*XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*
*XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens*
*24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF*
**DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/70**

# Avaliação de Diferentes Melhoramentos no Desenvolvimento de *Zea mays* e nas Propriedades de um Solo Contaminado

Jacqueline Zanin Lima
Professora Doutora, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, Brasil, jacqueline.zanin.lima@usp.br

Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues
Professora Associada, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, Brasil, valguima@usp.br

RESUMO: Esta pesquisa avaliou os efeitos da adição de turfa, composto e biocarvão, na remediação de um solo contaminado em laboratório com cádmio (Cd), chumbo (Pb) e zinco (Zn). O experimento foi conduzido em vasos, utilizando o milho (*Zea mays* L.) como organismo-teste. Os resultados mostraram que o solo natural apresentou pH de 4,8, que diminuiu para 4,2 com a contaminação, mas os tratamentos com composto e biocarvão aumentaram o pH do solo. Quanto ao fracionamento químico, os melhoramentos alteraram a distribuição dos contaminantes entre as diferentes frações da extração sequencial, em comparação com o solo sem tratamento, embora os efeitos tenham variado de acordo com o material aplicado. O Pb apresentou maior associação à fração F2, o Zn se distribuiu predominantemente na fração F3, já o Cd concentrou-se na fração F1, considerada a mais biodisponível. Entre os materiais avaliados, o composto promoveu os maiores comprimentos para raiz e parte aérea do milho. Esses resultados evidenciam que a adição de turfa, composto e biocarvão em solos contaminados pode contribuir para a mitigação dos impactos ambientais e ecológicos. Recomenda-se, entretanto, a realização de estudos adicionais que avaliem os efeitos dos melhoramentos a longo prazo e em ensaios de campo, considerando diferentes tipos de solo e condições edafoclimáticas.

PALAVRAS-CHAVE: Biocarvão, Composto, Extração sequencial, Metais potencialmente tóxicos, Remediação, Turfa.

ABSTRACT: This study evaluated the effects of adding peat, compost, and biochar on the remediation of a soil artificially contaminated in the laboratory with cadmium (Cd), lead (Pb), and zinc (Zn). The experiment was conducted in pots, using maize (*Zea mays* L.) as the test organism. The results showed that the natural soil had a pH of 4.8, which decreased to 4.2 following contamination, but treatments with compost and biochar increased the soil pH. Regarding chemical fractionation, the amendments altered the distribution of contaminants among the different sequential extraction fractions compared to the untreated soil, although the effects varied depending on the material applied. Pb was primarily associated with fraction F2, Zn was predominantly distributed in fraction F3, while Cd concentrated in fraction F1, considered the most bioavailable. Among the materials evaluated, compost promoted the greatest root and shoot lengths of maize. These results indicate that the addition of peat, compost, and biochar to contaminated soils can contribute to mitigating environmental and ecological impacts. However, further studies are recommended to evaluate the long-term effects of these amendments under field conditions, considering different soil types and edaphoclimatic conditions.

KEYWORDS: Biochar, Compost, Sequential extraction, Potentially toxic metals, Remediation, Peat.

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento da população humana, aliado à intensificação da exploração dos recursos naturais e ao aumento na geração de resíduos, tem contribuído para um cenário de desafios sociais, econômicos e ecológicos. Nesse contexto, as Nações Unidas estabeleceram 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) a serem alcançados até 2030 como um "plano para um futuro melhor e mais sustentável para todos". A recuperação da qualidade do solo e da água, incluindo a remediação de áreas contaminadas, é uma prática necessária para o alcance dos ODS.

Os metais potencialmente tóxicos (MPTs) estão entre os contaminantes que representam sérias ameaças à biota e à saúde humana devido à sua não degradabilidade e toxicidade (Kabata-Pendias, 2010). Assim, ao atingirem os seres vivos, podem se bioacumular ou biomagnificar causando efeitos deletérios no metabolismo de diferentes níveis tróficos da cadeia alimentar. Podem inibir o crescimento dos vegetais, afetar adversamente os microrganismos, além de causar sérios problemas na saúde humana (Alloway, 2012).

Uma vez que esses contaminantes atingem o solo, este componente funciona como uma espécie de dreno e, ao mesmo tempo, de tampão natural, regulando a movimentação destes MPTs para a atmosfera, hidrosfera e biota (Kabata-Pendias, 2010). O comportamento dos metais nos solos é governado por reações competitivas de sorção e dessorção, em interfaces sólido-água dos minerais, matéria orgânica (Alloway, 2012) e microrganismos. O entendimento desses mecanismos de interação é crucial para se controlar e remediar efetivamente uma área contaminada.

