

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta tese
será disponibilizado somente a partir
de 09/09/2026.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**LODO DE ESGOTO: EPT E A FERTILIDADE RESIDUAL DO
SOLO COM A RESPOSTA DA MAMONEIRA AOS VINTE E
SEIS ANOS DO EXPERIMENTO**

Orgelio Augusto de Sene
Engenheiro agrônomo

2025

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**LODO DE ESGOTO: EPT E A FERTILIDADE RESIDUAL DO
SOLO COM A RESPOSTA DA MAMONEIRA AOS VINTE E
SEIS ANOS DO EXPERIMENTO**

**Discente: Orgelio Augusto de Sene
Orientador: Prof. Dr. Wanderley José de Melo**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de
Jaboticabal, como parte da exigência para a
obtenção do título de Doutor em *Ciência do solo*

2025

S475l

Sene, Orgelio Augusto de

Lodo de esgoto: EPT e a fertilidade residual do solo com a resposta da mamoneira aos vinte e seis anos do experimento / Orgelio Augusto de Sene. -- Jaboticabal, 2025

126 p. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Wanderley José de Melo

1. Fertilidade do solo. 2. Ricinus communis L.. 3. Poluição ambiental por metais pesados. 4. Fitoextração de metais pesados. 5. Bioacumulação de metais pesados. I. Título.

POTENCIAIS IMPACTOS DA PESQUISA

O lodo de esgoto é potencial adubo de plantas dado teor físico-químico, mas a longo prazo essa estratégia poderia ser ineficaz com a presença dos elementos potencialmente tóxicos ao ecossistema. No contexto da economia circular, elevamos a segurança ambiental investigando a sinergia do arranjo solo/planta após 26 anos de aplicações deste resíduo.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

Sewage sludge is a potential plant fertilizer given its physical and chemical content, but in the long term this strategy could be ineffective due to the presence of elements that are potentially toxic to the ecosystem. In the context of the circular economy, we have increased environmental safety by investigating the synergy of the soil/plant arrangement after 26 years of applying this waste.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: LODO DE ESGOTO: EPT E A FERTILIDADE RESIDUAL DO SOLO COM A RESPOSTA DA MAMONEIRA AOS VINTE E SEIS ANOS DO EXPERIMENTO

AUTOR: ORGELIO AUGUSTO DE SENE

ORIENTADOR: WANDERLEY JOSÉ DE MELO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:



Documento assinado digitalmente

WANDERLEY JOSÉ DE MELO

Data: 25/09/2025 09:07:27-0000

Verifique em <https://validar.jb.gov.br/>

Prof. Dr. WANDERLEY JOSÉ DE MELO (Participação Virtual)
Departamento de Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal



Documento assinado digitalmente

CÁSSIO HAMILTON ABREU JÚNIOR

Data: 25/09/2025 08:05:45-0000

Verifique em <https://validar.jb.gov.br/>

Prof. Dr. CÁSSIO HAMILTON ABREU-JÚNIOR (Participação Virtual)
Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas, Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas / Universidade de São Paulo CENA/USP - Piracicaba/SP



Documento assinado digitalmente

THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA

Data: 25/09/2025 15:14:00-0000

Verifique em <https://validar.jb.gov.br/>

Prof. Dr. THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA (Participação Virtual)
Departamento de Ciência do Solo / FCAV UNESP Jaboticabal



Documento assinado digitalmente

ALINE RENÉE COSCIONE

Data: 25/09/2025 10:08:00-0000

Verifique em <https://validar.jb.gov.br/>

Pesquisadora Dra. ALINE RENÉE COSCIONE (Participação Virtual)
Centro de Solos e Recursos Ambientais / Instituto Agrônomo (IAC) - Campinas/SP



Documento assinado digitalmente

JÁIRO OSVALDO CAZETTA

Data: 25/09/2025 09:54:40-0000

Verifique em <https://validar.jb.gov.br/>

Prof. Dr. JÁIRO OSVALDO CAZETTA (Participação Virtual)
Departamento de Biotecnologia Agropecuária e Ambiental / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 09 de setembro de 2025

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

ORGELIO AUGUSTO DE SENE, nasceu no distrito do Panema, município de Santa Mariana/PR em 24 de março de 1971, foi “bóia fria” e ajudante de pedreiro (1988), ensino básico no Colégio Estadual Dr. Francisco Paula Landi, distrito do Panema (1987), e médio técnico em contabilidade do Colégio Estadual Joaquim M^a. Machado de Assis em Santa Mariana/PR, vindo a concluir o ensino médio na Escola Estadual Pública Prof. André R. Alckmin em suplência na cidade de Sumaré/SP (1992). cursou Economia pela Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUCCAMP) até o sexto período (1996). Foi professor estagiário na Escola Pública profa. Marianina R.Moraes em Sumaré/SP. Também foi vigilante patrimonial, vendedor externo, técnico de enfermagem e autônomo na fabricação de estruturas metálicas na Região Metropolitana de Campinas até meados de 2012, ingressou através do SISU na Universidade Federal do Maranhão no curso de Agronomia integral, na cidade de Chapadinha/MA. De 2013 à 2018 conciliou trabalho e estudos onde produzia olerícolas e comercializava na feira livre. Além disso foi monitor das disciplinas de Administração Rural, Economia Rural e Comercialização Agrícola. Realizou pesquisas nos Laboratórios de Química Orgânica e Microbiologia Agrícola, em seu Trabalho de Conclusão de Curso estudou nematologia na cultura da soja. Entre os anos de 2018 e 2020 cursou o Mestrado em Ciência Animal pelo Programa de Pós-graduação em Ciência Animal da UFMA com bolsa FAPEMA trabalhando com a ensilagem de genótipos de soja com cana-de-açúcar do Leste maranhense. Os resultados foram publicados na revista científica Nature-Scientific Reports, até aquela ocasião foi a pesquisa de maior impacto já publicada naquele programa, com Qualis A-1. Em 2021, foi admitido no doutorado junto ao Programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo) da FCAV/Unesp com bolsa CAPES, sendo vinculado ao Departamento de Biotecnologia Agropecuária e Ambiental, desenvolvendo pesquisas com lodo de esgoto na cultura da mamoneira. Em 2025 foi admitido em caráter temporário como docente das disciplinas de Química Orgânica, Fitotecnia, topografia do curso de agronomia da Universidade Estadual do Mato Grosso/Unemat.

