAS SEMENTES E ESTABELECIMENTO DAS PLÂNTULAS

O tratamento controle (C) apresentou o maior número de sementes germinadas (51), com uma porcentagem de germinação (G%) de 70,83%, seguido pelos tratamentos DCAF (50 sementes, 69,44%) e CAF (47 sementes, 65,28%). O tratamento NPK teve o menor número de sementes germinadas (26) e G% de 36,11%. Em relação ao índice de velocidade de germinação (IVG), o controle apresentou o maior valor (3,15), enquanto o NPK teve o menor (1,35). O tempo médio de germinação (TMG) não diferiu

significativamente entre os tratamentos, com valores variando de 8,50 (controle) a 10,34 (CAF) dias. O número de plântulas estabelecidas após 30 dias variou de 13 (NPK) a 46 (DCAF), com taxas de estabelecimento de 50% (NPK) e 92% (DCAF), sendo o controle com 43 plântulas e taxa de 84,3%.

Tabela 3 – Parâmetros de germinação e estabelecimento de plântulas nos diferentes tratamentos: Número de sementes germinadas (NSG), porcentagem de germinação (G%), índice de velocidade de germinação (IVG), tempo médio de germinação (TMG), número de plântulas estabelecidas (NPE) e taxa de estabelecimento de plântulas (E%) (média $\pm$ desvio padrão, quando aplicável).

Tratamento	NSG	G%	IVG	TMG	NPE	E%
Controle	51	70,8	3,15 $\pm$ 0,89 a	8,50 $\pm$ 1,35 a	43	84,3
Cafeína	47	65,3	2,41 $\pm$ 3,16 a	10,34 $\pm$ 1,75 a	43	91,5
Descafeinado	50	69,4	2,64 $\pm$ 1,06 a	10,21 $\pm$ 2,58 a	46	92,0
NPK	26	36,1	1,35 $\pm$ 0,80 b	10,03 $\pm$ 2,51 a	13	50,0

Médias seguidas por letras minúsculas diferentes na mesma coluna diferem significativamente entre si pelo Teste de Tukey ($\text{p} < 0,05$).

Ao final dos 30 dias, as plântulas do tratamento NPK apresentaram o menor comprimento da parte aérea ($1,9 \pm 1,9$ cm), significativamente inferior ao controle (C), que obteve o maior valor ($2,5 \pm 0,1$ cm) (Tabela 4). Os tratamentos CAF ($2,5 \pm 0,2$ cm) e DCAF ($2,4 \pm 0,2$ cm) foram intermediários e não diferiram estatisticamente de C ou NPK. Quanto ao comprimento radicular, CAF apresentou o maior valor ($7,8 \pm 0,7$ cm) e foi significativamente maior que C ($4,9 \pm 0,6$ cm); NPK ($3,8 \pm 0,8$ cm) não diferiu de CAF segundo o teste de Tukey, e DCAF ($5,5 \pm 0,7$ cm) não apresentou diferenças em relação aos demais tratamentos (Tabela 4).

Tabela 4 - Comprimento médio (cm) das partes aérea e radicular das plântulas nos diferentes tratamentos. Dados representam a média $\pm$ desvio padrão.

Tratamento	Comprimento aéreo (cm)	Comprimento radicular (cm)
C	2,5 $\pm$ 0,1 a	4,9 $\pm$ 0,6 a
CAF	2,5 $\pm$ 0,2 ab	7,8 $\pm$ 0,7 b
DCAF	2,4 $\pm$ 0,2 ab	5,5 $\pm$ 0,7 ab
NPK	1,9 $\pm$ 1,9 b	3,8 $\pm$ 0,8 b

Médias seguidas por letras minúsculas diferentes na mesma coluna diferem significativamente entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$)

3.3. EFEITOS DA BORRA DE CAFÉ NO DESENVOLVIMENTO DAS MUDAS

Ao final do experimento, o tratamento NPK apresentou a maior altura ($6,41 \pm 3,11$ cm), taxa de crescimento em altura ($0,028 \pm 0,039$ cm/dia), número de folhas ($7,89 \pm 1,98$) e taxa de aumento do número de folhas ($0,043 \pm 0,114$ folhas/dia), assim como o maior diâmetro na altura do solo (DAS, $3,40 \pm 1,35$ mm) e taxa de crescimento em DAS ($0,024 \pm 0,028$ mm/dia) sendo, de forma geral, significativamente maior que os tratamentos CAF e DCAF (Tabela 5). O tratamento controle (C) apresentou resultados intermediários, com altura final de $4,52 \pm 0,66$ cm e taxa de crescimento em altura de $0,006 \pm 0,004$ cm/dia, além de uma taxa de aumento no número de folhas de $0,017 \pm 0,206$ folhas/dia. Já os tratamentos CAF ($2,55 \pm 0,80$ cm em altura) e DCAF ($2,48 \pm 0,58$ cm em altura) apresentaram os menores desempenhos, com taxa de crescimento em altura negativa para DCAF ($-0,003 \pm 0,008$ cm/dia). O tratamento DCAF também teve uma taxa de crescimento em DAS negativa ($-0,008 \pm 0,032$ mm/dia), enquanto os tratamentos CAF e controle apresentaram taxas semelhantes em DAS (Tabela 5).

Tabela 5 - Parâmetros de crescimento das plântulas nos diferentes tratamentos: altura (cm), taxa de crescimento em altura (TCA, cm/dia), número de folhas (NF), taxa de aumento do número de folhas (TAF, folhas/dia), diâmetro na altura do solo (DAS, mm) e taxa de crescimento em DAS (TCDAS) (mm/dia). Dados representam a média $\pm$ desvio padrão.

Tratamento	Altura	TCA	NF	TAF	DAS	TCDAS
C	4,52 ± 0,66 b	0,006 ± 0,004 ab	5,74 ± 1,55 b	0,017 ± 0,206 a	1,52 ± 0,30 b	0,004 ± 0,005 ab
CAF	2,55 ± 0,80 c	0,002 ± 0,007 b	2,28 ± 1,74 c	0,0005 ± 0,018 a	0,96 ± 0,49 c	0,004 ± 0,010 ab
DCAF	2,48 ± 0,58 c	-0,003 ± 0,008 b	2,56 ± 1,26 c	0,0007 ± 0,017 a	1,01 ± 0,27 c	-0,008 ± 0,032 b
NPK	6,41 ± 3,11 a	0,028 ± 0,039 a	7,89 ± 1,98 a	0,043 ± 0,114 a	3,40 ± 1,35 a	0,024 ± 0,028 a

Médias seguidas por letras minúsculas diferentes na mesma coluna diferem significativamente entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$)

No início do experimento, o pH do solo foi de aproximadamente 7 em todos os tratamentos. Nas primeiras três semanas, observou-se uma redução do pH em todos eles, com os tratamentos NPK e DCAF atingindo valores em torno de 3,0, significativamente menores que os tratamentos C e CAF, que alcançaram valores em torno de 5,5 (Figura 3). Após cerca de 60 dias, os tratamentos DCAF, NPK e CAF apresentaram valores médios de pH entre 4,5 e 5,5, sendo significativamente menores que o tratamento C, que manteve o pH em torno de 6 (Figura 3).