Diante disso, diversas tecnologias, como o uso de agentes estabilizantes e sorventes derivados de resíduos orgânicos, oferecem métodos econômicos e ambientalmente amigáveis para reduzir a mobilidade dos MPTs. Contudo, devido à diversidade dos contaminantes e complexidade dos ambientes naturais, é necessário estudar novos materiais que sejam eficientes, ecologicamente corretos e, preferencialmente, de baixo custo. Os sorventes derivados de resíduos orgânicos têm demonstrado ser opções promissoras dentro dos princípios da economia circular, contribuindo para o descarte e o gerenciamento corretos de resíduos sólidos. No entanto, a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) tem recebido pouca atenção até o momento.

Nesse contexto, a presente pesquisa foi embasada na possibilidade de utilização de materiais reativos dotados de baixo custo (turfa e composto orgânico) e rápida obtenção (biocarvão) visando minimizar os impactos da contaminação em solos. Assim, foram avaliados os efeitos da adição desses melhoramentos na remediação de um solo contaminado em laboratório com cádmio (Cd), chumbo (Pb) e zinco (Zn), através de análises de extração sequencial e fitotoxicidade, utilizando o milho (*Zea mays* L.) como organismo-teste.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Solo e melhoramentos

As amostras de solo e turfa foram coletadas em locais não contaminados no município de Registro, Brasil. O composto e o biocarvão foram derivados da FORSU, coletada em restaurantes, incluindo resíduos frescos de cascas de ovos, frutas e vegetais, talos, sementes e caroços. A pilha de compostagem (~250 kg de resíduos triturados) permaneceu ao ar livre por 4 meses, sujeita, portanto, à incidência de radiação solar, vento e precipitação. O biocarvão foi obtido por pirólise (SP Pesquisa e Tecnologia, Brasil), com taxa de aquecimento de 10 °C $min^{-1}$ durante os primeiros 30 min e 20°C $min^{-1}$ até a temperatura alvo (500°C). Durante o processo, nitrogênio puro foi introduzido continuamente (1 L $min^{-1}$) para garantir um ambiente livre de oxigênio. Todas as amostras foram homogeneizadas, peneiradas (2,00 mm) e armazenadas em sacos de polipropileno. As propriedades físicas e químicas dos melhoramentos foram relatadas anteriormente (Lima et al., 2022a, 2022b) e as principais informações estão mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades físicas e química da turfa, composto e biocarvão.

| Propriedade | Turfa (T) | Composto (C) | Biocarvão (B) |
|---|---|---|---|
| pH ($H_2O$) | 4,2 ± 0.0 | 8,6 ± 0,1 | 10,6 ± 0,0 |
| $pH_{PCZ}$ | 4,0 ± 0,0 | 7,1 ± 0,0 | 8,1 ± 0,0 |
| Eh (mV) | + 211,3 ± 2,6 | + 31,4 ± 8,2 | - 139,0 ± 7,3 |
| CE (mS $cm^{-1}$) | 0,087 ± 0,004 | 4,253 ± 0,115 | 13,488 ± 0,227 |
| CTC ($cmol_c$ $kg^{-1}$) | 80,0 ± 8,5 | 92,0 ± 9,9 | 59,50 ± 0,71 |
| ASE ($m^2$ $g^{-1}$) | 5,68 | 51,97 | 42,31 |
| Cd (mg $kg^{-1}$) | < LQ | < LQ | < LQ |
| Pb (mg $kg^{-1}$) | 11,54 ± 0,54 | 1,93 ± 0,77 | 1,35 ± 0,20 |
| Zn (mg $kg^{-1}$) | 13,83 ± 0,42 | 134,75 ± 0,97 | 169,06 ± 8,87 |

Média ± desvio padrão (n = 3). PCZ: ponto de carga zero. Eh: potencial de oxido-redução. CE: condutividade elétrica. CTC: capacidade de troca catiônica. ASE: área superficial específica. LQ: limite de quantificação (mg $kg^{-1}$), sendo Cd (0,3), Pb (0,2) e Zn (2,0).

## 2.2 Experimento em vasos

O experimento em vasos foi conduzido com 100 g de solo contaminado em laboratório simultaneamente com três MPTs: Cd, Pb e Zn (100 mg $kg^{-1}$) e enriquecido com turfa, composto ou biocarvão em três diferentes taxas de adição (1%, 5% e 10%, m/m). As amostras foram identificadas pela primeira letra do tipo de melhoramento e pela taxa de adição. Por exemplo, "T5%" indica a amostra com 5% de turfa. Dois tratamentos controle foram incluídos: (i) solo não contaminado e não melhorado, identificado como "Solo", e (ii) solo contaminado e não melhorado, identificado como "Solo+M", onde M representa os metais, ou seja, Cd+Pb+Zn. O teor de umidade foi mantido em cerca de 70% da capacidade de campo, com a adição de água Milli-Q. O conteúdo dos vasos foi homogeneizado mensalmente e o ensaio teve duração de 8 meses. As coletas foram realizadas no início, na metade e ao final do experimento, sendo as amostras utilizadas para a determinação do pH, do teor de matéria orgânica e da disponibilidade de contaminantes através da extração sequencial.

