



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO**  
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ISABELA DA COSTA ALMEIDA**

**POTENCIAL DO BIOCHAR E DE *Trichoderma harzianum* NA REMEDIAÇÃO DE  
SOLOS CONTAMINADOS POR CÁDMIO**

**FORTALEZA**

**2026**

ISABELA DA COSTA ALMEIDA

**POTENCIAL DO BIOCHAR E DE *Trichoderma harzianum* NA REMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS POR CÁDMIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito à obtenção do título de bacharel em Agronomia da Universidade Federal do Ceará.

Orientador: Prof. Dr Arthur Prudêncio de Araujo Pereira.

Coorientador: Dr. Kaio Gráculo Vieira Garcia

FORTALEZA

2026

ISABELA DA COSTA ALMEIDA

**POTENCIAL DO BIOCHAR E DE *Trichoderma harzianum* NA REMEDIAÇÃO DE  
SOLOS CONTAMINADOS POR CÁDMIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito à obtenção do título de bacharel  
em Agronomia da Universidade Federal do  
Ceará.

Aprovada em: 16/01/2026

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Arthur Prudêncio de Araujo Pereira. (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dr. Kaio Gráculo Vieira Garcia (Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Elane Bezerra da Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Francisco Luan Almeida Barbosa  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

FORTALEZA

2026

## **DEDICATÓRIA**

À minha mãe e à minha irmã que me criaram e me transformaram em uma mulher forte, sonhadora e agora Engenheira Agrônoma. Vocês são tudo para mim.

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Ceará por me proporcionar conhecimento e experiências inesquecíveis.

Ao Prof. Dr. Arthur Prudêncio, pela excelente orientação e empenho ao proporcionar base e apoio para essa pesquisa.

Ao Kaio, pela excelente Co-orientação e ajuda durante o processo.

Ao Laboratório de Microbiologia do solo e aos seus bolsistas, por me proporcionar apoio e base para a pesquisa.

Aos participantes da banca examinadora Elane e Luan, pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao NEPAU, na pessoa do Técnico Alfredo, pelo apoio ao experimento.

À minha mãe, Dalva, que sempre foi meu alicerce e, com seus conselhos e abraços, nunca me deixou desistir.

À minha irmã, Amanda, que desde sempre foi a minha inspiração e meu exemplo.

Ao meu pai, José Edilson, por ter me proporcionado condições e base para seguir estudando.

À minha namorada, Thainá, que foi minha fortaleza durante esta jornada, oferecendo-me apoio e amor, mesmo nos momentos mais difíceis. Nada disso seria possível sem você.

Aos meus amigos de curso, que estiveram comigo no dia a dia me proporcionando conversas e sorrisos.

À Deus, por nunca me deixar sozinha.

Muito obrigada!!!

“Palavras são, na minha humilde opinião, nossa inesgotável fonte de magia. Capazes de causar grandes sofrimentos e também de remediá-los” - (DUMBLEDORE, Alvo. Harry Potter e as Relíquias da Morte, 2007).

## RESUMO

A poluição por metais pesados no solo é considerada um problema global, sendo responsáveis por afetar a qualidade do meio ambiente e causar danos eminentes à saúde humana. A origem desse tipo de poluição pode ser natural ou por atividades antrópicas, como a mineração. O objetivo desse trabalho foi analisar os potenciais efeitos do biochar de caju e do *Trichoderma harzianum* na remediação de solos contaminados por Cádmiio (Cd). O experimento foi desenvolvido entre os meses de maio e novembro de 2025, em uma casa de vegetação localizada na Universidade Federal do Ceará, Campus do PICI, Fortaleza-CE. O delineamento experimental foi fatorial 2x4, com quatro repetições, totalizando 32 unidades experimentais. Os fatores consistiram na presença ou ausência de contaminação por Cd e na aplicação de quatro tratamentos: controle, biochar, *Trichoderma harzianum* e biochar + *T. harzianum*. A espécie vegetal utilizada foi *Mimosa caesalpiniiifolia*. Ao final da condução experimental, com duração de 110 dias, foram avaliados os parâmetros de crescimento da planta, Massa Seca da Parte Aérea (MSPA), Massa Seca da Raíz (MSR), Altura (ALT), Diâmetro do Caule (DC), Número de Folhas (NF) e Comprimento da Raíz (CR); aspectos da planta; concentração de Cd na parte aérea, raízes e solo. A contaminação por Cd promoveu redução significativa nos parâmetros de crescimento e nos aspectos morfológicos das plantas, incluindo ALT, MSPA e MSR, DC, NF e CR. A aplicação de biochar e ou *Trichoderma harzianum* atenuou os efeitos fitotóxicos do Cd, promovendo incrementos no crescimento vegetal, independentemente da presença do metal. De modo geral, não foi observado efeito de interação, indicando efeitos principais independentes da contaminação e dos tratamentos. Em relação ao Cd, os tratamentos com biochar, isolado ou associado a *T. harzianum* reduziram a concentração de Cd na parte aérea, enquanto *T. harzianum* favoreceu maior retenção do metal no solo e nas raízes. Conclui-se que o biochar e *Trichoderma harzianum* atuam de forma independente na mitigação da fitotoxicidade do Cd, promovendo o crescimento vegetal e reduzindo a translocação do metal para a parte aérea.

**Palavras-chave:** Biorremediação; Metais Pesados; *Mimosa caesalpiniiifolia*; Microorganismos do solo

## ABSTRACT

Heavy metal pollution in soil is considered a global problem, being responsible for affecting the quality of the environment and causing imminent damage to human health. The origin of this type of pollution can be natural or from anthropogenic activities, such as mining. The objective of this study was to analyze the potential effects of cashew biochar and *Trichoderma harzianum* on the remediation of Cadmium-contaminated soils. The experiment was developed between May and November 2025, in a greenhouse located at the Federal University of Ceará, PICI Campus, Fortaleza-CE. The experimental design was a  $2 \times 4$  factorial, with four replications, totaling thirty-two experimental units. The factors consisted of the presence or absence of Cadmium (Cd) contamination and the application of four treatments: control, biochar, *T. harzianum*, and biochar + *T. harzianum*. The plant species used was *Mimosa caesalpiniiifolia*. At the end of the experimental conduction, lasting 110 days, the following plant growth parameters were evaluated: Shoot Dry Mass (SDM), Root Dry Mass (RDM), Height (HGT), Stem Diameter (SD), Number of Leaves (NL), and Root Length (RL); plant aspects; and Cd concentration in the shoots, roots, and soil. Cd contamination promoted a significant reduction in plant growth parameters and morphological aspects, including HGT, SDM, RDM, SD, NL, and RL. The application of biochar and/or *T. harzianum* attenuated the phytotoxic effects of Cd, promoting increments in plant growth, regardless of the metal's presence. Overall, no interaction effect was observed, indicating independent main effects of contamination and treatments. Regarding Cd, the treatments with biochar, isolated or associated with *T. harzianum*, reduced the Cd concentration in the shoots, while *T. harzianum* favored greater metal retention in the soil and roots. It is concluded that biochar and *T. harzianum* translocation of the metal to the shoots.

**Keywords:** Bioremediation; Heavy Metals: *Mimosa caesalpiniiifolia*; Soil microorganisms

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Período de Incubação do Cádmio no solo.....	26
Figura 2	– Inoculação do <i>Trichoderma harzianum</i> nas sementes.....	27
Figura 3	– Extração de Cádmio das amostras de solo e parte vegetal.....	28
Figura 4	– Parâmetros de crescimento de <i>M. caesalpiniiifolia</i> cultivadas na ausência (Sem Cd) e presença de Cd (Com Cd) .....	29
Figura 5	– Morfologia das plantas de <i>M. caesalpiniiifolia</i> cultivadas em solo sem Cd (– Cd) e com Cd (+Cd) sob diferentes tratamentos.....	32
Figura 6	– Concentração de Cd na parte aérea (a), raízes (b) e solo (c) após o cultivo <i>M. caesalpiniiifolia</i> sob diferentes tratamentos.....	33

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Caracterização química e física do solo coletado no Núcleo de Ensino e Pesquisa em Agricultura Urbana (NEPAU) na UFC, Fortaleza, CE, Brasil.....	25
----------	--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Cd	Cádmio
MSR	Massa Seca Raiz
MSPA	Massa Seca da Parte Aérea
ALT	Altura
NF	Número de Folhas
CR	Comprimento da Raiz
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
PGPF	<i>Plant Growth Promoting Fungi</i> (Fungos Promotores de Crescimento de Plantas)

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1 BIOCHAR: CONCEITO, PROPRIEDADES E IMPORTÂNCIA .....	15
2.1.1 Biochar como potencial remediador de solos contaminados por metais pesados ...	17
2.1.2 O biochar de bagaço de caju.....	18
2.2 TRICHODERMA: Funções Biológicas .....	19
2.3 METAIS PESADOS: Consequências da presença de Cádmiio nos solos do semiárido .	21
2.4 SABIÁ: Importância da Mimosa caesalpiniifolia para estudos de recuperação de solos degradados ou contaminados.....	22
3. HIPÓTESE .....	23
4. OBJETIVOS.....	23
4.1. Objetivo Geral .....	23
4.2. Objetivos Específicos .....	23
5. METODOLOGIA.....	24
5.1 Condições de crescimento, delineamento experimental e espécies de plantas.....	24
5.2 Processo Experimental .....	25
4.3 Parâmetros de crescimento da planta.....	27
5.4 Análises laboratoriais.....	28
5.5. Análise dos dados .....	29
6. RESULTADOS.....	29
6.1. Avaliação dos parâmetros de crescimento da planta.....	29
6.2. Aspectos Morfológicos da planta .....	31
6.3. Concentração de Cd na parte aérea, raízes e solo.....	32
7. DISCUSSÃO.....	34
8. CONCLUSÃO.....	36
REFERÊNCIAS .....	36

## 1.INTRODUÇÃO

A poluição por metais pesados é uma problemática global, sendo responsáveis por afetar a qualidade do meio ambiente e causar danos eminentes à saúde humana. Esses metais não possuem efeitos negativos somente na área onde estão presentes, mas podem degradar as regiões circunvizinhas (ANDRADE et al., 2009; PETTA et al., 2014), incluindo os recursos hídricos (CIMINELLI, 2006). A origem desse tipo de poluição pode ser natural ou por atividades antrópicas.

A contaminação natural por metais pesados ocorre, pois, elementos como chumbo, mercúrio, cádmio e arsênio existem na crosta terrestre e são liberados no ambiente (solo, água, ar) por processos geológicos, mas atividades humanas (mineração, indústria, agroquímicos) intensificam sua presença e os transportam, acumulando-os em alimentos (peixes, vegetais) e em produtos cotidianos, afetando a saúde através da bioacumulação e causando sintomas como fadiga, problemas neurológicos, renais e hormonais (Chang et al, 1996).

