

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA FLORESTAL**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**TACIANA DA SILVA PARAIZO**

**EUCALIPTO E BIOCHAR PARA FITOATENUAÇÃO DA POLUIÇÃO DO  
SOLO POR CÁDMIO**

**RECIFE-PE**

**2022**

**TACIANA DA SILVA PARAIZO**

**EUCALIPTO E BIOCHAR PARA FITOATENUAÇÃO DA POLUIÇÃO DO  
SOLO POR CÁDMIO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Florestal da Universidade Federal Rural  
de Pernambuco, como parte das  
exigências para a obtenção do grau de  
Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Eliane Cristina  
Sampaio de Freitas

Co-orientador: Dr<sup>o</sup> Fernando Bruno Vieira  
da Silva

**RECIFE-PE**

**2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Sistema Integrado de Bibliotecas  
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

P222e

Paraizo, Taciana da Silva

Eucalipto e biochar para fitoatenuação da poluição do solo por cádmio / Taciana da Silva Paraizo. - 2022.  
44 f.

Orientador: Profª Drª Eliane Cristina Sampaio de Freitas.

Coorientador: Drº Fernando Bruno Vieira da Silva.

Inclui referências.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em Engenharia Florestal, Recife, 2022.

1. Metal pesado. 2. Silvicultura. 3. Fitorremediação. 4. Qualidade ambiental. 5. Torta de filtro. I. Freitas, Prof Dr Eliane Cristina Sampaio de, orient. II. Silva, Drº Fernando Bruno Vieira da, coorient. III. TÁ-tulo

CDD 634.9

---

**TACIANA DA SILVA PARAIZO**

**EUCALIPTO E BIOCHAR PARA FITOATENUAÇÃO DA POLUIÇÃO DO  
SOLO POR CÁDMIO**

BANCA EXAMINADORA

07 de outubro de 2022

---

Dr<sup>a</sup> Paula Renata Muniz Araújo  
(Departamento de Agronomia/ UFRPE)

---

Dr<sup>o</sup> William Ramos da Silva  
(Suplente - Departamento de Agronomia/UFRPE)

---

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Eliane Cristina Sampaio de Freitas  
(Orientadora – Departamento de Ciência Florestal/UFRPE)

---

Dr<sup>o</sup> Fernando Bruno Vieira da Silva  
(Co-orientador – Departamento de Agronomia/UFRPE)

**RECIFE-PE**

**2022**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus companheiros de turma, minhas crianças com as quais compartilhei tantos momentos de angústia e de felicidade, tem um lugarzinho para cada um de vocês no meu coração.

Sou grata aos meus professores, por todo o conhecimento compartilhado. A minha orientadora, meu muito obrigada.

Serei eternamente grata ao grupo de pesquisa que tenho tanto orgulho de fazer parte, o grupo de Química Ambiental de Solos, onde acumulei amigos e conhecimento. Não vou citar nomes, ou vai ser uma página só para isso kkk, amo todos vocês, muito obrigada por tudo, é uma honra enorme fazer parte desse grupo.

Como não agradecer meus amigos mais próximos, que tornaram os meus dias mais leves. Carlos e Aline, muito obrigada por cada momento, sem vocês o caminho teria sido muito mais árduo. Aline Veloso que me apresentou o grupo maravilhoso que faço parte até hoje e por ser uma amiga tão fiel. Andrezza, por sempre ser o ouvido acolhedor, a irmã que a vida escolheu para mim.

Faltam palavras para agradecer ao meu co-orientador, sem ele esse trabalho não teria acontecido, muitíssimo obrigada por toda a paciência, presença, dedicação e amizade. Essa é uma vitória nossa!

Agradeço a minha família, sem eles não estaria aqui, meus pais por me ensinar o valor e a amar a ciência e a educação. As minhas irmãs, sempre prontas a ajudar. Vocês são meu porto seguro.

Por fim agradeço aos meus filhos, nem imagino minha vida sem vocês, são meu impulso diário, meu guia, o significado de amar no meu dicionário.

## RESUMO

Fitoatenuação é uma técnica promissora para mitigar efeitos deletérios da toxidez de metais pesados, promovendo um manejo ambientalmente seguro do uso do solo com culturas de valor econômico. O uso de biochars pode reduzir a mobilidade de metais e proporcionar melhorias fertilidade do solo promovendo um manejo seguro em ambientes poluídos. Neste sentido, o presente trabalho teve por objetivos (i) avaliar a imobilização e a compartimentalização do Cd no solo com a aplicação de doses de um biochar de torta de filtro (BT); (ii) avaliar as alterações na fertilidade do solo em resposta a aplicação do biochar; (iii) avaliar o crescimento, a nutrição mineral e o acúmulo de Cd em duas espécies de eucaliptos (*Corymbia citriodora* e o híbrido *Eucalyptus urograndis* × *Eucalyptus urophylla*) cultivadas em um solo poluído e tratado com biochar; (iv) avaliar a amenização do estresse causado pelo Cd por meio dos parâmetros fisiológicos das plantas tratadas com biochar; e (v) avaliar a regeneração da qualidade do solo poluído por meio de indicadores microbiológicos. Dois experimentos foram conduzidos sequencialmente: o primeiro experimento foi um ensaio de sorção. O solo foi incubado com doses do biochar (0, 2, 4, 8, 12, 16, 24 e 30% *m/m*) por 64 dias e ao final deste período, foram analisados a disponibilidade e o fracionamento químico do Cd no solo e os atributos químicos relacionados à fertilidade do solo; o segundo experimento foi conduzido em casa de vegetação, com duas espécies de eucaliptos cultivadas em vasos por 65 dias no solo poluído por Cd, com e sem a aplicação de 5% BT. Após o cultivo foram avaliados os parâmetros de crescimento; os teores de N, P e Cd nos tecidos das plantas; os parâmetros da fluorescência da clorofila *a* e os pigmentos fotossintéticos; e a biomassa juntamente com a atividade microbiana dos solos. A partir dos resultados obtidos foi possível inferir que (i) o biochar de torta de filtro pode ser indicado como um agente amenizante da poluição do solo por Cd; (ii) ambas as espécies de eucaliptos associadas com a aplicação de 5% BT foram tolerantes à toxidez por Cd; (iii) o cultivo do eucalipto com a aplicação de biochar promoveu melhorias na microbiota do solo poluído por Cd, um sensível indicador de qualidade ambiental; e (iv) a fitotecnologia utilizando as espécies de eucaliptos *C. citriodora* e o híbrido *E. urograndis* × *E. urophylla* mais a aplicação com 5% BT demonstrou potencial de atenuar os efeitos do Cd em áreas poluídas.

**Palavras – chaves:** Metal pesado. Silvicultura. Fitorremediação. Qualidade ambiental.

Torta de filtro.

## ABSTRACT

Phytoattenuation is a promising technique to mitigate the deleterious effects of heavy metals toxicity, promoting an environmentally safe management of land use with crops of economic value. The use of biochars can reduce the mobility of metals and provide improvements in soil fertility, promoting safe management in polluted environments. In this sense, the present work aimed to (i) evaluate the immobilization and compartmentalization of Cd in the soil with the application of doses of a filter cake biochar (CB); (ii) assess changes in soil fertility in response to biochar application; (iii) to evaluate the growth, mineral nutrition and Cd accumulation in two eucalyptus species (*Corymbia citriodora* and the hybrid *Eucalyptus urograndis* × *Eucalyptus urophylla*) cultivated in a polluted soil treated with biochar; (iv) to evaluate the amelioration of the stress caused by Cd through the physiological parameters of the plants treated with biochar; and (v) evaluate the regeneration of polluted soil quality through microbiological indicators. Two experiments were carried out sequentially: the first experiment was a sorption assay. The soil was incubated with doses of biochar (0, 2, 4, 8, 12, 16, 24 and 30% m/m) for 64 days and at the end of this period, the availability and chemical fractionation of Cd in the soil were analyzed. and chemical attributes related to soil fertility; the second experiment was carried out in a greenhouse, with two species of eucalyptus grown in pots for 65 days in soil polluted by Cd, with and without the application of 5% CB. After cultivation, the growth parameters were evaluated; the levels of N, P and Cd in the tissues of the plants; chlorophyll a fluorescence parameters and photosynthetic pigments; and biomass together with soil microbial activity. From the results obtained, it was possible to infer that (i) the filter cake biochar can be indicated as a mitigating agent of soil pollution by Cd; (ii) both eucalyptus species associated with the application of 5% BT were tolerant to Cd toxicity; (iii) the cultivation of eucalyptus with the application of biochar promoted improvements in the microbiota of the soil polluted by Cd, a sensitive indicator of environmental quality; and (iv) phytotechnology using the eucalyptus species *C. citriodora* and the hybrid *E. urograndis* × *E. urophylla* plus the application with 5% CB showed potential to attenuate the effects of Cd in polluted areas.

**Keywords:** heavy metal; forestry; phytoremediation; environmental quality; filter cake.



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização química, físico-química e granulométrica do Argissolo Amarelo poluído com cádmio e utilizado nos experimentos .....	17
Tabela 2 - Valores médios das características do biochar de torta de filtro utilizado nos experimentos.....	18
Tabela 3 - Valores médios das características químicas e físico-química do Argissolo Amarelo poluído por Cd .....	26
Tabela 4 - Valores médios dos parâmetros fisiológicos de <i>Corymbia citriodora</i> e <i>Eucalyptus urophylla</i> × <i>Eucalyptus grandis</i> cultivadas por 65 dias em um solo poluído por Cd e tratado com biochar de torta de filtro.....	32

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Valores médios da disponibilidade e do fracionamento químico de cádmio no solo poluído que foi submetido a doses de biochar de torta de filtro e incubado por 64 dias.....	19
Figura 2 - Valores médios dos parâmetros de crescimento e da produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes de <i>Corymbia citriodora</i> e <i>Eucalyptus urophylla</i> × <i>Eucalyptus grandis</i> .....	29
Figura 3 = Teores médios de cádmio, de nitrogênio e de fósforo na parte aérea e nas raízes de <i>Corymbia citriodora</i> e <i>Eucalyptus urophylla</i> × <i>Eucalyptus grandis</i> que foram cultivadas por 65 dias em um solo poluído por Cd .....	30
Figura 4 - Transientes da fluorescência da clorofila a de <i>Corymbia citriodora</i> e <i>Eucalyptus urophylla</i> × <i>Eucalyptus grandis</i> que foram cultivadas por 65 dias em um solo poluído por Cd, com e sem a aplicação de biochar de torta de filtro. ....	33
Figura 5 - Valores médios do carbono microbiano, do nitrogênio microbiano, da respiração basal da microbiota e do quociente metabólico de um solo poluído por cádmio e cultivado com <i>Corymbia citriodora</i> e <i>Eucalyptus urophylla</i> × <i>Eucalyptus grandis</i> .....	35

## SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO .....	12
2 - OBJETIVOS .....	15
2.1 Objetivo geral .....	15
2.2 Objetivos específicos .....	15
3 – MATERIAIS E MÉTODOS .....	16
3.1. Coleta, preparo e caracterização do solo e do biochar .....	16
3.2. Experimento 1: Disponibilidade, compartimentalização de Cd e alterações nas propriedades químicas de um solo poluído tratado com doses de biochar de torta de filtro	
3.2.1. Montagem e condução do experimento.....	18
3.2.2. Análises químicas dos solos .....	18
3.2.3. Análises estatísticas .....	20
3.3. Experimento 2: Fitoatenuação da poluição do solo por Cd com a aplicação de biochar e o cultivo de espécies florestais .....	20
3.3.1. Montagem, condução do experimento e medições biométricas .....	20
3.3.2. Avaliações fisiológicas nas plantas .....	21
3.3.3. Análises químicas nas plantas .....	22
3.3.4. Análises microbiológicas do solo .....	23
3.3.4. Análises microbiológicas do solo .....	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	24
4.1. Efeitos da aplicação de biochar sobre a disponibilidade e a compartimentalização de cádmio no solo.....	24
4.2. Efeitos da aplicação de biochar sobre a fertilidade do solo.....	25

4.3. Efeitos da adubação com biochar de torta de filtro sobre o crescimento das espécies <i>C. citriodora</i> e <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i> .....	27
4.4. Teores de cádmio e nutrientes nas plantas.....	29
4.5. Efeitos da adubação com biochar de torta de filtro sobre a fisiologia das espécies de eucaliptos cultivadas no solo poluído por cádmio.....	33
4.6. Avaliação da qualidade do solo por meio de indicadores microbiológicos .....	34
5. CONCLUSÕES.....	36

## 1 INTRODUÇÃO

A contaminação ambiental por metais pesados influencia diretamente na saúde humana e tem sido uma questão de grande importância em vários países do mundo (Tepanosyan et al., 2018; Adimalla et al., 2020; Zheng et al., 2020). Estudos mostram que seres humanos expostos a elevadas concentrações de metais sofrem danos no sistema nervoso central, quando estes elementos acumulam-se nos tecidos gordurosos do corpo humano, ou podem ter distúrbios no funcionamento de órgãos internos, quando estes metais se mantêm no sistema circulatório (Ali et al., 2019; Briffa et al., 2020); adicionalmente, a contaminação por metais também resulta em perda da biodiversidade da fauna, da flora e da microbiota do solo, com sérias consequências negativas para as múltiplas funções ecossistêmicas dos solos (Li et al., 2017; Ding et al., 2018).