### *2.2.1 Ensaios de pH e matéria orgânica*

As medições de pH foram realizadas após uma hora de equilíbrio da mistura sólido/água Milli-Q, na proporção de 1/10 ($M_{sólido}/V_{solução}$), utilizando um pHmetro Digimed (modelo de eletrodo DME-CV1). A matéria orgânica foi determinada utilizando perda por ignição em mufla a 440°C (ABNT NBR 13600, 2022).

### *2.2.2 Extração sequencial (BCR)*

A extração sequencial foi realizada com base na metodologia do *European Community Bureau of Reference* (BCR) (Rauret, 1998; Rauret et al., 1999). Este método é composto pelas seguintes etapas: frações trocáveis e fracamente retidas (F1); ligadas aos óxidos de Fe e Mn (F2); ligadas aos sulfetos e complexadas com a matéria orgânica (F3) e fração residual (F4). A Tabela 2 apresenta as condições experimentais partindo de 1,00 g de matriz sólida.

Tabela 2. Procedimentos de extração sequencial seguindo o método BCR (*Community Bureau of Reference*).

| Fração | Extrator | Volume (mL) | Temperatura (°C) | Tempo (h) | Agitação |
|---|---|---|---|---|---|
| F1 | $CH_3COOH$ (0,11 M) | 40 | Ambiente | 16 | 120 rpm |
| F2 | $NH_2OH$ (0,1 M), pH = 2,0 ($HNO_3$) | 40 | Ambiente | 16 | 120 rpm |
| F3 | $H_2O_2$ (30%) | 10 | Ambiente | 1 | Ocasional |
| | | | 85 ± 5 | 1 | Ocasional |
| | $H_2O_2$ (30%) | 10 | 85 ± 5 | 1 | Ocasional |
| | $NH_4CH_3CO_2$ (1 M), pH = 2,0 ($HNO_3$) | 50 | Ambiente | 16 | 120 rpm |
| F4 | $HNO_3$:HCl = 2:1 (v:v) | US EPA Método 3050B | | | |

Temperatura ambiente: 23 ± 2°C. As frações incluem F1 (solúvel em ácido), F2 (redutível), F3 (oxidável) e F4 (residual).

### *2.2.3 Testes de crescimento inicial*

O teste de emergência e crescimento inicial ocorreu no último mês do experimento em vasos e foi conduzido de acordo com a ABNT NBR ISO 11269-2:2014, empregando milho (*Zea mays* L.) como planta-teste. Cinco sementes foram plantadas em cada vaso, com tempo de crescimento de 24 dias. Ao final do ensaio, foram contadas as sementes germinadas e os comprimentos da parte aérea e das raízes foram medidos. Sementes com hipocótilos de pelo menos 2 mm foram definidas como sementes germinadas e a porcentagem de germinação (G %) foi calculada pela Equação 1:

$$G\ (\%) = \frac{Número\ total\ de\ sementes\ germinadas}{Número\ total\ de\ sementes\ plantadas}\ x\ 100 \qquad (1)$$

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Efeito dos melhoramentos no pH e na matéria orgânica do solo

O solo natural apresentava um pH médio de 4,8, que diminuiu para 4,2 com a contaminação. Em relação a adição dos melhoramentos, a turfa praticamente não trouxe alterações no pH, mas o composto e o biocarvão produziram aumentos no pH, sendo maiores em função do aumento da taxa adicionada (Tabela 3). O maior valor de pH foi de 10,0 para o solo contendo 10% de biocarvão, como consequência do elevado pH deste material (10,6; Tabela 1).