...Mas a dúvida é o preço da pureza e é inútil ter certeza...
"Sartre e Gessinger"



Dedico e ofereço

Aos meus filhos, Álvaro Guilherme e Ana Julia, aos cidadãos pagadores de impostos, como minha contrapartida pelos recursos públicos gastos com minha formação.

AGRADECIMENTOS

Ao Grande Arquiteto do Universo, as pedras angulares e as de tropeço pois ambas fazem parte da construção de um mesmo templo.

Agradecido aos meus queridos filhos, Álvaro Guilherme e Ana Julia, pois na longa trajetória de estudos, se fiquei distante, espero ser compreendido.

Ao meu orientador Prof. Dr. Wanderley José de Melo que é um exemplo vivo de vitória e superação de obstáculos da vida.

Aos docentes Prof. Dr. Cassio Hamilton e Prof. Dr. Thiago Nogueira e Profa. Dra^a Aline Conscione pela sensibilidade e apoio oferecido durante a fase de aprimoramento desta tese.

Ao Prof. Dr. Jairo Cazetta e Profa. Dra^a. Mara Pessôa e equipes dos laboratórios de química analítica e fertilidade do solo pelo apoio durante as análises de parte dos materiais.

Ao Prof. Dr. Pedro Aguiar do Departamento de Biologia da FCAV/Unesp e a Dra^a. Valeria Melo respectivamente pelo apoio com equipamento e sugestão quanto a escolha da cultura.

Ao colega de curso Daniel Carlos, pela boa vontade em auxiliar em diferentes momentos que necessitei.

Aos colegas, Cintia e Danilo pois foram os primeiros que me conduziram no interior do Campus sendo a Cintia que viabilizou o local com internet para minha primeira aula.

Aos discentes Giovana, Paulo Sergio e a colega Silvana pela colaboração prática no experimento em campo.

Aos colegas da cozinha do restaurante universitário especialmente ao senhor Oswaldo que sempre escolhia os melhores e suculentos pedaços de carne para a minha bandeja. Finalmente a todos os docentes e colaboradores da FCAV/Unesp, ao PPGA-CS pela minha admissão no curso, especialmente pela oportunidade de qualificação profissional com bolsa de estudos da Capes. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	15
2 Hipóteses	18
3 Objetivos	18
3.1 Geral	18
3.2 Objetivos específicos	18
4 REVISÃO DE LITERATURA	19
4.1 A cultura da mamoneira.....	19
4.2 Lodo de esgoto.....	22
4.3 Fertilidade de Solo.....	24
4.4 Acidez do solo	25
4.5 Poluição do solo por metais pesados.....	27
4.6 Fitoextração de metais pesados	31
4.7 A mamoneira como fitoextratora de metais pesados	32
4.8 Bioconcentração e transferência de MP.....	33
5 MATERIAL E MÉTODOS	34
5.1 A área experimental	34
5.2 Delineamento experimental e tratamentos.....	35
5.3 Histórico do experimento.....	35
5.4 Amostragem e preparo das amostras de solo antes da cultura	42
5.4.1 Análises de fertilidade e metais pesados do solo	42
5.4.2 Preparo do solo antes da semeadura.....	43
5.4.3 Semeadura da cultura	44
5.4.4 Tratos culturais	44
5.5 Amostragem das plantas	44

5.5.1 Preparo das amostras de plantas	45
5.6 Determinação e quantificação dos MP nos tecidos.....	46
5.7 Análise estatísticas.....	46
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
6.1 Análise granulométrica do solo	47
6.2 Potencial hidrogeniônico	48
6.3 Matéria orgânica do solo	51
6.4 Fósforo no solo.....	52
6.5 Potássio, Cálcio e Magnésio no solo.....	54
6.6 Enxofre no solo	59
6.7 Acidez do solo	60
7 Metais pesados e micronutrientes no solo	62
7.1 Extrações em DTPA.....	62
7.1.1 Boro no solo em Azometina-H	66
7.2 Extrações em HNO ₃ – Método EPA 3051	66
8 Fase vegetativa	69
8.1 Plantas	69
8.2 Morfologia das plantas aos 53 DAS	69
8.3 Teor foliar de macronutrientes e micronutrientes aos 53 DAS	72
8.4 Micronutrientes nos tecidos 53 DAS	74
8.4.1 Zinco	74
8.4.2 Manganês	75
8.4.3 Ferro	76
8.4.4 Cobre	77
9 Fase reprodutiva	78
9.1 Concentração de MP nas plantas	82

9.1.1 Cobre nos tecidos	82
9.1.2 Níquel nos tecidos	83
9.1.3 Chumbo nos tecidos	84
9.2 Fator de bioacumulação e fator de transferência	85
10 CONCLUSÕES	87
REFERÊNCIAS	88
MATERIAL SUPLEMENTAR.....	114

