

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CAMPUS LAGOA DO SINO  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA  
ENGENHARIA AGRONÔMICA

SAMUEL BALDIN NOGUEIRA

FITORREMEDIÇÃO: UMA TÉCNICA POTENCIAL EM ÁREAS AGRÍCOLAS  
CONTAMINADAS COM METAIS PESADOS

BURI (SP)

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CAMPUS LAGOA DO SINO  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA  
ENGENHARIA AGRONÔMICA

Samuel Baldin Nogueira

FITORREMEDIAÇÃO: UMA TÉCNICA POTENCIAL EM ÁREAS AGRÍCOLAS  
CONTAMINADAS COM METAIS PESADOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
como requisito para obtenção do título de  
bacharel em Engenharia Agrônômica pela  
Universidade Federal de São Carlos.

Orientação: Prof. Dr. Daniel Baron

BURI (SP)

2022

Samuel Baldin, Nogueira

Fitorremediação: Uma técnica viável em em áreas agrícolas contaminadas com metais pesados / Nogueira Samuel Baldin -- 2022.  
37f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Lagoa do Sino, Buri  
Orientador: Daniel Baron  
Banca Examinadora: Silvio Roberto de Lucena Tavares e Daniel Schwantes.  
Bibliografia

1. Fitorremediação. 2. Áreas contaminadas. 3. Metais pesados. I. Samuel Baldin, Nogueira. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539

SAMUEL BALDIN NOGUEIRA

FITORREMEDIAÇÃO: UMA TÉCNICA VIÁVEL EM ÁREAS AGRÍCOLAS  
CONTAMINADAS COM METAIS PESADOS

Trabalho de conclusão de curso apresentada  
como requisito para obtenção do título de  
bacharel em Engenharia Agrônômica pela  
Universidade Federal de São Carlos.  
Buri, 24 de novembro de 2022.

Aprovado em: 24/11/2022.



Prof. Dr. Daniel Baron  
Docente do Centro de Ciências da Natureza  
UFSCar - Campus Lagoa do Sino

---

Prof Dr. Daniel Baron (Orientador)  
Universidade Federal de São Carlos



---

Dr. Silvio Tavares  
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)



---

Dr. Daniel Schwantes  
Pontificia Universidad Católica de Chile (UC)

“Uma vida sem desafios não vale a pena ser vivida.”

Sócrates

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que sempre esteve ao meu lado e apoiou minhas decisões. Em especial, ao meu pai Edilson João Nogueira, à minha mãe Adriana Maria Baldin Nogueira, ao meu irmão Gabriel Baldin Nogueira e aos meus avós, Judith e José Roberto Nogueira. Sem vocês eu não estaria aqui.

À minha namorada, companheira e melhor amiga, Gabrielly Cristino da Silva, que sempre esteve do meu lado, nos dias bons e nos dias ruins, demonstrando sempre muito apoio e companheirismo. Tenho certeza que teria sido muito mais difícil sem você.

Aos meus “irmãos”, Rafael “molinete” Carvalho, Carlos “gaúcho” Bergamaschi e João “misto” Meneguetti. O companheirismo e apoio de vocês foram preponderantes em minha jornada. Por todos os momentos, alegrias, conquistas, derrotas, momentos felizes e momentos tristes: Agradeço! Que nossa amizade seja eterna.

Aos meus amigos e companheiros, que ao longo da graduação tiveram papel preponderante em minha vida: Larissa “tomate” Carnacini, Ana Gabriela, Wellington “tom” Toledo, Bruno Marchesin, Bianca Jacob e outros.

Agradeço à minha segunda família: Vamilton Barreto, Juliana Cristino, Giovana Cristino, Felipe Silva, Josiele Silva, Maria Quitéria Oliveira, Vanessa Oliveira e outros.

Agradeço aos meus colegas de sala – ‘VI Turma de Engenharia Agrônômica, UFSCar - Lagoa do Sino, 2018’.

Agradeço ao time do grupo Pesquisa e Extensão em Fisiologia Vegetal (PExFisio), Gabriel “perdido” Bortoloti, Raja Yamma, João “achado” Vitor, Rafael “molinete” Carvalho e outros, pelo apoio e auxílio.

Agradeço a Campina do Monte Alegre-SP, que por anos foi minha segunda casa, e aos moradores, pela recepção.

Agradeço a Universidade Federal de São Carlos, *campus* Lagoa do Sino (Buri-SP), docentes, técnicos e funcionários, que contribuíram em minha formação enquanto Engenheiro Agrônomo e cidadão.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da pesquisa.

Agradeço aos membros titulares da banca avaliadora: Dr. Silvio Tavares e Dr. Daniel Schwantes e aos membros suplentes: Eng. Agrônomo Gabriel Antônio Bortoloti e Dr. Renato Montagnolli.

Ao meu orientador, amigo e professor, Dr. Daniel Baron, agradeço especialmente, pela orientação, parceria, conversas e ensinamentos. Obrigado por acreditar em mim desde o começo e por ter dedicado tempo à minha formação. Graças a sua orientação sou uma

pessoa mais responsável, mais profissional e um ser humano melhor. O levarei em meu coração e pensamentos para sempre. Agradeço por tudo!

Agradeço a todos que acreditaram em mim e me ajudaram em algum momento da minha vida e graduação.

## RESUMO

NOGUEIRA, Samuel Baldin. Fitorremediação: Uma técnica viável em áreas agrícolas contaminadas com metais pesados. 2022, 37f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrônoma) – Universidade Federal de São Carlos Buri, 2022.

A contaminação de solos, desencadeada pelo rápido e, por vezes, irracional desenvolvimento humano, impacta negativamente a qualidade e quantidade dos alimentos. Dentre os contaminantes, os metais pesados (MPs) apresentam notoriedade, pois causam efeitos deletérios aos humanos, como deterioração de DNA e inibição de neurotransmissores. Além disso, afetam negativamente organismos vegetais, causando diminuição na taxa fotossintética, diminuição no crescimento vegetativo, etc. Atualmente, o Brasil é listado entre os países na zona de risco ecológico, devido a MPs, ademais, apresenta registros de contaminações por esses elementos em áreas agrícolas no estado de São Paulo. Desse modo, é de suma importância a utilização de técnicas que descontaminem os solos e, dentre essas técnicas, destaca-se a fitorremediação. Essa técnica utiliza plantas como agentes remediadores, de modo que os organismos vegetais 'remediarão' os contaminantes. As plantas indicadas para essas funções precisam apresentar "habilidades" específicas, como a hiperacumulação de contaminantes e tolerância a estresses abióticos, por exemplo, a espécie popularmente conhecida por nabo (*Brassica rapa* L.). A fitorremediação é indicada como sustentável e viável economicamente, todavia, são raros, quando não nulos, estudos no Brasil que indiquem e comprovem seu potencial econômico, tornando-se uma lacuna na literatura nacional. Por tanto, com vistas a elucidar tal lacuna, conduzimos um cenário hipotético em um canavial, em Mogi Guaçu-SP, com a presença de contaminantes acima do limite permitido pela CETESB ([cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/relacao-de-areas-contaminadas](http://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/relacao-de-areas-contaminadas)) para poluentes categorizados por 'metais' (definição genérica estabelecida por este órgão estatal), de modo a simularmos a realização da fitorremediação utilizando o nabo. Utilizamos conceitos de microeconomia para realizar os cálculos financeiros e aplicamos questionários com produtores, revendas e usinas de bioenergia para estimar os custos produtivos. Nossos resultados obtidos foram publicados no periódico 'Revista Ciência, Tecnologia e Ambiente' em formato de 'Research Article', presente ano 2022 [[doi.org/10.4322/2359-6643.12213](https://doi.org/10.4322/2359-6643.12213)]. Constatamos que o *déficit* econômico decorrente da fitorremediação foi da ordem de US\$ 536,43/ha, valor superior ao lucro anual de produção de cana-de-açúcar, US\$178,81/ha. Ademais, em nosso cenário hipotético, o custo da fitorremediação por m<sup>3</sup> (considerando 0,20m de profundidade) é de



~US\$5. Concluimos que a fitorremediação é uma técnica potencial e de fácil aplicabilidade para descontaminação e conservação de solos poluídos com MPs em áreas agrícolas brasileiras.