Tabela 3. Variação do pH das amostras ao longo do experimento em vasos.

| Amostra | Inicial | Intermediário | Final |
|---|---|---|---|
| T1% | 4,1 ± 0,0 | 4,1 ± 0,0 | 4,3 ± 0,0 |
| C1% | 4,4 ± 0,1 | 4,7 ± 0,0 | 4,8 ± 0,0 |
| B1% | 5,0 ± 0,0 | 5,4 ± 0,0 | 5,4 ± 0,1 |
| T5% | 4,1 ± 0,0 | 4,1 ± 0,0 | 4,3 ± 0,1 |
| C5% | 5,7 ± 0,0 | 6,6 ± 0,0 | 7,0 ± 0,1 |
| B5% | 8,1 ± 0,0 | 9,1 ± 0,0 | 9,1 ± 0,0 |
| T10% | 3,9 ± 0,0 | 4,1 ± 0,0 | 4,2 ± 0,0 |
| C10% | 6,0 ± 0,0 | 7,3 ± 0,0 | 7,8 ± 0,1 |
| B10% | 9,8 ± 0,0 | 10,0 ± 0,0 | 10,0 ± 0,0 |
| Solo+M | 4,2 ± 0,0 | 4,2 ± 0,0 | 4,4 ± 0,1 |
| Solo | 4,6 ± 0,0 | 4,8 ± 0,0 | 4,8 ± 0,0 |

M: Cd+Pb+Zn.

Observa-se também que, ao longo do ensaio em vasos, as variações nos valores de pH foram sutis, principalmente comparando os tempos intermediário e final, visto que as amostras tendem a caminhar para uma condição de equilíbrio. As maiores variações foram observadas para o composto, que aumentou em 1,3 e 1,8 unidades para as adições de 5% e 10%, respectivamente. Isso provavelmente se deve à maior degradação do material, uma vez que sua estabilidade é menor em comparação com os outros melhoramentos. Embora a porcentagem de matéria orgânica tenha aumentado com o incremento da taxa de adição nos três melhoramentos, de modo geral, o composto apresentou os maiores valores (Tabela 4).

Tabela 4. Variação da matéria orgânica das amostras ao longo do experimento em vasos.

| Amostra | Inicial (g $kg^{-1}$) | Final (g $kg^{-1}$) |
|---|---|---|
| T1% | 40,93 ± 4,63 | 39,66 ± 1,56 |
| C1% | 45,26 ± 3,51 | 41,01 ± 0,50 |
| B1% | 43,50 ± 1,57 | 41,24 ± 0,69 |
| T5% | 68,57 ± 1,13 | 56,81 ± 1,25 |
| C5% | 101,80 ± 3,08 | 58,46 ± 3,34 |
| B5% | 68,32 ± 2,24 | 60,91 ± 0,51 |
| T10% | 97,00 ± 3,47 | 81,88 ± 2,13 |
| C10% | 160,52 ± 3,25 | 89,55 ± 2,73 |
| B10% | 116,12 ± 3,40 | 96,53 ± 2,45 |
| Solo | 37,51 ± 1,57 | 36,94 ± 0,48 |

M: Cd+Pb+Zn.

### 3.2 Efeito dos melhoramentos na disponibilidade dos metais no solo

A extração sequencial tem sido amplamente aplicada para avaliar a mobilidade dos contaminantes, sendo que as frações F1, F2, F3 e F4 apresentam disponibilidade decrescente nessa ordem. De modo geral, os resultados da extração sequencial revelaram distintas distribuições entre as frações para cada MPT (Fig. 1).