LODO DE ESGOTO: EPT E A FERTILIDADE RESISUAL DO SOLO COM A RESPOSTA DA MAMONEIRA AOS VINTE E SEIS ANOS DO EXPERIMENTO

RESUMO – Através de dois protocolos distintos objetivou-se avaliar os teores de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn na camada entre 0 e 0,20m e as alterações químicas no solo decorrentes das aplicações de doses acumuladas de LE 110, 220 e 440 t/ha (base seca) do LE por 26 anos e um tratamento controle que recebeu apenas adubação inorgânica. Também foram obtidos os quocientes de bioacumulação (FBC) e distribuição (FT) dos MP do Cu, Ni e Pb nos tecidos da planta. O experimento foi conduzido a campo, em um Latossolo Vermelho Eutroférico típico (LVe) de textura argilosa, adotou-se o delineamento experimental em blocos casualizados, com quatro tratamentos e cinco repetições. Em amostras de solo coletadas na camada de 0 a 0,20m de profundidade, avaliou-se a fertilidade do solo e os teores de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn pelos protocolos EPA 3051 e DTPA. Aos 53 DAS foram sinalizadas e amostradas 12 plantas por parcela e mensuradas, altura do primeiro racemo, diâmetro do colmo, área foliar, bem como os macronutrientes e micronutrientes da folha diagnóstico. Aos 113 DAS, as 12 plantas sinalizadas foram colhidas, separadas as partes para a obtenção dos teores de Cu, Ni e Pb e calculados os fatores de bioacumulação (FBC) e transferência (FT) dos MP. A fertilidade do solo encontrada se adequou aos esperados em solos distróficos, o teor de argilas correspondeu a solos de textura média, apesar da área experimental ser de textura argilosa. As aplicações do LE não elevaram as bases e a matéria orgânica no solo (MOS), a acidez do solo aumentou a partir das aplicações de 110 t/ha, no entanto o teor de P foi considerado muito alto. Os teores de Pb e Cu no solo superaram os valores orientadores CONAMA e CETESB 125/21, Pb > valor de investigação (VI) e Cu > valor referencial de qualidade do solo (VRQ), os teores de Cd, Cr e Ni estiveram bem próximos ao limite aceitável do VRQ CETESB 125/2. Apenas os teores de Zn diferiram em doses a partir de 220 t/ha, nesta dose, o seu teor no solo foi > que o VRQ e na dose de 440 t/ha superou o VP. Nas plantas não foram verificados sintomas de toxicidade por MP. Exceto ao K⁺ os teores de macronutrientes e micronutrientes nos tecidos estiveram adequados para a cultura produzindo acima da média nacional, apesar do solo ser classificado na CLASSE III, onde pelo menos um MP atingiu o VI da resolução CONAMA 498/20. Em todos os tratamentos e elementos investigados FBC e FT >1,0 provaram a eficácia de *Ricinus Communis* L.; na descontaminação de ambientes poluídos por MP, corroborando com diferentes estudos realizados. Os resultados mostraram que apesar das aplicações do LE por mais de 26 anos, os teores de MP não infringiram as normas ambientais para áreas agrícola, o arranjo LE com a mamoneira pode trazer resultados socio-economicos e maior seguridade para a reciclagem do LE como fertilizante de plantas.

Palavras-chave: Bioacumulação de metal pesado, Biossólido, Fitoextração, Transferência de metal pesado, Poluição ambiental, *Ricinus communis* L

SEWAGE SLUDGE: PTE AND THE RESIDUAL FERTILITY OF THE SOIL IN THE RESPONSE OF THE CASTOR BEAN PLANT AT TWENTY-SIX YEARS OF THE EXPERIMENT

ABSTRACT - Through two distinct protocols, the objective was to evaluate the levels of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn in the layer between 0 and 0.20 m and the chemical changes in the soil resulting from the application of accumulated doses of LE 110, 220, and 440 t/ha (dry basis) of LE for 26 years and a control treatment that received only inorganic fertilization. The bioaccumulation (FBC) and distribution (FT) quotients of Cu, Ni, and Pb MP in plant tissues were also obtained. The experiment was conducted in the field, in a typical Eutrophic Red Latosol (LVe) with a clayey texture, adopting a randomized block experimental design with four treatments and five replicates. Soil samples collected from a depth of 0 to 0.20 m were used to evaluate soil fertility and the levels of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn using the EPA 3051 and DTPA protocols. At 53 DAS, 12 plants per plot were marked and sampled, and the height of the first raceme, culm diameter, leaf area, as well as the macronutrients and micronutrients of the diagnostic leaf were measured. At 113 DAS, the 12 marked plants were harvested, the parts were separated to obtain the Cu, Ni, and Pb contents, and the bioaccumulation (FBC) and transfer (FT) factors of the MP were calculated. The soil fertility found was in line with that expected in dystrophic soils, and the clay content corresponded to medium-textured soils, despite the experimental area being clayey in texture. The LE applications did not increase the bases and organic matter in the soil (MOS), and soil acidity increased from applications of 110 t/ha, however, the P content was considered very high. The Pb and Cu contents in the soil exceeded the CONAMA and CETESB 125/21 guideline values, Pb > investigation value (VI) and Cu > soil quality reference value (VRQ), while the Cd, Cr, and Ni contents were very close to the acceptable limit of VRQ CETESB 125/2. Only the Zn levels differed at doses above 220 t/ha. At this dose, its level in the soil was > than the VRQ, and at a dose of 440 t/ha, it exceeded the VP. No symptoms of MP toxicity were observed in the plants. Except for K⁺, the macronutrient and micronutrient levels in the tissues were adequate for the crop, producing above the national average, despite the soil being classified as CLASS III, where at least one MP reached the VI of CONAMA resolution 498/20. In all treatments and elements investigated, FBC and FT >1.0 proved the effectiveness of *Ricinus Communis* L. in decontaminating environments polluted by MP, corroborating different studies carried out. The results showed that despite LE applications for over 26 years, PM levels did not violate environmental standards for agricultural areas. The LE arrangement with castor beans can bring socio-economic results and greater security for LE recycling as a plant fertilizer.

Keywords: Heavy metal bioaccumulation, Biosolids, Phytoextraction, Heavy metal transfer, Environmental pollution, *Ricinus communis* L

1 INTRODUÇÃO

O lodo de esgoto (LE) é um subproduto das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). De acordo com Martins et al. (2021), este resíduo corresponde em cerca de 1% a 2% do volume total de esgotos tratados por uma ETE, mas isso varia conforme a tecnologia empregada.