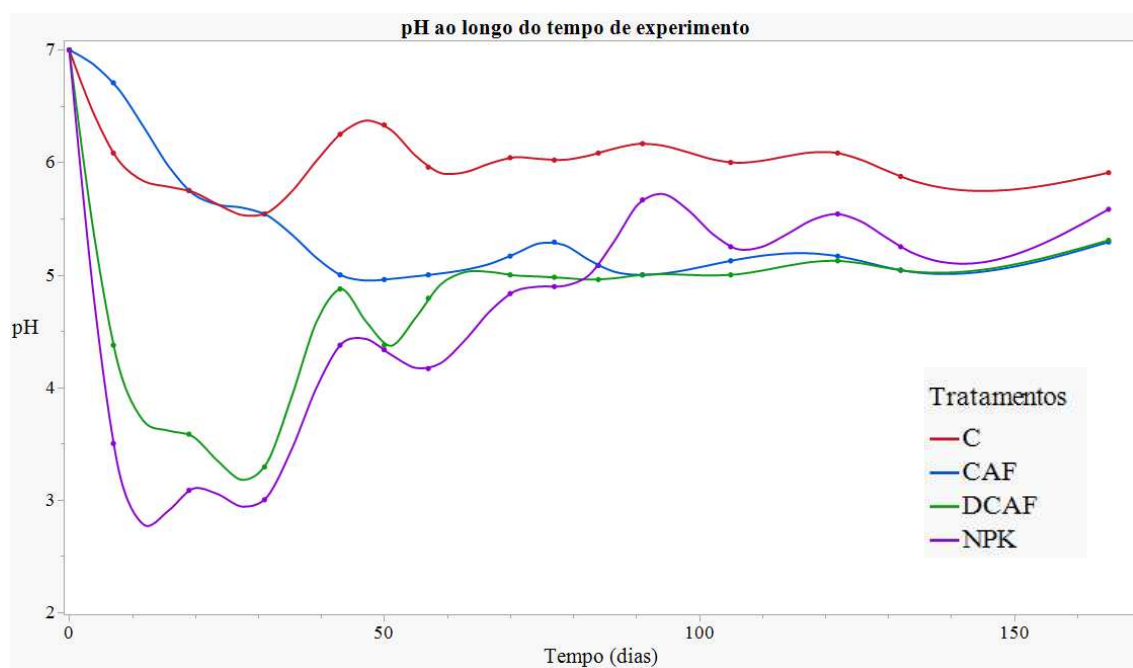


Figura 4 – Tendência do pH médios do solo nos diferentes tratamentos ao longo do experimento.

A massa fresca da parte aérea e radicular foi significativamente maior no tratamento NPK, em comparação aos demais. O comprimento da parte aérea foi significativamente maior nos tratamentos C e NPK que nos tratamentos CAF e DCAF; porém, não houve diferenças significativas no comprimento da parte radicular entre os tratamentos (Tabela 6).

Tabela 6 – Massas (g) e comprimentos (cm) das partes aéreas e radiculares das plantas, ao final do experimento, para cada tratamento (média $\pm$ desvio padrão).

Tratamentos	Massa (g)		Comprimento (cm)	
	Parte aérea	Parte radicular	Parte aérea	Parte radicular
C	0,67 $\pm$ 0,13 b	2,67 $\pm$ 0,77 b	5,30 $\pm$ 0,57 b	20,04 $\pm$ 4,57 a
CAF	0,09 $\pm$ 0,06 a	0,33 $\pm$ 0,20 a	3,12 $\pm$ 1,88 a	11,37 $\pm$ 8,78 a
DCAF	0,09 $\pm$ 0,08 a	0,27 $\pm$ 0,31 a	2,88 $\pm$ 2,10 a	11,22 $\pm$ 11,20 a
NPK	4,78 $\pm$ 3,15 b	14,76 $\pm$ 11,42 b	6,89 $\pm$ 3,35 b	18,57 $\pm$ 2,91 a

Médias seguidas por letras minúsculas diferentes na mesma coluna diferem significativamente entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$)

No início do experimento, os valores de Fo/Fm foram significativamente mais elevados nos tratamentos CAF e DCAF em comparação com C e NPK. No meio do experimento, o tratamento CAF foi significativamente maior do que os demais tratamentos, enquanto no final do experimento não houve diferenças significativas entre os tratamentos (Tabela 7).

Tabela 7 - Dados da relação Fo/Fm (média $\pm$ desvio padrão) nos diferentes momentos do experimento para cada tratamento.

Tratamento	Fo/Fm		
	Inicial	Meio	Fim
C	0,32 $\pm$ 0,05 a	0,25 $\pm$ 0,10 a	0,26 $\pm$ 0,03 a
CAF	0,63 $\pm$ 0,18 b	0,60 $\pm$ 0,18 b	0,29 $\pm$ 0,04 a
DCAF	0,65 $\pm$ 0,09 b	0,41 $\pm$ 0,15 a	0,30 $\pm$ 0,04 a
NPK	0,38 $\pm$ 0,13 a	0,29 $\pm$ 0,19 a	0,40 $\pm$ 0,03 a

Médias seguidas por letras minúsculas diferentes na mesma coluna diferem significativamente entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$)

O índice Fv/Fm foi significativamente maior nos tratamentos C e NPK que nos tratamentos CAF e DCAF, no início do experimento. No meio do experimento, o índice Fv/Fm foi significativamente menor no tratamento CAF em comparação com os outros

tratamentos. Ao final, não foram registradas diferenças significativas entre os tratamentos (Tabela 8).

Tabela 8 – Índice de eficiência quântica máxima do fotossistema II (Fv/Fm) nos momentos inicial, meio e fim do experimento para cada tratamento (média $\pm$ desvio padrão).

Tratamento	Fv/Fm		
	Inicial	Meio	Fim
C	0,68 $\pm$ 0,05 a	0,74 $\pm$ 0,09 a	0,70 $\pm$ 0,24 a
CAF	0,36 $\pm$ 0,18 b	0,39 $\pm$ 0,18 b	0,49 $\pm$ 0,27 a
DCAF	0,35 $\pm$ 0,09 b	0,59 $\pm$ 0,15 a	0,70 $\pm$ 0,10 a
NPK	0,62 $\pm$ 0,13 a	0,70 $\pm$ 0,19 a	0,60 $\pm$ 0,16 a

Médias seguidas por letras minúsculas diferentes na mesma coluna diferem significativamente entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$).