O Cd é um dos poluentes ambientais mais perigosos (Rehman et al., 2019); ele está ranqueado entre os dez contaminantes de maior ameaça à saúde humana, de acordo com a Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR, 2022). As operações de mineração e siderurgia, o uso de lodo de esgoto, águas residuárias e fertilizantes fosfatados na agricultura, são as principais fontes de contaminação dos solos por cádmio (Silva et al., 2016; He et al., 2017; Ji et al., 2017). No solo, o Cd é um metal muito móvel, não biodegradável, persistente e não essencial aos organismos vivos (Smolders and Mertens, 2013). O Cd antropogênico tende a permanecer nas formas solúveis e trocáveis no solo, que, são facilmente absorvidas pelas raízes e transportadas para a parte aérea das plantas (Chen et al., 2018; Cai et al., 2020).

Plantas expostas a Cd sofrem uma série de desordens bioquímicas e fisiológicas que podem promover sintomas como clorose nas folhas, inibição no crescimento, desbalanço na nutrição mineral, acúmulo de espécies de oxigênio reativas, desnaturação de proteínas e até mesmo a morte da planta (Bashir et al., 2018; Rehman et al., 2019; Rizwan et al., 2019). Na exposição humana, o Cd pode entrar no organismo pelo contato direto com o solo poluído (e.g. ingestão de solo) e/ou pela cadeia trófica, e, conseqüentemente, causar efeitos adversos à saúde, tais como danos renais, ósseos e pulmonares (ATSDR, 2012; Dong et al., 2019).

O biochar é um material poroso, de granulometria fina e rico em carbono; ele é produzido a partir da pirolise lenta da biomassa de vários resíduos (e.g. palha de arroz, palha de trigo, esterco, lodo de esgoto e etc) sobre uma ampla faixa de temperatura

(200 – 650°C) sob condições limitadas de oxigênio (Lu et al., 2017; Meng et al. 2018; Veloso et al., 2022). O uso de biochars em solos poluídos por metais pesados pode promover a imobilização dos metais pesados nos solos, promovendo uma menor absorção e fitotoxidez as plantas (Cui et al., 2016; Meng et al., 2018; Veloso et al., 2022). De acordo com Wang et al. (2021), os biochars podem reduzir a mobilidade dos metais nos solos por meio dos processos de adsorção física, troca iônica, adsorção específica e complexação. Adicionalmente, a aplicação de biochars aos solos pode proporcionar melhorias na fertilidade do solo; aumento na capacidade de retenção de água e nutrientes; sequestro de carbono e incrementos na produção da biomassa das culturas (Houben et al., 2013; Wang et al., 2015). O resíduo da produção da cana de açúcar conhecido como torta de filtro, que é proveniente do processo de tratamento e clarificação, já é utilizado na agricultura elevando de forma considerável os teores de matéria orgânica e elementos essenciais, o que indicaria que o uso desta matéria prima para a produção de biochar um aporte de elementos essenciais as plantas, como P, N e Ca (Junior et al., 2011).

A fitorremediação é um método *in situ* de recuperação de áreas poluídas por metais pesados. Esta técnica tem como princípio a utilização de plantas, associadas ou não a microorganismos e/ou compostos orgânicos, para remoção (e.g. fitoextração) ou imobilização (e.g. fitoestabilização) dos metais nos solos (Liu et al., 2020). A fitorremediação é menos onerosas em comparação a outras técnicas de engenharia de remediação (e.g. escavação); é uma tecnologia verde; pode ser empregada em grandes áreas; e promove a revegetação de áreas degradadas (e.g. metais pesados) (Yan et al., 2020).

Na última década, uma nova abordagem dentro da fitorremediação foi proposta e denominada de fitoatenuação. Ela se opõe ao paradigma de que áreas poluídas por metais pesados são improdutivas (Perlein et al., 2021). Na fitoatenuação, a remediação do solo não é o objetivo principal; contrariamente, as outras técnicas de fitorremediação, o seu foco é promover um gerenciamento do risco capaz de minimizar os potenciais efeitos deletérios à saúde humana e ambiental, e com isso permitir o manejo dos solos poluídos com culturas tolerantes à toxicidade dos metais pesados e de valor econômico (Cheng et al., 2015). Conseqüentemente, os rendimentos da atividade da fitoatenuação podem ser utilizados para custear as técnicas de remediação da área poluída. Vários trabalhos têm estudado a viabilidade econômica de culturas energéticas na fitoatenuação

(Perlein et al., 2021; Veloso et al., 2022), mas outras culturas com aplicações econômicas, que não seja para a alimentação humana e animal, podem ser exploradas, tal como a silvicultura de espécies florestais.

O eucalipto pertence à família Myrtaceae e possui mais de 140 gêneros. Dentro desta família estão os gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia*, que são espécies de origem Australiana, mas com grande potencial de adaptação as condições edafoclimáticas do Brasil (Cerqueira, 2002). De acordo com o relatório anual da Indústria Brasileira de Árvores, as florestas plantadas brasileiras somaram 9,55 milhões de hectares em 2020, deste total, 78% da área é ocupada por *Eucalyptus* e *Corymbia* (IBA, 2021).

A espécie *Corymbia citriodora*, comumente conhecida como eucalipto cheiroso, se destaca pela produção de óleos essenciais, usados nas indústrias química e farmacêutica (Vitti & Brito, 2003). Trabalhos encontrados na literatura indicam o uso destes óleos essenciais como repelentes de patógenos em outras culturas (França et al., 2012; Hussein et al., 2017). Introduzido no país com o objetivo de uso em construções, estruturas, caixotaria, postes, dormentes, lenha e carvão, com amplo uso nestas áreas até os dias de hoje, o *C. citriodora* possui como características da madeira, alta resistência mecânica, durabilidade natural e menor tendência ao rachamento, densidade básica média de  $0,750 \text{ g cm}^{-3}$ , o que indica a espécie com potencial para a extração de celulose (Brawner et al., 2012).

Na década dos anos 80, os programas de melhoramento da EMBRAPA Florestas, utilizaram sementes de 12 espécies de eucaliptos da Oceania, destes cruzamentos surgiu o híbrido *E. urophylla* × *E. grandis*, conhecido como eucalipto urograndis (Gonçalves, 2006). Produzida com finalidade de extração de polpa de celulose, este híbrido possui a característica do *E. urophylla* de rápido crescimento, rusticidade e adaptabilidade, e do *E. grandis* as características de maior densidade e coloração mais clara da madeira, se tornando assim o mais utilizado para obtenção de celulose de fibra curta, com elevado rendimento e qualidade da polpa (Carvalho, 2000). O *E. urophylla* × *E. grandis* possui tronco reto, com ciclos de corte de 5 anos, dependendo da utilização da madeira, tem capacidade de adaptação em quase todas as regiões brasileiras e possuem resistência a *Cryphonectria cubensis* (cancro do eucalipto), tipo de fungo que atinge várias espécies (Brisola e Demarco, 2011). Estudos também indicam o potencial de uso da espécie para produção de carvão e mourões (Carmona et al., 2020; Lima et al., 2019).

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 *Objetivo geral*

Avaliar o potencial da aplicação do biochar de torta de filtro na imobilização do cádmio no solo, na fitoatenuação com o cultivo de espécies de eucaliptos (*Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*) e na regeneração da qualidade ambiental de um solo poluído pelo metal.

### 2.2 *Objetivos específicos*

2.2.1. Avaliar a disponibilidade e a compartimentalização do Cd em um solo poluído e submetido a doses de biochar de torta de filtro por um período de incubação de 64 dias;

2.2.2. Avaliar os efeitos da aplicação das doses de biochar de torta de filtro sobre os parâmetros da fertilidade do solo poluído por cádmio;

2.2.3. Definir a dose recomendada do biochar de torta de filtro que torna a disponibilidade de Cd inferior ao valor de fitoxidez agrícola ( $1,3 \text{ mg kg}^{-1}$ ), estabelecido pela Resolução 420/2009 do CONAMA;

2.2.4. Avaliar o crescimento (altura, diâmetro do coleto e produção de biomassa) das duas espécies de eucaliptos cultivadas em um solo poluído por Cd e tratado com biochar de torta de filtro;

2.2.5. Determinar os teores de N, P e Cd nos diferentes tecidos das duas espécies de eucaliptos cultivadas em um solo poluído por Cd e tratado com biochar de torta de filtro;

2.2.6. Avaliar o efeito da adubação com o biochar de torta de filtro sobre o estresse fisiológico das duas espécies de eucaliptos cultivadas em um solo poluído por Cd;

2.2.7. Avaliar a qualidade ambiental do solo por meio de indicadores microbiológicos (C e N da biomassa microbiana, respiração basal e quociente metabólico) após cultivo das duas espécies de eucaliptos no solo poluído por Cd e tratado com biochar de torta de filtro.



### 3 MATERIAL E METODOS

#### 3.1. Coleta, preparo e caracterização do solo e do biochar

Amostras de um solo classificado como Argissolo Vermelho Amarelo foi coletado na profundidade de 0,0 – 0,2 m, seco ao ar e peneirado em malha 0,4 m. Este solo teve a contaminação induzida com cádmio, por meio da aplicação da dose de 10,0 mg kg<sup>-1</sup> Cd na forma de CdCl<sub>2</sub>. O solo permaneceu incubado com o metal por um período de 28 dias.

Para caracterização química e física do solo (Tabela 1), três subamostras foram coletadas e passadas em peneira de malha de 0,2 mm. O pH do solo foi determinado em água na relação 1:2,5 (solo:água); os teores trocáveis de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup> foram extraídos com KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>, os cátions básicos foram determinados por complexometria com EDTA 0,0125 mol L<sup>-1</sup>, enquanto que, o alumínio trocável foi determinado por titulação com a solução de 0,025 mol L<sup>-1</sup> NaOH; os teores de Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> trocável e P disponível foram extraídos por Mehlich-1, o K foi determinado por fotometria de chama e o P por colorimetria; o carbono orgânico total do solo foi determinado pelo método de oxidação via-úmida Walkley-Black e a matéria orgânica foi estimada pela multiplicação do resultado do carbono pelo fator de 1,724; a capacidade de troca catiônica (CTC) foi determinada pelo método do acetato de sódio/amônio (McGeorge, 1954); os teores de areia, silte e argila nos solos foram determinadas pelo método do densímetro de Bouyoucos após a dispersão química com NaOH e agitação por 16h. Todas as análises químicas descritas foram realizadas de acordo com os protocolos preconizados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Teixeira et al., 2017), exceto a capacidade de troca catiônica.

**Tabela 1. Caracterização química, físico-química e granulométrica do Argissolo Amarelo poluído com cádmio e utilizado nos experimentos**

Variáveis	Unidades	Média	±DP
pH	água (1:2,5)	5,28	0,01
Ca <sup>+2</sup> + Mg <sup>+2</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	4,47	0,06
Ca <sup>+2</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	3,97	0,06
Al <sup>+3</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,13	0,03
Na <sup>+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,83	0,05
K <sup>+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,38	0,01
H + Al	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	3,57	0,13
CTC	mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	70,46	8,56
P <sub>disponível</sub>	mg dm <sup>-3</sup>	92,19	5,35
COS	g kg <sup>-1</sup>	13,13	0,45
MOS	g kg <sup>-1</sup>	22,64	0,77
Cd <sub>(CC)</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	3,91	0,14
Areia	g kg <sup>-1</sup>	628,0	56,52
Silte	g kg <sup>-1</sup>	32,0	3,20
Argila	g kg <sup>-1</sup>	340,0	23,80

*CTC* capacidade de troca catiônica; *COS* carbono orgânico do solo; *MOS* matéria orgânica do solo; *Cd<sub>(CC)</sub>* teor disponível de cádmio no solo extraído com 0,01M CaCl<sub>2</sub>; *DP* desvio padrão.

O Cd disponível no solo foi extraído com CaCl<sub>2</sub> (Yin et al., 2016). Três gramas do solo foram agitados com 30,0 mL de solução de CaCl<sub>2</sub> a 0.01 mol L<sup>-1</sup> por 16h a 60 rpm. Posteriormente, as amostras foram centrifugadas a 4000 rpm por 20 min e o sobrenadante foi filtrado ( $\varnothing < 2 \mu\text{m}$ ). Os teores de Cd foram determinados em espectrometria de emissão ótica com plasma acoplado indutivamente (ICP–OES Perkin Elmer 7000 DV).