**Palavras-chave:** *Brassica rapa*, fitorremediação, metais pesados, viabilidade econômica.

## ABSTRACT

Soil contamination, caused by rapid human development, negatively affects the quality and quantity of food. Among the contaminants, heavy metals (HMs) are notorious because they cause harmful effects on humans, such as DNA deterioration and inhibition of neurotransmitters. In addition, HMs negatively affect plant organisms, causing a decrease in photosynthetic and plant growth, etc. Currently, Brazil is listed among the countries in the ecological risk zone due to HMs; furthermore, it has records of contamination by these elements in agricultural areas in the São Paulo state. Thus, it is essential to use techniques that decontaminate soils, and among these techniques, there is phytoremediation. This technique uses plants as remedial agents so that the plant organisms will remediate the contaminants. Plant species suitable for these functions need to have specific "skills", such as the hyperaccumulation of contaminants and tolerance to abiotic stresses, for example, turnip (*Brassica rapa* L.). Phytoremediation is indicated as sustainable and economically viable; however, no studies in Brazil indicate and prove its economic viability, making it a "gap" in the national literature. Therefore, to solve this scarce information, we conducted a hypothetical scenario of a sugarcane field in Mogi Guaçu-SP, which presented contamination above the limit allowed by CETESB ([cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/relacao-de-area-contaminadas](http://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/relacao-de-area-contaminadas)) for pollutants categorized by 'metals' (generic definition established by this state agency), so we simulated the performance of agricultural land remediation using turnip as a phytoremediator. We use microeconomics concepts to perform financial calculations and conduct questionnaires with producers, resellers, and bioenergy plants to estimate production price. Our results were published in the journal 'Revista Ciência, Tecnologia e Ambiente' in a 'Research Article format' in 2022 [[doi.org/10.4322/2359-6643.12213](https://doi.org/10.4322/2359-6643.12213)]. We found that the economic deficit caused by phytoremediation was US\$ 536.43/ha, which is higher than the annual profit from sugarcane production, US\$178,81/ha. Furthermore, in our hypothetical scenario, the cost of phytoremediation in m<sup>3</sup> (considering 0.20m depth) is ~US\$5. Therefore, we conclude that phytoremediation is a potential and easily applicable technique for the decontamination and conservation of soils polluted with HMs in Brazilian agricultural lands.

**Keywords:** *Brassica rapa*, phytoremediation, heavy metals, economic viability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração genérica dos principais mecanismos fisiológicos reportados em espécies fitorremediadoras. ....	17
Figura 2. Calculations of annual net profit, economic losses, and economic deficit. (NP) net profit, (GP) gross profit, (C) costs, (EL) economic loss, (t) time, (ED) economic deficit, and (PC) phytoremediation costs.....	27

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Concentrações limite de MPs para investigação em áreas agrícolas utilizando como base para calculo o risco causado a saúde humana. ....	14
Tabela 2. Concentrações de metais pesados encontrados em insumos agrícolas. ....	15
Tabela 3. Presença de metais pesados nos solos agricultáveis de alguns países do leste e sul do mediterrâneo. ....	16
Tabela 4. Estudos nacionais que comprovam a eficácia da fitorremediação em diferentes ambientes. ....	18
Tabela 5. Comparação de custos entre diferentes práticas remediadoras reportadas na literatura em diferentes países. ....	19
Tabela 6. Summary of sugarcane ( <i>Saccharum officinarum</i> L.) production cost to one cycle production year. ....	25
Tabela 7. Implementation and conduction of phytoremediation technique using turnip plants ( <i>Brassica rapa</i> L.). ....	26

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>PREMISSAS INICIAIS E RELEVÂNCIA DO TEMA .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>HIPÓTESE .....</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>ARTIGO ACEITO E PUBLICADO .....</b>	<b>20</b>
	<b>Introduction .....</b>	<b>22</b>
	<b>Material and methods .....</b>	<b>23</b>
	<b>Study area and plant material .....</b>	<b>23</b>
	<b>Path planning method and farm surveys .....</b>	<b>24</b>
	<b>Data analyses .....</b>	<b>24</b>
	<b>Results.....</b>	<b>25</b>
	<b>Discussion.....</b>	<b>28</b>
	<b>Conclusion.....</b>	<b>29</b>
	<b>References .....</b>	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>30</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>33</b>

## 1 PREMISSAS INICIAIS E RELEVÂNCIA DO TEMA

O desenvolvimento contínuo e acelerado da sociedade, juntamente com a industrialização e a urbanização - os quais executados na maioria das vezes de forma não planejada e desorganizada com consequências diretas no aspecto ambiental - pode resultar em descarte não tratado de efluentes e rejeitos em corpos hídricos, uso irracional dos recursos naturais, aplicação desenfreada de insumos com a presença de contaminantes, queima de combustíveis fósseis, etc. (HAROON *et al.*, 2019; PRIYADHARSHINI *et al.*, 2021). Tal cenário resulta em grave risco à segurança alimentar da sociedade como um todo, de tal modo que poluentes orgânicos e inorgânicos poderão ingressar na cadeia alimentar (humana e animal) (HENA; GUTIERREZ; CROUÉ, 2021; JASWAL; GUPTA, 2021). Dentre os vários poluentes ambientais, resultantes dos problemas anteriormente citados, os metais pesados (MPs) estão entre os principais problemas (LIN *et al.*, 2022).

Os MPs são elementos químicos que apresentam características metálicas e possuem massa atômica ( $>20$ ), gravidade específica ( $>5$ ) e densidade atômica ( $<4\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ ) similares entre si (BRIFFA; SINAGRA; BLUNDELL, 2020; DUFFUS, 2002). Esses elementos se caracterizam por serem não-degradáveis e se acumularem no ambiente por centenas ou milhares de anos e, quando adentram a alimentação humana, provocam efeitos deletérios, entre estes, danos à membrana celular, neurônios e ao DNA. Além disso, causam inibição de neurotransmissores, comprometendo o mecanismo bioquímico de replicação do material genético, o qual inclui a formação de inúmeros tipos de neoplasia (ENGWA *et al.*, 2019; SUMAN *et al.*, 2018). Em relação aos vegetais, a absorção, translocação e acumulação de MPs desencadeiam distúrbios fisiológicos, os quais variam conforme o elemento químico e o organismo vegetal. Entre os principais danos provocados pelos MPs são listadas a diminuição na área foliar, redução da germinação de sementes, menor desenvolvimento radicular e de copa, aumento na clorose das folhas, lesões em paredes celulares, menor integridade da membrana celular e diminuição da taxa fotossintética (JAMLA *et al.*, 2021; RAZA *et al.*, 2022; UR *et al.*, 2022)

Por outro lado, a crença popular de que todos os MPs são tóxicos aos seres humanos e às plantas, independentemente de sua concentração, está equivocada. Cada elemento químico possui uma concentração-limite para ser considerado tóxico e, além disso, existem alguns MPs que são fundamentais para o desenvolvimento vegetal. Nesse sentido, os 18 MPs listados por Briffa, Sinagra e Blundell (BRIFFA; SINAGRA; BLUNDELL, 2020) podem ser organizados em 3 classes ao se basear em seu efeito potencial e significância biológica nas plantas: (i) essenciais, (ii) benéficos e (iii) não-essenciais (ALI; KHAN, 2018; REBELLO *et al.*, 2021). Os

MPs da classe ‘essencial’ são fundamentais para as plantas completarem seu ciclo de vida, em que estes são, até mesmo, introduzidos pela agricultura nos solos e/ou via foliar como fertilizantes. Dentre estes estão o cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo) e zinco (Zn) (EPSTEIN; BLOOM, 2004; MAATHUIS, 2009). Os MPs considerados ‘benéficos’ são elementos que - em situações específicas - apresentam efeitos favoráveis para alguns vegetais e prejudiciais para outros, o que dependerá diretamente do elemento químico e concentração a ser investigado. Por exemplo, nessa classe é listado o cobalto (Co) (HÄNSCH; MENDEL, 2009; REBELLO *et al.*, 2021). Por fim, os MPs ‘não-essenciais’ são aqueles que não apresentam nenhuma função específica no metabolismo e/ou estrutura celular, de modo que causam efeitos prejudiciais a partir de baixas concentrações, tais como o cádmio (Cd), cromo (Cr), mercúrio (Hg), chumbo (Pb), etc. Entretanto, independente da classe do MP, concentrações elevadas prejudicarão o desenvolvimento das plantas. Paraphrasing Paracelso, médico suíço e alquimista que viveu no século XVI: *“Todas as substâncias são veneno, não existe nada que não seja veneno. Somente a dose correta diferencia o veneno do remédio”*. Desse modo, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) delimitou uma concentração limite de metais pesados estabelecidos como “ponto de partida” de investigação em áreas agrícolas, baseando-se em valores considerados deletérios aos humanos (Tabela 1).

Tabela 1. Concentrações limite de MPs para investigação em áreas agrícolas utilizando como base para cálculo o risco causado a saúde humana.

<b>Elemento</b>	<b>mg/kg de solo seco</b>
As	35
Cd	3
Pb	180
Co	35
Cu	200
Cr	150
Hg	12
Mn	50
Ni	70
Zn	450

Fonte: Adaptado de CONAMA, 2009.