No Brasil, a exploração de minérios valiosos, como o níquel, diamante, ouro e o ferro, gera grandes volumes de resíduos (rejeitos), sendo considerados uma das principais causas de contaminação do solo e da água por metais pesados (GUILHERME, 2005). Assim, quando esses resíduos da mineração são expostos na superfície do solo, metais como Arsênio (As), Cádmio (Cd), Chumbo (Pb), Mercúrio (Hg), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Níquel (Ni) e Zinco (Zn) são dispersos, afetando significativamente a saúde dos solos (ALBUQUERQUE; LEAL, 2014). Além disso, a atividade mineradora é umas das formas de degradação do solo mais significativas, pois o processo de extração mineral envolve a remoção da cobertura vegetal e de grandes volumes de solo levando à degradação do ecossistema local (GARCIA, K.G.V, 2025). Os seus impactos vão desde a causar danos na estrutura do solo, como também, causam perda da biodiversidade de flora e fauna de uma região (VIEIRA,2011).

Segundo a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM (2012), Os principais problemas relacionados a mineração, envolvem quatro categorias: (1) solo/subsolo; (2) água; (3) ar; e (4) seres humanos. No contexto de solo e subsolo, os impactos são direcionados a alteração dos ecossistemas naturais como o desmatamento, erosão e aumento da dispersão de metais pesados, em relação a água o impacto se concentra na contaminação de águas superficiais e lençóis freáticos, no ar a poluição acontece por dispersão de material particulado, por último as ações antrópicas causam alterações da paisagem, interferências na fauna e flora, desvalorização de imóveis vizinhos, poluição sonora, do ar e de rodovias (CPRM, 2012).

O Cádmiu (Cd) é um metal pesado que ganha destaque em relação a contaminação dos solos do semiárido do Brasil. Ele é encontrado na natureza associado a sulfetos de minérios de zinco, cobre e chumbo. Sua origem está em locais com acúmulo de resíduos da produção de baterias de níquel-cádmiu, componentes eletrônicos e mineração. Na atmosfera, as fontes significativas de emissões naturais de Cd são advindas do intemperismo de rochas, partículas de solo em suspensão no ar (por exemplo, os desertos), aerossol marinho e incêndios florestais (ATSDR, 2012; Richardson et al., 2001; UNEP, 2010). Em relação as entradas de Cd advindas de ações antrópicas, as atividades que se destacam são a mineração e a aplicação de fertilizantes fosfatados, facilitando que esse contaminante entre na cadeia alimentar e seja dispersado na região. Esse elemento é um dos elementos mais tóxicos e móveis no meio ambiente, quando absorvido em altas quantidade pelo corpo humano, podem se acumular em níveis elevados em vários órgãos (HAJEB, 2014).

Considerando os efeitos danosos da mineração e da contaminação de metais pesados, em foco o Cd, faz-se necessário encontrar formas para diminuir esses impactos na natureza, fortalecendo discussões que visam buscar estratégias para realizar a recuperação ou reabilitação desses ambientes, a fim de permitir que nas áreas degradadas, uma vez explorado, o solo tenha condições de restabelecer um equilíbrio ambiental e ecológico.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 BIOCHAR: CONCEITO, PROPRIEDADES E IMPORTÂNCIA**

O biochar ou biocarvão é um material sólido obtido a partir da pirólise de biomassas, processo caracterizado pela conversão termoquímica em ambiente limitado ou ausente de oxigênio (EPE,2024). Sua composição, geralmente, é carbono, minerais e cinzas e suas propriedades inerentes variam de acordo com a matéria-prima utilizada. A matéria-prima é aquecida em temperaturas elevadas (350-700 °C) e transformada em um produto altamente concentrado em carbono (IBI,2015). Nesse processo, podem ser utilizadas dois tipos principais de pirólise: a lenta e a rápida. A pirólise lenta é realizada em baixas temperaturas (cerca de 400° C) e com uma taxa de residência maior, podendo ser minutos ou horas, esse tipo de processo é destinado a produção de biocarvão por decompor ligações fracas. Estudos comprovam que a pirólise lenta tem um maior rendimento na produção de biochar, alcançando cerca de 36% comparada a pirólise rápida que é de apenas 17% (Uchimiya et al., 2011). Em contrapartida, a pirólise rápida é caracterizada por requerer altas temperaturas (450 a 800° C), taxas de aquecimento maiores (10-200°C/s) e um tempo de residência curto (segundos), isso favorece a produção de bio-óleo e biogás de síntese. Esse tipo de pirólise é

utilizado para produção de biocombustível em favor da produção alta de energia em relação à entrada e por produzir combustíveis líquidos, nas quais são mais fáceis de armazenar e transportar.

O termo biocarvão é utilizado exclusivamente para os materiais que passam pelo processo de pirólise para fins agroambientais (Brown et al, 2015). Ele tem origem ancestral, sendo baseado nos estudos da ‘Terra Preta do Índio’ na Amazônia (Hanke et al, 2022). Segundo Falcão et al (2009), esses solos da Amazônia são antropogênicos e podem ser caracterizados, de forma geral, pela coloração escura, presença de fragmentos cerâmicos e artefatos líticos, altas concentrações de matéria orgânica, além de minerais como cálcio (Ca), fósforo (P), magnésio (Mg), manganês (Mn) e zinco (Zn), se destacando por serem diferentes dos solos comuns dessa área.

Segundo Lehamann e Joseph (2009), de forma geral o biochar possui um teor fixo de carbono entre 50 e 90%, teor de umidade entre 1 e 15% e teor de cinzas de 0,5 a 5%, que consistem em minerais essenciais à nutrição vegetal. Sua principal característica é possuir diferentes tamanhos de poros (Lu et al., 2014). Os microporos (<2 nm), são responsáveis pela absorção de água, promoção da atividade microbiana, adsorção de poluentes, que podem ser orgânicos e metais pesados, e o aumento da área de superfície, o que favorece uma maior interação com os elementos do solo. Os mesoporos (2-50 nm), são responsáveis pelas interações e adsorção líquido-sólido, que são muito importantes no processo de recuperação de águas contaminadas. Os macroporos (> 50 nm) que desempenham papéis muito importantes na estrutura do solo, hidrologia e movimentação das raízes (Freddo et al., 2012). Devido ao seu diâmetro maior, esses poros permitem que a água transite mais facilmente, o que favorece uma melhor infiltração, favorecem uma maior aeração no solo e permitem uma maior passagem de ar, o que conseqüentemente, leva mais oxigênio para as raízes e para os microorganismos. Outro papel importante dos macroporos, é a formação de macroagregados que podem diminuir as erosões e melhorar a estrutura do solo, reduzindo a compactação (Chen et al. 2018).

Na agricultura sua aplicação é ampla, desde melhorar na estrutura e no condicionamento do solo, como também em possuir propriedades químicas e biológicas importantes para o desenvolvimento e recuperação do solo. O biochar absorve água e nutrientes, potencializando a produtividade e conseqüentemente reduzindo o uso de fertilizantes e a intensidade da irrigação. Isso acontece pois ele pode facilitar a disponibilidade de nutrientes para as plantas diminuindo a lixiviação, o que mantém a fertilidade do solo (Batista, 2016). Outro benefício importante, é que devido a sua capacidade de reter íons de

hidrogênio, responsáveis pelo processo de acidificação dos solos, o biochar consegue reduzir a acidez, pois favorece na liberação de compostos alcalinos em função da presença de sais, como carbonatos e cloretos de Ca e K, além de grupos funcionais ricos em oxigênio como adicetona e a quinona (Mukome; Parikh, 2016). Além disso, sua estrutura com empilhamento de grafeno e aromática organizada (Franco, 2019) ajuda a reter mais carbono em sua superfície, logo esse elemento passa a ficar mais tempo concentrado no solo, proporcionando um aumento do equilíbrio da matéria orgânica e a redução de dióxido de carbono na atmosfera, favorecendo para desaceleração do aquecimento global (Downie et al. 2012).

Em áreas degradadas, o uso do biochar pode ser muito útil. Em relação as propriedades físicas favorecem uma elevação da disponibilidade de água e oxigênio para as raízes das plantas, por sua vez, isso ajuda no processo de penetração dessas no solo (Freddo et al., 2012). Com isso, em áreas em que o solo está com baixa materia orgânica e compactado, essa função favoreceria uma recuperação inicial para esses solos, sua presença influencia na elasticidade e permeabilidade edáfica, bem como na descompactação dessas áreas (Silva, 2017).

### **2.1.1 Biochar como potencial remediador de solos contaminados por metais pesados**

O biochar possui características que contribui para recuperação de ambientes degradados. Essas características são em favor de aspectos físicos, biológicos e químicos.

De acordo com Guimarães (2017), o biochar tem uma camada externa altamente reativa, devido à presença de grupos químicos funcionais. Esses grupos, como hidroxilas e carboxilas, realizam interação com material orgânico do ambiente, na qual garante à sua estrutura interna a preservação e a captura do carbono por milhares de anos, aumentando assim a porção de matéria orgânica do solo.

A adsorção segundo o conceito da fisicoquímica, é o processo pelo qual átomos, moléculas ou íons são retidos na superfície de sólidos através de interações de natureza química ou física, possibilitando a separação dos componentes desses fluidos (NASCIMENTO et al, 2014). Estudos mostram que através da adsorção, o biochar pode ser utilizado na remoção de metais pesados, como por exemplo, Cr, Cd, Ni, Hg, Pb, entre outros (Tripathi et al., 2016). Essa capacidade ocorre devido a três processos: 1) interações eletrostáticas entre uma superfície de carbono (negativamente carregada) e cátions metálicos; 2) troca iônica entre cátions metálicos e prótons ionizáveis na superfície do carbono e; 3) interação adsortiva em relação aos elétrons de carbono deslocalizados (DUWIEJUAH; ABUBAKAR, 2020).

Com isso, ao mesmo tempo que promove fertilidade ao solo, ele consegue promover a

adsorção de contaminantes. A utilização do biochar somadas a técnicas como fitorremediação, por exemplo, formam um conjunto de recuperação de solos contaminados, já que a maior dificuldade dessas áreas é voltar a ser produtivas.

### **2.1.2 O biochar de bagaço de caju**

No processo de pirólise podem ser utilizados materiais orgânicos urbanos, como podas de árvores e lodo de esgoto, materiais agrícolas como bagaços e sobras de culturas e outros materiais como os oriundos de indústrias. A produção de biochar com esses é destinar de forma sustentável o que outrora seria descartado, e dessa forma reutilizar resíduos de culturas para produzir o biochar, principalmente uma tão importante para o Nordeste e o Brasil, como o caju, passa a ser uma possibilidade.

Segundo o caderno setorial ETENE (2022) do Banco do Nordeste, a Cajucultura é muito expressiva no Brasil, principalmente no Nordeste do país. Em 2020, a produção mundial de pedúnculo de caju foi de 1,35 milhão de toneladas e o Brasil participou com 81,5% desse volume. A área ocupada com a cultura do caju no Nordeste do Brasil é de aproximadamente 700 mil hectares, com uma produção de cerca de 1.260.000.000 quilos de pedúnculo (EMBRAPA,2021). Entretanto, somente cerca de 10 a 20% da produção é beneficiada nos processos de agroindustrialização, sendo 80 a 90% desperdiçado. Isso representa um baixo nível de aproveitamento do pedúnculo, dos quais o principal motivo é sua rápida vida útil.