O LE apresenta em sua composição aproximadamente 40% de matéria orgânica (MO), 4% de N e 2% de fósforo (P), (Bettiol e Camargo (2006) e Silva et al. (2020), e os teores de potássio (K) em média, a 0,4% da sua massa seca (Balkrishna et al. 2024).

Diversos estudos sugerem que além do N, P e K, o LE possui teores relevantes de micronutrientes essenciais: B, Cu, Fe, Mn e Zn, podendo substituir os fertilizantes inorgânicos (Silva et al. 2020; Prates et al. 2022).

Dentro do contexto de reciclagem, a utilização do LE como fertilizante possibilita o aumento da lucratividade agrícola (Sugurbekova et al., 2023).

Em diversos países a reciclagem do LE na agricultura diretamente ao solo ou na forma de compostagem, já é comum: França e Alemanha utilizam mais de 30%, enquanto os Estados Unidos da América reutilizam mais de 60% do LE produzido, com bons resultados (UFMG, 2018).

No Brasil menos de 5% do LE é reutilizado (ABCON/SINDCON, 2023). Segundo Pedrosa et al. (2010), apenas 1% do lodo seco foi destinado à agricultura, observamos o aumento gradual, no entanto até o ano de 2022 apenas 14 % do LE produzido no Brasil foi destinado a agricultura, embora haja produção significativa e expectativa de aumento (Sanepar, 2022).

Essa baixa taxa de reaproveitamento é preocupante, considerando que atualmente a agricultura brasileira depende de importar cerca de 85% dos fertilizantes consumidos na agricultura (Nunes et al., 2025).

No Brasil a maior parte das reservas de fosfato são de origem ígnea e a nível global é prevista a estagnação da oferta de fertilizantes fosfatados a médio e longo prazo (IFA e ARGUS, 2023).

As reservas brasileiras de Potássio já se encontram em colapso (PNF, 2021).

A reciclagem do LE em práticas agronômicas pode representar uma alternativa sustentável dentro da economia circular, além de contribuir em parte para diminuir os custos com adubação de culturas agrícolas.

No entanto, seu uso deve ser cauteloso. Andrade et al. (2014) alertaram que áreas agrícolas que recebem LE sistematicamente podem incorrer em poluição ambiental em curto, médio ou longo prazo. Por isso, é essencial seguir as normas dos órgãos ambientais nos diferentes entes federados que gerenciam esta atividade, a exemplo do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo (CETESB), evitando a degradação química do solo, águas e do ecossistema como um todo.

A composição físico-química do LE, conforme Iticescu et al. (2021), inclui também os metais pesados (MP). Seu uso sem acompanhamento técnico viola a Lei Federal nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Diversas estratégias têm sido estudadas para evitar que os teores de MP no solo ultrapassem os limites orientadores estabelecidos pelos órgãos ambientais.

Uma dessas estratégias é a fitoextração, que consiste no uso de plantas para remover contaminantes do solo. Segundo Pang et al. (2025), essa técnica apresenta vantagens sobre outras tecnologias, como menor custo e menor demanda energética.

Estudos demonstram que a fitoextração consegue remover quantidades significativas de MP sem comprometer a fertilidade do solo ou as comunidades microbianas. Além disso, é uma tecnologia acessível, que não requer equipamentos sofisticados (Yang et al., 2022; Yu et al., 2024).

Na Índia, Kumar et al. (2021) obtiveram bons resultados utilizando plantas de mamona para fitoextração em áreas contaminadas por resíduos de destilarias de etanol.

A mamoneira apresenta raízes especializadas que contribuem na descompactação e na aeração do solo com o aporte de MO em subsuperfície. Também é matéria prima para produção de energia e subprodutos de alto valor agregado a exemplo da torta de mamona que Segundo Checheto et al. (2010) contém 45/07/11 de N, P e K, finalmente os restos culturais deixam no solo 41/10/46 quilogramas de N, P e K por tonelada de biomassa.

Estudos de Siqueira et al. (2012) com a cultivar de mamona Lyra precoce produziram um saldo energético de 16 mil MJ/ha de energia, sendo segundo o autor equivalente a 415 litros de diesel por ha.

Além destas vantagens, todos os manejos são mecanizados utilizando o mesmo pacote tecnológico das principais culturas, também sendo considerada como uma alternativa para a segunda safra.

Dada sua multifuncionalidade, a mamoneira pode contribuir significativamente para a reciclagem segura do LE, aliando segurança ambiental e rentabilidade agrícola. Este estudo pretende investigar o uso de *Ricinus communis* L. como ferramenta mitigadora da poluição por MP, analisando a bioacumulação e distribuição dos metais Cu, Ni e Pb nas diferentes partes da planta. O objetivo é verificar seu potencial fitoextrator para futuras aplicações.

Embora existam vários estudos publicados, nem todos contemplam o ciclo completo da cultura em condições de campo. Pesquisas de longo prazo, especialmente com mais de 20 anos de duração, são fundamentais para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para o setor agropecuário e ambiental.

Neste contexto, este estudo propões investigar a fertilidade e os teores de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn residuais entre 0 e 0,20m de profundidade no solo, decorrentes das doses acumuladas de 110, 220 e 440 t/ha do LE na base seca, aplicadas no decorrer de 24 anos, bem como a produtividade e o potencial fitoextrator de *R. Communis* L, cultivar TAMAR de Cu, Ni e Pb.