No início e no meio do experimento, o índice SPAD foi significativamente maior nos tratamentos C e NPK em comparação com os tratamentos CAF e DCAF. No final do experimento, não houve diferenças significativas entre os tratamentos (Tabela 9).

Tabela 9 - Índice SPAD medido nos momentos inicial, meio e fim do experimento para cada tratamento (média $\pm$ desvio padrão).

Tratamento	Índice SPAD		
	Inicial	Meio	Fim
C	35,68 $\pm$ 5,52 a	34,48 $\pm$ 5,64 a	24,15 $\pm$ 6,54 a
CAF	20,41 $\pm$ 5,47 b	17,36 $\pm$ 3,66 b	22,58 $\pm$ 14,74 a
DCAF	20,93 $\pm$ 3,08 ab	18,45 $\pm$ 6,48 b	28,38 $\pm$ 11,68 a
NPK	35,30 $\pm$ 5,68 a	37,50 $\pm$ 4,75 a	20,53 $\pm$ 6,83 a

Médias seguidas por letras minúsculas diferentes na mesma coluna diferem significativamente entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$).

4. DISCUSSÃO

A cafeína é um contaminante emergente acumulado em águas superficiais, com fontes primárias derivadas de atividades antrópicas, como o consumo de café, e uso em medicamentos e cosméticos (Quadra et al., 2019; Buerge et al., 2003). O descarte inadequado da borra de café, resíduo rico neste composto, contribui para o aumento das concentrações de cafeína em ambientes aquáticos (Montagner et al., 2017). Dado que a cafeína apresenta toxicidade comprovada para organismos aquáticos, o manejo adequado das fontes é crucial para a contenção da contaminação ecossistêmica (Dos Santos et al., 2022). Paralelamente, o potencial fertilizante da borra de café, devido à presença de Carbono (C), Nitrogênio (N) e Fósforo (P) tem sido explorado no crescimento de hortaliças e árvores comerciais, como o eucalipto (Hardgrove & Livesly, 2017; Cervera-Mata et al., 2019; Caliskan et al., 2020).

A adição da borra de café ao solo é reconhecida como uma estratégia popular de gestão de resíduos (Cervera-Mata et al., 2022), sendo vista como um fertilizante químico eficaz e um modulador da microbiota edáfica (Stylianou et al., 2018). Neste trabalho, verificamos que os efeitos da aplicação da borra de café no solo, conforme relatado na literatura, englobam: (i) a modificação do ciclo do carbono, com aumento de formas recalcitrantes; (ii) o enriquecimento químico com a adição de C, N e outros nutrientes, bem como compostos potencialmente fitotóxicos; (iii) o aumento das concentrações de N total (TN) e formas disponíveis de K e P; (iv) a melhoria da capacidade de retenção de água e aumento da porosidade estrutural; (v) a ocorrência de efeitos negativos no crescimento de plantas; e (vi) a estimulação da atividade microbiana e alteração da composição dessa comunidade (Cervera-Mata et al., 2018, 2021, 2022; Martín-García, et al., 2019; Comino et al., 2020; Vela-Cano et al., 2019). As seções subsequentes detalharão como os resultados experimentais obtidos neste estudo se alinham ou divergem destas observações estabelecidas, com foco específico no contexto do *H. chrysotrichus*.

4.1. A PRESENÇA DE BORRA DE CAFÉ AO SOLO NÃO AFETA A GERMINAÇÃO DE SEMENTES DO IPÊ-AMARELO

Cafés comuns apresentam concentração de cafeína, em média, de 20 a 40mg em uma xícara de café de 50mL em cafés descafeinados, essa concentração varia 0,2 a 2mg (Rodrigues & Bragagnolo, 2013). Embora a lixiviação da borra tenha apresentado concentrações de 1,94mg/L (CAF) e 0,65mg/L (DCAF), que são de magnitude comparável à literatura quando convertidas para o volume de consumo (50mL), o foco da toxicidade deve ser na dose total aplicada ao experimento. Assim, ao adicionar 150g de borra de café aos tratamentos, foram inputados aproximadamente 90mg de cafeína no tratamento CAF e 4mg no tratamento DCAF (conforme quantificado na análise direta da borra). É relevante notar que a literatura indica efeitos inibitórios no crescimento de plântulas de *Coffea arabica* apenas em concentrações elevadas, como 10mM (1941,9mg/L) de cafeína, dose esta que afeta a mitose das raízes (Friedman e Waller, 1983). Consequentemente, a concentração de cafeína adicionada em nosso experimento é quase vinte vezes menor do que a dose reportada como inibitória, sugerindo que os efeitos observados nos tratamentos não podem ser atribuídos primariamente à toxicidade direta da cafeína.

O processo de germinação de sementes é fortemente influenciado pelas características individuais da espécie, mas também pode ser modulado por fatores extrínsecos (ambientais), como temperatura, luz, umidade e pH (Canossa et al., 2008; Rizzardi et al., 2009). A adição da borra de café pode influenciar as taxas de germinação de sementes, sobretudo pela modificação do pH e da umidade do solo (Dwiwedi et al., 1981; Caliskan et al., 2020). Os resultados desse estudo mostram que a taxa de germinação das sementes foi semelhante entre os tratamentos com adição de borra de café (com ou sem cafeína; CAF e DCAF) e o tratamento controle (C), que não recebeu nenhuma adição. Ao observarmos os resultados expressos na Tabela 2, a germinação das sementes variou entre 65 a 70% nos tratamentos C, CAF e DCAF. Em termos de dinâmica, C, CAF e DCAF apresentaram IVG semelhantes e TMG próximos, enquanto o NPK exibiu IVG menor e TMG maior, indicando germinação mais lenta sob esse tratamento.

Em estudos onde o Ipê-Amarelo passa por manipulação de substrato e é submetido a testes de taxa de germinação, estas se mostraram menores em média (46,77%) do que nosso estudo (de Lima Tresena, 2004; Hugo et al., 2004; Marques et al., 2004; Martins et

al., 2008; Sampaio et al., 2013; Silva et al., 2018; Bastos, 2021; Valdovinos et al., 2021). Esse resultado revela uma boa viabilidade das sementes utilizadas e atesta as boas condições experimentais estabelecidas. Após os 30 dias de observações da germinação das sementes, a taxa de plântulas estabelecidas evidenciou um bom desempenho dos tratamentos CAF e DCAF, com 91,5 e 92% de taxa de estabelecimento, respectivamente. O desempenho inferior observado no tratamento NPK pode ser atribuído à manutenção de um pH mais baixo neste grupo até cerca de 50 dias, um fator conhecido por prolongar o período desfavorável ao estabelecimento inicial das plântulas.