A produção do suco de caju originado da prensagem dos pedúnculos, é o processo industrial que mais gera como subproduto o bagaço, que em geral é descartado ou utilizado para outros fins, como as rações animais (AZEREDO et al., 2006). Segundo Santos (2007), esse pedúnculo gera cerca de 300.000 toneladas de resíduo por ano, necessitando de alternativas para evitar o alto desperdício. No Ceará, a possibilidade da utilização do bagaço para consumo humano foi uma dessas alternativas, visto que o custo para armazenar e transportar o bagaço para a venda como ração é inviável, com isso outros produtos ganharam espaço pelo forte apelo social, como o “hambúrguer de caju” , biscoitos, farinha e barras de cereais (MATIAS et al., 2005; LIMA, 2008). No entanto, a produção de bagaço de caju ainda é muito maior que a demanda por esses alimentos, gerando resíduos que acabam se tornando lixo urbano.

A produção do biochar de caju começa coletando a matéria prima em questão, no caso o bagaço de caju (*Anacardium occidentale*) (pseudofruto) originado dos processamentos industriais, na qual é preparado (seco e moído) para então ser submetido ao processo térmico,

chamado pirólise. A temperatura de pirólise geralmente é de 500 °C, com um tempo de residência de 190 minutos e com uma taxa de aquecimento de 10 °C min<sup>-1</sup> (BARBOSA,2024) sob fluxo moderado de nitrogênio (empresa SPPT Pesquisa Tecnológica). Esse processo transforma o bagaço em um material sólido, poroso e rico em carbono chamado biochar (EMBRAPA, 2011).

Com isso, o biochar pode ser uma alternativa para a indústria agrícola reutilizar e reciclar esses desperdícios para que não afetem o meio ambiente, transformando resíduos em recuperação.

## **2.2 TRICHODERMA: Funções Biológicas**

O *Trichoderma spp* é um gênero de fungos da família Hypocreaceae. Sua importância está relacionada a sua vasta presença nos solos florestais e agrícolas, sendo capaz de formar relações simbióticas promissoras com diversas espécies de plantas. O sucesso desse microorganismo no ecossistema do solo se deve principalmente à capacidade de modificar a rizosfera, pois ao colonizar as camadas mais externas das raízes, induz a planta a liberar moléculas que o atraem, reforçando essa interação (NUR et al, 2020).

Entre as principais funções biológicas que permite a esse fungo ser um agente eficiente na recuperação de áreas degradadas, destacam-se a capacidade de atacar outros fungos, agindo como potenciais agentes biológicos protegendo a planta de eventuais doenças ou contaminações (El Komy et al., 2015; Naher et al., 2014; Sundaramoorthy e Balabaskar, 2013); O fungo tem a capacidade de sintetizar hormônios vegetais, como auxinas, giberelinas e citocininas, na quais são responsáveis por promoverem o crescimento das raízes e da parte aérea, o que resulta em maior altura, biomassa e área foliar (El Komy et al., 2015; Contreras Cornejo et al., 2015a, 2015b; Garnica-Vergara et al., 2016);

Outra função importante desse gênero é sua capacidade de diminuir a ação de compostos tóxicos. Esse processo é realizado através da sua capacidade de biorremediação (técnica ambiental que usa organismos vivos como bactérias, fungos, plantas, para transformar substâncias tóxicas em compostos inócuos, como CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O). Dessa forma, agem na decomposição desses compostos, e também na melhora da saúde geral do solo e das plantas, tornando-as mais resilientes ao estresse (EGEA, 2020). Além disso, esse fungo tem a capacidade de acelerar a degradação de matéria orgânica, assim como aumentar a disponibilidade de nutrientes para a planta, pois consegue liberar enzimas como fosfatases, amilases e celulasas, que mineralizam a matéria orgânica e solubilizam nutrientes, como o fósforo, tornando-os mais disponíveis para a planta (Amira et al., 2011; Sharma et al., 2012; Vázquez et al., 2015; Zafra et al., 2015)

O *Trichoderma* também é capaz de tolerar ambientes desfavoráveis e possui grande capacidade destrutiva contra microrganismos patogênicos de plantas (Benítez et al., 2004; Harman, 2006). Os estudos mostram que os principais mecanismos de controle biológico por *Trichoderma spp.* agindo sobre os patógenos são (i) reconhecimento e invasão de espécies fúngicas patogênicas de plantas por meio da ruptura da parede celular concomitante a absorção de nutrientes liberados, conhecido como micoparasitismo (Bhat, 2017), (ii) indução da resistência da planta a doenças por meio da alteração da estrutura radicular (Kumar et al., 2019) e (iii) ataque aos nematoides das galhas e cistos, destruindo os ovos do nematoide e os juvenis da segunda fase (fase infestante), além de algumas fases do ciclo de nematoides adultos (Heidari e Olia, 2016).

O *Trichoderma harzianum* é uma espécie com ampla distribuição global e é facilmente encontrado em todos os tipos de substratos. É o nome mais frequente usado em práticas agrícolas relacionadas a *Trichoderma spp.*, principalmente em pesquisas relacionadas a controle de patógenos. Essa espécie conforme demonstrada por Nawrocka e Małolepsza (2013), utiliza uma estratégia de defesa na qual, produz uma quantidade significativa de substâncias chamadas peptaibóis, ou seja, peptídeos antimicrobianos. A principal função desses peptaibóis é bloquear uma enzima vital (chamada  $\beta$ -(1, 3) glucano sintase) presente no microrganismo que causa a doença. Ao bloquear essa enzima, o *T. harzianum* consegue impedir o crescimento e a atividade do patógeno, protegendo assim a planta. De acordo com o estudo de Cai et al. (2013), esse fungo, especificamente a cepa SQR-T037, atua como um poderoso estimulante de crescimento, ele consegue isso liberando uma substância chamada harzianolida, um metabólito secundário. Ainda nesse estudo, a harzianolida demonstrou a capacidade de aumentar significativamente o crescimento de mudas de tomate, tanto em culturas sem solo (hidropônicas) quanto em solo tradicional, mesmo em concentrações muito pequenas (0,1 ppm e 1 ppm). Os resultados destacaram que a harzianolida tem uma influência crucial nas fases iniciais do desenvolvimento da planta. Ela promove um sistema radicular mais robusto, aumentando tanto o comprimento total das raízes quanto a quantidade de pontas (que são essenciais para absorção de nutrientes).

Com isso, esse gênero, como também a espécie utilizada, se mostram bastante promissores na recuperação de áreas contaminadas, pois possui diversas características importantes para solucionar os problemas desses solos. Os metais pesados são elementos químicos persistentes, logo não são degradados por agentes biológicos (bactérias, fungos, plantas), mas esses agentes utilizam a biorremediação para alterar a forma química, reduzir a toxicidade, imobilizar ou concentrar os poluentes para remoção do ambiente e ainda promover

o crescimento das plantas. O que permite aprofundar estudos de cooperativismo com outros potenciais métodos de recuperação, como é o caso do Biochar.

### **2.3 METAIS PESADOS: Consequências da presença de Cádmio nos solos do semiárido**

Segundo Duffus (2002), os metais pesados podem ser definidos como elementos químicos com uma massa específica e uma massa atômica elevadas, na qual conseguem ter uma toxicidade mesmo em baixas concentrações. Esses elementos não são degradáveis e têm a tendência de se acumular nos organismos (bioacumulação) e na cadeia alimentar (biomagnificação).

A origem dos metais pesados nos solos pode ser natural ou antropogênica. A contaminação natural por metais pesados ocorre, pois, elementos como chumbo, mercúrio, cádmio e arsênico existem na crosta terrestre e são liberados no ambiente (solo, água, ar) por processos geológicos. Esses metais possuem outras origens naturais como a erosão de rochas sedimentares e incêndios florestais (Richardson et al., 2001; UNEP, 2010).

Os solos do semiárido possuem características que intensificam o efeito do Cd, como baixa capacidade de retenção, baixa CTC, baixo pH, ausência de minerais de argila, baixa concentração de matéria orgânica e rochas sedimentares como material de origem (EMBRAPA, 2022). Em geral, as concentrações de Cd em rochas sedimentares (0,01 a 2,6 mg/kg<sup>-1</sup>) são maiores do que aquelas em rochas ígneas (0,07 a 0,25 mg/kg<sup>-1</sup>) ou rochas metamórficas (0,11 a 1,0 mg/kg<sup>-1</sup>) (Hammons et al., 1978; Mar e Okazaki, 2012; Page et al., 1987; Smolders e Mertens, 2013). Com isso, quando entendemos que a maior parte dos solos do Semiárido brasileiro se desenvolve a partir de rochas sedimentares, que são, portanto, seu material de origem, vemos que essa característica geológica fundamental confere a esses solos uma maior susceptibilidade à contaminação. Isso ocorre porque a composição dessas rochas geram solos com duas propriedades críticas, a alta porosidade e permeabilidade, o que facilita a lixiviação acelerada dos poluentes até as camadas mais profundas; Logo, por esses solos terem baixa capacidade de retenção, uma baixa CTC, e conseqüentemente a ausência de minerais de argila e matéria orgânica, isso faz com que o solo não consiga atuar como filtro, o que resulta em solos pobres, de baixa fertilidade e com uma microbiota reduzida (JACOMINE, 1996).

Em relação as origens antropogênicas de Cd no solo, essas são principalmente as emissões de combustão, lodo de esgoto, aterros sanitários, tráfego, indústria metalúrgica, mineração, indústria agroquímica e o uso inadequado de fertilizantes fosfatados na agricultura (BIGALKE, 2017), na qual os estudos sugerem que a aplicação desse tipo de fertilizante

altera a química do solo, permitindo que o Cd possa ser transferido facilmente para a cadeia alimentar e atuar de forma tóxica para a biota. No que se refere a atividade mineradora no Brasil, esta ganha destaque por ser umas das formas de contaminação de Cd mais significativas e por ter impactos em amplo espectro. Essa atividade impacta o solo, pois causa remoção da vegetação e da camada superficial do solo, o que conseqüentemente causa perda na concentração de matéria orgânica na área. Além disso, causam erosão, compactação e a própria contaminação por metais pesados. Quanto a biodiversidade, esta atividade causa perda de habitat, desmatamento, êxodo de espécies e desequilíbrio ecológico (ARAUJO et al, 2014).

Além disso, o Cd está presente em uma gama de produtos industrializados como corantes, plásticos, produtos metalúrgicos e galvânicos, pilhas, baterias, esmaltes, vidros, tintas, lâmpadas fluorescentes, resíduos de pneus, óleos combustíveis, lubrificantes etc. (MALAVOLTA, 1994; PRASAD et al., 2001; HALL, 2002), produtos esses que se lançados ilegalmente no meio ambiente, podem vir a constituir importantes fontes de contaminação, impactando diretamente nossos solos.