10 CONCLUSÕES

Verificamos que a dose acumulada de 220 t ha⁻¹ do LE protagonizou efeito em comum para diferentes variáveis: P, K, Mg, S e V% e no pH do solo. Os teores do P foram considerados muito altos (133 mg/kg), os teores de K (3,2 mmol/c kg⁻¹) foram afetados pela acidez do solo entre 4,6 e 5,3 pH. Os teores de Mg foram entre 9 e 14mmolc dm³, os teores de S (21 mg kg⁻¹) ambos considerados altos, porém o S poderia estar imobilizado devido a sua relação C/S no solo, no entanto são necessários estudos complementares relacionados as comunidades microbianas. O V% ficou abaixo de 42%, considerado característico de solos distróficos. A MO não diferiu, esteve entre 22 e 28g/dm³, abaixo do esperado para solos argilosos.

Apenas a produção foliar diferiu em doses no final do ciclo, na fase vegetativa houve efeito de dose generalizado onde os teores foliares de macronutrientes e micronutrientes estiveram dentro da faixa de suficiência para a cultura, exceto ao K que esteve abaixo do nível crítico. Mesmo estando o solo contaminado por MP a CLASSE III a mamoneira não apresentou sintomas visuais de toxicidade por MP e produziu acima da média nacional, 1,94 t ha⁻¹ de grãos sem adubação mineral.

Os quocientes para o FBC e FT de *R. communis* L, foi maior que 1,0 para todos os elementos investigados, provando que a planta é fitoextratora de Cu, Ni e Pb em solos contaminados.

Os MP biodisponíveis estiveram em menor teor no solo, enquanto os teores semitotais apresentaram os seguintes resultados: O Zn foi o único elemento que diferiu aos tratamentos. O Zn e Cu mostraram teores maiores que o VRQ e VP.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017. Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. 3. ed. Exactus Metrologia e Qualidade, 19 dez. 2017. Disponível em: https://www.exactusmetrologia.com.br/sites/default/files/3-nbr_iso_iec_17025-2017.

ABNT NBR 12209:2011. Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. 2. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011. 53 p. ISBN 978-85-07-03106-2. Disponível em: <https://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/documentos-e-publicacoes>. Acesso em: 16 set. 2004.

Abreu CA, Abreu MF, Andrade JC (1998). Distribuição de chumbo no perfil de solo avaliada pelas soluções de DTPA e Mehlich-3. **Bragantia**, v. 57, p. 185–192. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87051998000100021>.

Abreu CA, Abreu MF, Andrade JC (2001). Determinação de cobre, ferro, manganês, zinco, cádmio, cromo, níquel e chumbo em solos usando a solução de DTPA pH 7,3. In: Raij B Van, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA (Eds.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, p. 240–250.

Acharya Balkrishna A, Banerjee S, Ghosh S, Chauhan D, Kaushik L, Arya V, Singh SK (2024). Reuse of sewage sludge as organic agricultural products: an efficient technology-based initiative. **Applied and Environmental Soil Science**. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2024/1433973>.

Adamescu A, Hamilton IP, Al-Abadleh HA (2011). Thermodynamics of dimethylarsinic acid and arsenate interactions with hydrated iron-(oxyhydr)oxide clusters: DFT calculations. **Environmental Science & Technology**, v. 45, p. 10438–10444.

Adams P, Massey DM (1984). Nutrient uptake by tomatoes from recirculating solutions. In: **INTERNATIONAL CONGRESS ON SOILLESS CULTURE**, 6., Lunteren. *Proceedings...* Wageningen: International Society for Soilless Culture, p. 71–79.

Almeida Júnior AB, Oliveira FDA, Medeiros JF, Oliveira MKT, Linhares PCF (2009). Efeito de doses de fósforo no desenvolvimento inicial da mamoneira. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 1, p. 217–221. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=237117625032>. ISSN 0100-316X.

Almeida GM, Castro GR (2022). **Adsorção de metais pesados em amostras aquosas utilizando partículas de PVC modificadas com sulfanilamida**. 49 f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia Ambiental) – UNESP, Botucatu.

Amorin HCS, Araujo MA, Lal R, Zinn YL (2023). What C:N ratios in soil particle-size fractions really say: N is preferentially sorbed by clays over organic C. **Catena**, v. 230, p. 107230. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107230>.

Andrade EMG (2011). **Elementos-traço As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se e Zn em Latossolos e plantas de milho após treze aplicações anuais de lodo de esgoto**. 125 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) – UNESP, Jaboticabal.

Andrade EMG, Lima AST, Melo WJ, Santos EJ, Herrmann AB (2014). Elementos-traço em dois latossolos após aplicações anuais de lodo de esgoto por treze anos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 1, p. 135–148. Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2014v35n1p135>.

Andrade AA, Freire FJ, Silva FC, Rein TA (2024). **Correção da acidez de solos cultivados com cana-de-açúcar**. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1171743/1/Andrade-recao-acidez-2024.pdf>. Acesso em: 12 out. 2025.

Ao M, Chen X, Deng T, Sun S, Tang Y, Morel JL (2022). Chromium biogeochemical behaviour in soil-plant systems and remediation strategies: a critical review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 424, p. 127233.

Arnon DI, Stout PR (1939). The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. **Plant Physiology**, v. 14, p. 371–375.

Azevedo DMP, Nóbrega LB, Lima EF, Batista FAZ, Beltrão NEM (2001). Manejo cultural. In: Azevedo DMP, Lima EF (Eds.). **O agronegócio da mamona no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p. 121–160.

Babar H, Yawar A, Shafeeq R, Haibat A, Mohsin Z, Shaukat A, Muhammad NA, Qandeel Z, Santos TLE, Jorge RDV (2022). Chapter 2 – Speciation, fractionation, bioavailability and transfer of metals and metalloids to plants. In: **Phytophysiology and Remediation Techniques**, p. 29–50. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91675-2.00026-3>.

Balkrishna AA, Banerjee S, Ghosh S, Chauhan D, Kaushik L, Arya V, Singh SK (2024). Reuse of sewage sludge as organic agricultural products: an efficient technology-based initiative. **Applied and Environmental Soil Science**. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2024/1433973>.