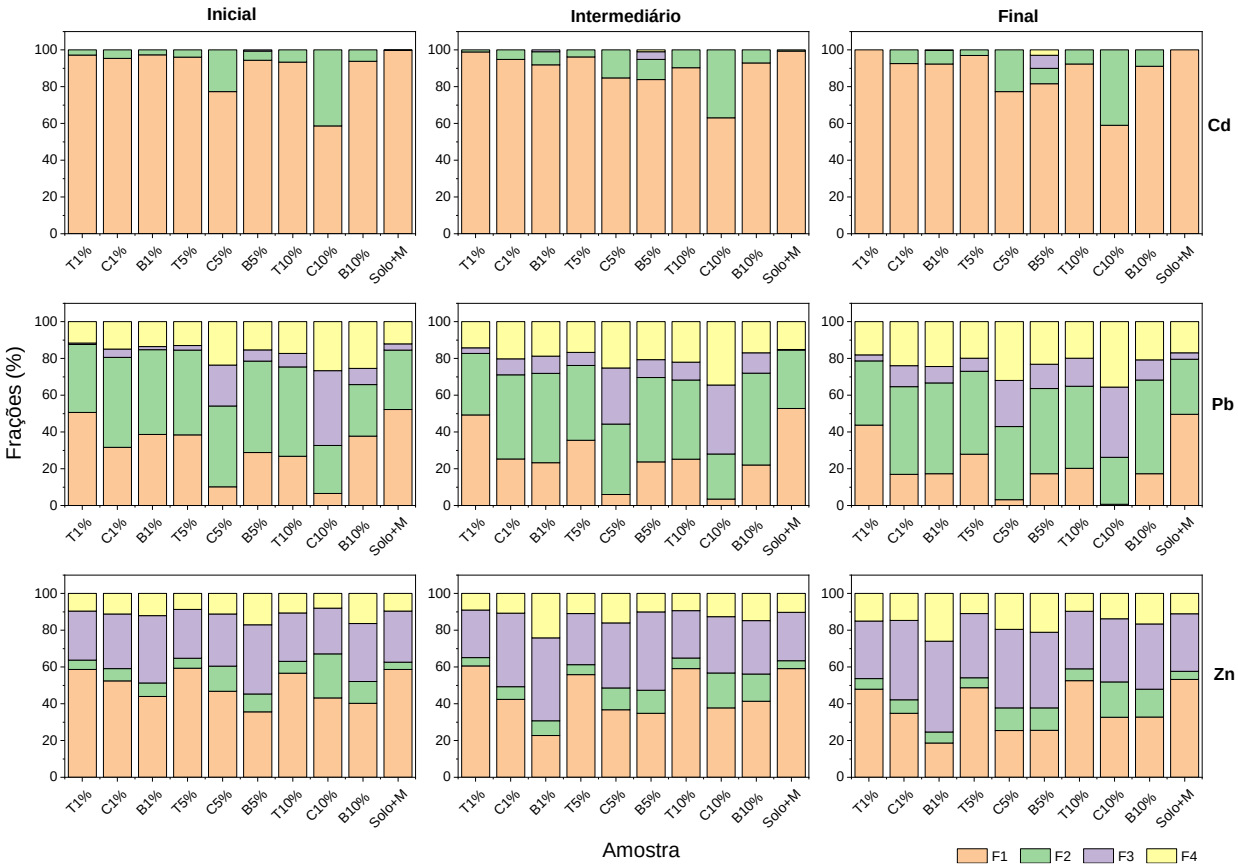



Figura 1. Extração sequencial de Cd, Pb e Zn no solo contaminado tratado com turfa (T), composto (C) e biocarvão (B) e em solo contaminado não tratado ("Solo+M", sendo M: Cd+Pb+Zn), no início, meio e fim do experimento em vasos.

O Cd se mostrou predominantemente associado à fração F1 (mais móvel). No solo sem melhoramento, 99,8% da concentração de Cd estava ligada a essa fração. Embora a adição dos melhoramentos tenha reduzido essa fração, os menores valores observados foram de 77,3% e 59,0% para C5% e C10%, respectivamente. Esse comportamento é particularmente preocupante, uma vez que o Cd é um elemento altamente tóxico mesmo em baixas concentrações, reforçando a necessidade de cautela quanto aos seus potenciais riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Em solos não contaminados, as concentrações médias desse elemento variam entre 0,07 e 1,1 mg $kg^{-1}$, sendo sua migração vertical no perfil do solo mais comum do que a acumulação superficial, especialmente em regiões de clima úmido. Assim, concentrações elevadas no horizonte superficial tendem a indicar contaminação (Kabata-Pendias, 2010). Comparando os diferentes melhoramentos, o composto apresentou os maiores efeitos na redução da disponibilidade de Cd. Observou-se que a fração F1 diminuiu com o aumento da taxa de adição e, em contrapartida, houve aumento da fração F2.

O Pb esteve majoritariamente associado à fração F2 (óxidos de Fe e Mn). As exceções foram a turfa com adição de 1%, que apresentou uma distribuição muito semelhante à do solo não tratado, e o tratamento com composto a 10%, no qual foram observadas porcentagens próximas entre as frações F3 e F4. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato da fração F3 estar associada à matéria orgânica. De acordo com Kabata-Pendias (2010), o Pb é um dos MPTs com menor mobilidade no solo, sendo sua dinâmica fortemente influenciada pela formação de complexos estáveis com a matéria orgânica. Nesse sentido, o tratamento C10%, que apresentou o maior teor de matéria orgânica (160,52 g $kg^{-1}$, Tabela 4), favoreceu a redistribuição do Pb para frações menos móveis. Para fins de comparação, o solo não tratado apresentou 30,0% do Pb associado à fração F2. Além disso, enquanto a fração F1 representou 49,6% no solo não tratado, esse valor foi reduzido para apenas 0,7% no C10%, ao final do experimento.