O tratamento com a adição de NPK apresentou uma taxa de germinação significativamente reduzida, o que pode estar relacionado à quantidade de NPK aplicada, resultando em um solo mais ácido no início do experimento. Nosso solo inicial já apresentava caráter naturalmente ácido. Assim, qualquer incremento de acidez decorrente do NPK tenderia a potencializar o efeito inibitório sobre a germinação, sobretudo nos primeiros dias, antes da estabilização do pH. Esse aumento na acidez pode ter interferido na germinação das sementes, afetando negativamente o desempenho em comparação aos outros tratamentos. Portanto, ao se adicionar nutrientes ao solo, é importante fazer a adição de substâncias que possam tamponar o pH (Thakare et al., 2023).

Kasongo et al. (2011) apresenta que a adição de borra de café em solos arenosos obteve resultados semelhantes de padrões de tamponamento, mas com a estabilização do pH (de 5,11 para 6,17) bem mais longa, apenas após 24 meses da aplicação. Isso corrobora que, de forma geral, o pH tem efeito direto nas condições do solo (composição, propriedades, disponibilidade de nutrientes e sua forma de decomposição), podendo influenciar diretamente a comunidade, a estrutura, atividade e biomassa microbológica e o crescimento e a produtividade de plantas (Fierer & Jackson, 2006; Turner, 2010; Wang & Tang, 2018; Pan et al., 2022). A partir de nossos dados, reiteramos que o pH demonstrou ter influência sob os parâmetros da germinação, principalmente ao tratamento NPK. Como a adição de matéria orgânica foi recente, é plausível um pulso transitório de atividade microbiana com imobilização de N e alterações físicas do substrato, modulando a disponibilidade hídrica e gasosa na zona da semente e influenciando germinação/estabelecimento nos primeiros dias (efeito transitório). Em complemento aos desfechos de germinação e estabelecimento, aos 30 dias (Tabela 4) o comprimento radicular foi maior em CAF em relação a C; NPK foi numericamente menor, porém não

diferiu de CAF, e DCAF ficou intermediário. Para a 'parte aérea, C superou NPK, enquanto CAF e DCAF foram intermediários, sem diferença em relação a C ou NPK.

A adição da matéria orgânica proveniente da borra de café aconteceu simultaneamente com a semeadura das sementes de Ipê. Após a germinação e estabelecimento das plântulas (30 dias iniciais), quando poucas influências ambientais são de alta relevância para os resultados, começam-se as interações diretas entre as propriedades do solo e o desempenho do crescimento da planta, como consequência do estado da rizosfera. A rizosfera é a região do solo que recebe influência direta das raízes (Andrade, 1999). Durante o crescimento da planta, as raízes crescem em busca de estabilização e disponibilidade de nutrientes. As raízes liberam exsudatos que influenciam o crescimento microbiano, criando relações mutualísticas (Cardoso & Nogueira, 2007). Observando as dinâmicas do pH e o resultado do crescimento radicular e aéreo das plântulas a seu estabelecimento, o processo da adição de nutrientes (NPK) e o DCAF desempenharam uma acidificação abrupta do solo, o que, em conjunto com a liberação de exsudatos da raiz para sua adaptação, pode ser justificado pela abrupta queda do pH. As borras de café (presentes nos tratamentos CAF e DCAF) possuem teores relevantes de N e P (Tabela 9). Cada nutriente possui uma faixa ótima para ser mineralizada pelos microrganismos ou absorvida pelas raízes das plantas; no caso do P, sua disponibilidade no solo é altamente dependente do pH, com maior mobilidade em faixas levemente ácidas a neutras, enquanto faixas de pH muito baixos favorecem a fixação com Al/Fe, reduzindo a sua disponibilidade para as plantas (Penn & Camberato, 2009). O N, em formas de nitrato ou amoniacal, pode influenciar de diferentes formas o pH da rizosfera. Quando absorvido em forma de nitrato, aumenta a disponibilidade de alguns nutrientes no solo, enquanto na forma amoniacal promove acidificação (Cardoso & Nogueira, 2007) (Hinsinger et al., 2003).

4.2. A APLICAÇÃO DE BORRA DE CAFÉ APRESENTOU RESULTADO NEGATIVO AO DESENVOLVIMENTO DAS MUDAS

Em nosso estudo, foi observada uma menor taxa de aumento no número de folhas nos tratamentos CAF e DCAF, mesmo considerando os baixíssimos teores de cafeína no café descafeinado. Esse resultado deve estar associado a potenciais efeitos fitotóxicos da cafeína, como já registrado na literatura pela inibição da germinação de sementes em

Cicer arietinum (Dwivedi et al., 1981), atraso mitótico (Gonzalez-Fernandez et al., 1985) e indução de senescência precoce devido à má regulação da expressão da enzima Ribulose 1-5 Bisfosfato Carboxilase/Oxigenase (RuBisCO) em folhas de tabaco (*Nicotiana tabacum*) e *Arabidopsis thaliana* (Mohanpuria; Yadav, 2009). A RuBisCO é responsável pela transformação de moléculas de CO₂ em moléculas de carbono orgânico. Portanto, sua desregulação impacta diretamente o fotossistema da planta (Siedlecka; Krupa, 2004) e reduz significativamente suas chances de sobrevivência (Mohanpuria; Yadav, 2009).

No estudo de Mohanpuria e Yadav (2009), observou-se que as plantas absorveram cafeína durante a exposição, resultando em efeitos mais severos à medida que a concentração aumentava. A senescência promove a degradação de proteínas relacionadas à fotossíntese, enquanto a RuBisCO não é re-sintetizada (Yoshida, 2003; Krupinska; Humbeck, 2004). Isso levanta duas hipóteses: (i) a cafeína induz a senescência, levando à desregulação da RuBisCO, ou (ii) a cafeína desregula a RuBisCO, induzindo a senescência (Yoshida, 2003; Krupinska; Humbeck, 2004; Mohanpuria; Yadav, 2009). Com base nos nossos resultados, a segunda hipótese parece mais consistente. Nossos dados fisiológicos demonstram sinais de estresse nas plantas com alguma adição de cafeína (CAF e DCAF) desde o início do experimento, reforçando a influência da cafeína sobre processos metabólicos essenciais. Ao longo do tempo, esse estresse se traduziu em sinais de senescência nas folhas. No tratamento CAF, manchas características de senescência surgiram já na metade do experimento, enquanto, no DCAF, essas manifestações apareceram mais tardiamente, possivelmente devido ao menor tamanho das plantas e à menor exposição relativa à cafeína.