Baker AJM, Brooks RR (1989). Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements: a review of their distribution, ecology and phytochemistry. **Biorecovery**, v. 1, n. 2, p. 81–126.

Baran A, Wieczorek J, Mazurek R, Urbanski K, Klimkiewicz-Pawlas A (2018). Potential ecological risk assessment and predicting zinc accumulation in soils. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 40, n. 1, p. 435–450. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10653-017-9924-7>.

Barbosa JC, Júnior WM (2015). **Sistema de análises estatísticas de ensaios agrônômicos – AgroEstat**. Jaboticabal: FCAV/UNESP, 366 p.

Barrow NJ (1969). Effects of adsorption of sulfate by soils on the amount of sulfate present and its availability to plants. **Soil Science**, Baltimore, v. 108, n. 3, p. 193–201.

Barrow NJ (2017). Os efeitos do pH na absorção de fosfato do solo. **Solo Vegetal**, v. 410, n. 1, p. 401–410.

Bataglia OC, Furlani AMC, Teixeira JPF, Furlani P, Gallo JR (1983). **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônômico, 48 p. (Boletim Técnico, 78).

Bear FE, Toth SJ (1948). Influence of calcium on availability of other soil cations. **Soil Science**, v. 65, p. 69–74.

Benites VM, Madari B, Machado PLOA (2003). **Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo**. Rio de Janeiro: Embrapa, 7 p. ISSN 1517-5685. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/285721267_Extração_e_fracionamento_o_quantitativo_de_substancias_humicas_do_solo_Um_procedimento_simplificado_de_baixo_custo.

Bettiol W, Camargo OA (2006). **O lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 349 p.

Bingham FT, Page AL, Mahler RJ, Ganje TJ (1976). Cadmium availability to rice in sludge-amended soil under “flood” and “nonflood” culture. **Soil Science Society of America Journal**, v. 40, p. 715–719. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1976.03615995004000050030x>.

Brady NC, Weil RR (2013). Ciclagem de nutrientes e fertilidade do solo. In: **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, p. 437–499.

Braga JM (1983). **Avaliação da fertilidade do solo (ensaios de campo)**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 101 p.

BRASIL (2020). **Lei n.º 14.026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 7 mar. 2021.

BRASIL (2020). **Resolução CONAMA n.º 498, de 19 de agosto de 2020**. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de bio sólido em solos e dá outras providências. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-498-de-19-de-agosto-de-2020-273467970>. Acesso em: 18 mai. 2023.

BRASÍLIA (DF). Ageitec Mamona – Embrapa Algodão. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-ecnologica/cultivos/mamona/producao/tratos-culturais/adubacao>. Acesso em: 31 maio 2025.

Brooks RR (1983). **Biological methods of prospecting for minerals**. New York: Wiley Interscience, 322 p.

Burak DL, Fontes MPF, Santos NT, Monteiro LVS, Martins ES, Becquer T (2010). Geochemistry and spatial distribution of heavy metals in Oxisols in a mineralized region of the Brazilian Central Plateau. **Geoderma**, v. 160, n. 2, p. 131–142. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.08.007>.

Buta M, Hubeny J, Zieliński W, Harnisz M, Korzeniewska E (2021). Sewage sludge in agriculture – the effects of selected chemical pollutants and emerging genetic resistance determinants on the quality of soil and crops: a review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 214, p. 112070. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112070>.

Cabugao KG (2021). Bringing function to structure: root–soil interactions shaping phosphatase activity throughout a soil profile in Puerto Rico. **Ecology and Evolution**, v. 11, n. 3, p. 1150–1164.

Cacprzak M, Neczaj E et al. (2017). Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. **Environmental Research**, San Diego, v. 156, n. 7, p. 39–46.

Caixeta KF, Felix ACA, Silva FAC, Braga MB, Silva J, Guedes IMR (2015). Perda de nutrientes por lixiviação em Latossolo cultivado com diferentes híbridos de meloeiro sob ambiente protegido. In: **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 35., Natal. *O solo e suas múltiplas funções: anais*. Natal: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1031276>. Acesso em: 22 abr. 2025.

Caldeira DAS (1997). **Cinética da degradação de compostos orgânicos no solo**. Tese (Doutorado em Ciências – Universidade de São Paulo). São Paulo: USP. Disponível em: <http://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-20181127-155420>.

Camilotti F, Andrioli I, Marques MO, Silva AR, Júnior LT, Nobile FO (2006). Atributos físicos de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar após aplicações de lodo de esgoto e vinhaça. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 3, p. 738–747. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/qhn3hZ4tcC9CzXsqfcctFKC/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 25 mar. 2024.

Capelle R (1961). Microdosage colorimétrique du bore en milieu aqueux, au moyen de réactifs à groupement azolique ou imine dérivés des acides h et k. **Analytica Chimica Acta**, v. 24, p. 555–572.

Cardoso AAS (2015). Influência da acidez e do teor de fósforo do solo no crescimento inicial do mogno. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 81, p. 1–10. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/667/404>. Acesso em: 26 dez. 2023.

Caridad e Cancela R (2002). **Contenido de macro-micronutrientes, metales pesados y otros elementos en suelos naturales de São Paulo (Brasil) y Galicia (España)**. 573 p. Tesis (Doctorado) – Universidad de A Coruña, A Coruña, España.

Cerqueira PLW, Aisse MM (2021). Costs of sludge processing in waste-water treatment plants with Upflow Anaerobic Sludge Blanket reactors and aerobic post-treatment: resources for conception studies. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 2. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-415220190244>.

CETESB (2014). **Valores orientadores de águas e sedimentos do Estado de São Paulo**. Lei Estadual n.º 13.577, de 08 de julho de 2009 e seu Decreto n.º 59.263, de 05 de junho de 2013. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/valores-orientadores-para-solo-e-agua-subterranea/>.