A presença desses elementos nos solos agrícolas é algo natural, pois é resultante do intemperismo das rochas matrizes dos solos e erupções vulcânicas. Contudo, atividades antropogênicas acentuam a concentração dos MPs no ambiente. De modo geral, podemos elencar atividades e/ou manejos agrícolas que provocam, significativamente, o acúmulo de MPs acima das limites aceitáveis, tais como a aplicação de fertilizantes minerais e orgânicos, além de defensivos agrícolas (Tabela 2), de modo que, a aplicação de 60kg/ha de P, pode adicionar a camada superficial e subsuperficial do solo 26kg/ha de Cu, 1kg/ha de Pb e 0,3kg/ha de Cd (AZZI *et al.*, 2017). Além disso, o extrativismo mineral e descarte irregular de resíduos industriais, como efluentes não tratados, também são responsáveis pelo incremento de metais pesados nos solos (HAROON *et al.*, 2019). De acordo com Kumar, Pandita e Setia (KUMAR; PANDITA; SETIA, 2022) os metais Mn, Cd, Cr e Hg são um grave risco ecológico na Índia, China, Irã, Polônia e Omã; o Cd representa alto risco ecológico também em outros países, tais como Egito, Nigéria, Marrocos e Paquistão. Ademais; o Zn é um grave problema na Polônia e na Mongólia; o Ni afeta a Índia; o Pb afeta o Irã; o As no Chile. Já, o Brasil, é listado como ‘zona de baixo risco ecológico’ dada as características físico-químicas dos solos que ocorrem no país (KUMAR; PANDITA; SETIA, 2022).

Tabela 2. Concentrações de metais pesados encontrados em insumos agrícolas.

Produto	Ni	Co	Cr	Cd	Pb	Cu	Mn	Zn	Fe
	mg/kg								
Fertilizante orgânico Cama de frango	2,6	2,1	1,4	1,1	2,2	1486	368	8322	1776,4
Fertilizante mineral NPK 0-20-0	0	0	0	5,7	9,2	7,8	0	92,3	840
Defensivo agrícola Actara 250 WG®	21,5	0	29,9	0	26,6	171,9	566,3	1373,4	12486,2

Fonte: Adaptado de AZZI *et al.*, 2017 e FRANCO, 2019.

Além disso, de acordo com a literatura, as concentrações dos MPs nos países do leste e sul do mediterrâneo em solos agricultáveis são drasticamente distintos, mas apresentam índices considerados altos de contaminação (Tabela 3) (AZZI *et al.*, 2017).



Tabela 3. Presença de metais pesados nos solos agricultáveis de alguns países do leste e sul do mediterrâneo.

Países	Cd	Zn	Pb	Cu	Cr
	mg/kg de solo				
Dubai	0,7 - 1	3,3 - 170,3	6,9 - 2784	0,8 - 65,9	0 (zero)
Libano	0,3 - 2,8	0 (zero)	11,3 - 22,9	25,3 - 54,2	0 (zero)
Egito	12 - 16	36-41	46 - 79	28 - 29	0 (zero)
Iraque	11 - 41	0 (zero)	29 - 183	0 (zero)	0 (zero)
Irã	0,1 - 8,7	50,2 - 1510,3	7,2 - 319,3	15,4 - 84	67 - 116
Síria	0 (zero)	46 - 293	<5 - 108	16 - 97	12 - 116
Tunísia	16,5	3337,6	676	0 (zero)	0 (zero)
Morrocos	0,5 - 0,8	262 - 791,6	38,4 - 67,1	66,7	0 (zero)
Argélia	0 - 14,1	4,7 - 258,8	3,1 - 823,7	0,2 - 132,1	7,4 - 111,5

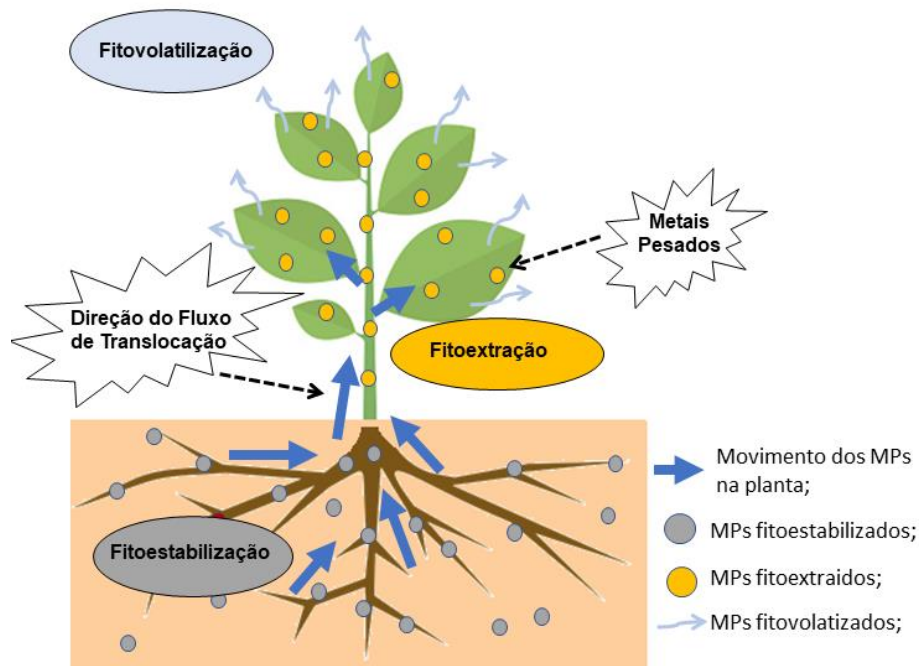
Fonte: AZZI *et al.*, 2017.

O Brasil possui Mn, Fe, Cd, Co, Cr, Cu, Ni e Zn naturalmente em seus solos, mas – normalmente - não apresentam teores elevados sem a intervenção humana (FADIGAS *et al.*, 2002). Entretanto, não existem levantamentos atuais no Brasil. A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) – instituição que realiza o mapeamento e registro de áreas contaminadas no estado de São Paulo – registrou aumento significativo de áreas contaminadas por metais e outros poluentes. Por exemplo, no ano de 2016 foram registradas 521 áreas contaminadas em situação de ‘risco confirmado’ e em 2017 foram registradas 901 áreas (aumento de 73% no referido biênio). Por outro lado, em 2021, a CETESB registrou 1.940 áreas reabilitadas e com liberação de uso para exploração econômica. Os números para o estado de São Paulo indicam a existência de 6.571 áreas contaminadas, que, de acordo com o último censo disponibilizado, 78% destas estão reabilitadas para uso ou com medidas de intervenção aprovadas. Dentre os 19 contaminantes registrados, os metais figuram na quarta colocação entre os maiores registros de contaminação, com total de 1.292 registros (CETESB, 2022). Dentre as técnicas utilizadas pela CETESB para a remediação de locais contaminados, a técnica mais utilizada em áreas de grande extensão - como áreas agrícolas - é a fitorremediação.

A fitorremediação é uma vertente da biorremediação que possibilita a “limpeza” de corpos hídricos e solos a partir do uso de organismos vegetais como agentes remediadores (NEDJIMI, 2021). Essa técnica é considerada sustentável, pois, melhora os aspectos físico-químicos do solo, utiliza a luz solar como principal fonte energética e gera ínfimos impactos negativos ao ambiente (PARSEH *et al.*, 2018; TAVARES, 2009). Além disso, a mesma é

considerada uma biotecnologia que possui capacidade em remediar ampla variedade de MPs. No mais, trata-se de biotecnologia de monitoramento considerado acessível quando comparado a outras técnicas remediadoras (NEDJIMI, 2021). As plantas utilizadas como agentes fitorremediadoras em áreas contaminadas por MPs devem possuir “habilidades” específicas, tais como tolerar estresses abióticos causados pelos metais, elevada produção de biomassa, possuir um sistema radicular robusto e hiperacumular MPs. De maneira geral, plantas categorizadas como fitorremediadoras de solos podem expressar 3 diferentes mecanismos de remediação, por meio da absorção radicular dos elementos presentes no solo (Figura 1) (CAMESELLE; GOUVEIA, 2019; ODOH *et al.*, 2019; PRABAKARAN *et al.*, 2019).

Figura 1. Ilustração genérica dos principais mecanismos fisiológicos reportados em espécies fitorremediadoras.



Fonte: Adaptado de Nogueira; Baron, 2022b.