#### **2.4 SABIÁ: Importância da *Mimosa caesalpinifolia* para estudos de recuperação de solos degradados ou contaminados**

A Sabiá (*Mimosa caesalpinifolia*) é uma espécie arbórea nativa do bioma Caatinga, com uma maior ocorrência no Nordeste do Brasil. É uma árvore de porte pequeno a médio, que pode atingir de 7-10 metros de altura e 30cm de DAP (diâmetro da altura do peito), tem um tronco tortuoso e casca pardo-clara revestida de fina camada suberosa, quando maiores podem apresentar espinhos no caule; suas folhas são bipinadas com 6 pinas opostas, ou seja, se dividem em vários folíolos pequenos, o que dá uma aparência densa à copa; Cada pina é constituída de 4 a 8 folíolos basais ovais e os apicais obovados; apresentam látex branco nas folhas jovens (RIZZINI,1971). Seus frutos são craspédios articulados medindo cerca de 7 cm de comprimento por 10 mm a 13 mm de largura (LIMA, 1985). Suas sementes variam de forma, podendo ser de obovóide a oblonga e orbicular, com estrutura dura e lisa, com cerca de 5,1 mm de comprimento por 4,4 mm de largura, e 1,3 mm a 1,8 mm de espessura; seu tegumento é castanho-claro a marrom, de superfície lisa lustrosa em forma de ferradura (FELICIANO, 1989). Por pertencer à família Fabaceae, a *Mimosa caesalpinifolia* tem a capacidade de fixar nitrogênio atmosférico no solo através de uma relação simbiótica com bactérias em suas raízes, em foco as do gênero *Rhizobium*. Isso a torna crucial para a fertilidade do solo, especialmente em áreas degradadas, na qual tem como principal característica a perda de nutrientes essenciais (FELICIANO, 1989). Além disso, por ser uma espécie heliófila, tem características que permite uma melhor adaptação no semiárido

brasileiro. Entre essas, inclui um bom desenvolvimento radicular, alta capacidade de evitar perda de água, taxas elevadas de fotossíntese e resistência a temperaturas elevadas. A *Mimosa caesalpiniiifolia* é muito utilizada no Nordeste para diversos fins. Por ter uma madeira muito funcional, sua utilização inclui estacas, mourões de cercas, lenha e carvão. No quesito dos ramos verdes, o sabiá é uma espécie forrageira com alto valor nutricional, e por ter um teor de proteína elevado é utilizada como alimento para gado, ovino e caprino em épocas de secas, servindo de alternativa para a pastagem (VASCONCELOS, 1989).

Segundo Barros (1960), o sabiá é uma planta apícola, com grande potencial de uso na apicultura, produzindo grande quantidade de pólen e néctar, e possuindo flores com grande apelo para abelhas. Para projetos de reflorestamento, essa espécie é amplamente utilizada, pois possui alta resistência a condições adversas, como solos pobres, secos e degradados, além de ser tolerante à seca prolongada. Outro fator que favorece essa espécie nesse tipo de projeto é sua alta capacidade de aporte de nutrientes pela serrapilheira. Esse fenômeno é caracterizado por porções orgânicas senescentes da parte aérea das árvores que, ao cair e se decompor, retornam ao solo quantidades significativas de nutrientes, formando camadas orgânicas que protegem a fertilidade das áreas florestais.

### **3. HIPÓTESE**

A hipótese deste estudo fundamenta-se na premissa de que a aplicação conjunta de biochar de caju e *Trichoderma harzianum* exerce um efeito em conjunto superior aos tratamentos isolados na mitigação da toxicidade por Cádmio (Cd). Espera-se que o biochar atue na imobilização do metal no solo via aumento do pH e adsorção, enquanto o *T. harzianum* atue como promotor de crescimento e indutor de resiliência fisiológica, resultando em uma estratégia de fitorremediação eficiente que reduz a biodisponibilidade do Cd e favorece o desenvolvimento vegetativo da *Mimosa caesalpiniiifolia*.

### **4.OBJETIVOS**

#### **4.1. Objetivo Geral**

O objetivo desse trabalho foi analisar os potenciais efeitos do biochar de caju e do *Trichoderma harzianum* na remediação dos solos contaminados por Cádmio.

#### **4.2. Objetivos Específicos**

Avaliar os efeitos do biochar de bagaço de caju e da inoculação com *Trichoderma harzianum* sobre o crescimento vegetal em um ambiente contaminado por Cd, por meio da análise de altura de plantas, massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca de raízes (MSR),

diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF) e comprimento de raízes (CR).

Analisar as alterações nos aspectos morfológicos das plantas submetidas à contaminação por Cd, em resposta à aplicação isolada ou combinada de biochar *Trichoderma harzianum*.

Quantificar as concentrações de Cd na parte aérea, no sistema radicular e no solo, avaliando o efeito dos tratamentos na absorção, retenção e mobilidade do metal.

## 5. METODOLOGIA

### 5.1 Condições de crescimento, delineamento experimental e espécies de plantas

O experimento foi desenvolvido entre os meses de maio e novembro de 2025, em uma casa de vegetação localizada na Universidade Federal do Ceará, Campus do PICI, Fortaleza-CE.

As sementes da espécie Sansão do Campo (*Mimosa caesalpinifolia*) utilizadas foram adquiridas em embalagens comerciais, aluminizadas, à prova de umidade, com rótulos indicando: Sementes Beneficiadas, Marca comercial Bio Sementes, data da análise 08/2017, porcentagem de pureza 97,7%, germinação 75% e prazo de validade 06/2018.

Na casa de vegetação, essas sementes foram plantadas em vasos com capacidade de 3kg de solo, rotulados com o nome dos tratamentos. Em cada vaso, foram semeadas 5 unidades da semente, para garantir uma boa taxa de germinação. O solo foi devidamente peneirado para retirar as impurezas.

O experimento foi em delineamento fatorial 2x4, com dois fatores: Fator A: Contaminação do solo com Cd -presente ou ausente. Fator B: Tratamentos aplicados (controle, inoculação com *Trichoderma harzianum*, aplicação de biochar e a combinação *T. harzianum*+biochar). O experimento foi montado com 4 repetições, constituindo 32 unidades experimentais. Para as variáveis relacionadas ao teor de Cd na parte aérea, nas raízes e no solo, a análise dos dados foi realizada considerando apenas os tratamentos, sem aplicação do modelo fatorial, uma vez que não foi detectado Cd nos tratamentos sem contaminação.

A irrigação foi realizada diariamente durante o período experimental. Para o controle e administração do volume de irrigação, foram empregados um bécquer e uma proveta graduada de 100 mL, sendo este último instrumento utilizado para quantificar o aporte hídrico exato para cada unidade experimental (repetição) durante o período de crescimento.

A emergência das sementes nos vasos ocorreu após 5 dias do plantio. No 15º dia, foi realizado o desbaste com o objetivo de deixar apenas uma planta por vaso.

## 5.2 Processo Experimental

O processo iniciou-se coletando o solo uma área de mata nativa dentro no Núcleo de Ensino e Pesquisa em Agricultura da Universidade Federal do Ceará, localizado no Campus do Pici. Esse solo foi coletado a uma profundidade de 0–20 cm e peneirado com o objetivo de retirar as impurezas e partículas grandes. Após isso, foi utilizado sacos plásticos para transportar o solo até a casa de vegetação. Foram utilizados como materiais para a coleta: peneira grande de madeira com malha de 2 mm, enxada sacho duas pontas, pá, carrinho de mão, uma lona e os sacos de armazenamento. A caracterização química do solo foi realizada no Laboratório de Solo, Água e Planta da UFC, seguindo a metodologia descrita por (Tabela 1).

**Tabela 1.** Caracterização química e física do solo coletado no Núcleo de Ensino e Pesquisa em Agricultura Urbana (NEPAU) na UFC, Fortaleza, CE, Brasil.

pH (H <sub>2</sub> O)	CE (dS/m)	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> /kg)	K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> /kg)	H + Al	Al <sup>3+</sup>	SB (%)	SA (%)	PST (%)
5.0	0.9	0.4	0.6	0.18	4.46	0.5	41	14	1
N	MO (g/kg)	P (mg/kg)	Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Areia Grossa	Areia Fina	Silte (g/kg)	Argila	Argila Natural	Classe Textural
1.36	21.39	37	1.6	586	282	95	37	4	Areia Argilosa

Nota: CE = condutividade elétrica, BS = percentagem de saturação de base, AS = percentagem de saturação de alumínio, ESP = percentagem de sódio trocável, OM = matéria orgânica.

Os vasos foram desinfetados e limpos utilizando detergente, água e álcool 70%, para impedir qualquer contaminação. Com isso, o solo coletado foi pesado e colocado nos vasos, distribuindo igualmente 3kg de solo em cada.

No laboratório, o primeiro passo foi preparar a solução de Cd para aplicar nos solos dos tratamentos que foram contaminados. A contaminação do solo foi realizada pela aplicação de 20 mg de Cd por kg de solo, utilizando cloreto de cádmio (CdCl<sub>2</sub>) como fonte do metal. Para isso foi utilizado os seguintes materiais: balança analítica, água destilada, becker, bastão de vidro, balão volumétrico de 2L, proveta graduada, pipetas ou provetas de 100ml, luvas, máscara PFF2, óculos de segurança, jaleco e capela de exaustão. Foi aplicado 100mL da solução em vasos contendo 3 kg de solo previamente homogeneizado, após a adição, o conteúdo foi novamente revolvido para garantir a dispersão uniforme do líquido. A incubação durou por 14 dias a temperatura ambiente, sendo necessário revolver o solo levemente 1-2

vezes durante esse período.

Figura 1- Período de Incubação do Cádmio no solo



Fonte: Almeida, 2025.

A segunda etapa consistiu na aplicação do biochar em dose equivalente a  $40 \text{ mg/ha}^{-1}$ . Para o cálculo foi considerado o preenchimento de vasos com 3 kg de solo (densidade de  $1,6 \text{ g cm}^{-3}$ ), respeitando o limite recomendado de incorporação inferior a 2% (p/p), considerada limitante para a aplicação de biochar em solos (NOVOTNY, 2015). O cálculo de base foi: densidade do solo  $1,6 \text{ g/cm}^3$ , profundidade 0-20cm, massa de solo em 1 ha  $3.200.000 \text{ kg/ha}$ , dose de biochar  $40.000 \text{ kg/ha}$ , correlação  $12,5 \text{ g biochar/kg}$  de solo para 3kg de solo. Com isso, o procedimento consistiu em pesar exatamente  $37,5 \text{ g}$  de biochar para cada vaso, espalhar o biochar de maneira uniforme sobre o solo do vaso e misturar completamente o biochar no solo usando uma colher ou espátula limpa. Durante o processo de aplicação, foi realizado alguns cuidados como, realizar a pesagem em local livre de vento para evitar perdas de material fino, utilizar EPI (luvas, máscara e jaleco). As amostras foram homogeneizadas manualmente nos sacos plásticos durante 7 dias para permitir que o biochar estivesse distribuído uniformemente no solo dos vasos.