O Zn esteve associado predominantemente à fração F3, ligada aos sulfetos e à complexação com a matéria orgânica, nas amostras tratadas com composto e biocarvão, enquanto nas amostras com turfa, a fração principal foi a F1. Em condições naturais, o Zn tende a se acumular no horizonte superficial do solo em função

da sua sorção à matéria orgânica (Kabata-Pendias, 2010). Ademais, a soma das frações F3 e F4 representa a proporção do contaminante com menor disponibilidade, e o Zn apresentou, de modo geral, os maiores valores para essa soma quando comparado ao Cd e ao Pb. Nos solos tratados, esses valores variaram de 41,0% (T10%) a 75,4% (B1%), enquanto no solo não tratado corresponderam a 42,3%.

Em situações de contaminação real, múltiplos contaminantes tendem a coexistir, de forma semelhante ao observado no presente estudo. A presença simultânea de diferentes contaminantes catiônicos pode promover a competição por sítios de troca nas superfícies dos melhoramentos, resultando na redução do potencial de retenção desses elementos em sistemas multicontaminados. Estudos anteriores indicam que, de modo geral, a ordem de afinidade desses metais pelos melhoramentos é Pb > Cd ≈ Zn (Lima et al., 2023). De forma semelhante, biocarvões derivados de diferentes matérias-primas, como palha de colza, palha de trigo, palha de *Miscanthus* e madeira, apresentaram a ordem Pb > Cd > Zn (Soria et al., 2020). Ji et al. (2022) também relataram maior capacidade de sorção de Pb em comparação ao Cd, sendo que a competição entre esses dois metais inibiu severamente a sorção de Cd em biocarvões derivados de cogumelo orelha-de-pau. Os resultados de Raimondi (2019), utilizando turfa e composto de torta de filtro da cana-de-açúcar, também evidenciaram maior capacidade de sorção de Pb em relação ao Cd e ao Zn, cujos valores foram semelhantes entre si.

### 3.3 Efeito dos melhoramentos no crescimento inicial do milho

Todos os melhoramentos favoreceram a germinação das sementes do milho, em comparação ao solo contaminado sem melhoramento e também ao solo não contaminado, com exceção da amostra B10%, que apresentou germinação média de apenas 20% (Fig. 2a). O composto e o biocarvão se destacaram por promover o crescimento das plantas, tanto do sistema radicular quanto da parte aérea, em relação ao solo contaminado ("Solo+M") (Fig. 2b). No caso do composto, as taxas de adição de 5% e 10% contribuíram mais para o crescimento das plantas em comparação à taxa de 1%. Para o biocarvão, embora a taxa de 5% tenha promovido maior crescimento em relação à de 1%, a adição de 10% prejudicou inclusive a germinação das sementes (Fig. 2a).

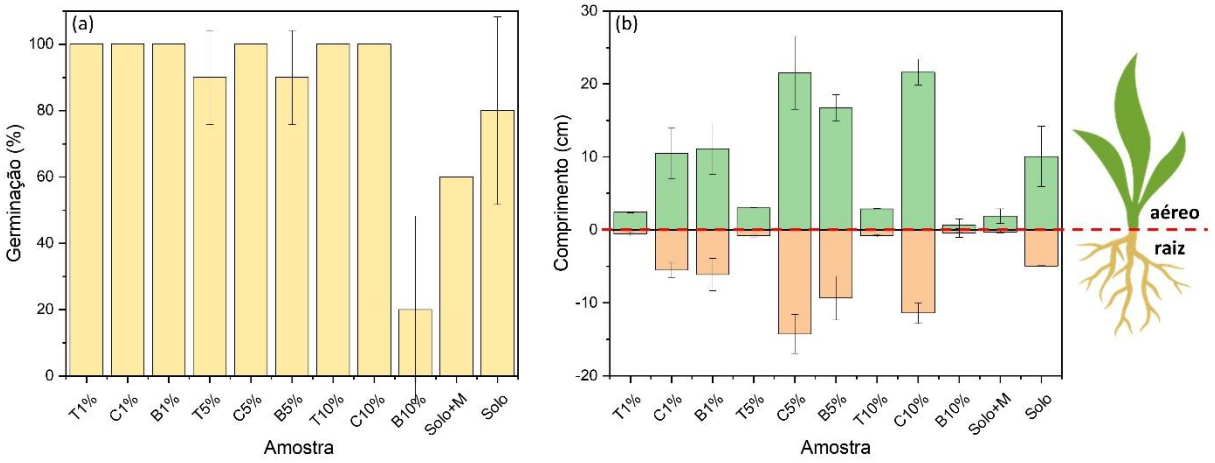



Figura 2. Efeito dos melhoramentos na germinação (a) e no crescimento da parte aérea e raiz do milho (*Z. mays*) (b).