O mecanismo denominado ‘fitovolatilização’ - utilizado na remediação de Hg, Se e As - diz respeito a capacidade ou “habilidade” das plantas em absorverem e converterem os poluentes em formas voláteis menos tóxicas e, após isso, realizar a sua liberação à atmosfera por meio da transpiração. Já, as plantas que realizam a ‘fitoestabilização’ - utilizado na remediação de Pb, As, Cd, Cr, Cu e Zn -, diminuirão a mobilidade e a biodisponibilidade dos MPs presentes na rizosfera, por meio da precipitação, sorção, complexação ou alteração da valência dos elementos. Por fim, a ‘fitoextração’ - utilizado na remediação da maioria dos MPs

- considerada a mais importante dentre os mecanismos - é a capacidade das plantas absorverem e acumularem os MPs em seus órgãos aéreos. Todavia, a eficiência desse mecanismo varia de acordo com as características da fisiologia do solo - como o pH e a capacidade de troca catiônica (CTC) (BORTOLOTTI; BARON, 2022; KUMARI *et al.*, 2020; SHEORAN; SHEORAN; POONIA, 2016; YADAV *et al.*, 2019). O pH é descrito pela literatura como o fator preponderante envolvido à biodisponibilidade dos íons dos MPs no solo, facilitando assim a absorção dos elementos pelas raízes do vegetais. Além disso, é constatado que solos com pH ácidos tendem a aumentar a biodisponibilidade desses contaminantes, devido a dessorção dos mesmos nos colóides dos solos (SHAH; DAVEREY, 2020).

A literatura reporta que vegetais pertencentes ao gênero botânico *Brassica* são significativamente estudados e utilizados na fitorremediação de MPs. Entre as principais espécies estão o nabo (*Brassica rapa* L.), a colza (*Brassica napus* L.) e a mostarda-castanha [*Brassica juncea* (L.) Czern], de modo que seus principais mecanismos de fitorremediação é a fitoextração (DU *et al.*, 2020; NAVARRO-LEÓN *et al.*, 2019; RUBIO *et al.*, 2020). A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) também é citada como potencial agente fitorremediadora, dada a sua produção de biomassa e versatilidade produtiva, porém, existem divergências na literatura sobre a acumulação e absorção de alguns metais, de modo a ser denominada uma ‘pobre acumuladora para alguns metais pesados’ (WANG *et al.*, 2017). Com relação a efetividade e viabilidade da aplicação dessa técnica remediadora no Brasil, existem publicações nacionais que comprovam sua eficácia, tanto em casas-de-vegetação, a campo e em corpos hídricos (Tabela 4).

Tabela 4. Estudos nacionais que comprovam a eficácia da fitorremediação em diferentes ambientes.

<b>Ambiente</b>	<b>Autoria</b>
Corpo hídrico	DE LIMA <i>et al.</i> , 2022.
Casa de vegetação	RIBEIRO DE SOUZA <i>et al.</i> , 2012.
Campo	DA SILVA <i>et al.</i> , 2022; TAVARES, 2009.

Todavia, ao verificarmos os dados reportados sobre a viabilidade econômica da fitorremediação, a literatura internacional indica um custo relativamente menor quando comparado a outras técnicas (Tabela 5). Ainda assim, há uma lacuna na literatura nacional nesta área, de modo que, não foram encontrados dados nacionais do custo da fitorremediação em pequenas ou grandes escalas, além de serem nulos/excassos uma comparação desse montante monetário com o lucro derivado de uma área agrícola.

Tabela 5. Comparação de custos entre diferentes práticas remediadoras reportadas na literatura em diferentes países.

<b>Práticas remediadoras</b>	<b>Custo variável/ton (US\$)</b>	<b>País</b>	<b>Autoria</b>
Fitorremediação	10- 35		
Aeração do solo	20 - 220	Estados Unidos da América	SCHNOOR, 1997
Lavagem do solo	80 - 200		
Solidificação	240- 340		
Incineração	200– 1500		
<b>Práticas remediadoras</b>	<b>Custo variável/m<sup>3</sup> (US\$)</b>	<b>País</b>	<b>Autoria</b>
Fitorremediação	3	China	WAN; LEI; CHEN, 2016
Extração	225- 272	Taiwan	CHEN; CHIOU, 2008;
Biopilhas	122 - 244	Japão	INOUE; KATAYAMA, 2011;
Biorremediação	56	Inglaterra	DAY; MORSE; LESTER, 1997.

Fonte: Adaptado de Nogueira; Baron, 2022b.

\*cotação utilizada: US\$1,00/R\$5,16 (21 out de 2022)

Desse modo, por meio de um estudo de caso, a presente monografia de conclusão de curso contribuiu com informações iniciais e necessárias para o preenchimento de lacunas na área econômica pertinente a fitorremediação, em especial, a viabilidade e potencial econômico da aplicação desta técnica em uma realidade produtiva brasileira, de modo a comparar o possível lucro em um cenário produtivo de cana-de-açúcar, com o custo da aplicação e condução da fitorremediação.

## 2 HIPÓTESE

H0 (hipótese de nulidade):

- Investigar se a fitorremediação é uma técnica sem potencial para descontaminação de metais pesados em área agrícola.

H1 (hipótese alternativa):

- A fitorremediação é uma técnica potencial para descontaminação de metais pesados em área agrícola.

### 3 OBJETIVOS

Verificar a aplicabilidade da fitorremediação em áreas agrícolas brasileiras.

### 4 ARTIGO ACEITO E PUBLICADO

Redigimos um manuscrito de acordo com as normas do periódico ‘Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente’ e publicamos o mesmo no corrente ano. A referência completa é:

‘NOGUEIRA, S.B., BARON, D., 2022. Phytoremediation: a viable technique in sugarcane farm heavy metals contaminated. **Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente**, vol. 12, e12213a’. O referido artigo está disponível no *link*:

<https://www.revistacta.ufscar.br/index.php/revistacta/article/view/213>

A partir desta publicação, utilizamos o artigo original para compor parte desta monografia e esta, ao ser apreciada pela banca examinadora, sugeriu melhorias e alterações pontuais. Diante disso, segue o texto do referido artigo com as modificações atendidas.

## **Phytoremediation: a viable technique in sugarcane farm heavy metals contaminated**

**Fitorremediação: uma técnica viável em canaviais contaminados com metais pesados**

**Samuel Baldin Nogueira<sup>1</sup>, Daniel Baron<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de São Carlos – *UFSCar*, Buri, SP, Brasil. \*Corresponding author: [danielbaron@ufscar.br](mailto:danielbaron@ufscar.br)

### **Abstract**

Heavy metals (HMs) affect more than 500 million hectares worldwide. These elements lead to a decrease in world plant production and provoke deleterious effects on human health. Phytoremediation is a technique that conserves and remediates soil contaminated by these pollutants. The literature indicates that phytoremediation is operationally simple and economically viable; however, there is scarce literature on this subject in Brazil. In this way, we assess a simulated case study to crop plants sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) in an agricultural area contaminated by HMs. We found that the economic deficit caused by phytoremediation in the context addressed was US\$ 536.43, a value higher than the annual profit from sugarcane production. Furthermore, in our hypothetical scenario, the cost of phytoremediation in m<sup>3</sup> is ~US\$5. Therefore, we conclude that phytoremediation is an potential technique and has easy applicability for soil decontamination and conservation polluted with HMs in Brazilian farmland.

**Keywords:** Farmland, hypothetical scenario, inorganic pollutants, phytoremediation cost, soil decontamination.

### **Resumo**

Os metais pesados (MPs) afetam mais de 500 milhões de hectares em todo o mundo. Esses elementos levam à diminuição da produção vegetal e provocam efeitos deletérios à saúde humana. A fitorremediação é uma técnica que conserva e remedia solos contaminados por esses poluentes. A literatura indica que a fitorremediação é operacionalmente simples e economicamente viável, porém, há escassa literatura sobre este assunto no Brasil. Desta forma, avaliou-se um estudo de caso simulado para o cultivo de plantas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) em área agrícola contaminada por MPs. Constatamos que o *déficit* econômico

acarretado pela fitorremediação no contexto abordado foi de US\$536,43, valor superior ao lucro anual de produção de cana-de-açúcar. Ademais, em nosso cenário hipotético, o custo da fitorremediação em m<sup>3</sup> é de ~US\$5. Concluímos que a fitorremediação é uma técnica potencial e de fácil aplicabilidade para descontaminação e conservação de solos poluídos com MPs em terras agrícolas brasileiras.

**Palavras-chave:** Áreas agrícolas, cenário hipotético, custo da fitorremediação, descontaminação de solos, poluentes inorgânicos.