Após esse período de incubação do Cd e de incorporação do biochar no solo, os vasos e o solo estavam prontos para iniciar o processo de crescimento das plantas. Com isso, as sementes foram submetidas a um protocolo de preparo e limpeza em laboratório, essencial antes do plantio. O procedimento começou com a separação e contagem das sementes, definindo-se exatamente cinco (5) sementes por vaso para padronizar o experimento, em seguida, foi aplicado álcool 70% (álcool etílico) com objetivo de quebrar a tensão superficial da semente, permitindo que os produtos seguintes agissem de forma mais eficaz. Depois disso, as sementes foram lavadas com água destilada para remover os resíduos. A etapa de

desinfecção foi realizada utilizando hipoclorito de sódio (NaClO), pois este produto químico serve para eliminar fungos e bactérias patogênicos da superfície da semente, garantindo que o plantio seja livre de contaminação e as futuras plântulas permaneçam saudáveis. Por último, as sementes limpas e desinfetadas foram colocadas sobre papel de filtro para uma secagem. Somente após estarem secas, elas foram levadas para o plantio no ambiente controlado da casa de vegetação.

Seguindo o processo experimental, foi utilizado 0,75mL do produto comercial Trichodermil SC® 1306, formulado à base de *Trichoderma harzianum*, cepa ESALQ-1306, com concentração de  $2,0 \times 10^9$  conídios viáveis mL<sup>-1</sup> e 150mL de água destilada. Esse cálculo se deu pois, em cada semente dos tratamentos seria colocado 1mL dessa solução na hora do plantio. Com isso, para aplicar a solução, foi utilizado um erlenmeyer de 200ml e uma pipeta automática. Em cada cova, foi aplicado o *Trichoderma harzianum* com o intuito de crescer juntamente com o embrião, pois o fungo em questão é um promotor do crescimento e da germinação das plantas. Ele também contribui para o desenvolvimento inicial da planta e atua no fortalecimento do sistema radicular, além disso possui a capacidade de amenizar a severidade dos danos causados por estresses ambientais. Essa proteção se deve à produção de metabólitos secundários e hormônios vegetais, que auxiliam a planta a lidar melhor com condições adversas (LISBOA, 2018).

Figura 2- Inoculação do *Trichoderma harzianum* nas sementes



Fonte: Almeida, 2025.

O período de condução do experimento foi de 110 dias.

#### 4.3 Parâmetros de crescimento da planta

Foram analisados os seguintes parâmetros: Altura, Diâmetro do caule, Número de folhas, Comprimento da raiz, Massa seca da parte aérea e Massa seca da raiz. Para realizar a medição inicial foram utilizados régua e paquímetro. O principal objetivo era perceber a

diferença entre os tratamentos e avaliar como cada uma das plantas reagiram durante o período de crescimento em ambiente controlado. Em relação a massa seca, as plantas foram submetidas a estufa em temperatura média, cada uma das unidades experimentais fora dividida em sacos de papel devidamente identificados, após esse processo, cada uma delas foram pesadas em balança. Esse dado é importante, pois busca obter uma medida objetiva da biomassa real (matéria orgânica) das plantas sem a interferência da variabilidade causada pelo teor de água.

Após a pesagem, as amostras foram submetidas a trituração. Essa trituração é importante para posteriormente realizar as análises laboratoriais, que no caso foi a de Cd da parte vegetal.

#### 5.4 Análises laboratoriais

Após a trituração, as amostras da parte vegetal dos tratamentos foram separadas e identificadas por repetição em sacos plásticos, assim também foi realizado com as amostras de solos. Foi realizada a pesagem de 0,50g das amostras da parte vegetal e 20g das amostras de solo, após isso elas foram colocadas em erlenmeyers de 150ml também identificados.

Para realizar a extração do Cd nas amostras erlenmeyers do solo, foi utilizada a solução extratora DTPA (1,96g) + Cloreto de Cálcio (1,47g) + Trinanolamina (14,9g) + 1L de água destilada, o pH da solução é de 7,3. Em cada erlenmeyers foi colocado 40ml dessa solução, após isso eles foram levados para o agitador por 1h a 280RPM. Com as amostras da parte vegetal, foi utilizado 25ml de HCl 0,1M em cada erlenmeyer de cada repetição e da mesma forma eles foram colocados no agitador (Teixeira et al. 2017).

Figura 3- Extração de Cádmiio das amostras de solo e parte vegetal



Fonte: Almeida, 2025.

Após esse periodo as amostras passaram por um processo de filtragem, na qual foi

utilizado papel filtro, funil e tubos tipo falcon, com o intuito de eliminar as partículas grandes. Com as amostras de solo e da parte vegetal filtradas, os extratos foram levados para serem analisados por espectrometria de absorção atômica.

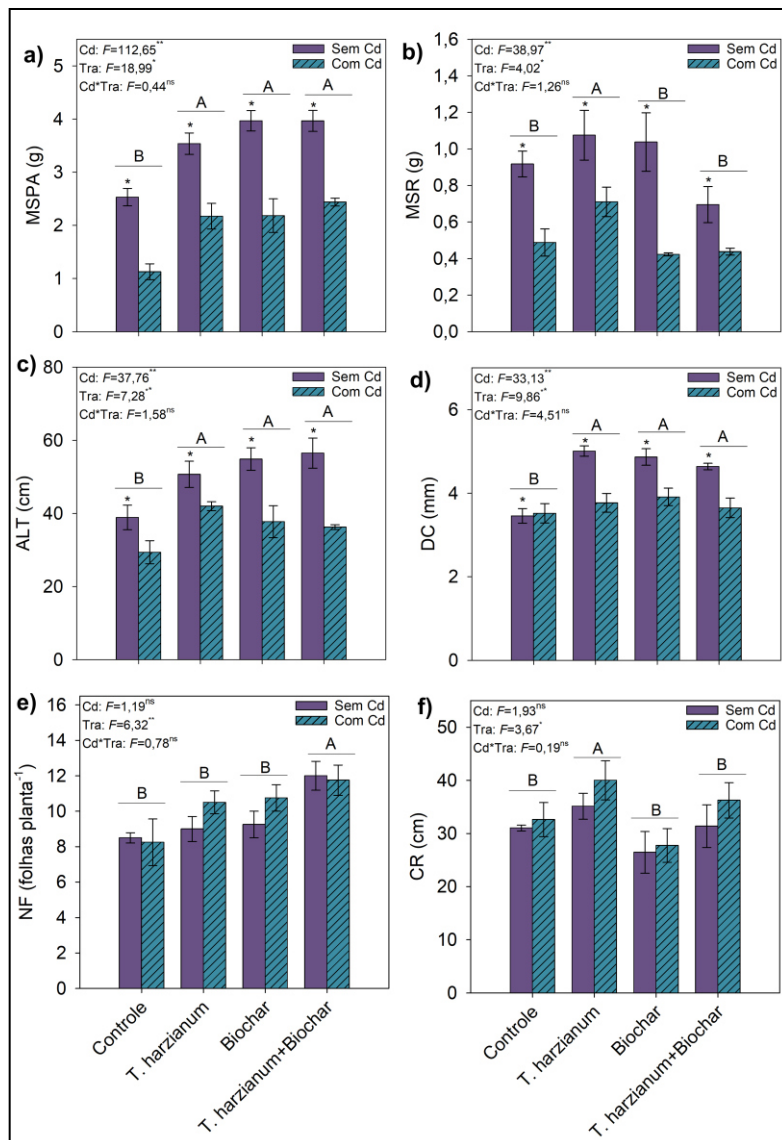
### 5.5. Análise dos dados

Os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA), com aplicação do teste F ( $p \leq 0,05$ ). Quando detectadas diferenças significativas, as médias foram agrupadas pelo teste de Scott–Knott ( $p \leq 0,05$ ), utilizando o software AgroEstat.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Avaliação dos parâmetros de crescimento da planta

Os parâmetros de crescimento de *M. caesalpiniaefolia* apresentaram respostas diferentes entre os tratamentos com contaminação e sem contaminação, assim como tiveram diferenças entre aqueles que tinham o biochar e o *Trichoderma harzianum* e os que não tinham (Figura 4).



**Figura 4.** Parâmetros de crescimento de *M. caesalpinifolia* cultivadas na ausência (Sem Cd) e presença de Cd (Com Cd). Massa seca da parte aérea (MSPA) (a), massa seca da raiz (MSR) (b), altura (ALT) (c), diâmetro do caule (DC) (d), número de folhas (NF) (e) e comprimento da raiz (CR) (f). Valores representam médias  $\pm$  erro padrão (n = 4). Letras maiúsculas sublinhadas indicam diferenças significativas entre os tratamentos, independente da presença ou ausência de Cd, enquanto (\*) indica diferenças entre as condições Com Cd e Sem Cd dentro do mesmo tratamento pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). F = teste F, \*\* =  $p < 0,01$ , \* =  $p < 0,05$ , ns = não significativo.

Para a MSPA, os resultados mostraram um efeito geral muito forte da contaminação de Cd, assim como cada um dos tratamentos, com o fator de interação ( $F = 0,44^{NS}$ ) mostrando que o efeito do Cd e dos tratamentos não dependem significativamente um do outro (Figura 4a). No tratamento Controle, o Cd diminuiu drasticamente a MSPA. No tratamento com *T. harzianum*, biochar e com a combinação *T. harzianum* + Biochar, o Cd diminuiu a MSPA, mas teve resultados melhores na ausência de Cd (indicado pela letra A). No geral, os resultados mostraram que a presença de Cd causou uma redução significativa da MSPA em todos os tratamentos. Porém, os tratamentos *T. harzianum*, Biochar e a combinação, foram superiores ao Controle, especialmente na ausência de Cd, conseguindo manter uma MSPA maior.

Na MSR, tanto a contaminação por Cd quanto os tratamentos aplicados apresentaram efeitos principais fortemente significativos (Figura 4b). No tratamento Controle, o Cd diminuiu a MSR. No tratamento *T. harzianum*, o Cd diminuiu a MSR, se destacou por ser o melhor tratamento sem Cd e o que obteve menor redução no tratamento com Cd. No tratamento Biochar, o Cd diminuiu a MSR. No tratamento *T. harzianum* + Biochar, o Cd diminuiu a MSR, além de ter sido o pior grupo sem Cd. Os tratamentos com Biochar foram o que teve a menor MSR entre todos na presença de Cd. Nesse parâmetro, o Cd obteve um efeito geral alto, seu impacto foi uniforme, ou seja, ele reduziu a MSR significativamente em todos os tratamentos. Porém, essa redução foi menor no tratamento no *T. harzianum* isolado, na qual conseguiu manter a massa seca da raiz melhor em comparação com os outros. Além disso, nos tratamentos sem a contaminação, o *T. harzianum* isolado também resultou na maior MSR.

No parâmetro Altura (ALT), o Cd também teve efeito altamente significativo e de modo geral os resultados das repetições foram uniformes, se mantendo a diferença significativa apenas entre aqueles que foram contaminados e aqueles que não foram. Como pode ser observado os tratamentos sem Cd tiveram altura maior do que aqueles com o Cd (Figura 4c). O Cd foi tóxico, reduzindo a altura na maioria dos casos, sendo mais visível no Controle. No entanto, o tratamento *T. harzianum* isolado obteve uma ALT média maior na

presença de Cd em comparação aos tratamentos do Biochar isolado e da combinação.