As taxas de crescimento observadas ao longo do experimento indicam diferenças significativas na adaptabilidade das plantas diante dos tratamentos testados. Fatores como pH, rizosfera e ação de microrganismos, conhecidos por influenciar a qualidade do solo, são aspectos importantes para contextualizar as taxas de crescimento em altura, número de folhas e DAS (Tabela 4). Entretanto, o foco principal do estudo foi compreender as diferenças geradas pela adição de material contendo cafeína em comparação com aqueles sem cafeína. Apesar de os tratamentos com borra de café não apresentarem diferenças expressivas em relação ao controle, diferenças foram observadas entre os próprios tratamentos. A tendência à mortalidade (baixa adaptabilidade) associada ao tratamento DCAF foi evidenciada por taxas negativas de crescimento em altura e DAS, indicando, em média, um desenvolvimento estrutural limitado.

O índice SPAD, geralmente proporcional aos teores foliares de clorofila (Wood et al., 1992; Markwell et al., 1995; Silveira et al., 2003), apresentou valores relativamente constantes ao longo do tempo, considerando os recortes do início, meio e fim do experimento. Comparando os tratamentos, CAF e DCAF apresentaram os menores índices SPAD em relação aos demais durante grande parte do experimento, embora tenham se aproximado da média ao final. Cruz et al. (2012) relataram que a adição de pequenas quantidades de borra de café fresca (cerca de 10% v/v) promoveu aumentos em xantofilas, betacarotenos e clorofilas em folhas de alface, mas também observaram redução nos teores de nitrogênio foliar. Isso indicaria um possível estresse nutricional ou a presença de compostos tóxicos, como a cafeína, sinalizando estresse às plantas (Melo et al., 2018). No presente estudo, mesmo utilizando 16% m/m de borra de café, os valores do índice SPAD foram semelhantes entre os tratamentos com cafeína e descafeinado, sugerindo que mesmo baixas quantidades de cafeína (como no café descafeinado) possam causar efeito negativo.

Nossos resultados indicaram alto nível de estresse no início e no meio do experimento para os tratamentos CAF e DCAF, em comparação com os demais. Esse estresse foi refletido também nos índices de F_v/F_m , cujo valor padrão para plantas saudáveis é de 0,83 (Schoedl et al., 2012). Nos tratamentos mencionados, os valores estiveram abaixo desse padrão durante essas fases. Ao final do experimento, a eficiência máxima do PSII para o tratamento CAF foi de $0,49 \pm 0,27$, enquanto os demais tratamentos apresentaram valores entre 0,60 e 0,70.

Esses dados corroboram os relatos de Cruz et al. (2012) e Mohanpuria e Yadav (2009), que sugerem que a cafeína pode exercer efeito tóxico sobre o processo fotossintético. Esse impacto interfere diretamente na eficiência do PSII, influenciando negativamente o crescimento e a saúde das plantas. No contexto de nossos resultados, essa relação pode ter sido reforçada pela dinâmica inicial de acidificação observada no pH dos tratamentos CAF e DCAF, potencialmente ampliando os efeitos da cafeína sobre a fotossíntese e sobre o metabolismo geral das mudas.

A maioria dos estudos que avaliam a utilização da borra de café como matéria orgânica e potencial fertilizante é realizada em espécies agrícolas, o que dificulta a comparação direta com espécies arbóreas. No entanto, Caliskan et al. (2019) fornecem alguns dados que auxiliam na interpretação de nossos resultados. Esses autores observaram que, ao adicionar 10% de borra de café em 90% de areia, a razão entre parte

aérea e radicular foi 50% maior do que no substrato convencional. Por outro lado, em nosso estudo, os tratamentos com adição de borra de café, seja com cafeína ou descafeinado, apresentaram valores consideravelmente menores.

Kasongo et al. (2013) relataram um aumento no crescimento de plantas cultivadas em solos ácidos e arenosos (similares ao utilizado neste experimento), o que sugere que a borra de café pode beneficiar plantas em condições de baixa fertilidade. No entanto, outros trabalhos apontam uma relação negativa entre o aumento da dose de borra de café e o crescimento das plantas, destacando uma desaceleração ou redução do crescimento (Yamane et al., 2014; Hardgrove; Livesley, 2016; Ribeiro et al., 2017; Cervera-Mata et al., 2018; Hirooka et al., 2022). Essas discrepâncias ressaltam a importância de considerar as características específicas das espécies vegetais e as condições experimentais ao avaliar os efeitos da borra de café como fertilizante. Assim, esses testes devem ser realizados com diferentes espécies arbóreas para melhor subsidiar a decisão sobre a aplicação da borra de café como fertilizante.

Os resultados dos valores de massa e comprimento das partes radiculares estão relacionados ao potencial de extrusão e refletem os efeitos da mineralização dos nutrientes da borra de café, bem como sua interação com compostos presentes, como fenólicos, ácidos e, principalmente, a cafeína (Hu et al., 2025). Evolutivamente, a cafeína é um composto secundário com papéis biológicos, incluindo anti-herbivoria e alelopatia (Nathanson, 1984; Smyth, 1992; Glendinning et al., 2000), além de possíveis efeitos sobre os microrganismos do solo (Mazzafera et al., 1995), como a inibição do seu crescimento (Cruz; Marques dos Santos Cordovil, 2015). Assim, acredita-se que, nos tratamentos com adição de borra de café, principalmente no CAF, essas interações da cafeína com a rizosfera tenham alterado as dinâmicas das comunidades bacterianas, impactando o desenvolvimento radicular e outros parâmetros de crescimento das plantas.

Foi observado que, no tratamento CAF, ao longo do experimento, não houve crescimento de gramíneas nos potes e, apesar das manchas de senescência nas folhas, não foram registradas marcas de herbivoria – ao contrário dos tratamentos C, NPK e, em menor medida, DCAF, que apresentaram folhas cortadas por formigas. Isso sugere que a cafeína pode ter interferido no crescimento das gramíneas e na interação da planta com herbívoros. Essa interpretação é coerente com o papel alelopático e de defesa contra herbívoros já descrito para a cafeína, cuja presença pode afetar não apenas a planta alvo, mas também o entorno ecológico imediato. Infelizmente não foi possível fazer a análise

do conteúdo de cafeína nas folhas ao final do experimento para avaliar se essa espécie foi capaz de incorporar essa molécula como mecanismo de defesa das suas folhas.