## **Introduction**

Heavy metals (HMs) are chemical elements that have electrical and thermal conductivity, hardness, ductility, and malleability similar to each other (Duffus, 2002), such as arsenic (As), cadmium (Cd), lead (Pb), and chromium (Cr). Besides, they are naturally present in sediments, water bodies, and soils due to their source material and volcanic eruptions (Ali et al., 2019). However, HMs soil availability increased in recent years due to irregular waste disposals, such as industrial effluents, mineral extraction, and agricultural activities. Among agricultural activities are listed pesticides, herbicides, biosolids, fertilizers derived from phosphate rocks, and irrigation with contaminated water (Haroon et al., 2019; Ali et al., 2019).

The literature reported that HMs had affected many soils worldwide in the last decade. For example, in 2015, HMs covered 250 million hectares (ha), representing 13.7% of farmlands, and in 2018, 500 million ha were diagnosed as contaminated (Mani et al., 2015; Liu et al., 2018). The People's Republic of China has the most contaminated areas registered worldwide, with 80 million contaminated ha (He et al., 2015). According to Odoh et al. (2019), these inorganic contaminants in African soil cause socioeconomic and health problems. These occur because soil contamination reduces productivity, reducing family income, and, in addition, the food produced in these areas, if ingested for long periods, causes health disorders.

Furthermore, HMs soil pollution is estimated to impact the world economy by US\$10 billion annually (He et al. 2015). In the São Paulo state (Brazil), about 1,273 sites contaminated by HMs are registered (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo, 2020). In this way, the use of sustainable techniques that remediate and conserve soils from these contaminants is critical (Ashraf et al., 2019). In Brazil, according to Bernardino et al. (2016), there is great potential for the use of phytoremediation due to its flora and climate, which can enhance the accumulation or stabilization of pollutants by plants.

Phytoremediation is an environmental decontamination technique characterized by using plant species to minimize the toxic effects, such as HMs, on water, soil, and air.

Furthermore, it is considered a "clean" technique, as it uses solar energy as the primary source of energy, improves the "health" of the soil, promoting porosity, and consequently, increasing water infiltration and erosion management (Rostami and Azhdarpoor, 2019; Ramborger et al., 2021; Tavares, 2009). This technique is considered efficient, adaptable to the environment, socially accepted, ecologically viable, and aesthetically pleasing (Nedjimi, 2021; Shah and Daverey, 2020; Yan et al., 2020).

Several studies report that plant species to perform phytoremediation must have specific characteristics, for example, robust root system, hyperaccumulating multiple heavy metals, and heavy metals stress tolerance (Haider et al., 2021; Chen et al., 2020; Prabakaran et al., 2019). Besides, species belonging to the botanical genus *Brassica* are indicated to perform HM phytoremediation, such as turnip (*Brassica rapa* L.) (Navarro-León et al., 2019; Rizwan et al., 2018), canola (*Brassica napus* L.) (Rubio et al., 2020; Włóka et al., 2019), and chinese mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern] (Chen et al., 2020; Soares et al., 2020).

Phytoremediation can be considered a low-cost technique compared to other decontamination techniques (Nedjimi, 2021; YAN et al., 2020; Tavares, 2009). For example, it is possible to achieve an economic surplus within seven years after its implementation (Wan et al., 2016). However, a lack of literature addresses this subject, especially regarding prices and feasibility applicability. In this sense, contamination cases in farmlands become alarming without scientific support to manage decontamination.

Therefore, in this study, we present a comprehensive hypothetical scenario in Brazilian farmland polluted with HMs to estimate the economic cost analysis of the phytoremediation technique.

## **Material and methods**

### **STUDY AREA AND PLANT MATERIAL**

Our study investigated HMs soil-contaminated agricultural areas (sugarcane farms) in the region of Mogi Guaçu (São Paulo state, Brazil) reported by the Environmental Company of the State of São Paulo or *CETESB* (Cetesb, 2020). We performed the return rate calculation methods for the sugarcane crop (*Saccharum officinarum* L.) according to the National Company of Supplying or *CONAB* (Conab, 2020). *Brassica rapa* L. (turnip) was chosen as a 'phytoremediator plant model' for simulating our case study because it possesses some interesting characteristics such as seed acquisition, climate adaptation, robust root system, hyperaccumulate multiple HMs, HMs stress tolerance, and management cultivation. Moreover,



we considered carrying out two production cycles in the cultivation of turnip plants for performed pollutants phytoremediation (Zhang et al., 2021; Chen et al., 2020; Haider et al., 2021).

## **PATH PLANNING METHOD AND FARM SURVEYS**

To perform production cost and profit calculations, we based on microeconomic and production price concepts (Pindyck and Rubinfeld, 2013). To obtain production cost data for sugarcane, we applied surveys to producers, agricultural resellers, and bioenergy plants, achieving the results in Table 1. Concerning turnips, we were based on the literature and research with agricultural producers and resellers (Table 2). To obtain data on productivity and commercial value, we used databases from the Institute of Agricultural Economics or IEA (<http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/out/Bancodedados.php>).

## **DATA ANALYSES**

To quantify the gross profit of sugarcane, we consider the following equation (Equation 1):

$$GP = AV \times CP \quad (1)$$

Where GP is the gross profit, AV is the average productivity, SD is the commercialization price.

To calculate the annual net profit on the sugarcane farm, we consider the cost and gross profit (Equation 2):

$$NP = GP - C \quad (2)$$

Where NP is the annual net profit, C is the cost, and GP is the gross profit.

We consider that the sugarcane farmers will experience an economic loss during the remediation period (Equation 3):

$$EL = NP \times t \quad (3)$$

Where EL is the economic loss, NP is the annual net profit, and t is the evaluated time.

The calculation of the financial return was performed based on the concept of economic surplus and deficit (Equation 4):

$$ED = PC + EL \quad (4)$$

Where ED is the economic deficit, PC is the phytoremediation cost, EL is the economic loss.

## Results

Consulting the IEA databases, we found that the average productivity (AV) of sugarcane in São Paulo is 81.38 t/ha and the commercialization price (CP) is US\$ 14.46/t (for September/2020) (Iea, 2021). Thus, following Equation 1, we have that (Equation 6):

$$GP = AV \times CP$$

$$GP = 81.38 \text{ t/ha} \times 14.46/\text{t} \quad (6)$$

$$GP = \text{US\$}1,176.61/\text{ha}$$

Thus, GP for 1ha is US\$ 1,176.61/ha per productive year. After that, by gathering data from producers, local traders, and bioenergy plants, we quantify that sugarcane production will have an average annual production cost (C) average of US\$997.79/ha (Table 6). It is worth mentioning that the amount related to Harvesting, loading, and transporting, shown in Table 1, is charged by the bioenergy plant that acquired the production; thus, it is an outsourced cost to the farmer.

Table 6. Summary of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) production costs to one cycle production year.

Activity	Cost (ha)
Soil preparation *	US\$56.41
Planting *	US\$184.54
Fuel	US\$7.82
Fertilizers	US\$233.29
Herbicides	US\$63.25
Fungicides	US\$6.36
Insecticides	US\$25.86
Harvesting, loading, transporting <sup>1</sup>	US\$420.24
<b>Cost</b>	<b>US\$997.79</b>

\*Amortization of the value in five years, as the sugarcane crop is semi-perennial and its implementation cost can be diluted in its total production period; <sup>1</sup>outsourced activity.

Source: Adaptad from NOGUEIRA; BARON, 2022a

We calculated the cost of performing phytoremediation after reading and critically analyzing some publications (BASSEGIO; JANOTTO, 2020; CREMONEZ *et al.*, 2013; SALTON *et al.*, 1995) and informal queries from the use of the plant species phytoremediator turnip. The value found ranged around US\$380.51/ha (Table 7). However, in this hypothetical scenario, we consider the need to cultivate turnips in two production cycles, reducing the levels of heavy metals in the soil - as indicated by Wei et al. (2016) - enabling the realization of commercial production. This way, the cost of phytoremediation (PC) will be US\$761,02

Table 7. Implementation and conduction of phytoremediation technique using turnip plants (*Brassica rapa* L.).

<b>Activity/ supplies</b>	<b>Cost (ha)</b>
Fuel	US\$11.99
Seeds	US\$61.13
Herbicides	US\$19.7
Insecticides	US\$20.63
Fungicides	US\$6.38
Fertilizers	US\$133.71
Harvest	US\$127.00
<b>Cost</b>	<b>US\$380.51</b>

Source: Adapted from NOGUEIRA; BARON, 2022a

It is noteworthy that in our hypothetical scenario, we considered that the farmer would already possess the necessary implements to carry out the phytoremediation, such as tractors, spray pumps, etc. Furthermore, we consider CETESB's management itinerary rules for contaminated areas so that there are eight procedures for the implementation of the phytoremediation technique, such as (i) preliminary assessments; (ii) confirmatory investigation; (iii) prioritization, (iv) detailed investigation; (v) risk assessment, (vi) remediation investigation; (vii) remediation project and, finally, (viii) remediation (Cetesb, 2001). Although there is no literature on the expected time to complete the phytoremediation

script in full, we can speculate a total period of two (2) years required to carry out the script and one (1) year to carry out and conduct the phytoremediation. Thus, it would take three (3) years to solve the area's problem.