No Diâmetro do caule (DC), a interação não é significativa ( $F=4,51^*$ ), ou seja, isso significa que o efeito do Cd no diâmetro do caule (DC) depende do tratamento. Não houve efeito de interação, conforme pode ser verificado na Figura 4d. Apenas os efeitos principais da contaminação por Cd e dos tratamentos aplicados foram significativos. Dessa forma, o Cd reduziu o DC de maneira independente nos tratamentos, todos apresentaram valores uniformes, na presença ou ausência de Cd. Porém, *T. harzianum*, Biochar e a combinação resultaram em um diâmetro de caule maior do que o Controle. Nos tratamentos sem contaminação, aquele somente com *T. harzianum* se destacou obtendo um diâmetro ligeiramente maior.

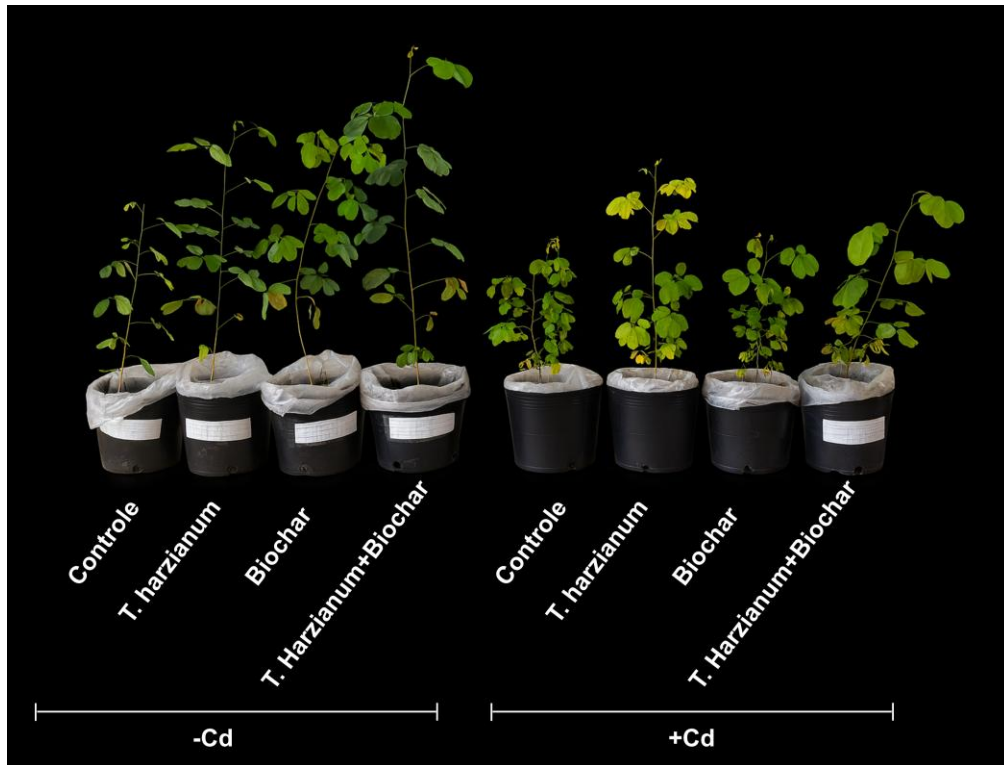
No parâmetro Número de Folhas (NF), o Cd, no geral, não afetou a quantidade de folhas, entretanto, entre os tratamentos houve um forte efeito (Figura 4e). O número de folhas não foi afetado significativamente pela presença de Cd em nenhum dos tratamentos. Porém, o tratamento *T. harzianum* + Biochar resultaram em um número de folhas significativamente maior do que o os outros tratamentos.

O Comprimento da Raíz (CR), assim como o NF, não foi afetado significativamente pela presença de Cd em nenhum dos tratamentos, se mantendo uniforme em todos (Figura 4f). O tratamento com *T. harzianum* isolado resultou em um comprimento de raiz significativamente maior que os demais tratamentos, principalmente na presença de Cd.

No geral, os resultados mostraram que o Cd é altamente tóxico, causando as maiores reduções nos parâmetros de Massa Seca da Parte Aérea (MSPA), Massa Seca da Raiz e Altura (ALT) em quase todos os tratamentos. Os tratamentos *T. harzianum*, Biochar e a combinação *T. harzianum* + Biochar foram consistentemente superiores ao Controle na ausência e na presença de Cd em todos os parâmetros. O Número de Folhas (NF) e o Comprimento da Raiz (CR) foram os parâmetros menos afetados pela presença de Cd (ambos  $F^{NS}$ ).

## 6.2. Aspectos Morfológicos da planta

Os aspectos morfológicos são muito importantes para analisar o desempenho dos tratamentos em relação as variáveis impostas, ou seja, perceber as mudanças visuais ajudam a ter noção do impacto do biochar, do *T. harzianum* e principalmente do Cd nas mudas de *M. caesalpiniiifolia* (Figura 5).

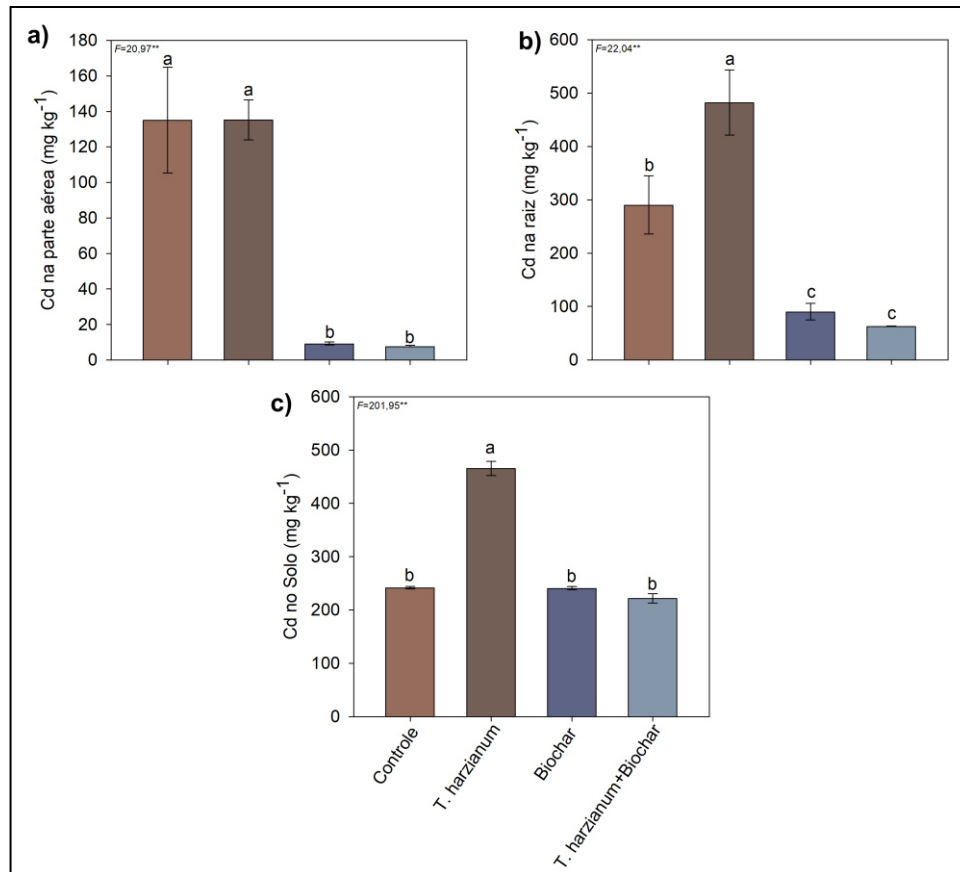


**Figura 5.** Morfologia das plantas de *M. caesalpinifolia* cultivadas em solo sem Cd (-Cd) e com Cd (+Cd) sob diferentes tratamentos (Controle, *T. harzianum*, Biochar e *T. harzianum* + Biochar).

As mudas cultivadas em solos com a presença de Cd apresentaram sintomas morfológicos bastante característicos, devido a uma redução generalizada do metabolismo. Os sintomas foram a redução do crescimento vegetal (crescimento lento), principalmente na altura, clorose generalizada (amarelecimento das folhas) que é consequência da dificuldade na absorção de nutrientes e água devido aos danos no sistema radicular. Entre os tratamentos +Cd, os que mais se destacaram como possível mitigador, foi o *T. harzianum* isolado e a combinação *T. harzianum* + biochar, visivelmente conseguiram manter as mudas em crescimento e com um bom desenvolvimento. Já em relação aos tratamentos -Cd, a combinação *T. harzianum* + biochar favoreceu um bom desenvolvimento, estando entre as mudas que tiveram uma melhor estatura, além disso, as folhas se mantiveram verdes e saudáveis. De modo geral, o controle foi o que teve um menor desenvolvimento.

### 6.3. Concentração de Cd na parte aérea, raízes e solo

As concentrações de Cd são um ótimo parâmetro para identificar como a planta reagiu ao impacto desse estresse durante o seu desenvolvimento. Os três comportamentos analisados em relação ao Cd foram a parte aérea, as raízes e o solo, diante dos tratamentos aos quais eles foram submetidos (Figura 6).



**Figura 6.** Concentração de Cd na parte aérea (a), raízes (b) e solo (c) após o cultivo *M. caesalpinifolia* sob diferentes tratamentos (Controle, *T. harzianum*, Biochar e *T. harzianum* + Biochar). Barras representam média  $\pm$  erro padrão (n = 4). Letras diferentes indicam diferenças estatísticas significativas entre tratamentos pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). F = teste F, \*\* =  $p < 0,01$ , \* =  $p < 0,05$ , ns = não significativo.

A concentração de Cd na parte aérea foi significativamente reduzida pelos tratamentos com biochar, aplicado isoladamente ou em combinação. Os tratamentos Controle e *T. harzianum* isolado resultaram em concentrações de Cd na parte aérea significativamente mais altas, com os resultados sendo cerca de  $130 \text{ mg kg}^{-1}$ . (Figura 6a).

Nas raízes, a concentração de Cd foi significativamente maior no tratamento com *T. Harzianum* isolado, com aproximadamente  $500 \text{ mg kg}^{-1}$ . Os tratamentos com Biochar (isolado ou em combinação) resultaram nas concentrações de Cd significativamente mais baixas. (Figura 6b).

No solo, a concentração de Cd foi significativamente maior no tratamento com *T. harzianum* isolado, apresentando novamente uma concentração de aproximadamente  $500 \text{ mg kg}^{-1}$ . Por outro lado, os tratamentos controle, Biochar e *T. harzianum* + Biochar resultaram em concentrações de Cd em  $200 \text{ mg kg}^{-1}$ , que são significativamente mais baixas e não diferem entre si. (Figura 6c).