Vale ressaltar que as amostras C5%, B5% e B10% apresentaram crescimento superior ao observado no solo não contaminado, evidenciando que os melhoramentos podem superar as limitações do solo original. De fato, trata-se de um solo ácido (pH 4,8; Tabela 3), com baixo teor de nutrientes e matéria orgânica (37,51 g $kg^{-1}$; Tabela 4), condições nas quais a incorporação de composto ou biocarvão favorece a disponibilidade de nutrientes e a capacidade de retenção de água, resultando em maior desenvolvimento da planta.

Estudos anteriores também documentaram a melhoria do crescimento do milho e de outras plantas com a adição de diferentes melhoramentos. Saqib Rashid et al. (2018) relataram que a aplicação de biocarvão e de composto, individualmente ou combinado, a uma taxa de 2%, promoveu aumento do crescimento radicular e da parte aérea do milho cultivado em solo multicontaminado (contendo Pb, Zn, Cr, Cu e Ni), impulsionando significativamente a produção de biomassa. Lima et al. (2023) verificaram que a adição de 1% de BC500 a

solos contaminados com escória de fundição (Cd, Pb, Zn, As, Cu, Cr e Ni) resultou em maior comprimento radicular e da parte aérea no milho. Ren et al. (2020) mostraram que adições crescentes de biocarvão (até 4%) aumentaram a biomassa seca aérea da mostarda (*Brassica juncea*) cultivada em solos contaminados com Cd, Pb, Zn e As, provenientes de fundição e mineração. De forma semelhante, Teodoro et al. (2020) demonstraram que a adição de biocarvão co-compostado melhorou o crescimento e o desenvolvimento de plantas, aumentando a produção de clorofila total e carotenoides em *Lolium perenne*. Esses efeitos positivos podem ser atribuídos à melhoria das propriedades físicas e químicas do solo, ao aumento da disponibilidade de nutrientes e ao favorecimento das atividades enzimáticas proporcionadas pelos melhoramentos.

Diferentemente da maioria dos melhoramentos orgânicos do solo, como composto e turfa, que são facilmente decompostos, a natureza recalcitrante do biocarvão confere maior estabilidade e, portanto, pode estender seus benefícios por longo período (Basak et al., 2022). Contudo, os resultados desta pesquisa mostraram que a maior adição de biocarvão (10%), prejudicou a germinação e o crescimento do milho. Resultado similar foi observado por Jun et al. (2020), que estudaram o crescimento em campo do girassol (*Helianthus annuus* L.) em solo contaminado com Cd, Pb, Zn e As. Os autores relataram que a adição de 2,5% e 5% de biocarvão promoveu o crescimento e aumentou significativamente a biomassa das plantas, enquanto a aplicação de 10% foi excessiva, resultando na inibição do crescimento e na redução da biomassa.

Ademais, altas taxas de biocarvão aplicadas em solos argilosos podem reduzir a água disponível, aumentar a probabilidade de excesso de salinidade e elevar o pH (principalmente em solos alcalinos), o que pode levar à precipitação de nutrientes e à redução da fertilidade. Além disso, efeitos adversos sobre a reprodução, o crescimento e a integridade do DNA de invertebrados já foram relatados, assim como alterações no microbioma do solo, incluindo mudanças na proporção de fungos e bactérias (Brtnicky et al., 2021).

Outras espécies vegetais precisam ser avaliadas em pesquisas futuras utilizando os mesmos materiais deste estudo, mas considerando outros contaminantes e cenários a longo prazo, incluindo múltiplos ciclos de cultivo, para avaliar a persistência dos benefícios sobre o crescimento vegetal e a mobilidade dos MPTs. Além disso, estudos que integrem a avaliação de solos com diferentes texturas, pHs e condições climáticas poderiam fornecer diretrizes mais precisas para otimizar a aplicação de melhoramentos em casos de contaminação real, minimizando efeitos adversos e maximizando a recuperação da qualidade do solo e a segurança ambiental.

## 4 CONCLUSÃO

A adição de melhoramentos em solo contaminado com Cd, Pb e Zn promoveu alterações na disponibilidade dos contaminantes e no crescimento do milho. O composto e o biocarvão se destacaram por reduzir a fração mais móvel do Cd e favorecer a redistribuição de Pb e Zn para formas menos disponíveis, refletindo em maior retenção de metais no solo e menor risco ambiental. Entretanto, altas taxas de biocarvão (10%) mostraram efeitos adversos, prejudicando a germinação e o crescimento das plantas, possivelmente devido a alterações na disponibilidade de água, salinidade e pH do solo. Comparativamente, a turfa apresentou menor efeito sobre o crescimento, mantendo o metal em frações mais móveis. Esses resultados indicam que o tipo de melhoramento e a taxa aplicada são fatores críticos para maximizar os benefícios do tratamento de solos contaminados. O estudo evidencia a necessidade de avaliações integradas de solos, plantas e microbiota para otimizar estratégias de remediação, garantindo segurança ambiental e produtividade agrícola sustentável.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (n° processo: 2017/16961-0) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Produtividade em Pesquisa (Processo 310989/2020-5).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). NBR ISO 11269-2. *Qualidade do solo – Determinação dos efeitos de poluentes na flora terrestre*. Parte 2: Efeitos do solo contaminado na emergência e no crescimento inicial de vegetais superiores. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). NBR 13600. *Solo – Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C*. Rio de Janeiro.