Thus, the annual net profit, economic losses, and deficit calculations can be visualized in Figure 1.

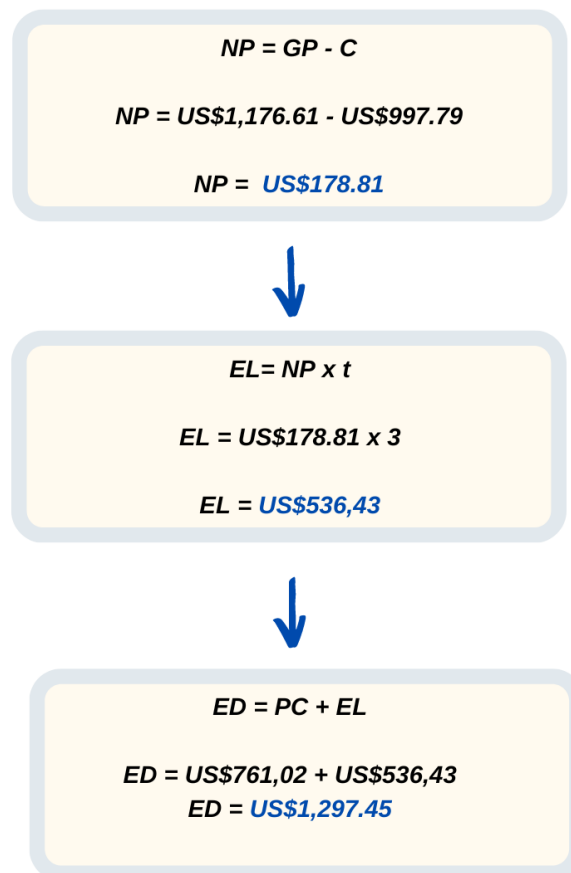


Figura 2. Calculations of annual net profit, economic losses, and economic deficit. (NP) net profit, (GP) gross profit, (C) costs, (EL) economic loss, (t) time, (ED) economic deficit, and (PC) phytoremediation costs.

Source: Adaptad from NOGUEIRA; BARON, 2022a

We state that the implementation and conduction of phytoremediation costs in agricultural areas are elevated (US\$380.51/ha ~ 213% of the value collected per hectare in a productive year of sugarcane).

## Discussion

Our hypothetical scenario allows us to state that phytoremediation implementation and conduction costs for sugarcane farmland in the following years are mandatory to remove the HMs from the soil due to deleterious effects on plants, which will indeed reduce the profits of an agriculturist. Furthermore, if this decontamination does not occur, commercial production to decrease drastically (Odoh et al., 2019; Haider et al., 2021; Wu et al., 2018).

Regarding data obtained on annual net profit and cost in sugarcane production, it is worth noticing that agricultural data obtained can be considered more significant compared to similar reports from previous years (Trevisan and Lima, 2015). Nevertheless, our Brazilian data survey was carried out during a COVID-19 (SARS-CoV-2) disease pandemic reality, which allows us to state that agricultural inputs faced high prices, mainly due to the devaluation of the national currency (Brazilian real) against the US dollar. A calculated example is a pesticide price based on commercial 2,4-D (herbicide) from January 2020 to May 2021, which presented an increase of 46% in price. In this period, fertilizers formulated were even more expressive concerning herbicides, so formulated 05-25-25 (NPK) presented a 93% increase (Iea, 2021). Thus, it is unsuitable for comparing the values found in studies carried out before the pandemic.

In addition to providing data on phytoremediation costs, our survey provides information that can help professional farmers make decisions in contaminated areas. So, as Bernardino et al. (2016) presented, phytoremediation is in whole evolution in Brazil and has excellent potential for development. However, it is worth mentioning that this work presented data referring to a specific situation; therefore, more studies must occur addressing phytoremediation in different areas so that the scope of this technique can be defined.

It is worth mentioning that, during the research carried out with farmers, we identified that the implementation and conduction of phytoremediation in agricultural production areas could be considered "easy" because, for the most part, the farmers already own the necessary tools for phytoremediation, such as tractors and agricultural implements. In this way, there is no need for more investments and no difficulty in using them.

Furthermore, we can speculate that the price per  $m^3$  of phytoremediation in the explored scenario, considering a soil depth of 0.2 m, would be US\$5.2. According to Wan et al. (2016), when carrying out a study in the People's Republic of China, the price of phytoremediation is US\$3/ $m^3$ , in addition, the benefits caused by phytoremediation are demonstrated, such as annual agricultural production function, decrease in human income and ecosystem service function.

## Conclusion

The phytoremediation technique is relatively expensive for sugarcane farms polluted with HMs. As a result, we found a one-year economic loss of US\$536.43/ha and a 3-year economic deficit of US\$1,297.02/ha. Although in our hypothetical scenario of sugarcane production, we calculated an annual net income of US\$178.81/ha, and the cost of phytoremediation in m<sup>3</sup> (considering 0.20m depth) is ~US\$5. Furthermore, phytoremediation can be considered a technique with "easy" application and conduction. Thus, we conclude that phytoremediation is a potential and easily applicable technique for the decontamination and conservation of soils polluted with HMs in Brazilian agricultural lands.

## REFERENCES

- ALI, H., KHAN, E. & ILAHI, I., 2019. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, vol. 2019, pp. 6730305. [http:// dx.doi.org/10.1155/2019/6730305](http://dx.doi.org/10.1155/2019/6730305).
- ASHRAF, S., ALI, Q., AHMAD ZAHIR, Z., ASHRAF, S. & NAEEM ASGHAR, H., 2019. Phytoremediation: environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 174, pp. 714-727. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.068>. PMID:30878808
- BASSEGIO, D. & ZANOTTO, M.D., 2020. Growth, yield, and oil content of Brassica species under Brazilian tropical conditions. *Bragantia*, vol. 79, no. 2, pp. 203- 212. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.20190411>.
- BERNARDINO, C.A.R., MAHLER, C.F., PREUSSLER, K.H. & NOVO, L.A.B., 2016. State of the art of Phytoremediation in Brazil: review and perspectives. *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 227, no. 8, pp. 272. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-016-2971-3>.
- CHEN, L., LONG, C., WANG, D. & YANG, J., 2020. Phytoremediation of cadmium (Cd) and uranium (U) contaminated soils by Brassica juncea L. enhanced with exogenous application of plant growth regulators. *Chemosphere*, vol. 242, pp. 125112. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125112>. PMID:31669993.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB, 2001. Manual de gerenciamento de áreas contaminadas. 2. ed. São Paulo: CETESB. 595 p.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB, 2020. Relatório de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no estado de São Paulo. São Paulo: CETESB.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB, 2021. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: safra 2021/22 – 3º levantamento. Brasília: Conab. Observatório Agrícola, vol. 8, no. 3.
- CREMONEZ, P.A., FEIDEN, A., CREMONEZ, F.E., DE ROSSI, E., ANTONELLI, J., NADALETI, W.C. & TOMASSONI, F., 2013. Nabo forrageiro: do cultivo a produção de

biodiesel. *Acta Iguazu*, vol. 2, no. 2, pp. 64-72.

DUFFUS, J.H., 2002. "Heavy metals" a meaningless term? (IUPAC technical report). *Pure and Applied Chemistry*, vol. 74, no. 5, pp. 793-807. <http://dx.doi.org/10.1351/pac200274050793>.

HAIDER, F.U., LIQUN, C., COULTER, J.A., CHEEMA, S.A., WU, J., ZHANG, R., WENJUN, M. & FAROOQ, M., 2021. Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 211, pp. 111887. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111887>. PMID:33450535.

HAROON, B., PING, A., PERVEZ, A., FARIDULLAH. & IRSHAD, M., 2019. Characterization of heavy metal in soils as affected by long-term irrigation with industrial wastewater. *Journal of Water Reuse and Desalination*, vol. 9, no. 1, pp. 47-56. <http://dx.doi.org/10.2166/wrd.2018.008>.

HE, Z., SHENTU, J., YANG, X., BALIGAR, V.C., ZHANG, T. & STOFFELLA, P.J., 2015. Heavy metal contamination of soils: sources, indicators, and assessment. *Journal of Environmental Indicators*, vol. 9, pp. 17-18.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA – IEA, 2021 [viewed October 2021]. Banco de dados [online]. Available from: <http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/out/Bancodedados.php>

LIU, L., LI, W., SONG, W. & GUO, M., 2018. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: principles and applicability. *The Science of the Total Environment*, vol. 633, pp. 206-219. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.161>. PMID:29573687.