CETESB (2021). O Cr e Ni foram os elementos que estiveram em teores mais distantes do valor orientador, enquanto o Pb foi o elemento mais crítico no solo, superando o VI CONAMA 498/20. [Informação técnica].

CFSEMG (1999). **Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: quinta aproximação**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 359 p. Seção “Mamoneira”, p. 311.

Chakraborty I, Chatterjee K (2020). Polymers and composites derived from castor oil as sustainable materials and degradable biomaterials: current status and emerging trends. **Biomacromolecules**, v. 21, n. 12, p. 4639–4662.

Chechetto RG (2010). **Energy balance for biodiesel production by the castor bean crop (*Ricinus communis* L.)**. p. 546–553.

Chen Y, Wu H, Sun P, Liu J, Qiao S, Zhang D, Zhang Z (2021). Remediation of chromium-contaminated soil based on *Bacillus cereus* WHX-1 immobilized on biochar: Cr (VI) transformation and functional microbial enrichment. **Frontiers in Microbiology**, v. 12.

Christensen BT (1992). Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. In: Lal R, Rose CW, Schwertmann U, Stewart BA, Tinker PB, Wagenet RJ, Yaron B (Eds.). **Advances in Soil Science**. New York: Springer-Verlag, p. 1–76.

Comin MA (2021). Revolução Verde e o processo de modernização agrícola em Soledade (RS, Brasil) de 1960 a 1990. **Revista História UEG – Morrinhos**, v. 10, n. 2, e022122.

CONAB (2025). Primeiro levantamento da CONAB aponta para uma colheita de 354,7 milhões de toneladas de grãos na safra 2025/26. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 18 out. 2025.

CONAB (2024). Boletim logístico: volume de fertilizante importado em janeiro é recorde no país. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5404-boletim-logistico-volume-de-fertilizante-importado-em-janeiro-e-recorde-no-pais>.

CONAMA (2009). **Resolução n.º 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 gestão ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias. Brasília: Ministério do Meio Ambiente.

Corato U (2020). Agricultural waste recycling in horticultural intensive farming systems by on-farm composting and compost-based tea application improves soil quality and plant health: a review under the perspective of a circular economy. **Science of the Total Environment**, v. 738, p. 139840.

Costa DET, Guilherme LRG, Melo EC, Ribeiro BT, Euzelina S, Bil I (2012). Assessing the tolerance of castor bean to Cd and Pb for phytoremediation purposes. **Biological Trace Element Research**, v. 145, p. 93–100. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12011-011-9164-0>.

Cruz BJE, Alves DCL, Sá RO, Viana RS, Ferrari S (2021). Potencial produtivo de híbridos de mamona em diferentes densidades de plantas na segunda safra em ambiente estressante. **Revista Ciências Agroveterinárias**, v. 20, n. 1. Universidade Federal de Santa Catarina.

Cunha KPV, Nascimento CWA, Pimentel RMM, Accioly AMA, Silva AJ (2008). Disponibilidade, acúmulo e toxidez de cádmio e zinco em milho cultivado em solo contaminado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1319–1328. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300039>.

Cwiertny DM, Hunter GJ, Pettibone JM, Scherer MM, Grassian VH (2009). Surface chemistry and dissolution of α -FeOOH nanorods and microrods: environmental implications of size-dependent interactions with oxalate. **Journal of Physical Chemistry C**, v. 113, p. 2175–2186.

Dai ZM, Liu GF (2020). Long-term nutrient inputs shift soil microbial functional profiles of phosphorus cycling in diverse agroecosystems. **The ISME Journal**, v. 14, p. 757–770.

Dai S, Li H, Yang Z, Dai M, Dong X, Ge X, Sun M, Shi L (2018). Effects of biochar amendments on speciation and bioavailability of heavy metals in coal-mine-contaminated soil. **Human and Ecological Risk Assessment**, v. 24, p. 1887–1900. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1429250>.

Delarica DLD (2020). **Formas de fósforo em solos tropicais adubados com lodo de esgoto em experimento de longa duração**. 62 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) – UNESP, Jaboticabal. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/6a8c96fe-c273-4a97-847d-2b686aab268e/content>. Acesso em: 21 out. 2025.

Delgado A, Quemada M, Mateos L, Villalobos FJ (2024). Fertilization with phosphorus, potassium and other nutrients. In: Villalobos FJ, Fereres E (Orgs.). **Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture**. Cham: Springer. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-69150-8_28.

Devesa R, Díaz F, Barral MT (2010). Trace metals in river bed sediments: an assessment of their partitioning and bioavailability by using multivariate exploratory analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 91, p. 2471–2477.

Dhaliwal SS, Sharma V, Shukla AK (2022). Capítulo 1 – Impacto dos micronutrientes na mitigação de tensões abióticas em solos e plantas: um passo progressivo em direção à segurança das culturas e à qualidade nutricional. In: Sparks DL (Ed.). **Avanços em Agronomia**. Academic Press, p. 1–78.

Donagema GK, Campos DVB, Calderano SB, Teixeira WG, Viana JHM (2011). **Manual de métodos de análises de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 230 p. (Documentos, 132; ISSN 1517-2627). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/77712/1/Manual-metodos-analis-solo-2.ed.pdf>. Acesso em: 31 out. 2025.

Dudley LM, McNeal BL, Baham JE, Coray CS, Cheng HH (1987). Characterization of soluble organic compounds and complexation of copper, nickel, and zinc in extracts of sludge-amended soils. **Journal of Environmental Quality**, v. 16, p. 341–348. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/jeq1987.00472425001600040009x>.

EARTH G (2024). Google Earth. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/@-21.2462397,-48.2856799,352m/data=!3m1!1e3?entry=ttu>. Acesso em: 17 out. 2024.