O biochar foi preparado usando a torta de filtro como matéria prima. Ela foi obtida a partir de uma indústria sulcroalcooleira, localizada na região da Zona da Mata de Pernambuco (7° 49' 11.824" S 35° 0' 41.436" W). O biochar foi produzido a partir da pirólise lenta da torta de filtro a 400°C, no laboratório de Química Ambiental de Solos, utilizando um reator confeccionado pelo grupo de pesquisa. A temperatura do processo de pirolise do biochar foi controlada através de termômetro acoplado ao reator. Para as análises químicas e físico-químicas do biochar (Tabela 2), subamostras em

triplicata do biochar foram secas em estufa (40°C), maceradas e peneiradas em malha de 850 µm.

**Tabela 2. Valores médios ( $\pm$ desvio padrão) das características do biochar de torta de filtro utilizado nos experimentos**

Variáveis	Unidades	Média	$\pm$ DP
pH	água (1:5)	7,9	0,1
CE	dS m <sup>-1</sup>	456,0	60,4
CTC	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	225,0	11,6
AS	m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>	185,0	15,7
Umidade	%	6,0	0,2
Carbono fixado	%	56,0	9,8
Cinzas	% (m/m)	20,4	1,3
Carbono	% (m/m)	84,0	2,5
Nitrogênio	% (m/m)	4,0	0,9
Oxigênio	% (m/m)	9,2	1,7
Fósforo	g kg <sup>-1</sup>	69,5	2,1
Cádmio	mg kg <sup>-1</sup>	< LOQ	< LOQ

*CE* condutividade elétrica; *CTC* capacidade de troca catiônica; *AS* área de superfície específica; *DP* desvio padrão; *LOQ* limite de quantificação (0,07 mg kg<sup>-1</sup> Cd).

O pH do biochar foi determinado em uma suspensão com água destilada na relação de 1:5 (v/v); a umidade foi determinada por gravimetria após a secagem da amostra em estufa a 105°C por 18h; para a determinação dos materiais voláteis, três amostras foram previamente secas em estufa a 105°C, posteriormente, 1,0 g das amostras foram pesadas em cadinhos e aquecidas na mufla a 950°C por 10'; o teor de cinzas foi determinado pelo aquecimento em mufla a 750°C por 6h; o carbono fixado foi obtido por meio da soma dos valores da matéria seca, do material volátil e do teor de cinzas. Todas as análises foram realizadas de acordo com a metodologia proposta por Singh et al. (2017). Para a determinação dos teores dos macronutrientes, dos micronutrientes e do Cd no biochar, 0,2 g do material foi pesado em tubos de teflon e digerido em forno de microondas (180°C por 10') com 8 mL HNO<sub>3</sub> + 2 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, posteriormente, os extratos foram filtrados e o volume aferido para 25 mL em balões volumétricos certificados (US EPA 1996). O P foi determinado por colorimetria; K e Na por fotometria de chama; e Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn e Cd foram determinados por ICP-OES. Apesar de ser variável de acordo com os fatores de produção do resíduo, a

torta de filtro tem o P como um elemento predominante em sua composição e o uso deste resíduo como adubo promove melhorias nas propriedades químicas do solo, como o aumento da disponibilidade de nitrogênio, cálcio, CTC e diminuição nos teores de Al trocável (Junior et al., 2011).

### **3.2. Experimento 1: Disponibilidade, compartimentalização de Cd e alterações nas propriedades químicas de um solo poluído tratado com doses de biochar de torta de filtro**

#### *3.2.1. Montagem e condução do experimento*

Quinhentos gramas do solo poluído por Cd foram pesados e acondicionados em vasos plásticos com 15,0 cm de diâmetro e 12,0 cm de altura. O experimento foi conduzido no laboratório de Química Ambiental do Solo, no Departamento de Agronomia da Universidade Federal Rural de Pernambuco. O estudo foi realizado em delineamento inteiramente casualizado e os tratamentos consistiram de sete doses de biochar de torta de filtro (2; 4; 8; 12; 16; 24 e 30% *m/m*) mais o tratamento controle sem adição de biochar; com três repetições. Os solos foram incubados por 64 dias com umidade a 70% da capacidade de retenção de água. Ao final do período de incubação amostras dos solos foram coletadas; secas; peneiradas; e armazenadas para posterior análises.

#### *3.2.2. Análises químicas dos solos*

##### *Avaliação da disponibilidade de Cd nos solos*

O Cd disponível no solo foi extraído com  $\text{CaCl}_2$  (Yin et al. 2016). Três gramas do solo foram agitados com 30,0 mL da solução contendo  $0.01 \text{ mol L}^{-1} \text{ CaCl}_2$  por 16h a 60 rpm. Posteriormente, as amostras foram centrifugadas a 4000 rpm por 20 min e o sobrenadante foi filtrado ( $\emptyset < 2 \mu\text{m}$ ). Os teores de Cd foram determinados em espectrometria de emissão ótica com plasma acoplado indutivamente (ICP–OES Perkin Elmer 7000 DV).

##### *Extração sequencial do Cd nos solos*

A compartimentalização do Cd no solo foi avaliada por meio do procedimento de extração sequencial de acordo com o método BCR proposto pela European Community Bureau of Reference. Neste método, foram extraídas operacionalmente três formas de Cd no solo (solúvel em ácidos–ligados a carbonatos; redutível–ligado aos óxidos de Fe

e Mn; e a forma oxidável–ligado à matéria orgânica) mais a fração residual. Para a extração sequencial, 1,0 g das amostras dos solos foram pesadas e acondicionadas em tubos de centrifuga de 50,0 mililitros.

- Fração 1 (trocável e/ou ligada a carbonatos): 20 mL da solução de ácido acético foi adicionado ao tubo com o solo e agitados por 16h a 30 rpm. Posteriormente, os tubos foram centrifugados a 5000 rpm por 10', os extratos foram filtrados e armazenados a 4°C para posterior análise. O resíduo foi lavado com água destilada, agitado por 5', centrifugado e o sobrenadante descartado;
- Fração 2 (reduzível – ligado as formas dos óxidos de Fe/Mn): 20 mL de cloridrato de hidroxilamina a 0,1 mol L<sup>-1</sup> (pH 2,0) foi adicionado ao material da fração anterior e agitados por 16h a 30 rpm. Posteriormente, os tubos foram centrifugados a 5000 rpm por 10', os extratos foram filtrados e armazenados a 4°C para posterior análise. O resíduo desta fração também foi lavado com água destilada, agitado por 5', centrifugado e o sobrenadante descartado;
- Fração 3 (oxidável – ligado a matéria orgânica): 5,0 mL da solução de 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> foi adicionado ao material da fração anterior, aquecidos a 85°C por 1h em banho–maria; posteriormente foi adicionado 25 mL de acetato de amônio (1,0 mol L<sup>-1</sup> pH 2,0) e agitados por 16h a 30 rpm. Posteriormente, os tubos foram centrifugados a 5000 rpm por 10', filtrado e armazenado a 4°C para posterior análise. O resíduo foi lavado com água destilada, agitado por 5', centrifugado e o sobrenadante descartado;
- Fração 4 (residual): 5,0 mL HNO<sub>3</sub> + 15,0 mL HCl foram adicionados ao resíduo da fração 3, que foi digerido até a evaporação de todo ácido em chapa aquecedora a 150°C. Posteriormente, a amostra foi dissolvida em uma solução de 5% de HNO<sub>3</sub>.

Os teores de Cd nos extratos da extração sequencial foram determinados em espectrometria de emissão ótica com plasma acoplado indutivamente (ICP–OES Perkin Elmer 7000 DV).

#### *Avaliação dos atributos químicos para a fertilidade do solo*

O pH foi determinado em água na relação solo:água 1:2,5; Ca<sup>+2</sup> + Mg<sup>+2</sup> trocáveis foram extraídos com a solução de KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> e determinados por complexometria com EDTA 0,0125 mol L<sup>-1</sup>; Al<sup>3+</sup> trocável foi extraído com a solução de KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>

<sup>1</sup> e a determinação foi realizada pela titulação com NaOH 0,025 mol L<sup>-1</sup>; K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> e P foram extraídos com a solução de Mehlich-1, K<sup>+</sup> e Na<sup>+</sup> foram determinados por fotometria de chama, enquanto que o P foi determinado pelo método colorimétrico em espectrofotômetro UV-Vis; o carbono foi determinado pela oxidação úmida com dicromato de potássio e a matéria orgânica foi estimada por meio do fator 1,724. Todos os procedimentos analíticos descritos anteriormente foram realizados de acordo com os protocolos estabelecidos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Teixeira et al., 2017). A capacidade de troca catiônica (CTC) foi determinada pelo método do acetato de amônio/sódio (Richards, 1954).

### 3.2.3. Análises estatísticas

Os valores da média e do desvio padrão foram calculados para todas as variáveis analisadas. A normalidade dos dados foi verificada pelo teste Shapiro-Wilk ( $p < 0.05$ ), e, quando necessário, transformações do tipo logarítmica e raiz quadrada foram aplicadas no conjunto dos dados. Todos os resultados dos tratamentos foram submetidos à análise de variância (ANOVA  $p < 0.05$ ). Modelos de regressões lineares e não lineares foram ajustados aos resultados do Cd disponível em função das doses do biochar; o valor do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) foi utilizado como critério de melhor ajuste do modelo de regressão. As concentrações médias dos resultados do fracionamento químico do Cd e dos atributos relacionados à fertilidade do solo foram comparadas entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $p < 0.05$ ). Todas as análises estatísticas foram realizadas com os softwares SISVAR e OriginPro 2018.

## 3.3. Experimento 2: Fitoatenuação da poluição do solo por Cd com a aplicação de biochar e o cultivo de espécies florestais

### 3.3.1. Montagem, condução do experimento e medições biométricas

O experimento foi realizado na casa de vegetação do Departamento de Agronomia da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) entre julho e setembro de 2022. Cinco quilogramas de solo poluído por cádmio foram pesados e acondicionados em vasos plásticos. O estudo foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado em um arranjo fatorial 2 × 2 (duas espécies de eucaliptos: *Corymbia citriodora* e o híbrido *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*, combinadas com e sem a aplicação da dose de 5% de biochar de torta de filtro), com

quatro repetições. A dose de 5% de biochar nos tratamentos, foi definida com base nos resultados do experimento 1.

Os solos foram fertilizados com 250,0 mg kg<sup>-1</sup> N e 240,0 mg kg<sup>-1</sup> P utilizando as fontes ureia e fosfato monoamônico (MAP), respectivamente. As mudas das espécies *Corymbia sp.* e *Eucalyptus sp.* foram produzidas em viveiro florestal de forma seminal; as mudas ficaram por dois meses em tubetes de polipropileno, contendo substrato comercial e vermiculita; a umidade foi mantida por irrigação diária. Posteriormente, as mudas foram transplantadas para os vasos; a seleção das mudas para a condução do experimento foi definida baseada na altura e no diâmetro do coleto, para garantir medidas homogêneas. Durante a condução do experimento, a umidade do solo foi mantida a 80 % da capacidade máxima de retenção de água.

Depois de 65 dias do transplântio, as alturas das plantas foram medidas da base até a gema apical com o auxílio de uma trena graduada; o diâmetro do coleto foi medido com o auxílio de um paquímetro. Após as medições, as plantas foram coletadas e separadas em parte aérea e raízes. As amostras foram lavadas com água de torneira e destilada; secas em estufa a 70° C até peso constante; pesadas para obtenção da produção da biomassa seca; e trituradas em moinhos de facas tipo Wiley. Amostras de solo também foram coletadas para avaliação dos indicadores microbiológicos de qualidade; aproximadamente, 200 g de solo foram coletados de cada vaso e mantidos em refrigeração a 4° C para posterior análises.

### *3.3.2. Avaliações fisiológicas nas plantas*

Os danos causados pela toxicidade do Cd ao aparato fotossintético foram avaliados pela investigação do potencial hídrico ( $\psi_w$ ) das folhas, pela quantificação dos teores dos pigmentos fotossintéticos (clorofila a, clorofila b, total e carotenoides) e pelo espectro de emissão da fluorescência da clorofila. As avaliações ocorreram aos 64 dias do transplântio, um dia antes da coleta do experimento.