Como mencionado anteriormente, a quantidade de nutrientes disponíveis no solo influencia as dinâmicas da rizosfera e os ciclos de carbono (C) e nitrogênio (N). Estudos indicam um aumento na biomassa microbiana e na respiração do solo devido à adição de matéria orgânica (Cervera-Mata et al., 2021), mas o ciclo do nitrogênio, por exemplo, pode ser fortemente alterado pela imobilização de N, com redução da disponibilidade de NO_3^- no solo devido à baixa mineralização (Cervera-Mata et al., 2022). A qualidade dos compostos de C e N adicionados ao solo pelas borras de café, compostos principalmente por lignina, fenóis e taninos, dificulta a decomposição por microrganismos devido à sua estrutura resistente (Cervera-Mata et al., 2022). Dessa forma, a retenção de nutrientes no solo pode ter sido maior nos tratamentos que apresentaram dinâmicas de estresse, como nos casos de plantas com baixa adaptação, dificultando a exsudação e absorção de nutrientes.

5. CONCLUSÕES

Conclui-se que a adição de borra de café, seja com cafeína (CAF) ou descafeinada (DCAF), não apresentou efeitos significativos sobre a taxa de germinação de *H. chrysotrichus*. Observou-se, ainda, que o uso de NPK em determinadas quantidades pode ser prejudicial na fase inicial de desenvolvimento, ressaltando a importância do equilíbrio nutricional do substrato para o crescimento adequado das plantas.

Embora os tratamentos com borra de café não tenham promovido benefícios expressivos, os resultados morfológicos indicaram que, nos estágios iniciais, o investimento das plântulas esteve mais direcionado ao crescimento radicular do que ao desenvolvimento da parte aérea. Esse padrão sugere que a qualidade nutricional do solo exerce papel mais determinante do que a capacidade fotossintética nessa fase inicial. No decorrer do crescimento, contudo, ambos os tratamentos com borra de café revelaram efeitos negativos. A cafeína, mesmo em baixas concentrações, atuou como fator estressor, reduzindo a eficiência fotossintética e comprometendo parâmetros fisiológicos essenciais. Esses achados corroboram estudos prévios que apontam a cafeína como substância capaz de induzir estresse e interferir em processos fundamentais, como a fotossíntese.

Apesar de os resultados não se mostrarem favoráveis para *H. chrysotrichus*, recomenda-se que futuras pesquisas avaliem a aplicação da borra de café em outras espécies arbóreas, assim como estratégias de manejo alternativo, como a compostagem, a fim de reduzir seus efeitos fitotóxicos. Além disso, os resultados aqui obtidos indicam a relevância de experimentos conduzidos por períodos mais longos, uma vez que a maior decomposição da borra de café poderia favorecer a mineralização de nutrientes e, conseqüentemente, modificar os efeitos observados a longo prazo. Essas abordagens poderão oferecer subsídios mais consistentes para o aproveitamento sustentável desse resíduo em práticas de cultivo e restauração florestal.

6. REFERÊNCIAS

ANDRADE, G. Interacciones microbianas en la rizosfera. In: SIQUIERA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; FAQUIM, V.; FURTINI-NETO, A. E.; CARVALHO, J. G. (orgs.). **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Lavras: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência do Solo, 1999. p. 551–575.

BARNES, J. D.; BALAGUER, L.; MANRIQUE, E.; ELVIRA, S.; DAVISON, A. W. A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls *a* and *b* in lichens and higher plants. **Environmental and Experimental Botany**, v. 32, n. 2, p. 85–100, 1992. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0098-8472\(92\)90034-Y](https://doi.org/10.1016/0098-8472(92)90034-Y).

BARROW, N. J.; HARTEMINK, A. E. The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants. **Plant and Soil**, v. 487, n. 1–2, p. 21–37, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05960-5>.

CARDOSO, E. J. B. N.; NOGUEIRA, M. A. A rizosfera e seus efeitos na comunidade microbiana e na nutrição de plantas. In: CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. (orgs.). **Microbiota do solo e qualidade ambiental**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2007. p. 79–96.

CERVERA-MATA, A.; MONDINI, C.; MARTIN-GARCIA, J. M.; DELGADO, G. Effects of the addition of spent coffee grounds combined with a nitrogen fertilizer on the soil-plant system. **Agrochimica**, v. 65, n. 3, p. 261–277, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.12871/00021857202134>.

CERVERA-MATA, A.; ARANDA, V.; ONTIVEROS-ORTEGA, A.; COMINO, F.; MARTÍN-GARCÍA, J. M.; VELA-CANO, M.; DELGADO, G. Hydrophobicity and surface free energy to assess spent coffee grounds as soil amendment. Relationships with soil quality. **Catena**, v. 196, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104826>.

CERVERA-MATA, A.; MONDINI, C.; FERNÁNDEZ-ARTEAGA, A.; SINICCO, T.; DELGADO, G. Influence of the application of charred and uncharred spent coffee grounds on soil carbon and nitrogen cycles. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v.

69, n. 14, p. 3235–3251, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03650340.2023.2214079>.

CERVERA-MATA, A.; NAVARRO-ALARCÓN, M.; RUFIÁN-HENARES, J. Á.; PASTORIZA, S.; MONTILLA-GÓMEZ, J.; DELGADO, G. Phytotoxicity and chelating capacity of spent coffee grounds: Two contrasting faces in its use as soil organic amendment. **Science of the Total Environment**, v. 717, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137247>.

COMINO, F.; CERVERA-MATA, A.; ARANDA, V.; MARTÍN-GARCÍA, J. M.; DELGADO, G. Short-term impact of spent coffee grounds over soil organic matter composition and stability in two contrasted Mediterranean agricultural soils. **Journal of Soils and Sediments**, v. 20, n. 3, p. 1182–1198, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02474-5>.

CERVERA-MATA, A.; MOLINERO-GARCÍA, A.; MARTÍN-GARCÍA, J. M.; DELGADO, G. Sequential effects of spent coffee grounds on soil physical properties. **Soil Use and Management**, v. 39, n. 1, p. 286–297, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/sum.12853>.

CORREIA, C. A.; KATO, M. T.; BRITO, M. A.; MARTINS, M. A. P.; MANSUR, M. S. S. Avaliação de um sistema combinado anaeróbio-aeróbio para tratamento de efluentes de indústria de café solúvel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 4, p. 430–436, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000400010>.

DELGADO, G.; NAVARRO-ALARCÓN, M.; MONDINI, C.; SINICCO, T.; CASTAÑEDA-SÁNCHEZ, P. S.; VELA-CANO, M.; CERVERA-MATA, A. Agronomic implications of spent coffee grounds: Benefits and risks as soil amendment. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 42, n. 3, p. 42–51, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00791-8>.

DOS SANTOS, A. C. et al. Avaliação da toxicidade aguda de fármacos emergentes em *Daphnia magna* Straus, 1820 (Cladocera: Daphniidae). **Revista Ambiente & Água, Taubaté**, v. 17, e2841, 2022. DOI: 10.4136/ambagua.2841.