## 7. DISCUSSÃO

Em relação a Massa Seca da Raiz (MSR) e o Comprimento da Raiz (CR), estes foram melhores no tratamento de *T. harzianum* isolado. Estudos já mencionados, como o de Cai et al. (2013), evidenciaram que o principal motivo é o fato desse fungo ser um agente bioestimulante, promovendo o crescimento e o desenvolvimento de plantas através de várias interações benéficas, além disso esse fungo coloniza as raízes das plantas e estimula um maior desenvolvimento do sistema radicular, resultando em maior massa seca de raízes e melhor absorção de água e nutrientes. Através do metabólito secundário chamado harzianolide que tem influência nos estágios iniciais do crescimento da planta, este fungo aumenta o comprimento e as pontas das raízes. Outro ponto em relação a esse parâmetro é que a MSR sofreu uma redução significativa na presença de Cd nos tratamentos com Biochar (isolado e combinação), (Figura 4b). Estudos como o de Tripathi et al., 2016, mostram que a imobilização do Cd promovida pelo Biochar deveria ter sido suficiente para manter a integridade fisiológica da raiz, neutralizando o estresse oxidativo que, de outra forma, teria prejudicado o crescimento radicular, porém os resultados mostraram incoerência. Portanto, *T. harzianum* isolado prova ser uma intervenção de valor na proteção das raízes de *M. caesalpiniiifolia* contra metais pesados.

A Altura (ALT) da planta foi um indicador particularmente sensível ao estresse por Cd, sendo reduzida significativamente em todos os tratamentos (Figura 4c). Contudo, o tratamento *T. Harzianum* isolado foi o melhor resultado em relação a Altura com a presença de Cd, o que sugere um claro efeito sinérgico entre o fungo e a planta. Segundo El Komy et al., 2015, a proteção conferida pelo fungo pode está diretamente ligada aos mecanismos de biorremediação (desintoxicação) e melhoria da nutrição da planta, além disso o fungo consegue sintetizar hormônios vegetais, o que resulta em maior altura, biomassa e área foliar. O *Trichoderma harzianum* induz a tolerância ao estresse, o que permite que a planta invista recursos energéticos no crescimento vertical (Altura).

Os tratamentos com o Biochar, demonstraram redução na Altura (Figura 4c), mas na Figura 6 demonstraram uma baixa concentração de Cd para a parte aérea. Segundo Lu et al., 2014, devido à sua alta área superficial e capacidade de troca catiônica, o Biochar é o componente responsável por adsorver e fixar o Cd no solo e na rizosfera. A Figura 6 demonstrou que tanto o Biochar isolado quanto a combinação foram igualmente eficazes em reduzir drasticamente a translocação de Cd para a parte aérea, o que minimiza a toxicidade sistêmica do metal. Esta proteção pode ser evidenciada em pesquisas como o trabalho de Lemos (2022), que demonstrou a capacidade do Biochar de resíduos da agroindústria do

açaí em reduzir o Cd biodisponível. O Biochar impede a toxicidade do Cd porque ele neutraliza o solo (aumenta o pH), sendo importante ressaltar que o Cd assim como outros metais pesados, são mais solúveis e biodisponíveis em solos ácidos, assim como havia explicado em seu trabalho Olaniran (2013). Além disso, oferece uma estrutura física porosa (superfície) e química (grupos funcionais/carbonatos) para aprisionar ou imobilizar o Cd na matriz do solo. Isso significa que menos Cd  $2+$  entra na raiz e, conseqüentemente, a planta consegue crescer melhor já que acumula menos metal na parte aérea, o que é o objetivo da fitoestabilização.

Em contrapartida, observou-se que o tratamento com *T. harzianum* isolado resultou na concentrações residuais de Cd no solo e nas partes vegetais significativamente mais altas (Figura 6) em comparação com os demais tratamentos, com resultados sendo  $140 \text{ mg kg}^{-1}$  na parte aérea e aproximadamente  $500 \text{ mg kg}^{-1}$  na raiz e no solo. Este resultado sugere que o *T. harzianum* pode ter alterado as propriedades do solo, e não apenas o balanço de massa do Cd. A liberação de agentes quelantes, como ácidos orgânicos e sideróforos, é um mecanismo bem estabelecido de PGPF para aumentar a solubilidade de nutrientes e, por extensão, de íons metálicos como o Cd. O fungo provavelmente complexou o Cd no solo, facilitando o acúmulo nas raízes e ao redor delas, através de micélios fungicos (Figura 6b). Contudo, o Cd residual detectado no solo pode representar a porção do metal que foi 'solubilizada' pelo fungo, mas não absorvida pela planta. Essa alteração na biodisponibilidade, tornando o metal mais extraível, explica o valor final elevado, e é uma característica que deve ser considerada ao se utilizar o *T. harzianum* em estratégias de fitorremediação, onde a principal meta é a redução efetiva do Cd no solo (MOTAHER,2020). Em resumo, o fungo adsorveu o Cd e biacumulou esse metal em suas hifas, permitindo que ele ficasse prontamente disponível no solo para absorção das raízes da planta, configurando uma estratégia de biorremediação. De acordo com Alloway (1995), a concentração de cádmio em solos naturais costuma ser inferior a  $1 \text{ mg kg}^{-1}$ , sendo este elemento proveniente da desintegração química dos materiais de origem. Observa-se que rochas ígneas ácidas, como o granito ( $0,09 \text{ mg kg}^{-1}$ ), possuem teores menores de Cd do que rochas básicas, como o basalto ( $0,13 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Em contrapartida, embora sedimentos como calcário e arenito apresentem baixas concentrações, valores expressivos são encontrados em fosforitas, nódulos de manganês e, especialmente, em folhelhos negros, onde os níveis podem atingir  $219 \text{ mg kg}^{-1}$  (FERGUSSON, 1990). Tais enriquecimentos de Cd são frequentemente associados a depósitos de sulfetos metálicos (Pb e Zn) do tipo VHMS ou Sedex. Por fim, Kabata-Pendias (2001) estima que a média global de Cd em horizontes superficiais seja de  $0,53 \text{ mg kg}^{-1}$ , sugerindo que qualquer montante acima deste patamar

indica contaminação por atividades antrópicas.

Embora o fungo isolado não tenha sido capaz de conter a toxicidade na Parte Aérea (Figura 6), sua presença na combinação é vital para o crescimento vegetal. A combinação funciona em duas frentes: química e fisiológica. O Biochar atua como um 'escudo' químico que reduz a biodisponibilidade e a absorção do Cd, e o *T. harzianum* atua como um 'suporte biológico' que otimiza a fisiologia da planta para lidar com o Cd residual que foi absorvido.

A comparação entre o *T. harzianum* isolado e o tratamento *T. harzianum* + Biochar é fundamental para avaliar a ocorrência de um efeito em conjunto na mitigação da toxicidade do Cd. O Biochar, por si só, demonstrou ser eficaz, pois reduziu o acúmulo de Cd na parte aérea, no solo e nas raízes (Figura 6). No entanto, a adição do fungo PGPF *T. harzianum* conferiu um benefício em relação a altura e a proteção da MSR, favorecendo o crescimento vegetal mesmo em condições de estresse por contaminação. A combinação, assim como o Biochar isolado, conseguiu reduzir a quantidade de Cd no solo e nas partes vegetais (Figura 6). E na condição de solo limpo (Sem Cd), a combinação demonstrou um benefício no Comprimento da Raiz (CR), sendo superior ao Biochar isolado (Figura 4f). Tais resultados indicam que o *T. harzianum* complementa a proteção química do Biochar com um suporte fisiológico (bioestimulação e indução de tolerância), resultando em uma resiliência ao estresse que nenhuma das estratégias, isoladamente, pôde proporcionar.

## 8. CONCLUSÃO

A contaminação por Cd promoveu redução significativa nos parâmetros de crescimento e nos aspectos morfológicos de *M. caesalpinifolia*. De modo geral, a aplicação de biochar e ou *T. harzianum* atenuou os efeitos fitotóxicos do Cd, promovendo incrementos no crescimento vegetal, independentemente da presença do metal. O uso isolado de *T. harzianum* esteve associado a maior concentração de Cd nas raízes e no solo, sem restringir sua translocação para a parte aérea. Por sua vez, o biochar, aplicado isoladamente ou em combinação, foi mais eficiente na redução da concentração de Cd na parte aérea, indicando maior capacidade de imobilização do metal, contribuindo para a manutenção do crescimento vegetal e para a redução da translocação de Cd no sistema solo-planta.

## REFERÊNCIAS

- ALLOWAY, B.J. Heavy Metals in Soils. 2.ed. London: Blackie Academic & Professional, 1995. 386p. ISBN 0-7514-0198-6
- ALBUQUERQUE, A. R. O.; LEAL, J. S. L. A. Metais pesados provenientes de rejeitos de

mineração e seus efeitos sobre a saúde e o meio ambiente. *Ciência & Saúde*, Brasília, v. 7, n. 2, p. 89-100, 2014.

ANDRADE, M. G., MELO, V. F., GABARDO, J., SOUZA, L. C. P., REISSMANN, C. B. Metais pesados em solos de área de mineração e metalurgia de chumbo: I - fitoextração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.33, n.6, p.1879-1888, 2009.

ARAUJO, E. R.; OLIVIERI, R. D.; FERNANDES, F. R. C. Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.

ATSDR, 2012. A Toxicological Profile for Cadmium. Agency for Toxic Substances and B. A. ONI, O. O. OZIEGBEB, O.O. OLAWOLE. Significance of biochar application to the environment and economy. *Annals of Agricultural Sciences*. Volume 64, Issue 2, 2019, Pages 222-236

BARBOSA, Francisco L. A.; SANTOS, João M. R.; MOTA, Jaedson C. A.; COSTA, Mirian C. G.; ARAUJO, Ademir S. F.; GARCIA, Kaio G. V.; ALMEIDA, Murilo S.; NASCIMENTO, Ícaro V.; MEDEIROS, Erika V.; FERREIRA, Odair P.; SOUZA FILHO, Antonio G.; FREGOLENTE, Lais G.; SOUSA, Helon H. F.; BORGES, Wardsson L.; PEREIRA, Arthur Prudêncio de Araujo. Potential of biochar to restoration of microbial biomass and enzymatic activity in a highly degraded semiarid soil. *Scientific Reports*, [s. l.], v. 14, art. 26065, p. 1-13, 2024.

BATISTA, N. S. (2016). Diversificação de cultivos de hortaliças associada ao uso de insumos para a fertilidade do solo, em sistema orgânico de produção (Dissertação de mestrado). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil. <https://tede.ufrj.br/jspui/handle/jspui/1774>

BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN NETO, L.; ANDRADE, C. A. de (ed.). Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. *Biocarvão: uso agrícola e ambiental*. Brasília, DF: Embrapa, 2023. cap. 14.

BIGALKE, M., ULRICH, A., REHMUS, A., KELLER, A., 2017. Accumulation of cadmium and uranium in arable soils in Switzerland. *Environ. Pollut.* 221, 85–93

BIOCHAR INTERNATIONAL. *Biochar production technologies*. Disponível em: <https://biochar-international.org/about-biochar/how-to-make-biochar/biochar-production-technologies/>. Acesso em: 16 Jul. 2025.

BRAINER, Maria Simone de Castro Pereira. *Cajucultura*. Fortaleza: Banco do Nordeste, Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste, 2022. 54 p. (Caderno Setorial ETENE,n.230).

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca. Brasília, DF: MMA, 2005. Disponível em: <http://www.exemplo.gov.br/panbrasil>. Acesso em: 7 jan. 2026.