#### *Potencial hídrico ( $\psi_w$ ) das folhas*

Para avaliação do potencial hídrico, amostras de folhas sadias com pecíolos (isentas de ataques de pragas e sem sintomas de doença ou deficiências nutricionais) do terço médio das plantas foram coletadas no horário das 4:30 h da manhã, elas foram envolvidas em papel alumínio e armazenadas sob refrigeração a 4° C, para posterior

análise. As determinações foram realizadas no horário entre as 8:00 e 9:00h utilizando uma câmara de pressão Scholander (Model 1515D Pressure Chamber Instrument–PMS Instrument Company). As leituras foram expressas em MPa.

#### *Fluorescência da clorofila*

As medições ocorreram nas folhas totalmente expandidas e sadias do terço médio das plantas. Primeiramente, uma seção do limbo das folhas (desprezando a nervura central) foram adaptadas ao escuro por o tempo mínimo de 30 minutos com o auxílio de pinças específicas, com o objetivo de atingir o estado de máxima oxidação do sistema fotossintético de transporte de elétrons. Posteriormente, as folhas foram expostas a pulsos de luz saturada de alta intensidade ( $2250 \text{ mmil m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) e a fluorescência foi medida usando um fluorômetro manual FluorPen, modelo F100 (Photon Systems Instruments). A partir da determinação da fluorescência cinética rápida foi obtida a curva e os parâmetros do transiente da fluorescência da clorofila *a* ( $F_o$ : fluorescência inicial;  $F_m$ : fluorescência máxima;  $F_v = F_m - F_o$ : fluorescência variável), além do rendimento quântico do fotossistema II ( $F_v/F_m$ ).

#### *Determinação dos pigmentos fotossintéticos*

As folhas utilizadas para a análise da fluorescência da clorofila foram coletadas para a determinação dos teores das clorofilas *a*, *b*, total e carotenoides. Neste estudo foi utilizado um método destrutivo, onde 0,100 g da matéria fresca da folha foi fracionada e armazenada em frascos de âmbar com 10,0 mL da solução de álcool etílico P.A. a 95%, o material foi refrigerado a 4°C por 24h, para a extração. Posteriormente, as leituras em absorvância foram realizadas em espectrofotômetro–UV. Os valores obtidos foram aplicados nas equações 1 – 3, para obtenção dos teores dos pigmentos fotossintéticos (Lichtenthaler & Buschmann 2001).

$$Cla_{(\mu\text{g mL}^{-1})} = 13,36 \times A_{664,1} - 5,19 \times A_{648,6} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$Clb_{(\mu\text{g mL}^{-1})} = 27,43 \times A_{648,6} - 8,12 \times A_{664,1} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$C(x + c)_{(\mu\text{g mL}^{-1})} = \frac{1000 \times A_{470} - 2,13 \times Cla - 97,64 \times Clb}{209} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde *Cl<sub>a</sub>* é o teor da clorofila *a*; *Cl<sub>b</sub>* é o teor da clorofila *b*; *C(x + c)* é o teor de carotenoides e xantofilas; e  $A_{664,1;648,6;470}$  são os valores da absorvância nos comprimentos de onda de 664,1; 648,6 e 470 nm.



### 3.3.3. Análises químicas nas plantas

Para avaliar os nutrientes e os teores de cádmio na parte aérea e nas raízes das plantas, uma amostra de 0,500 g do material vegetal foi digerida em sistema por micro-ondas (Milestone – Ethos Easy) com 8,0 mL HNO<sub>3</sub> + 2,0 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 175°C por 10' (USEPA 1996). Posteriormente, os extratos foram filtrados ( $\emptyset < 2.0 \mu\text{m}$ ) e o volume foi aferido para balões volumétricos de 25,0 mL com água ultrapura. Nos extratos da digestão foram determinados os teores de P por colorimetria; e o Cd por espectrometria de emissão ótica com plasma acoplado (ICP–OES Perkin Elmer 7000 DV). O nitrogênio orgânico total foi extraído pela digestão de 0,200 g do material vegetal em ácido sulfúrico concentrado a 350°C, de acordo com o método de Kjeldahl (Tedesco et al. 2005). Como controle de qualidade, foram utilizadas amostras em branco e material de referência para planta (SRM 1570a Spinach leaves) com os teores multielementares certificados pelo NIST (National Institute of Standards and Technology). As recuperações dos elementos no material certificado variaram entre 95,0 e 102,0%. Todas as análises foram realizadas em duplicada.

### 3.3.4. Análises microbiológicas do solo

O C ( $C_{mic}$ ) e o N ( $N_{mic}$ ) da biomassa microbiana dos solos poluídos por Cd e tratados com biochar de torta de filtro foram determinados pelo método da irradiação–extração, que tem como objetivo promover a lise celular e posteriormente quantificar a diferença nos resultados das amostras irradiadas e não irradiadas para os teores de C e N liberados. A respiração basal do solo (CO<sub>2</sub>–C) foi estimada pela quantificação do C–CO<sub>2</sub> emitido pela microbiota do solo em amostras de solos incubada por sete dias (Mendonça & Matos 2017). O quociente metabólico (qCO<sub>2</sub>) foi calculado pela relação entre o  $C_{mic}$  e o CO<sub>2</sub>–C (Anderson & Domsch 1993).

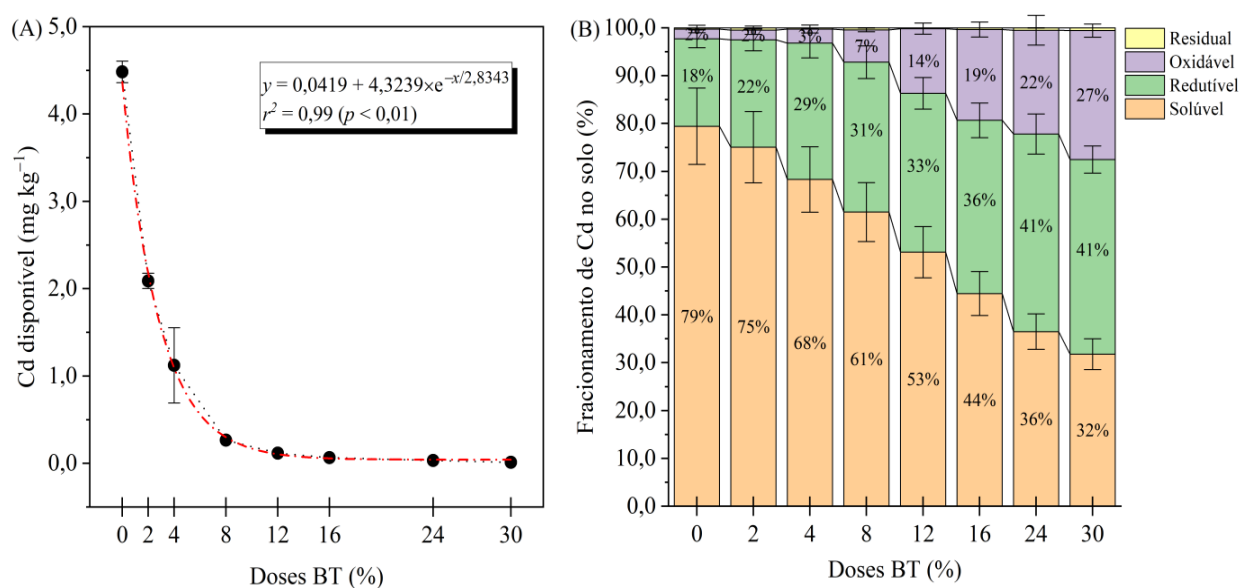
### 3.3.5. Análises estatísticas

Os valores da média e do desvio padrão foram calculados para todas as variáveis analisadas. A normalidade dos dados foi verificada pelo teste Shapiro–Wilk ( $p < 0.05$ ), e, quando necessário, transformações do tipo logarítmica e raiz quadrada foram aplicadas no conjunto dos dados. Todos os resultados dos tratamentos foram submetidos à análise de variância (ANOVA  $p < 0.05$ ). Os valores médios das variáveis foram comparados entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $p < 0.05$ ). Todas as análises estatísticas foram realizadas com os softwares SISVAR e OriginPro 2018.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Efeitos da aplicação do biochar sobre a disponibilidade e a compartimentalização de cádmio no solo

Houve efeito significativo da aplicação das doses do biochar da torta de filtro (BT) sobre a disponibilidade de Cd no solo (Figura 1A). Os teores de Cd reduziram com o aumento das doses do biochar; com a aplicação das doses de 2 e 4% BT, a disponibilidade de Cd no solo reduziu de 4,5 mg kg<sup>-1</sup> para 2,1 (-53,3%) e 1,1 (-75,6%) mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente, em relação ao controle. A partir da dose de 8% BT, os teores de Cd foram muito baixos e variaram entre 0,27 e 0,01 mg kg<sup>-1</sup>. Contudo, a dose de 8% BT é equivalente a 240 t ha<sup>-1</sup> e para as condições do solo investigado, e provavelmente é considerada economicamente inviável. Com a aplicação de 4% BT (equivalente a 60 t ha<sup>-1</sup>), o teor de Cd no solo foi inferior ao valor de prevenção (VP) (1,3 mg kg<sup>-1</sup> Cd) estabelecido na resolução n° 420 de 2009 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2009), que corresponde ao teor do metal no solo que causa fitotoxicidade para a maioria das culturas de importância agrícola. A redução na disponibilidade de Cd no solo com a aplicação de biochar tem sido verificada em outros estudos (Lu et al., 2015; Puga et al., 2015; Veloso et al., 2022). Abbas et al. (2017) verificaram que o Cd disponível no solo e extraído com DTPA (pH 7,0) reduziu 20,0; 40,0 e 54,3% com as aplicações das doses de 1,5; 3,0; e 5,0% de um biochar de palha de arroz.



**Fig 1.** Valores médios ( $\pm$  desvio padrão) da disponibilidade (A) e do fracionamento químico (B) de cádmio no solo poluído que foi submetido a doses de biochar de torta de filtro e incubado por 64 dias. BT biochar de torta de filtro;  $p < 0,01$  significativo a 1% de probabilidade pela ANOVA.

A redução dos teores disponíveis de Cd possivelmente está relacionada ao processo de sorção do metal desempenhado pelo biochar. Na figura 1B foram apresentados os resultados do fracionamento químico do Cd no solo que está diretamente relacionado com a mobilidade do metal. Com a aplicação do BT, os teores de Cd na fração solúvel (forma mais lábil) reduziram significativamente de 79% no controle para 32% com a aplicação da maior dose (30% BT). O Cd da fração mais lábil (solúvel – correspondente ao Cd trocável e ligado a carbonatos) foi redistribuído para os compartimentos mais recalcitrantes (de menor disponibilidade) do solo. As doses do BT aumentaram os teores de Cd na fração redutível (Cd ligados aos óxidos de Fe/Al/Mn) e na fração oxidável (Cd ligado a matéria orgânica do solo); os incrementos foram de 4 – 23% e de 1 – 25%, respectivamente. Não houve alteração nos teores de Cd relacionados à fração residual e valores foram inferiores a  $0,06 \text{ mg kg}^{-1}$ . Resultados similares foram verificados por Nobaharan et al. (2022); os autores, investigando os efeitos das doses de biochar de palha de arroz (0,0; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0 e 10,0% *m/m*) sobre o fracionamento químico de Cd em um solo poluído, verificaram que a aplicação de biochar reduziu os teores de Cd na fração trocável e ligados a carbonatos, enquanto que, houve um incremento significativo do metal ligado aos óxidos de Fe/Mn, a matéria orgânica e a fração residual.

#### *4.2. Efeitos da aplicação de biochar sobre a fertilidade do solo*

As doses do BT tiveram efeito significativo e positivo sobre os parâmetros da fertilidade do solo (tabela 3). O valor do pH do solo variou entre 5,5 (pH ácido) e 7,5 (pH levemente alcalino) com a aplicação de 2% e 30% BT. Na dose de 4% BT o valor diferiu estatisticamente do tratamento controle e apresentou um valor de pH ideal ( $6,0 \pm 0,0$ ) para o desenvolvimento e a nutrição mineral das plantas. Esta mesma dose promoveu um aumento de 100% nos teores de  $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{2+}$  e neutralizou a toxidez por  $\text{Al}^{+3}$ . O aumento do pH do solo associado a maior disponibilidade de  $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{2+}$  pode ser justificado pelo fato dos biochars conter substâncias alcalinas (principalmente carbonatos) e apresentar valores de pH elevados (Cheng et al. 2018); o BT apresentou um valor de pH alcalino ( $7,9 \pm 0,1$ ) (tabela 2), o que corrobora a presença de carbonatos. De acordo com Yuan et al. (2011), a alcalinidade de um biochar pode variar em função do tipo de matéria-prima e da temperatura de pirólise; nesse mesmo estudo, foi verificado um aumento proporcional nos valores do pH do biochar quando a temperatura da reação de pirólise aumentou de  $300^{\circ}\text{C}$  para  $700^{\circ}\text{C}$ . A presença de grupos

funcionais, tais como, carboxila ( $-\text{COOH}$ ) e hidroxila ( $-\text{OH}$ ) também foram considerados fatores preponderantes para a alcalinização no biochar.