DWIVEDI, C. M.; JUNJAPPA, H.; KRISHNA-MURTI, C. R. In vitro screening of potential anti-cancer chemicals: Effect of purine pyrimidine analogues on seed germination. *Toxicology*, v. 21, p. 251-260, 1981.

EKANEM, U. S.; AKPAKPA, M. A.; SAMUEL, A.; ANAKWE, U. C.; OKORONKWO, A. G. Bioconversion of spent coffee grounds into organic fertilizer using indigenous microorganisms. **Bioresource Technology Reports**, v. 15, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100785>.

ESPINOSA-BARRERA, R.; JIMÉNEZ, C.; ARIAS, C. Effect of composting on the bioavailability of heavy metals and organic pollutants in spent coffee grounds. **Waste Management**, v. 120, p. 305–315, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.011>.

GAO, W.; SHEN, F.; FANG, Y.; LI, Y.; XU, J.; QIAN, X.; ZHANG, J.; LI, Z.; ZHOU, X. Effects of spent coffee grounds biochar on soil microbial community and nitrogen transformation in an alkaline soil. **Chemosphere**, v. 280, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130700>.

GARCÍA, M. C.; SÁNCHEZ, M.; LÓPEZ, M. A.; BERGILLOS, A.; DELGADO, G. Optimization of composting of spent coffee grounds and pruning waste through biochar addition. **Waste and Biomass Valorization**, v. 13, n. 4, p. 1691–1703, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01551-5>.

GONZÁLEZ, L. B.; HERRERA, E.; ÁLVAREZ, M. E.; PÉREZ, J.; RUIZ, M. Environmental fate of spent coffee grounds: A life cycle assessment. **Science of the Total Environment**, v. 812, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152555>.

GREGORICH, E. G.; MONREAL, C. M.; ELLERT, B. H.; MCMAHON, S. Determination of carbon mineralization in soil using CO₂ evolution and static absorption methods. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 26, n. 3–4, p. 873–894, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00103629509369339>.

GUAN, L.; ZHU, Q.; CHEN, F.; XU, S.; LIU, L. Effects of spent coffee grounds on soil properties and plant growth: A review. **Environmental Research**, v. 204, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112086>.

HANADA, S.; CHOUDHURY, A.; WATANABE, T.; SHINANO, T. Nutritional and physiological responses of plants to the addition of spent coffee grounds in soil. **Plants**, v. 9, n. 11, p. 1442, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants9111442>.

HINSINGER, P., PLASSARD, C., TANG, C. *ET AL.* Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: A review. *Plant and Soil* **248**, 43–59 (2003). Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1022371130939>

HU, Y.; LI, J.; WU, Y.; ZHANG, D.; QI, Z.; YANG, R. Spent Coffee Ground and Its Derivatives as Soil Amendments—Impact on Soil Health and Plant Production. *Agronomy* **2025**, *15*, 26. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy15010026>

HUANG, J.; CAI, W.; TANG, J.; DENG, Q.; HUANG, Y.; FAN, L. Valorization of spent coffee grounds for biochar production and application: A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 5, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106291>.

JIMÉNEZ-ZEA, M.; GÓMEZ-MALPARTIDA, J.; MARTÍNEZ, J.; SANZ, J.; ZORNOZA, R. Agronomic application of spent coffee grounds: A case study in Mediterranean soils. **Agricultural Water Management**, v. 247, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107568>.

KAVANAGH, V.; MOHAN, S. D.; THOMPSON, I. P. Assessing the effects of coffee-derived biochar on soil health and its potential as a carbon sink. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 138, p. 107–120, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.107607>.

KIM, S.; KIM, C.; AHN, J. Environmental impact assessment of spent coffee grounds utilization: A comparative study. **Journal of Cleaner Production**, v. 275, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124043>.

KOBAYASHI, M.; FUKUDA, K.; HORIUCHI, T.; SATO, Y. Composting spent coffee grounds and effects on plant growth and soil properties. **Compost Science & Utilization**, v. 29, n. 1, p. 21–32, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/1065657X.2021.1880041>.

KORPELAINEN, H.; GONZÁLEZ, J. S.; JÄRVI, P.; OSMO, M. Biodegradation of caffeine and chlorogenic acid in composted coffee waste. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 138, p. 91–97, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.12.006>.

LABOURIAU, L.G. 1970. On the physiology of seed germination in *Vicia graminea* Sm.-I. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 42:235-262.

LABOURIAU, L.G. 1983. A germinação das sementes. Secretaria Geral da OEA, Washington.

LEE, S.; OH, S. R.; KIM, J.; LEE, Y. Optimization of anaerobic digestion of coffee waste for biogas production. **Bioresource Technology**, v. 310, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123435>.

LI, Z.; WANG, X.; CHEN, C.; FENG, W.; LUO, G. Application of spent coffee grounds in wastewater treatment: A review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 34, p. 46740–46755, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14352-1>.

LIANG, J.; ZHANG, Y.; LIN, Z.; YUAN, J. Composting of coffee waste with different co-substrates and its influence on plant growth. **Waste Management & Research**, v. 39, n. 1, p. 117–125, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0734242X20981323>.

LOURENÇO, J.; SILVA, M.; MOREIRA, P.; MARQUES, A. Bioremediation potential of spent coffee grounds for petroleum hydrocarbons. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 22, p. 28824–28833, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11923-6>.

MAGUIRE, J.D. Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, v.2, n.2, p.176-177, 1962.

MAHDAVI, H.; AMIRI, M.; NASIRI, H. Valorization of spent coffee grounds for sustainable energy and environmental applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 138, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110520>.

MARTINEZ-SABORIT, F. R.; GONZÁLEZ-BERNALDO, P.; PACHECO, C.; MARTÍNEZ-AVILÉS, R. Influence of coffee waste biochar on soil microbial community

and greenhouse gas emissions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 322, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107637>.

MELO, B. R., DA SILVA, T., GOULART CASTRO, D., SILVA BOTELHO, F., MOREIRA, E., GOMES, S., & DOS SANTOS, H. (2018). Allelopathic Effect of the Coffee Residue in Emergency and *Urochloa brizantha* Growth. *American Journal of Plant Sciences*, 9(4), 637-644. <https://doi.org/10.4236/ajps.2018.94050>

MELO, L. C. A.; ANDRADE, C. A.; MOREIRA, A. P. B. Microbial degradation pathways of caffeine in soils: Insights into bioremediation potential. **Journal of Hazardous Materials**, v. 405, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124233>.

MOREIRA, I.; ALVES, J.; COSTA, C.; SILVA, F. Effects of coffee grounds on germination and early growth of plants. **Industrial Crops and Products**, v. 172, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113956>.