MANI, D., KUMAR, C. & PATEL, N.K., 2015. Hyperaccumulator oilcake manure as an alternative for chelate-induced phytoremediation of heavy metals contaminated alluvial soils. *International Journal of Phytoremediation*, vol. 17, no. 3, pp. 256-263. <http://dx.doi.org/10.1080/15226514.2014.883497>. PMID:25397984.

NAVARRO-LEÓN, E., OVIEDO-SILVA, J., RUIZ, J.M. & BLASCO, B., 2019. Possible role of HMA4a TILLING mutants of *Brassica rapa* in cadmium phytoremediation programs. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 180, pp. 88-94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.04.081>. PMID:31078020.

NEDJIMI, B., 2021. Phytoremediation: a sustainable environmental technology for heavy metals decontamination. *SN Applied Sciences*, vol. 3, no. 3, pp. 1-19. <http://dx.doi.org/10.1007/s42452-021-04301-4>.

ODOH, C.K., ZABBEY, N., SAM, K. & EZE, C.N., 2019. Status, progress and challenges of phytoremediation: an African scenario. *Journal of Environmental Management*, vol. 237, pp. 365-378. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.090>. PMID:30818239.

PINDYCK, R. & RUBINFELD, D., 2013. *Microeconomia*. 8th ed. São Paulo: Pearson.

PRABAKARAN, K., LI, J., ANANDKUMAR, A., LENG, Z., ZOU, C.B. & DU, D., 2019. Managing environmental contamination through phytoremediation by invasive plants: a review. *Ecological Engineering*, vol. 138, pp. 28-37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.07.002>.

RAMBORGER, B.P., GOMES PAZ, M.E., KIELING, K.M.C., SIGAL CARRIÇO, M.R., PAULA GOLLINO, G., COSTA, M.T., RIBEIRO, V.B., FOLMER, V., GASPAROTTO

- DENARDIN, E.L., JESUS SOARES, J. & ROEHRS, R., 2021. Toxicological parameters of aqueous residue after using *Plectranthus neochilus* for 2,4-D phytoremediation. *Chemosphere*, vol. 270, pp. 128638. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128638>. PMID:33268092.
- RIZWAN, M., ALI, S., ZIA UR REHMAN, M., RINKLEBE, J., TSANG, D.C.W., BASHIR, A., MAQBOOL, A., TACK, F.M.G. & OK, Y.S., 2018. Cadmium phytoremediation potential of Brassica crop species: a review. *The Science of the Total Environment*, vol. 631–632, pp. 1175-1191. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.104>. PMID:29727943.
- ROSTAMI, S. & AZHDARPOOR, A., 2019. The application of plant growth regulators to improve phytoremediation of contaminated soils: a review. *Chemosphere*, vol. 220, pp. 818-827. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.203>. PMID:30612051.
- RUBIO, M., MERA, M.F., CAZÓN, S., RUBIO, M.E. & PÉREZ, C.A., 2020. SR micro-XRF to study Pb diffusion using a one-dimensional geometric model in leaves of *Brassica napus* for phytoremediation. *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 167, pp. 1-5. <http://dx.doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.04.041>.
- SALTON, J.C., PITOL, C., SIEDE, P.K., HERMANI, L.C. & ENDRES, V.C., 1995. Nabo Forrageiro: sistemas de manejo. Dourados: EMBRAPA-CPAO. SHAH, V. & DAVEREY, A., 2020. Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil. *Environmental Technology and Innovation*, vol. 18, pp. 100774. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2020.100774>.
- SOARES, T.F.S.N., DIAS, D.C.F., OLIVEIRA, A.M.S., RIBEIRO, D.M. & DIAS, L.A.D.S., 2020. Exogenous brassinosteroids increase lead stress tolerance in seed germination and seedling growth of *Brassica juncea* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 193, pp. 110296. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110296>. PMID:32092579.
- TAVARES, S.R. L., 2009. Fitorremediação em solo e água de áreas contaminadas por metais pesados provenientes da disposição de resíduos perigosos. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro. 415 p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil.
- TREVISAN, J.E., & LIMA, N.C., 2015. Composição do custo de produção da cana-de-açúcar na região do triângulo mineiro. In: Congresso Nacional de Excelência em Gestão, 3-14 August 2015. Rio de Janeiro: CNEG. pp. 1–19.
- WAN, X., LEI, M. & CHEN, T., 2016. Cost–benefit calculation of phytoremediation technology for heavy- metal-contaminated soil. *The Science of the Total Environment*, vol. 563–564, pp. 796-802. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.080>. PMID:26765508.
- WŁÓKA, D., PLACEK, A., SMOL, M., RORAT, A., HUTCHISON, D. & KACPRZAK, M., 2019. The efficiency and economic aspects of phytoremediation technology using *Phalaris arundinacea* L. and *Brassica napus* L. combined with compost and nano SiO<sub>2</sub> fertilization for the removal of PAH's from soil. *Journal of Environmental Management*, vol. 234, pp. 311-319. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.113>. PMID:30634123.
- WU, W., WU, Y., WU, J., LIU, X., CHEN, X., CAI, X. & YU, S., 2018. Regional risk assessment of trace elements in farmland soils associated with improper e-waste recycling activities in Southern China. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 192, pp. 112-119. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.06.009>.
- YAN, A., WANG, Y., TAN, S., YASOF, M., GHOSH, S. & CHEN, Z., 2020.



Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land. *Frontiers of Plant Science*, vol. 11, pp. 359. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2020.00359>. PMID:32425957.

ZHANG, J., CAO, X., YAO, Z., LIN, Q., YAN, B., CUI, X., HE, Z., YANG, X., WANG, C.H. & CHEN, G., 2021. Phytoremediation of Cd-contaminated farmland soil via various *Sedum alfredii*-oilseed rape cropping systems: efficiency comparison and cost-benefit analysis. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 419, pp. 126489. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126489>. PMID:34216961.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao verificarmos os resultados encontrados em nosso cenário hipotético, rejeitamos a nossa hipótese de nulidade ( $H_0$ ) e, conseqüentemente, aceitamos a hipótese alternativa ( $H_1$ ). Ou seja, consideraremos que a fitorremediação conduzida em uma área de produção contaminada por MPs é potencialmente benéfica para descontaminação de metais pesados em área agrícola. Ademais, nossa proposta de estudo foi desenvolvida durante o período de restrições presenciais impostas pelas autoridades públicas de saúde (esferas municipais e estaduais e da própria instituição de ensino superior – UFSCar) por conta do cenário pandêmico da COVID-19. Diante disso, tal situação resultou em alterações no percurso metodológico/hipóteses a serem testadas, pois, inicialmente, realizaríamos metodologias e análises laboratoriais. “Enfrentar” tal obstáculo (distanciamento das atividades presenciais na Universidade) e realizar o presente estudo foram desafiadores e, a partir de nossa resiliência e determinação, superamos as dificuldades e avançamos com a redação de um manuscrito técnico de revisão, em língua inglesa, de modo que o mesmo foi aceito e publicado em formato de artigo em periódico científico. Por fim, acreditamos que a referida publicação contribuiu com *insights* em uma área de estudo tão escassa de informações no cenário brasileiro. Além disso, também acreditamos que seja necessária a realização de novos estudos que explorem os dados de produtividade de outras espécies vegetais de interesse econômico em situações de áreas agrícolas com a presença de contaminantes ambientais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALI, Hazrat; KHAN, Ezzat. What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term ‘heavy metals’—proposal of a comprehensive definition. **Toxicological and Environmental Chemistry**, v. 100, n. 1, p. 6–19, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02772248.2017.1413652>.
- AZZI, Valérie *et al.* Trace Metals in Phosphate Fertilizers Used in Eastern Mediterranean Countries. **Clean - Soil, Air, Water**, v. 45, n. 1, 2017.
- BASSEGIO, Doglas; JANOTTO, Maurício Dutra. Growth , yield , and oil content of Brassica species under Brazilian tropical conditions. **Bragantia**, v. 79, p. 203–212, 2020.
- BORTOLOTI, Gabriel Antonio; BARON, Daniel. Phytoremediation of toxic heavy metals by Brassica plants: A biochemical and physiological approach. **Environmental Advances**, v. 8, p. 100204, 2022.
- BRIFFA, Jessica; SINAGRA, Emmanuel; BLUNDELL, Renald. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. **Heliyon**, v. 6, n. 9, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>.
- CAMESELLE, Claudio; GOUVEIA, Susana. Phytoremediation of mixed contaminated soil enhanced with electric current. **Journal of Hazardous Materials**, v. 361, p. 95–102, 2019.
- CHEN, Ching Ho; CHIOU, Ing Jia. Remediation of heavy metal-contaminated farm soil using turnover and attenuation method guided with a sustainable management framework. **Environmental Engineering Science**, v. 25, n. 1, p. 11–32, 2008.
- CREMONEZ, Paulo André *et al.* Nabo Forrageiro: Do Cultivo a Produção De Biodiesel. **Acta Iguazu**, v. 2, n. 2, p. 64–72, 2013.
- CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **RESOLUÇÃO Nº 420, DE 28 DE DEZEMBRO DE 2009**. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.
- DA SILVA, Isley Cristiellem Bicalho *et al.* Potential phytoremediation of Pampa biome native and invasive grass species cohabiting vineyards contaminated with Cu in Southern Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 56, p. 85376–85388, 2022.
- DAY, Scott Jason; MORSE, Gwen Kinglsey; LESTER, John. N. The cost effectiveness of contaminated land remediation strategies. **Science of The Total Environment**, v. 201, n. 2, p. 125–136, 1997.
- DE LIMA, Daniel Vinícius Neves *et al.* Seasonal variation in the phytoremediation by *Pontederia crassipes* (Mart) Solms (water hyacinth) and its associated microbiota. **Ecological Engineering**, v. 183, p. 106744, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857422002051>.
- DU, Juan *et al.* Screening of Chinese mustard (*Brassica juncea* L.) cultivars for the phytoremediation of Cd and Zn based on the plant physiological mechanisms. **Environmental Pollution**, v. 261, p. 114213, 2020.