**Tabela 3.** Valores médios ( $\pm$ desvio padrão) das características químicas e físico-química do Argissolo Amarelo poluído por Cd e submetido a doses de biochar de torta de filtro por um período de incubação de 64 dias

Doses	pH	Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	K <sup>+</sup>	CTC	P <sub>disponível</sub>	MOS
Biochar	água(1:2,5)	----- (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) -----				-----	mg dm <sup>-3</sup>	g kg <sup>-1</sup>
0,0%	5,3 $\pm$ 0,1a	3,0 $\pm$ 0,2a	2,4 $\pm$ 0,4a	0,2 $\pm$ 0,0c	0,3 $\pm$ 0,0a	5,8 $\pm$ 0,3a	170,8 $\pm$ 27,9a	9,0 $\pm$ 0,4a
2,0%	5,5 $\pm$ 0,0ab	5,0 $\pm$ 0,3b	4,3 $\pm$ 0,3b	0,1 $\pm$ 0,0b	0,4 $\pm$ 0,0a	7,1 $\pm$ 0,3ab	262,1 $\pm$ 19,1ab	9,8 $\pm$ 1,3a
4,0%	6,0 $\pm$ 0,0b	6,0 $\pm$ 0,4c	4,7 $\pm$ 0,2bc	0,0 $\pm$ 0,0a	0,4 $\pm$ 0,1a	7,4 $\pm$ 0,5ab	458,3 $\pm$ 69,5abc	12,1 $\pm$ 0,8ab
8,0%	6,6 $\pm$ 0,0c	7,1 $\pm$ 0,4d	5,9 $\pm$ 0,2cd	0,0 $\pm$ 0,0a	0,6 $\pm$ 0,1b	7,7 $\pm$ 0,3ab	578,5 $\pm$ 22,7abc	15,5 $\pm$ 1,2bc
12,0%	6,9 $\pm$ 0,0cd	8,0 $\pm$ 0,4e	5,9 $\pm$ 0,2cd	0,0 $\pm$ 0,0a	0,8 $\pm$ 0,1c	7,1 $\pm$ 0,1ab	810,4 $\pm$ 76,7bcd	15,8 $\pm$ 1,2bc
16,0%	7,1 $\pm$ 0,0de	8,3 $\pm$ 0,3e	6,9 $\pm$ 0,4de	0,0 $\pm$ 0,0a	0,9 $\pm$ 0,0c	8,9 $\pm$ 0,2bc	858,1 $\pm$ 29,3cd	17,0 $\pm$ 0,2c
24,0%	7,4 $\pm$ 0,0e	9,2 $\pm$ 0,2f	7,5 $\pm$ 0,3ef	0,0 $\pm$ 0,0a	1,2 $\pm$ 0,0d	9,5 $\pm$ 0,2c	1139,5 $\pm$ 62,0cd	20,5 $\pm$ 0,6cd
30,0%	7,5 $\pm$ 0,0e	9,5 $\pm$ 0,3f	8,0 $\pm$ 0,5f	0,0 $\pm$ 0,0a	1,3 $\pm$ 0,1d	9,7 $\pm$ 0,3c	1232,8 $\pm$ 8,2d	22,3 $\pm$ 0,3d

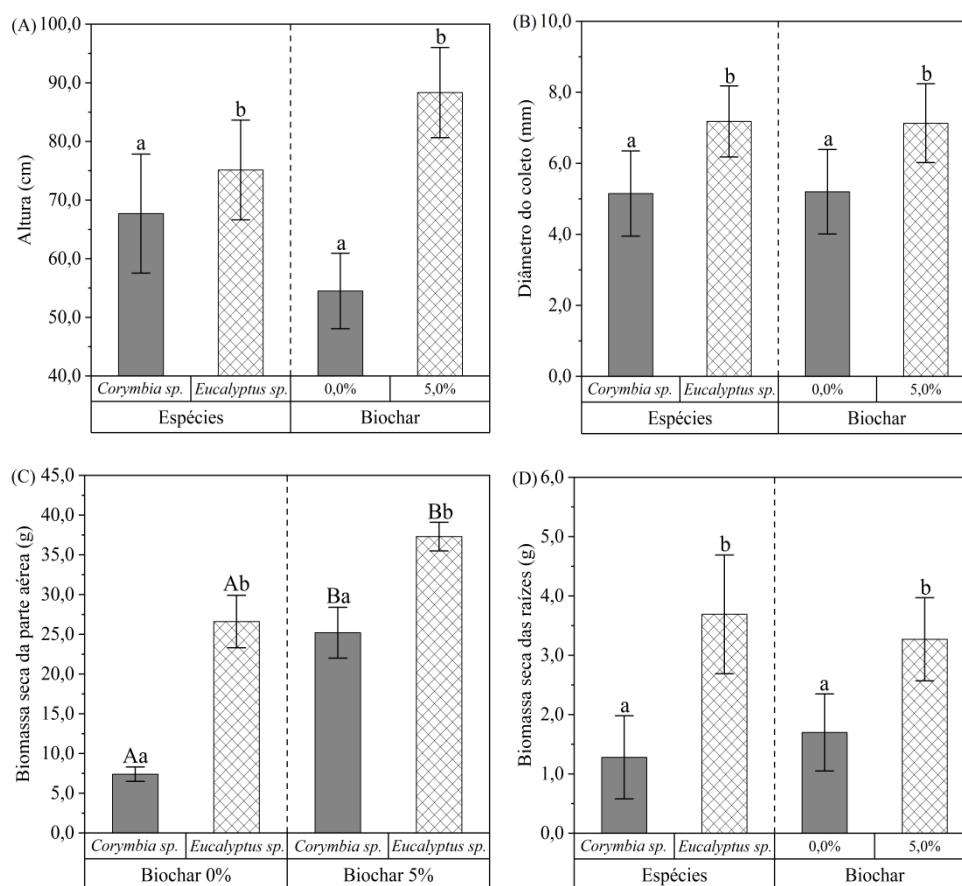
CTC capacidade de troca catiônica; MOS matéria orgânica do solo; valores médios seguidos pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Efeitos significativos nos teores do K<sup>+</sup> trocável e na MOS foram observados a partir da dose de 8% BT. Os valores da CTC variaram entre 7,1 e 9,7 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> nos solos tratados com o biochar. Com relação ao P disponível no solo, as doses do BT promoveram incrementos entre 91,3 e 1062,0 mg dm<sup>-3</sup>. Vários estudos têm corroborado que a adubação com biochar melhora a fertilidade dos solos (Agegnehu et al. 2017; El-Naggar et al. 2019; Diatta et al. 2020). Veloso et al. (2022) verificaram que a adubação com biochar de palha de arroz em um solo poluído por cádmio aumentou os teores de P disponível, a capacidade de troca catiônica e o carbono orgânico do solo em 107,5; 30,3 e 27,0%, respectivamente, com a dose de 30 Mg ha<sup>-1</sup> em relação ao tratamento sem biochar.

O aumento nos teores do carbono orgânico do solo com a aplicação das doses do BT pode estar associado com a contribuição do carbono presente no biochar, enquanto que, o aumento significativo na capacidade de troca catiônica do solo pode estar relacionado aos grupos funcionais carregados negativamente na superfície do biochar (Karimi et al. 2020; Veloso et al. 2022). Com relação aos teores de P disponível no solo, a maior disponibilidade em resposta a doses do BT pode estar associada (i) ao efeito do pH sobre as reações de adsorção/dessorção dos íons fosfato e/ou (co)precipitação/dissolução de minerais fosfatados (Bornø et al. 2018); (ii) ao aporte de P oriundo do próprio biochar; (iii) a competição entre os grupamentos das substâncias e/ou o C lábil com os íons fosfato nos sítios de troca dos colóides do solo (Schneider e Haderlein 2016); (iv) a maior atividade da comunidade microbiana que é responsável pela solubilização e mineralização de fosfatos no solo (Zhou et al. 2020).

#### 4.3. Efeitos da aplicação de biochar de torta de filtro sobre o crescimento das espécies *C. citriodora* e *E. urophylla* × *E. grandis*

Não houve efeito significativo ( $p > 0,05$ ) da interação (espécie × biochar) para as variáveis de crescimento, exceto para a produção de biomassa seca da parte aérea. Para a altura, o diâmetro do coleto e a biomassa seca das raízes, os resultados da espécie *Eucalyptus sp.* foram significativamente maiores do que os verificados para a *C. citriodora*. As diferenças foram de 11,0; 39,4; e 188,3%, respectivamente, em relação às duas espécies (Fig 2A, 2B e 2C). Com relação aos efeitos da aplicação do biochar, a dose de 5% BT aumentou a altura média das plantas de 54,5 para 88,3 cm (+62,1%), o diâmetro do coleto de 5,2 para 7,1 mm (+36,5%) e a biomassa das raízes de 1,7 para 3,3 g (+92,4%) quando comparado com o tratamento sem adição de biochar. Para a biomassa da parte aérea das plantas, o *Eucalyptus sp.* crescido no solo tratado com 5% BT foi o que apresentou a maior produção de biomassa dos tecidos da parte aérea (37,3 g), este resultado foi significativamente superior aos verificados nos outros tratamentos (Fig 2C). Outro resultado interessante, ainda com relação à biomassa da parte aérea, foi a comparação entre as duas espécies no tratamento sem adição de biochar, onde o teor do Cd era alto (aproximadamente  $4,0 \text{ mg kg}^{-1} \text{ Cd}$ ) e tóxico para as plantas; mas o *Eucalyptus sp.* teve uma produção de biomassa 3,6 vezes maior do que o verificado para o *C. citriodora*; o índice de tolerância [IT(%) = (biomassa parte aérea<sub>sem-biochar</sub>/biomassa parte aérea<sub>com-biochar</sub>)×100] ao estresse causado pela toxidez do Cd foi calculado para ambas as espécies. Os valores médios para o IT foram  $29,4 \pm 2,1$  e  $71,3 \pm 2,5\%$  para a *C. citriodora* e *Eucalyptus sp.*, respectivamente; estes resultados indicam que o *Eucalyptus sp.* possui uma tolerância a toxidez por cádmio maior do que a *C. citriodora*.



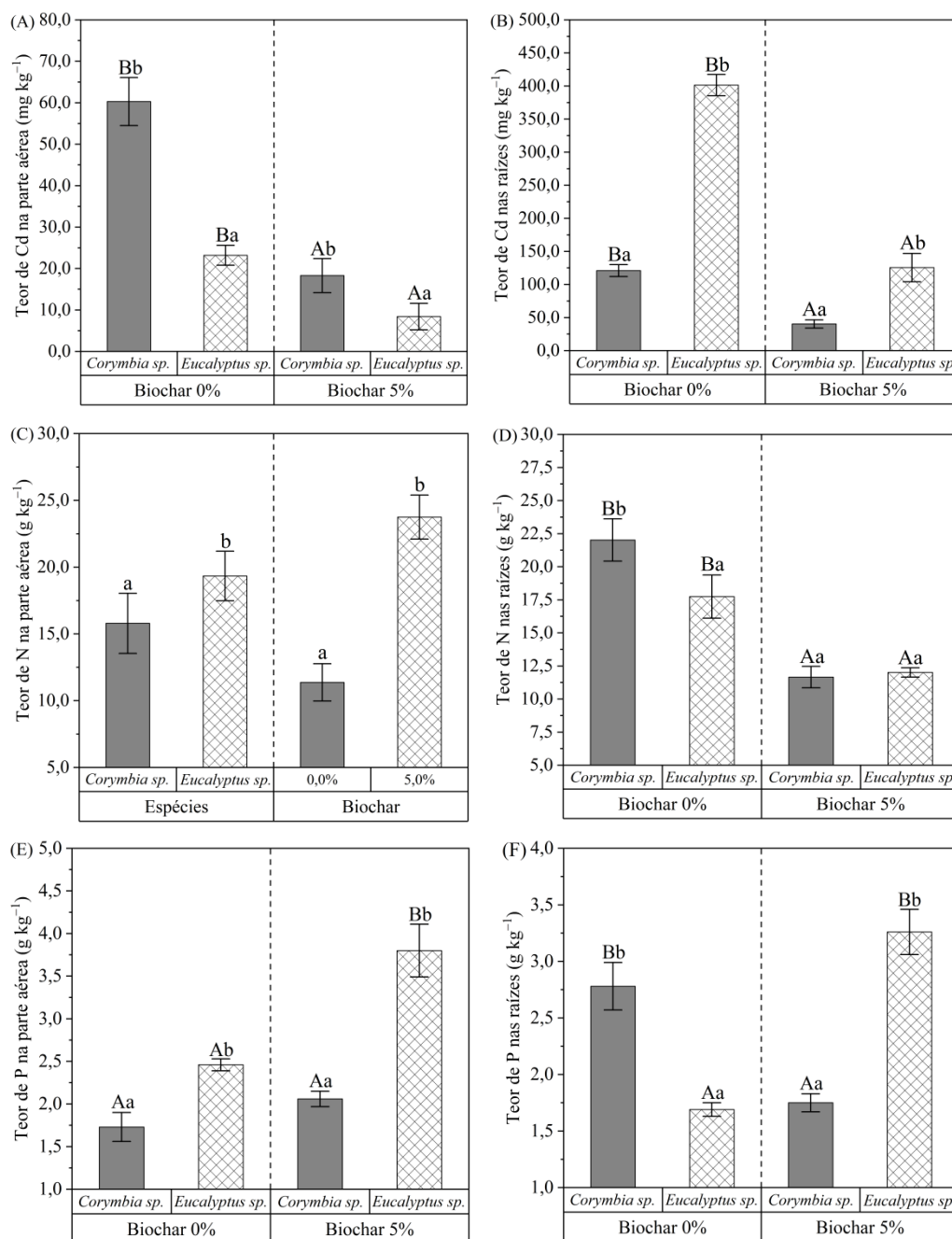
**Fig 2.** Valores médios ( $\pm$ desvio padrão) dos parâmetros de crescimento (altura e diâmetro do coleto, A e B, respectivamente) e da produção de biomassa seca da parte aérea (C) e das raízes (D) de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* que foram cultivadas por 65 dias em um solo poluído por Cd, com e sem a aplicação de biochar de torta de filtro. Valores médios seguidos pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As letras minúsculas comparam os valores médios entre os níveis de um mesmo fator (e.g. altura das plantas com e sem a aplicação de biochar); enquanto que, as letras maiúsculas comparam os valores médios da mesma espécie com e sem a aplicação do biochar, quando a interação (espécies × biochar) foi significativa pela ANOVA ( $p < 0,05$ ).