MÜLLER, R. C.; WEHMEIER, S.; HOPPE, J.; MAIER, S. Coffee waste as a substrate for biohydrogen production via dark fermentation. **Renewable Energy**, v. 170, p. 1096–1105, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.024>.

NAVARRA, L. P.; FERREIRA, A. F.; GOUVEIA, S. G. Chemical composition of different coffee varieties: Influences on sensory and bioactive properties. *Food Research International*, v. 99, p. 935-945, 2017.

NGUYEN, T. T.; BUI, X. T.; BUI, D. D.; NGUYEN, T. A. Reusing spent coffee grounds for biofertilizer production: Case study and environmental benefits. **Environmental Technology & Innovation**, v. 23, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101718>.

OGUCHI, K.; KAWAMURA, T.; MIURA, K. Evaluation of caffeine's effect on aquatic ecosystems using spent coffee waste leachate. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 40, n. 7, p. 1956–1964, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/etc.4980>.

OLIVEIRA, E. M. et al. **COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO CAFÉ SUBMETIDO AO PROCESSO DE DESCAFEINAÇÃO**. Disponível em: <http://sbicafe.ufv.br/bitstream/handle/123456789/7254/121_39-CBPC-2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 18 mar. 2025.

OKUMURA, K.; YAMADA, K.; FUKUDA, H. Efficiency of microbial consortia in degrading caffeine and organic compounds in spent coffee. **Journal of Applied Microbiology**, v. 131, n. 1, p. 45–58, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jam.14949>.

ORTIZ, S.; HERNÁNDEZ, E.; ZÚÑIGA, F.; CONTRERAS, C. Effects of coffee biochar on phosphorus mobility in acidic soils. **Soil Use and Management**, v. 37, n. 4, p. 642–651, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/sum.12712>.

PACHURI, P.; SHARMA, A.; SHARMA, S. Spent coffee grounds as a novel substrate for fungal biomass and enzyme production. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 33, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.101991>.

PADILHA, P.; AMARAL, L.; SILVA, G. Utilization of spent coffee grounds for soil remediation and carbon sequestration. **Environmental Pollution**, v. 283, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117067>.

PAIVA, R.; FERREIRA, D.; LIMA, R. Spent coffee grounds in plant nutrition: A sustainable alternative for waste management. **Journal of Cleaner Production**, v. 305, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127118>.

PAN, W.; LIU, Z.; ZHAO, Q.; LI, Y.; ZHU, X. Effects of soil pH on plant growth and soil microbial communities. *Soil Science Society of America Journal*, v. 86, n. 3, p. 457-466, 2022.

PENN, C. J., & CAMBERATO, J. J. (2019). A Critical Review on Soil Chemical Processes that Control How Soil pH Affects Phosphorus Availability to Plants. *Agriculture*, 9(6), 120. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture9060120>

PÉREZ-CASTILLO, M. L.; GONZÁLEZ-GARCÍA, S.; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, A. Influence of caffeine on microbial activity in aquatic ecosystems. **Water Research**, v. 204, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117624>.

PETRÁNYI, G.; HORVÁTH, S.; KOVÁCS, Á. Sustainable disposal of spent coffee grounds in agricultural systems: A review. **Agricultural Systems**, v. 191, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103194>.

- PRADO, A.; MACHADO, C.; SOUZA, P. Bioactivity of spent coffee grounds on germination and seedling growth. **Industrial Crops and Products**, v. 169, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113686>.
- RAMOS, M.; SANTOS, F.; COSTA, M. Biodegradation of caffeine from spent coffee: A study in controlled conditions. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 229, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113062>.
- RIBEIRO, F.; MENDES, L.; CARVALHO, J. The impact of coffee residues on soil nutrient cycles and microbial dynamics. **Science of the Total Environment**, v. 800, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149516>.
- RODRIGUES, J.; OLIVEIRA, F.; MARTINS, S. Assessment of caffeine persistence in aquatic ecosystems influenced by coffee waste. **Environmental Research**, v. 201, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111479>.
- SALGADO, D.; SANTANA, C.; LIMA, T. Caffeine leachates from spent coffee grounds: Impacts on plant health and soil quality. **Agronomy**, v. 11, n. 11, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy11112456>.
- SANTOS, A.; GOMES, R.; FERREIRA, J. Microbial degradation of spent coffee grounds in compost systems. **Waste Management**, v. 126, p. 24–34, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.044>.
- SANTOS, J.; TEIXEIRA, M.; ALMEIDA, C. Influence of spent coffee grounds on seedling growth in different soil types. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 160, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108323>.
- SIEDELECK, T.; KRUPA, S. Effect of caffeine on the photosynthetic activity of plants. *Environmental and Experimental Botany*, v. 52, p. 91-98, 2004.
- SILVA, A.; SANTANA, L.; BARBOSA, J. Environmental implications of caffeine degradation in riparian zones. **Ecological Indicators**, v. 129, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107999>.
- SOUZA, F.; FERREIRA, R.; MENEZES, C. Spent coffee grounds as a biostimulant for seedling vigor: A greenhouse trial. **Journal of Plant Physiology**, v. 267, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2021.153542>.

STRASSBURG, B. B. N.; BROOKS, T. M.; LUCAS, P. M.; BODLE, J.; FERRAZ, S. F. B.; MUNOZ, A.; GIBSON, L.; VOGEL, A.; REID, J. L.; SANTOS, M. F. Estimating the cost of forest restoration and conservation of the Atlantic Forest. *Science Advances*, v. 6, n. 15, 2020.

TANG-LIU, D.; et al. Excretion and metabolism of caffeine in humans. *Journal of Clinical Pharmacology*, v. 63, n. 4, p. 478-487, 2023.

TAKAHASHI, K.; YAMAMOTO, N.; SHIMIZU, H. Role of caffeine in shaping microbial communities in coffee waste-enriched environments. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 105, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11462-3>.

THAKARE, A.; BHAT, S.; OSENI, J. Variability in soil texture influencing pH buffering capacity and nutrient availability. *Chemical Science Review and Letters*, v. 4, n. 13, p. 57-66, 2023.

TURNER, B. L. Soil organic matter dynamics: The influence of microbial activity and environmental factors. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 42, n. 7, p. 1161-1169, 2010.

VIGNOLI, J.; LIMA, D. P.; VIEIRA, L. G.; ALMEIDA, D. E.; FREITAS, A. L.; et al. Influence of processing on coffee quality. *Food Chemistry*, v. 134, n. 4, p. 1843-1851, 2011.

WANG, W.; TANG, L. Soil microbial communities and their relationship with soil nutrients. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 25, p. 10212-10224, 2018.

ZANATTA, J.; LUCAS, R.; RICARDO, P. Comparative study of germination inhibition by caffeine leachates from coffee grounds. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, n. 10, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09168-2>.