DUFFUS, John H. “heavy metals” - A meaningless term? (IUPAC technical report). **Pure and Applied Chemistry**, v. 74, n. 5, p. 793–807, 2002.

ENGWA, Godwill Azeh *et al.* Mechanism and Health Effects of Heavy Metal Toxicity in Humans. **Poisoning in the modern world-new tricks for an old dog**, v. 10, p. 70–90, 2019. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1039/C7RA00172J%0Ahttps://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.12.014>.

EPSTEIN, Emanuel; BLOOM, Arnold J. **Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives**. 2nd Revised. [S. l.]: Sinauer Associates Is an Imprint of Oxford University Press, 2004.

FADIGAS, F. S. *et al.* Concentrações naturais de metais pesados em algumas classes de solos brasileiros. **Bragantia**, Campinas, v. 2, p. 151–159, 2002.

FRANCO, Tainara Ferrugem. **Metais Pesados em Solos de Áreas de Produção**. 2019. 68 f. - UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO, 2019.

HÄNSCH, Robert; MENDEL, Ralf. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). **Current Opinion in Plant Biology**, v. 12, n. 3, p. 259–266, 2009.

HAROON, Bushra *et al.* Characterization of heavy metal in soils as affected by long-term irrigation with industrial wastewater. **Journal of Water Reuse and Desalination**, v. 9, n. 1, p. 47–56, 2019.

HENA, Sufia; GUTIERREZ, Leonardo; CROUÉ, Jean Philippe. Removal of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) from wastewater using microalgae: A review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 403, p. 124041, 2021.

INOUE, Yasushi; KATAYAMA, Arata. Two-scale evaluation of remediation technologies for a contaminated site by applying economic input–output life cycle assessment: Risk–cost, risk–energy consumption and risk–CO<sub>2</sub> emission. **Journal of Hazardous Materials**, v. 192, n. 3, p. 1234–1242, 2011.

JAMLA, Monica *et al.* Omics approaches for understanding heavy metal responses and tolerance in plants. **Current Plant Biology**, v. 27, p. 100213, 2021.

JASWAL, Tamanna; GUPTA, Jasmine. A review on the toxicity of silver nanoparticles on human health. **Materials Today: Proceedings**, 2021.

KUMAR, Vinod; PANDITA, Shevita; SETIA, Raj. A meta-analysis of potential ecological risk evaluation of heavy metals in sediments and soils. **Gondwana Research**, v. 103, p. 487–501, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.10.028>.

KUMARI, Shivani *et al.* Recent developments in environmental mercury bioremediation and its toxicity: A review. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 13, p. 100283, 2020.

LIN, Hai *et al.* Technologies for removing heavy metal from contaminated soils on farmland: A review. **Chemosphere**, v. 305, p. 135457, 2022.

MAATHUIS, Frans JM. Physiological functions of mineral macronutrients. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 12, n. 3, p. 250–258, 2009.

NAVARRO-LEÓN, Eloy *et al.* Possible role of HMA4a TILLING mutants of *Brassica rapa* in cadmium phytoremediation programs. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 180, p. 88–94, 2019.

NEDJIMI, Bouzid. Phytoremediation: a sustainable environmental technology for heavy metals decontamination. **SN Applied Sciences**, v. 3, n. 3, p. 1–19, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04301-4>.

NOGUEIRA, Samuel Baldin; BARON, Daniel. **Fitorremediação: Ferramenta biotecnológica para o manejo sustentável de metais pesados em solos cultivados**. São Carlos: UFSCar/CPOI, 2022b.

NOGUEIRA, Samuel Baldin; BARON, Daniel. Phytoremediation : a viable technique in sugarcane farm heavy metals contaminated. **Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente**, v. 12, p. e12213, 2022a.

ODOH, Chuks Kenneth *et al.* Status, progress and challenges of phytoremediation - An African scenario. **Journal of Environmental Management**, v. 237, p. 365–378, 2019.

PARSEH, Iman *et al.* Phytoremediation of benzene vapors from indoor air by *Schefflera arboricola* and *Spathiphyllum wallisii* plants. **Atmospheric Pollution Research**, v. 9, n. 6, p. 1083–1087, 2018.

PRABAKARAN, Kirk. *et al.* Managing environmental contamination through phytoremediation by invasive plants: A review. **Ecological Engineering**, v. 138, p. 28–37, 2019.

PRIYADHARSHINI, Stephen Dayana *et al.* Phycoremediation of wastewater for pollutant removal: A green approach to environmental protection and long-term remediation. **Environmental Pollution**, v. 290, p. 117989, 2021.

RAZA, Ali *et al.* Advances in “Omics” Approaches for Improving Toxic Metals/Metalloids Tolerance in Plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 1–28, 2022.

REBELLO, Sharrel *et al.* Cleaner technologies to combat heavy metal toxicity. **Journal of Environmental Management**, v. 296, p. 113231, 2021.

RIBEIRO DE SOUZA, Sarah Caroline *et al.* Lead tolerance and phytoremediation potential of Brazilian leguminous tree species at the seedling stage. **Journal of Environmental Management**, v. 110, p. 299–307, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.06.015>.

RUBIO, M. *et al.* SR micro-XRF to study Pb diffusion using a one-dimensional geometric model in leaves of *Brassica napus* for phytoremediation. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 167, p. 1–5, 2020.

SALTON, Julio César *et al.* NABO FORRAGEIRO: Sistemas de Manejo. **EMBRAPA-CPAO**, v. 7, p. 23, 1995.

SCHNOOR, Jerald L. Phytoremediation: Technology Evaluation Report. **Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center**, p. 43, 1997.

SHAH, Vijendra; DAVEREY, Achlesh. Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil. **Environmental Technology and Innovation**, v. 18, p. 100774, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100774>.

SHEORAN, Vimla; SHEORAN, Attar Singh; POONIA, Poonam. Factors Affecting Phytoextraction: A Review. **Pedosphere**, v. 26, n. 2, p. 148–166, 2016.

SUMAN, Jachym *et al.* Phytoextraction of heavy metals: A promising tool for clean-up of polluted environment?. **Frontiers in Plant Science**, v. 871, 2018.

TAVARES, Sílvio Roberto de Lucena. **Fitorremediação em solo e água de áreas contaminadas por metais pesados provenientes da disposição de resíduos perigosos**. 2009. 415 f. 2009.

UR, Shafeeq *et al.* Ecotoxicology and Environmental Safety State-of-the-art OMICS strategies against toxic effects of heavy metals in plants : A review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 242, n. May, p. 113952, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113952>.

WAN, Xiaoming; LEI, Mei; CHEN, Tongbin. Cost–benefit calculation of phytoremediation technology for heavy-metal-contaminated soil. **Science of the Total Environment**, v. 563–564, p. 796–802, 2016.

WANG, Xiaofei *et al.* Short-term phytoremediation effect of sugarcane for contaminated farmland on heavy metal accumulation ability along the Huanjiang River in Guangxi, China. **Advances in Engineering Research**, v. 141, p. 395–407, 2017.

YADAV, Mamata Si. *et al.* Prioritizing components of package of integrated pest management in Indian mustard (*Brassica juncea*) in India for better economic benefit. **Crop Protection**, v. 120, n. October 2018, p. 21–29, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.02.008>.