O maior crescimento das plantas nos solos tratados com biochar possivelmente está relacionado a redução na fitodisponibilidade do Cd (Fig 1) e a melhoria na fertilidade do solo, principalmente, devido ao aumento da disponibilidade dos nutrientes para as plantas (e.g. do P, Ca e Mg) (tabela 3). Estudos avaliando o crescimento de espécies florestais sob condições de estresse por cádmio e com a adição de biochar são escassos (Guo et al., 2017; Yousaf et al., 2019; Mohebzadeh et al., 2021); Yousaf et al. (2019) verificaram que a aplicação de 6% de um biochar de esterco no solo contaminado com uma solução de Cd de  $25 \text{ mg L}^{-1}$  promoveu um incremento de 40,0% no crescimento das mudas de *Albizia lebbek* em relação ao controle. Outros trabalhos, com espécies não florestais, também verificaram resultados similares, tal como o estudo

realizado por Abbas et al. (2017). Os autores verificaram que as plantas de trigo (*Triticum aestivum* L.) cultivadas em um solo contaminado por cádmio tiveram incrementos significativos na sua altura quando o solo foi adubado com doses de biochar; foi também verificado que no tratamento com 5,0% de biochar de palha de arroz, as biomassas das partes aérea, raízes e grãos aumentaram 180,0; 92,0; e 110,6%, respectivamente, em relação ao tratamento controle. Outros trabalhos, como o de Puga et al. (2015) e o de Veloso et al. (2022) também verificaram aumento significativo nas biomassas das plantas de feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), *Mucuna aterrima* e milho (*Zea mays*) com a aplicação de biochars do bagaço da cana-de-açúcar e da palha de arroz em solos poluídos por cádmio.

#### 4.4. Teores de cádmio e nutrientes nas plantas

O maior crescimento e produção de biomassa das plantas nos solos tratados com biochar pode ser justificado pelo menor acúmulo de cádmio nos tecidos vegetais e uma melhoria no status nutricional das plantas, como apresentados na figura 3. Os teores de Cd na parte aérea e nas raízes dos eucaliptos foram significativamente mais baixos nos tratamentos com o BT, e isto, possivelmente, está relacionado aos mecanismos de imobilização do metal no solo, induzidos pelo biochar (Fig 1). O acúmulo de Cd foi muito maior nas raízes do que na parte aérea das plantas, principalmente na espécie *Eucalyptus sp.* (em média 401,4 mg kg<sup>-1</sup> Cd), demonstrando o potencial desta espécie em ser uma fitoestabilizadora da poluição do solo por cádmio. Com a aplicação de 5% BT, os teores de Cd na parte aérea reduziram de 60,3 para 18,3 (-69,7%) mg kg<sup>-1</sup> e de 23,2 para 8,4 (-63,8%) mg kg<sup>-1</sup> nas espécies *C. citriodora* e *Eucalyptus sp.*, respectivamente, quando comparadas ao tratamento sem biochar (Fig 3A). Nas raízes, as reduções dos teores de Cd foram de 66,7 e 68,7%, respectivamente (Fig 3B).



**Fig 3.** Teores médios ( $\pm$ desvio padrão) de cádmio (A e B), de nitrogênio (C e D) e de fósforo (E e F) na parte aérea e nas raízes de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla*  $\times$  *Eucalyptus grandis* que foram cultivadas por 65 dias em um solo poluído por Cd, com e sem a aplicação de biochar de torta de filtro. Valores médios seguidos pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As letras minúsculas comparam os valores médios entre os níveis de um mesmo fator; enquanto que, as letras maiúsculas comparam os valores médios da mesma espécie com e sem a aplicação do biochar, quando a interação (espécies  $\times$  biochar) foi significativa pela ANOVA ( $p < 0,05$ ).



A redução no acúmulo de Cd nos diferentes tecidos das plantas cultivadas em solos contaminados e tratados com biochar também tem sido registrada em outros estudos (Puga et al., 2015; Abbas et al., 2017; Veloso et al., 2022). As menores concentrações de Cd nas espécies de eucalipto podem ser justificadas pelas ações diretas e indiretas da adição do biochar na imobilização de Cd no solo, o que resultou na redução da disponibilidade do metal (Fig 1A). Além disso, o aumento no crescimento vegetal observado nos tratamentos com biochar (Fig 2) pode ter promovido a diluição do metal na biomassa vegetal.

Não houve efeito significativo da interação para os teores de nitrogênio na parte aérea das plantas. O valor médio de N no *Eucalyptus sp.* ( $19,3 \text{ g kg}^{-1}$ ) foi significativamente maior do que o verificado na *C. citriodora* ( $15,8 \text{ g kg}^{-1}$ ); enquanto que as plantas cultivadas nos solos tratados com 5% BT tiveram teores de N duas vezes maior do que o tratamento sem biochar (Fig 3C). Nas raízes, os teores de N foram maiores nas plantas do tratamento controle (Fig 3D); isto pode estar relacionado à menor translocação do N das raízes para a parte aérea das plantas nos solos sem biochar e/ou a um efeito de diluição no tratamento com 5% BT, tendo em vista que, a biomassa das raízes nessas plantas foi duas vezes maior do que o tratamento controle (Fig 2D). Comportamento similar também foi verificado para os teores de P nas raízes de *C. citriodora*. Por outro lado, no *Eucalyptus sp.* com a aplicação de 5% BT, o P nas raízes teve um incremento de  $1,6 \text{ g kg}^{-1}$  (+92,9%) (Fig 3F). Com relação ao P nos tecidos da parte aérea, o *Eucalyptus sp.* combinado com 5% BT foi o tratamento com o maior teor médio ( $3,8 \text{ g kg}^{-1}$  P) e diferiu estatisticamente dos demais tratamentos (Fig 3E).

O aumento na absorção de P pelas plantas de eucaliptos pode ser justificado tanto seu pelo fornecimento a partir da aplicação de biochar como pela redução na sorção de P no solo, promovendo um aumento significativo na disponibilidade deste nutriente para as plantas (tabela 3). Para o nitrogênio, o biochar de torta de filtro não é considerado uma fonte significativa para as plantas, pois a matéria prima possui baixos teores de N, além do fato do N orgânico no biochar ser recalcitrante (Xie et al., 2013). Contudo, estudos demonstraram que a adubação com biochar pode reduzir a perda de N gasoso (e.g. via desnitrificação e volatilização de amônia) (Igalavithana et al. 2016; Horák et al., 2017), aumentar a mineralização do N orgânico do solo (Singh & Cowie, 2014) e aumentar a absorção de N pela planta (Liu et al., 2018).

#### 4.5. Efeitos da adubação com biochar de torta de filtro sobre a fisiologia das espécies de eucaliptos cultivadas no solo poluído por cádmio

Resultados significativos e positivos da interação foram verificados para o potencial hídrico e os teores da clorofila b e carotenóides (tabela 4). O tratamento com 5% BT reduziu os potenciais hídricos das plantas de  $-1,3$  para  $-0,2$  MPa e de  $-1,5$  para  $-0,67$  MPa (nas espécies *C. citriodora* e *Eucalyptus sp.*, respectivamente); estes resultados são indicadores de que as plantas crescidas nos solos tratados com biochar apresentaram um nível de estresse inferior aquelas no tratamento controle, um vez que, plantas sob estresse tendem a reduzir significativamente a transpiração e as trocas gasosas com o meio externo, e por isso a tensão interna na planta tende a ser maior. Os teores da clorofila b aumentaram nas plantas em resposta a adubação com 5% BT, os incrementos foram de 176,4% para *C. citriodora* e de 117,6% para *Eucalyptus sp.*; os teores dos carotenóides tiveram a mesma tendência na *C. citriodora*, porém houve uma redução deste pigmento no *Eucalyptus sp.* combinado com a aplicação de biochar. Os teores de clorofila indicam uma melhor assimilação de nitrogênio, por representarem a quantidade de N presente nas folhas (Silva et al., 2020). A melhoria nos parâmetros fisiológicos das plantas cultivadas nos solos tratados com BT, provavelmente, está relacionada ao menor acúmulo do metal nos tecidos da parte aérea da planta e maior absorção e translocação dos nutrientes (Fig 3).

**Tabela 4.** Valores médios ( $\pm$ desvio padrão) dos parâmetros fisiológicos de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla*  $\times$  *Eucalyptus grandis* cultivadas por 65 dias em um solo poluído por Cd e tratado com biochar de torta de filtro