Alloway, B. J. (2012). Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. 3ª ed. Springer Science & Business Media.

Basak, B. B., Sarkar, B., Saha, A., Sarkar, A., Mandal, S., Biswas, J. K., ... Bolan, N. S. (2022). Revamping highly weathered soils in the tropics with biochar application: What we know and what is needed. *Science of the Total Environment*, 822, 153461.

Brtnicky M., Datta R., Holatko J., Bielska L., … Pecina V. (2021). A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment. *Science of the Total Environment* 796, 148756.

Ji, Y., Zheng, N., An, Q., Sun, S., Wang, S., Li, X., ... Zhang, W. (2022). The effect of carbonization temperature on the capacity and mechanisms of Cd (II)-Pb (II) mix-ions adsorption by wood ear mushroom sticks derived biochar. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 239, 113646.

Jun L., Wei H., Aili M, Juan N., Hongyan X., Jingsong H., Yunhua Z., Cuiying P. (2020). Effect of lychee biochar on the remediation of heavy metal-contaminated soil using sunflower: a field experiment. *Environmental Research*, 109886.

Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace elements in soils and plants*, 4rd ed. CRC Press LLC, Boca Raton.

Lima, J. Z., da Silva, E. F., Patinha, C., Durães, N., Vieira, E. M., Rodrigues, V. G. S. (2022a). Sorption of arsenic by composts and biochars derived from the organic fraction of municipal solid wastes: Kinetic, isotherm and oral bioaccessibility study. *Environmental Research*, 204, 111988.

Lima, J. Z., da Silva, E. F., Patinha, C., Rodrigues, V. G. S. (2022b). Sorption and post-sorption performances of Cd, Pb and Zn onto peat, compost and biochar. *Journal of Environmental Management*, 321, 115968.

Lima, J. Z., Nauerth, I. M. R., da Silva, E. F., Pejon, O. J., Rodrigues, V. G. S. (2023). Competitive sorption and desorption of cadmium, lead, and zinc onto peat, compost, and biochar. *Journal of Environmental Management*, 344, 118515.

Raimondi, I.M. (2019). *Turfa, composto de torta de cana-de-açúcar e zeólitas como sorventes de Pb, Cd e Zn: Equilíbrio em lote, cinética, dessorção e bioacessibilidade*. Tese (Doutorado) – EESC, USP, São Carlos.

Rauret, G. (1998). Extraction procedures for the determination of heavy metals in contaminated soil and sediment. *Talanta* 46, 449-455.

Rauret, G., López-Sánchez, J.F., Sahuquillo A., Rubio R., Davidson C., Ure A., Quevauniller P. (1999). Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials. *Journal of Environmental Monitoring* 1(1), 57-61.

Ren, C., Guo, D., Liu, X., Li, R., Zhang, Z. (2020). Performance of the emerging biochar on the stabilization of potentially toxic metals in smelter-and mining-contaminated soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(35), 43428-43438.

Saqib Rashid M., Liu G., Yousaf B., Song Y., Ahmed R., … Cheema A.I. (2022). Efficacy of rice husk biochar and compost amendments on the translocation, bioavailability, and heavy metals speciation in contaminated soil: role of free radical production in maize (*Zea mays* L.). *Journal of Cleaner Production* 330, 129805.

Soria, R.I., Rolfe, S.A., Betancourth, M.P., Thornton, S.F. (2020). The relationship between properties of plant-based biochars and sorption of Cd (II), Pb (II) and Zn (II) in soil model systems. *Heliyon*, 6(11).

Teodoro, M., Trakal, L., Gallagher, B. N., Šimek, P., Soudek, P., Pohořelý, M., ... Mohan, D. (2020). Application of co-composted biochar significantly improved plant-growth relevant physical/chemical properties of a metal contaminated soil. *Chemosphere*, 242, 125255.

US EPA - US Environmental Protection Agency. (1996). *Method 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils*, vol. 2. US EPA, Washington, DC, USA. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2026.