BROWN, R.; CAMPO, B.; BOATENG, A. A.; GARCIA-PEREZ, M. G.; MAŠEK, O. Fundamentals of biochar production. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for Environmental Management: Science, Technology, and Implementation. Earthscan, London & Sterling, 2015. p. 39-61

CAI, F., YU, G., WANG, P., WEI, Z., FU, L., SHEN, Q., CHEN, W., 2013. Harzianolide, a novel plant growth regulator and systemic resistance elicitor from *Trichoderma harzianum*. *Plant Physiol. Bioch.* 73, 106 - 113.

CARDOSO JÚNIOR, C. D.; PIMENTA, A. S.; SOUZA, E. C. de; PEREIRA, A. K. S.; DIAS JÚNIOR, A. F. Agricultural and forestry use of biochar: state of the art and future research. *Research, Society and Development, [S. l.]*, v. 11, n. 2, p. e55711225999, 2022. DOI:10.33448/rsd-v11i2.25999.4

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

CIMINELLI, V. S. T., SALUM, M.J.G., RUBIO, J., PERES, A.E.C. (2006-A), "Água e mineração, organizado por Aldo da Cunha Rebouças, Benedito Braga e José Galizia Tundisi, Águas Doces no Brasil, 3ª. ed, São Paulo, Escrituras Editora e Distribuidora de Livros Ltda., p.433-458

COSTA, G. S.; ANDRADE, A. G.; FARIA, S. M. Aporte de nutrientes pela serrapilheira de *Mimosa caesalpiniaefolia* (sabiá) com seis anos de idade. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 3., 1997, Ouro Preto. Do substrato ao solo: trabalhos voluntários. Viçosa: Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, 1997. p. 344-354.

DOWNIE, A., MUNROE, P., COWIE, A. L., & ZWIETEN, L. V. (2012). Biochar as a geoengineering climate solution: hazard identification and risk management. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42 (3), 225 – 250. <https://doi.org/10.1080/1064338>

DUWIEJUAH AB, ABUBAKARI AH, QUAINOO AK, AMADU Y. Review of Biochar Properties and Remediation of Metal Pollution of Water and Soil. *J Health Pollut.* 2020 Aug 19;10(27):200902. doi: 10.5696/2156-9614-10.27.200902. PMID: 32874758; PMCID: PMC7453820.

EGEA, T.C. Avaliação do perfil de produção de enzimas e potencial de degradação do herbicida diuron pelos fungos isolados de solo de plantação de cana-de-açúcar. 2020. Tese (Mestrado em Ciências) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de São José do Rio Preto, SP.

FALCÃO, N. P. S.; CLEMENT, C. R.; TSAI, S. M.; COMERFORD, N. B. Pedology, fertility, and biology of Central Amazonian Dark Earths. In: WOODS, W. I.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; STEINER, C.; WINKLERPRINS, A.; REBELLATO, L. (ed). *Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision*. Berlin: Springer Science, 2009. p.213-228.

FELICIANO, A. L. P. Estudo da germinação de sementes e desenvolvimento de muda, acompanhado de descrições morfológicas, de dez espécies arbóreas ocorrentes no SemiÁrido nordestino. 1989. 114 f. Tese (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal de Viçosa - Viçosa, MG.

FERNANDO MACHADO DE MELLO, ESSAÏD BILAL, GUSTAVO NEVES, MARIA EDUARDA L.R. TEODORO, THIAGO PEIXOTO DE ARAUJO. Compared Background and Reference Values in Sources of Cadmium-enriched Soils from Brazil. 16° CBGE - 16° Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Comitê Organizador do 16° CBGE, Sep 2018, São Paulo, France. fhal-01947199f

FRANCO, M. H. R. (2019). Biochar e fertilizantes especiais no crescimento inicial da cultura do milho (Tese de doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/26428>

FREDDO, A., CAI, B.J., REID, V., 2012. Environmental contextualisation of potential toxic

GARCIA, K. G. V. et al. The Contribution of Arbuscular Mycorrhizal Fungi to Soil Enzyme Activity and the Performance of *Mimosa caesalpiniaefolia* in Soil Degraded by Scheelite Mining: Implications for Restoration. *Forests*, [S. l.], 2023.

- GUILHERME, L.R.G. et al. Elementos-traço em solos e sistemas aquáticos. Tópicos em Ciências do Solo, v. 4, p. 345-390, 2005
- HALL, J. L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Botany*, v. 53, p. 1-11, 2002
- HAJEB, P., SLOTH, J.J., SHAKIBAZADEH, S., MAHYUDIN, N.A., AFSAH-HEJRI, L., 2014. Toxic elements in food: occurrence, binding, and reduction approaches. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 13, 457–472.
- HANKE, D.; NASICMENTO, S. G.; DICK, D. P.; ÁVILA, M. R.; PILLON, C. N. Produção e caracterização de biocarvão a partir de diferentes fontes de biomassa vegetal: aproveitamento de resíduos arbóreos e agrícolas sem destinação apropriada, *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, [s.l.], v. 10, n. 2, 2022.
- IBI. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil, IBI-STD-01.1, 2015, International Biochar Initiative, [https://www.biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/IBI\\_Biochar\\_Standards\\_V2.1\\_Final.pdf](https://www.biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final.pdf). Acesso em: 10 Jul de 2025.
- KABATA-PENDIAS, A. and PENDIAS, H., (2001). Trace Elements in Soils and Plants, Third Edition. Boca Raton: CRC Press LLC.
- LEHMANN, J., & JOSEPH, S. (2009). Biochar for Environmental Management: An Introduction. *Science And Technology*, 1, 1–12
- LI, H., DONG, X., SILVA, E. B., OLIVEIRA, L. M., CHEN, Y., & MA, L. Q. (2017). Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications. *Chemosphere*, 178, 466-478. [10.1016/j.chemosphere.2017.03.072](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.072).
- LIMA, M. P. M. de. Morfologia dos frutos e sementes dos gêneros da tribo Mimoseae (Leguminosae-Mimosoideae) aplicada à sistemática. *Rodriguésia*, Rio de Janeiro, v. 37, n. 62, p. 53-78, jan./jul. 1985.
- LISBOA, D. M. de. Isolados de *Trichoderma* spp. na inibição de fitopatógenos, na germinação de sementes e no desenvolvimento de plantas de tomateiro. Orientador: Gilmar Franzener. 2018. 43p. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Laranjeiras do Sul. Disponível em: <https://rd.uffs.edu.br/bitstream/prefix/2912/1/LISBOA.pdf>

- MALAVOLTA, E. Fertilizantes e seu impacto ambiental, micronutrientes e metais pesados: mitos, mistificação e fatos. São Paulo, ProduQuímica, 1994.
- MOTAHHER HOSSAIN MD E SULTANA F (2020). Aplicação e mecanismos de fungos promotores do crescimento vegetal (PGPF) para fitoestimulação. Agricultura Orgânica. IntechOpen. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.92338>.
- MUKOME, F. N. D.; PARIKH, S. J. Chemical, physical, and surface characterization of biochar. In: OK, Y. S.; UCHIMIYA, S. M.; CHANG, S. X.; BOLAN, N. (ed.) Biochar: production, characterization, and applications. Boca Raton: CRC Press, 2016. p. 68-96
- NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do; et al. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. 256 p. (Estudos da Pós-Graduação).
- NAWROCKA, J., MAŁOLEPSZA, U., 2013. Diversity in plant systemic resistance induced by Trichoderma. Biol. Control 67, 149–156.
- NOVOTNY, E. H., MAIA, C. M. B., DE CARVALHO, F., MADARI, B. E. & M. T. DE M. & Biochar: Carbono pirogênico para uso agrícola - Uma revisão crítica. *Rev. Bras. Cienc. Solo*. **39**, 321–344 (2015).
- NUR A. Zin, NOOR A. Badaluddin, Biological functions of Trichoderma spp. for agriculture applications, *Annals of Agricultural Sciences*, Volume 65, Issue 2, 2020, Pages 168-178
- OLANIRAN AO, BALGOBIND A., PILLAY B. Biodisponibilidade de metais pesados no solo: impacto na biodegradação microbiana de compostos orgânicos e possíveis estratégias de melhoria. *Int. J. Mol. Sci.* 2013;14:10197–10228. doi: 10.3390/ijms140510197
- PRASAD, M. N. V.; MALEC, P.; WALOSZEK, A.; BOJKO, M.; STRZALKA, K. Physiological responses of LEMNA TRISULCA L. (DUCKWEED) TO CADMIUM AND COPPER BIOACCUMULATION. *Plant Science*, v. 161, p. 881-889, 2001
- RENATO C. L. [et al.]. Produção do biogás a partir do bagaço de caju. Fortaleza. Embrapa Agroindústria Tropical, 2011. 43 p.; 21 cm. – (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Agroindústria Tropical, ISSN 1679-6543; 51).
- RICHARDSON G.M, GARRETT R, MITCHELL I, MAH-POULSON M, HACKBARTH T. Critical review on natural global and regional emissions of six trace metals to the atmosphere. Prepared for the International Lead Zinc Research Organisation, the International Copper Association, and the Nickel Producers Environmental Research Association. 2001 RIZZINI, C.

T. Árvores e madeiras úteis do Brasil: manual de dendrologia brasileira. São Paulo: E. Blücher, 1971. 294 p.

S. P. SOHI, E. KRULL, E. LOPEZ-CAPEL, AND R. BOL, A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil. in DONALD L. SPARKS editor: ADVANCES IN AGRONOMY, Vol. 105, Burlington: Academic Press, 2010, pp.47-82. ISBN: 978-0-12-381023-6

SANTOS, Mauro Carneiro dos. *Solos do semiárido do Brasil*. 2. ed. Recife: EDUFRPE, 2017. 54 p. (Cadernos do Semiárido: riquezas e oportunidades; v. 10). Disponível em: <http://www.ipa.br/novo/pdf/cadernos-do-semiarido/10---solos-do-semiarido-do-brasil.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2025.

TOMAZELLI, Andréa Cristina. Estudo comparativo das concentrações de cádmio, chumbo e mercúrio em seis bacias hidrográficas do estado de São Paulo. 2003. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2003. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/59/59139/tde-15032005-173014/>.

TRIPATHI, M.; SAHU, J. N.; GANESAN, P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 55, p. 467-481, 2016.

UCHIMIYA, M.; CHANG, S.; KLASSON, K. T. Screening biochars for heavy metal retention in soil: role of oxygen functional groups. *Journal of Hazardous Materials*, v. 190, p. 432–41, 2011.

UNEP, 2010. Final Review of Scientific Information on Cadmium. United Nations

VASCONCELOS, B. Sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth.), valiosa forrageira arbórea e produtora de madeira das caatingas. Mossoró: ESAM, 1989. Não paginado. (ESAM. Coleção mossoroense, Série 13, 660).

VIEIRA, EA (2011). A (in) sustentabilidade da indústria da mineração no Brasil. *Estação Científica*, [S.l.], 2: 1-15. Disponível: . Acessado em: 10 de março de 2019.

VIOTTI, P.; MARZEDDU, S.; ANTONUCCI, A.; DÉCIMA, M.A.; LOVASCIO, P.; TATTI, F.; BONI, M.R. Biochar as Alternative Material for Heavy Metal Adsorption from Groundwaters: Lab-Scale (Column) Experiment Review. *Materials* 2024, 17, 809