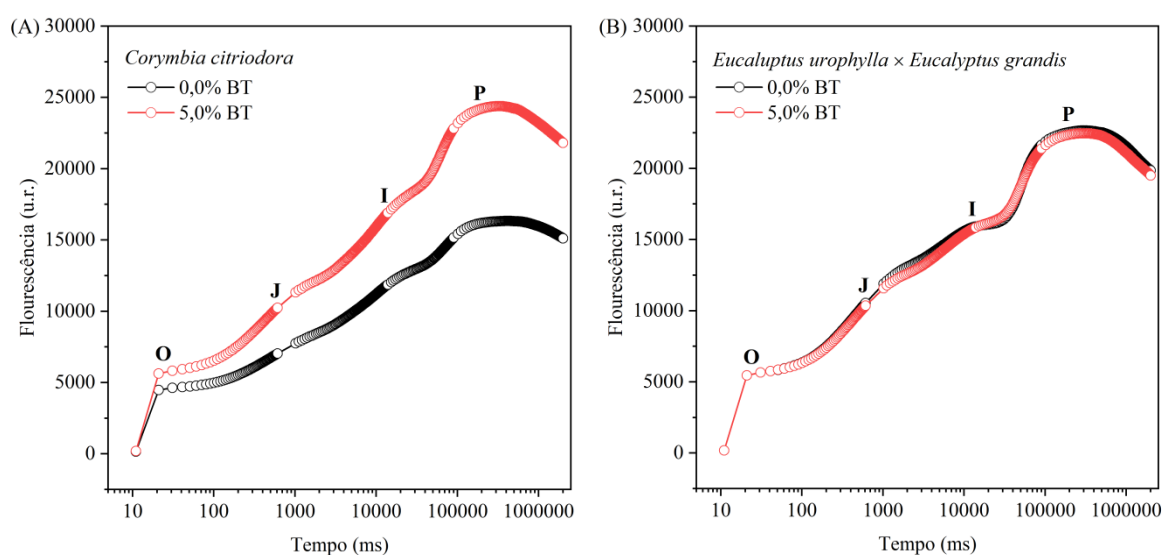
	Potencial hídrico (MPa)			Eficiência fotossintética (Fv/Fm) (adimensional)		
	0,0% BT	5,0% BT	Média ( $\pm$ DP)	0,0% BT	5,0% BT	Média ( $\pm$ DP)
<i>Corymbia sp.</i>	$-1,31 \pm 0,07$ aB	$-0,24 \pm 0,06$ aA	$-0,78 \pm 0,75$ a	$0,67 \pm 0,02$ ns	$0,92 \pm 0,02$ ns	$0,79 \pm 0,18$ ns
<i>Eucalyptus sp.</i>	$-1,50 \pm 0,05$ bB	$-0,67 \pm 0,05$ bA	$-1,08 \pm 0,59$ b	$0,65 \pm 0,02$ ns	$0,87 \pm 0,02$ ns	$0,76 \pm 0,15$ ns
Média ( $\pm$ DP)	$-1,40 \pm 0,14$ A	$-0,46 \pm 0,30$ B		$0,66 \pm 0,01$ A	$0,89 \pm 0,04$ B	
	Clorofila a ( $\mu\text{g mL}^{-1}$ )			Clorofila b ( $\mu\text{g mL}^{-1}$ )		
<i>Corymbia sp.</i>	$9,87 \pm 0,66$ ns	$31,53 \pm 2,38$ ns	$20,70 \pm 15,31$ a	$4,24 \pm 0,53$ aA	$11,72 \pm 1,18$ aB	$7,98 \pm 5,29$ a
<i>Eucalyptus sp.</i>	$22,49 \pm 5,92$ ns	$40,22 \pm 0,48$ ns	$31,36 \pm 12,54$ b	$13,78 \pm 0,58$ bA	$29,98 \pm 3,57$ bB	$21,88 \pm 11,45$ b
Média ( $\pm$ DP)	$16,18 \pm 8,92$ A	$35,87 \pm 6,15$ B		$9,01 \pm 6,75$ A	$20,85 \pm 12,91$ B	
	Clorofila total ( $\mu\text{g mL}^{-1}$ )			Carotenóides ( $\mu\text{g mL}^{-1}$ )		
<i>Corymbia sp.</i>	$14,11 \pm 0,97$ ns	$43,24 \pm 3,53$ ns	$26,68 \pm 20,60$ a	$3,55 \pm 0,92$ aA	$6,56 \pm 0,59$ bB	$5,06 \pm 2,13$ ns
<i>Eucalyptus sp.</i>	$36,28 \pm 5,79$ ns	$70,20 \pm 3,10$ ns	$53,24 \pm 23,99$ b	$8,19 \pm 1,61$ bB	$2,74 \pm 0,51$ aA	$5,47 \pm 3,85$ ns
Média ( $\pm$ DP)	$25,19 \pm 15,67$ A	$56,72 \pm 19,06$ B		$5,87 \pm 3,28$ B	$4,65 \pm 2,70$ A	

BT biochar de torta de filtro; DP desvio padrão; ns não significativo pela ANOVA ( $p < 0,05$ ). Fv/Fm relação entre a fluorescência variável e a máxima. Valores médios seguidos pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Letras minúsculas comparam os valores nas colunas, enquanto que, as letras maiúsculas comparam os valores nas linhas.

Os teores da clorofila a e total aumentaram em média 121,7 e 125,2% com a aplicação de 5% BT em relação ao tratamento sem biochar; e a espécie *Eucalyptus sp.*

teve os maiores valores. Resultados similares foram obtidos por Abbas et al. (2017), que verificaram que os teores de clorofila a e b aumentaram significativamente 200,0 e 158,3%, respectivamente, nas plantas de trigo com a aplicação de 5,0% de biochar em relação ao controle. Adicionalmente, também foram verificadas melhorias nos parâmetros de trocas gasosas da planta (e.g. condutância estomática, taxa fotossintética, taxa de transpiração e eficiência no uso da água) com a adição do biochar no solo poluído por cádmio.

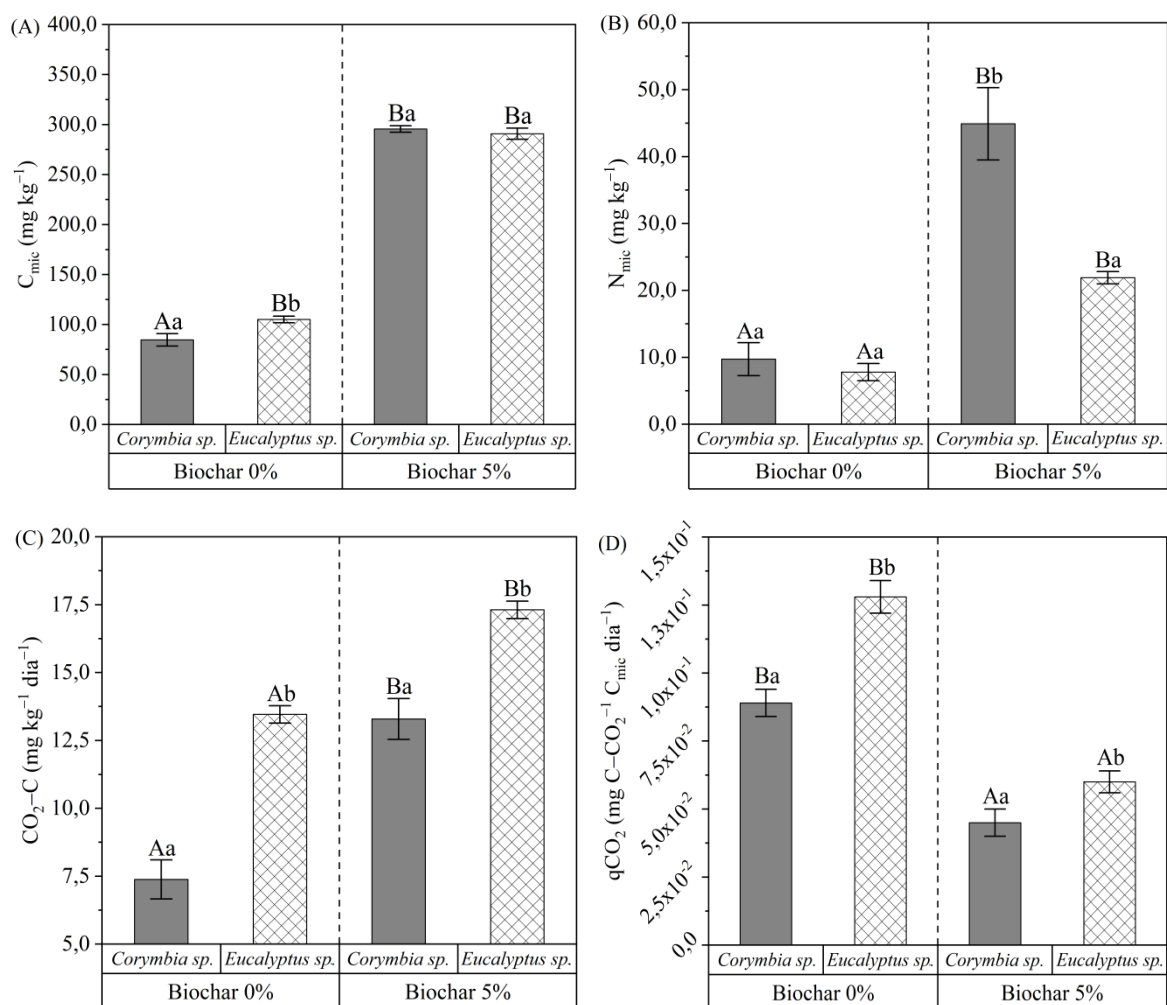
O aumento nos teores dos pigmentos fotossintéticos pode promover incrementos no rendimento do fotossistema II e, com isso aumentar o crescimento e a atividade metabólica da planta. A relação entre a fluorescência variável e máxima ( $F_v/F_m$ ) é um indicador da eficiência fotossintética da planta; neste estudo foi verificado que o tratamento com 5% BT aumentou a eficiência fotossintética de 0,66 para 0,89 (+34,8%). Este efeito positivo da adubação com biochar foi nitidamente verificado pela análise dos transientes da fluorescência da clorofila *a*, principalmente para a espécie *C. citriodora* (Fig 4). Com a aplicação de 5% BT, os valores da intensidade da fluorescência foram significativamente maiores em relação ao tratamento sem biochar, indicando um menor estresse na atividade fotossintética. Para o *Eucalyptus sp.*, a intensidade da fluorescência não diferiu entre os tratamentos com e sem biochar. Este resultado corrobora, juntamente com o maior crescimento no solo sem biochar (Fig 2), que esta espécie possui um mecanismo de tolerância a toxidez por Cd superior ao da *C. citriodora*.



**Fig 4.** Transientes da fluorescência da clorofila *a* de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* que foram cultivadas por 65 dias em um solo poluído por Cd, com e sem a aplicação de biochar de torta de filtro. BT biochar de torta de filtro. Representação em escala logarítmica.

#### 4.6. Avaliação da qualidade do solo por meio de indicadores microbiológicos

Vários estudos têm utilizado variáveis microbiológicas para inferir sobre a qualidade ambiental de solos contaminados por metais pesados (Li et al., 2017; Tang et al., 2019; Li et al., 2020). Neste estudo, o cultivo de ambas as espécies associadas com a aplicação de 5% BT aumentou significativamente os teores do C-microbiano do solo (em média 217,3%) em relação ao tratamento sem biochar (Fig 5A). Comportamento similar também foi verificado para os resultados do N da biomassa microbiana (Fig 5B); os teores de  $N_{mic}$  aumentaram de 9,7 para 44,9 (+362,9%) e de 7,79 para 21,9 (+181,1%)  $mg\ kg^{-1}$  nas espécies *C. citriodora* e *Eucalyptus sp.*, respectivamente, com a aplicação do biochar. Estes resultados ( $C_{mic}$  e  $N_{mic}$ ) são indicadores de que o cultivo de ambas as espécies de eucaliptos no solo poluído por Cd e adubado com BT promoveu o crescimento da biomassa microbiana do solo; e isto possivelmente está associado com as melhores condições do solo para o crescimento da microbiota, por meio da imobilização e remoção do metal do solo, exsudação de compostos orgânicos e nutrientes essenciais aos organismos do solo.



**Fig 5.** Valores médios ( $\pm$  desvio padrão) do carbono microbiano ( $C_{mic}$ ) (A), do nitrogênio microbiano ( $N_{mic}$ ) (B), da respiração basal da microbiota ( $CO_2-C$ ) (C) e do quociente metabólico ( $qCO_2$ ) de um solo poluído por cádmio e cultivado com *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla*  $\times$  *Eucalyptus grandis* por 65 dias, com e sem a aplicação de biochar de torta de filtro. Valores médios seguidos pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As letras minúsculas comparam os valores médios entre os níveis de um mesmo fator; enquanto que, as letras maiúsculas comparam os valores médios da mesma espécie com e sem a aplicação do biochar, quando a interação (espécies  $\times$  biochar) foi significativa pela ANOVA ( $p < 0,05$ ).

Como consequência do aumento da biomassa microbiana, os resultados da respiração basal também aumentaram nos tratamentos com 5% BT, porém no tratamento com *Eucalyptus sp.* sem biochar o valor médio do  $CO_2-C$  ( $13,5 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) foi alto em relação ao solo cultivado com *C. citriodora* ( $7,4 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ); isto pode ser um indicativo de maior estresse da população microbiana do solo (Fig 5C). Houve efeito significativo ( $p < 0,05$ ) da adubação com biochar e o cultivo das espécies de eucaliptos sobre o quociente metabólico ( $qCO_2$ ). As plantas cultivadas nos solos tratados com biochar tiveram os menores resultados e, conseqüentemente, indicaram um menor estresse abiótico pela poluição do solo por cádmio (Fig 5D).

## 5 CONCLUSÃO

A adubação com biochar de torta de filtro se mostrou eficiente em imobilizar o cádmio no solo. Além das possíveis ações diretas e indiretas de sorção do Cd pelos mecanismos de adsorção física, troca iônica, adsorção específica e complexação, o biochar promoveu a redistribuição do Cd no solo das frações mais lábeis para as formas mais recalcitrantes, reduzindo assim a sua mobilidade e disponibilidade para as plantas.

A dose de 5,0% *m/m* do biochar de torta de filtro foi considerada ideal para a proposta de fitoatenuação, pelo fato dela garantir um teor de Cd disponível no solo inferior ao limite de fitotoxicidade, melhorar os parâmetros da fertilidade do solo e por representar uma dose de biochar economicamente viável para o uso agrícola em um solo poluído por Cd, de textura franco argiloso arenosa.

As plantas de *Corymbia citriodora* e do híbrido *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* apresentaram menor acúmulo de Cd nos tecidos das plantas, o que promoveu um melhor status nutricional por N e P; somado a um maior crescimento e produção de biomassa. A aplicação do biochar também promoveu um menor estresse fisiológico às plantas. O híbrido *E. urophylla* × *E. grandis* mostrou ser mais tolerante à toxicidade do Cd do que a *Corymbia citriodora*. Além dos benefícios proporcionados ao crescimento e desenvolvimento das plantas, a adubação com biochar de torta de filtro em cultivo de espécies de eucaliptos melhorou a qualidade do solo poluído por Cd, com base nos indicadores microbiológicos (aumento na biomassa microbiana e menor quociente metabólico). Desta forma, o uso da *E. urophylla* × *E. grandis* associado ao manejo com 5% do biochar de torta de filtro pode ser considerada uma fitotecnologia mais eficaz que *Corymbia citriodora* com o mesmo tratamento, sendo capaz de fitoatenuar solos poluídos por cádmio.

## REFERÊNCIAS

- ABBAS, T., RIZWAN, M., ALI, S., REHMAN, M.Z., QAVVUM, M.F., ABBAS, F., HANNAN, F., RINKLEBE, J., OK, Y.S., 2017. Effect of biochar on cadmium bioavailability and uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in a soil with aged contamination. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 140, 37 e 47., 2017.
- ABRAF, Anuário Estatístico da ABRAF. Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas.
- ADIMALLA, N.; CHEN, J.; QIAN, H. Spatial characteristics of heavy metal contamination and potential human health risk assessment of urban soils: A case study from an urban region of South India. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 194, p. 110406, 2020.
- AGEGNEHU, G.; SRIVASTAVA, A. K.; BIRD, M. I. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. **Applied soil ecology**, v. 119, p. 156-170, 2017.
- ALI, H.; KHAN, E.; ILAHI, I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. **Journal of chemistry**, v. 2019, 2019.
- ALMEIDA JÚNIOR, Agenor B. de et al. Fertilidade do solo e absorção de nutrientes em cana-de-açúcar fertilizada com torta de filtro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 1004-1013, 2011.
- Ashizawa, A., Faroon, O., Ingerman, L., Jenkins, K., Tucker, P., & Wright, S. (2012). **Toxicological profile for cadmium**. Tech. Rep., 2013.
- BASHIR, S et al. Comparative efficiency of rice husk-derived biochar (RHB) and steel slag (SS) on cadmium (Cd) mobility and its uptake by Chinese cabbage in highly contaminated soil. **International journal of phytoremediation**, v. 20, n. 12, p. 1221-1228, 2018.
- BERNARDI, M. R. et al. Crescimento de mudas de *Corymbia citriodora* em função do uso de hidrogel e adubação. **Cerne**, v. 18, p. 67-74, 2012.

- BRAWNER, Jeremy T. et al. Selection of *Corymbia citriodora* for pulp productivity. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 74, n. 2, p. 121-131, 2012.
- BRIFFA, J.; SINAGRA, E.; BLUNDELL, R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. **Heliyon**, v. 6, n. 9, p. e04691, 2020.
- CAI, Y., ZHANG, S., CAI, K., HUANG, F., PAN, B., & WANG, W. Cd accumulation, biomass and yield of rice are varied with silicon application at different growth phases under high concentration cadmium-contaminated soil. **Chemosphere**, 242, 125128. 2020.
- CARMONA, Iara Nobre et al. Caracterização energética do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis* plantados no oeste do Pará. **Revista Agroecossistemas**, v. 11, n. 2, p. 57-65, 2020.
- CHENG, S. F., HUANG, C. Y., LIN, S. C., CHEN, K. L., & LIN, Y. C. Feasibility of using peanut (*Arachis hypogaea* L.) for phytoattenuation on lead-contaminated agricultural land—an in situ study. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 202, p. 25-30, 2015.
- CONAMA (2009) Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 420, de 30 de dezembro de 2009. **“Dispõe sobre critérios e valores para orientadores de qualidade do solo quanto a presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental.** Republica Federativa do Brasil.
- CUI, Liqiang et al. Continuous immobilization of cadmium and lead in biochar amended contaminated paddy soil: a five-year field experiment. **Ecological engineering**, v. 93, p. 1-8, 2016.
- DADALTO, Juliana P. et al. Sistema de preparo do solo e sua influência na atividade microbiana. **Engenharia Agrícola**, v. 35, p. 506-513, 2015.
- DIATTA, André Amakobo et al. Effects of biochar on soil fertility and crop productivity in arid regions: a review. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 13, n. 14, p. 1-17, 2020.
- DING, Kengbo et al. Ecosystem services provided by heavy metal-contaminated soils in China. **Journal of soils and sediments**, v. 18, n. 2, p. 380-390, 2018.



- DONG, Qiyu et al. Silicon amendment reduces soil Cd availability and Cd uptake of two Pennisetum species. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 9, p. 1624, 2019.
- EL-NAGGAR, Ali et al. Biochar application to low fertility soils: A review of current status, and future prospects. **Geoderma**, v. 337, p. 536-554, 2019.
- FRANÇA, Solange Maria de et al. Toxicity and repellency of essential oils to *Zabrotes subfasciatus* (Boheman) (Coleoptera, Chrysomelidae, Bruchinae) in *Phaseolus vulgaris* L. **Acta Amazonica**, v. 42, p. 381-386, 2012.
- GONTIJO, D. de O. **Silvicultura do Eucalipto: Principais espécies cultivadas no Brasil e suas Características**. 2018. 50 f. MBA em Manejo Florestal de precisão - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- HE, Huaidong et al. Growth and Cd uptake by rice (*Oryza sativa*) in acidic and Cd-contaminated paddy soils amended with steel slag. **Chemosphere**, v. 189, p. 247-254, 2017.
- HORÁK, Ján et al. Biochar and biochar with N-fertilizer affect soil N<sub>2</sub>O emission in Haplic Luvisol. **Biologia**, v. 72, n. 9, p. 995-1001, 2017.
- HUSSEIN, H. S.; SALEM, M. ZM; SOLIMAN, A. M. Repellent, attractive, and insecticidal effects of essential oils from *Schinus terebinthifolius* fruits and *Corymbia citriodora* leaves on two whitefly species, *Bemisia tabaci*, and *Trialeurodes ricini*. **Scientia Horticulturae**, v. 216, p. 111-119, 2017.
- IGALAVITHANA, Avanthi Deshani et al. The effects of biochar amendment on soil fertility. **Agricultural and environmental applications of biochar: Advances and barriers**, v. 63, p. 123-144, 2016.
- Ji, Xionghui et al. Effect of silicon fertilizers on cadmium in rice (*Oryza sativa*) tissue at tillering stage. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 11, p. 10740-10748, 2017.
- LI, Baojie et al. Quantifying and mapping threats to soil biodiversity in Nanjing, China. **European Journal of Soil Biology**, v. 82, p. 72-80, 2017.

LI, Xiaoqi et al. Response of soil microbial communities and microbial interactions to long-term heavy metal contamination. **Environmental Pollution**, v. 231, p. 908-917, 2017.

LI, Changchao et al. Effects of heavy metals on microbial communities in sediments and establishment of bioindicators based on microbial taxa and function for environmental monitoring and management. **Science of the Total Environment**, v. 749, p. 141555, 2020.

LICHTENTHALER, Hartmut K.; BUSCHMANN, Claus. Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. **Current protocols in food analytical chemistry**, v. 1, n. 1, p. F4. 3.1-F4. 3.8, 2001.

LIMA, Pedro Augusto Fonseca et al. Qualidade da madeira de eucalipto para aplicação como mourão tratado. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 2, p. 509-519, 2019.

LIMA VELOSO, Venâncio et al. Phytoattenuation of Cd, Pb, and Zn in a Slag-contaminated Soil Amended with Rice Straw Biochar and Grown with Energy Maize. **Environmental Management**, v. 69, n. 1, p. 196-212, 2022.

LIU, Qi et al. How does biochar influence soil N cycle? A meta-analysis. **Plant and soil**, v. 426, n. 1, p. 211-225, 2018.

LIU, Shuming et al. Prospect of phytoremediation combined with other approaches for remediation of heavy metal-polluted soils. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 14, p. 16069-16085, 2020.

LU, H. et al. Effect of biochar in cadmium availability and soil biological activity in an anthrosol following acid rain deposition and aging. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 226, n. 5, p. 1-11, 2015.

LU, Kouping et al. Effect of bamboo and rice straw biochars on the mobility and redistribution of heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) in contaminated soil. **Journal of environmental management**, v. 186, p. 285-292, 2017.

MAGALHÃES, Marcio Osvaldo Lima et al. **Avaliação do potencial de espécies de eucalipto na remediação de áreas contaminadas com metais pesados**. 2008. 58 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

MENG, Jun et al. Changes in heavy metal bioavailability and speciation from a Pb-Zn mining soil amended with biochars from co-pyrolysis of rice straw and swine manure. **Science of the Total Environment**, v. 633, p. 300-307, 2018.

NOBAHARAN, Khatereh et al. Effects of biochar dose on cadmium accumulation in spinach and its fractionation in a calcareous soil. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 15, n. 4, p. 1-14, 2022.

PERLEIN, Alexandre et al. The Use of Sorghum in a Phytoattenuation Strategy: A Field Experiment on a TE-Contaminated Site. **Applied Sciences**, v. 11, n. 8, p. 3471, 2021.

PUGA, A. P. et al. Cadmium, lead, and zinc mobility and plant uptake in a mine soil amended with sugarcane straw biochar. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 22, p. 17606-17614, 2015.

REIS, Cristiane Aparecida Fioravante et al. *Corymbia citriodora*: estado da arte de pesquisas no Brasil. **Embrapa Floresta**, 2013. 57 f.

ROSSI, Ticiane. **Estudo do potencial de uso do resíduo efluente gerado da destilação do óleo de folhas de eucalipto (*Corymbia citriodora* (Hook) Pryor e Johnson 1976), como corante natural para o tingimento têxtil de algodão. 2009.** Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz. Piracicaba.

SOARES, Cláudio Roberto Fonsêca Sousa et al. Fitotoxidez de cádmio para *Eucalyptus maculata* e *E. urophylla* em solução nutritiva. **Revista Árvore**, v. 29, p. 175-183, 2005.

UR REHMAN, Muhammad Zia et al. Split application of silicon in cadmium (Cd) spiked alkaline soil plays a vital role in decreasing Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) grains. **Chemosphere**, v. 226, p. 454-462, 2019.

SILVA, Fernando Bruno Vieira et al. Assessing heavy metal sources in sugarcane Brazilian soils: an approach using multivariate analysis. **Environmental monitoring and assessment**, v. 188, n. 8, p. 1-12, 2016.

SILVA, William Ramos et al. The Stabilization Method of Sewage Sludge Affects Soil Microbial Attributes and Boosts Soil P Content and Maize Yield in a Sludge-Amended Soil in the Field. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, p. 1-10, 2022.

SINGH, Bhupinder Pal; COWIE, Annette L. Long-term influence of biochar on native organic carbon mineralisation in a low-carbon clayey soil. **Scientific reports**, v. 4, n. 1, p. 1-9, 2014.

SINGH, Balwant; CAMPS-ARBESTAIN, Marta; LEHMANN, Johannes (Ed.). **Biochar: a guide to analytical methods**. Csiro Publishing, 2017.

TANG, Jiayi et al. Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: A review on heavy metal pollution. **Journal of Environmental Management**, v. 242, p. 121-130, 2019.

TEPANOSYAN, Gevorg et al. Continuous impact of mining activities on soil heavy metals levels and human health. **Science of the Total Environment**, v. 639, p. 900-909, 2018.

TYTŁA, Malwina; WIDZIEWICZ, Kamila; ZIELEWICZ, Ewa. Heavy metals and its chemical speciation in sewage sludge at different stages of processing. **Environmental Technology**, v. 37, n. 7, p. 899-908, 2016.

USEPA. **Method 3050B: Acid digestion of sediments, sludges, soils**. Washington, DC, USA. 1996.

VITTI, Andrea M. Silveira; BRITO, José Otávio. Óleo essencial de eucalipto. **Documentos florestais**, v. 17, n. 3, p. 1-26, 2003.

WANG, Yue et al. Remediation of heavy-metal-contaminated soils by biochar: a review. **Environmental Geotechnics**, v. 9, n. 3, p. 135-148, 2019.

XIE, Zubin et al. Impact of biochar application on nitrogen nutrition of rice, greenhouse-gas emissions and soil organic carbon dynamics in two paddy soils of China. **Plant and soil**, v. 370, n. 1, p. 527-540, 2013.

YAN, An et al. Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 359, 2020.

YIN, Daixia et al. Varying effect of biochar on Cd, Pb and As mobility in a multi-metal contaminated paddy soil. **Chemosphere**, v. 152, p. 196-206, 2016.

ZHENG, Shunan et al. Human health risk assessment of heavy metals in soil and food crops in the Pearl River Delta urban agglomeration of China. **Food chemistry**, v. 316, p. 126213, 2020.