Echart CL, Molina SC (2001). Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismos de tolerância e seu controle genético. **Ciência Rural**, v. 31, p. 531–541.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). (2007). **SW-846 Test Method 3051A: Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils, and Oils**. Washington, DC: EPA.

ESTAÇÃO AGROCLIMÁTICA (2023). Departamento de Ciências Exatas da FCAV–UNESP, Câmpus de Jaboticabal. [Boletim técnico].

EUROSTAT (2022). **Eurostat – a sua chave para as estatísticas europeias**. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat>.

Fang L, Liu Y, Tian H, Chen H, Wang Y, Huang M (2017). Proper land use for heavy metal-polluted soil based on enzyme activity analysis around a Pb-Zn mine in Feng County, China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 36, p. 28152–28164. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0308-4>.

Favaretto N, Deschamps C, Daros E, Pissaia A (1997). Efeito do lodo de esgoto na fertilidade do solo e no crescimento e produtividade de milho (*Zea mays L.*). **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 837–848.

Ferreira GB (2022). **Correção de solo, nutrição mineral e adubação da mamoneira**. [Documento técnico].

Fischer L, Brümmer GW, Barrow NJ (2007). Observations and modelling of the reactions of 10 metals with goethite: adsorption and diffusion processes. **European Journal of Soil Science**, v. 58, p. 1304–1315.

Fitz WJ, Wenzel WW (2002). Arsenic transformations in the soil–rhizosphere–plant system: fundamentals and potential application to phytoremediation. **Journal of Biotechnology**, v. 99, n. 3, p. 259–278.

Franklin O, Cambui CA, Gruffman L, Palmroth S, Oren R, Näsholm T (2017). The carbon bonus of organic nitrogen use efficiency of plants. **Plant, Cell and**

Environment, v. 40, n. 1, p. 25–35. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/pce.12772>.

Garbellini LR (2022). **Avaliação do potencial toxicológico de substâncias inorgânicas na reciclagem de biossólidos**. 69 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

Gardes M, Bruns TD (1993). ITS primers with enhanced specificity for basidiomycetes: application to the identification of mycorrhizae and rusts. **Molecular Ecology**, v. 2, p. 113–118.

Gomes DL, Silva W, Cruz ND, Araújo RO, Otaviano JJS, Oliveira JD (2021). Influência dos resíduos urbanos na distribuição, mobilidade e biodisponibilidade de metais potencialmente tóxicos em solo do lixão de Imperatriz-MA. **Brazilian Journal of Development**. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/29723>.

Guilherme LRG, Anderson SJ (1998). Copper sorption kinetics and sorption hysteresis in two oxide-rich soils (Oxisols). In: Venne EA (Ed.). **Adsorption of Metals by Geomedia: Variables, Mechanisms and Model Applications**. San Diego: Academic Press, cap. 9, p. 209–228.

Hafeez B, Khanif YM, Saleem M (2013). Role of zinc in plant nutrition. **International Journal of Experimental Agriculture**, v. 3, n. 2, p. 374–391. Disponível em: <https://doi.org/10.5897/AJEAx.2013.27461>.

Haque N, Peralta-Videa JR, Jones GL, Gill TE, Gardea-Torresdey JL (2008). Screening the phytoremediation potential of desert broom (*Baccharis sarothroides* Gray) growing on mine tailings in Arizona, USA. **Environmental Pollution**, v. 153, p. 362–368.

Hartwig JEP, Hartwig MP (2025). Adaptação da metodologia de determinação da granulometria do solo pelo método de Bouyoucos utilizando um Planossolo com aplicação de efluente de bovinocultura leiteira. **Revista Foco**, v. 18, n. 9, e9773. Disponível em: <https://doi.org/10.54751/revistafoco.v18n9-166>.

Hartemink AE, Barrow NJ (2023). Soil pH–nutrient relationships: the diagram. **Plant and Soil**, v. 486, p. 209–215. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>.

Hausladen DM, Fendorf S (2017). Hexavalent chromium generation within naturally structured soils and sediments. **Environmental Science & Technology**, v. 51, p. 2058–2067.

IAC – Instituto Agronômico de Campinas (2024). **Informações sobre interpretação e análises de solos**. Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Solos e Recursos Ambientais. Disponível em: <https://www.iac.sp.gov.br/produtoseservicos/analisedosolo/interpretacaoanalise.php>. Acesso em: 25 set. 2024.

IFA – Argus (2023). **Phosphate Rock Resources & Reserves**. Disponível em: https://www.fertilizer.org/wp-content/uploads/2023/04/2023_Argus_IFA_Phosphate_Rock_Resources_and_Reserves_Final.pdf. Acesso em: 11 maio 2023.

ISO (1995). **Soil quality – Extraction of trace elements soluble in aqua regia. ISO 11466.3**. International Organization for Standardization.

Iticescu C, Georgescu PL, Arseni M, Rosu A, Timofti M, Carp G, Cioca LI (2021). Optimal solutions for the use of sewage sludge on agricultural lands. **Water**, v. 13, p. 585.

Iwegbue CMA (2007). Fractionation, characterization and speciation of heavy metals in composts and compost-amended soils. **African Journal of Biotechnology**, v. 6, n. 2, p. 67–78.

Jaworska H, Lemanowicz J (2019). Heavy metal contents and enzymatic activity in soils exposed to the impact of road traffic. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–12. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56418-7>.

Kabata-Pendias A, Pendias H (2001). **Trace elements in soils and plants**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 413 p.

Katoh M, Kitahara W, Sato T (2013). Sorption of lead in animal manure compost: contributions of inorganic and organic fractions. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 225, p. 1828. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1828-2>.

Khan AG (2020). Promises and potential of in situ nano-phytoremediation strategy to mycorrhizo-remediate heavy metal contaminated soils using non-food bioenergy crops (*Vetiver zizinioides* & *Cannabis sativa*). **International Journal of**

Phytoremediation, v. 22, n. 9, p. 900–915. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1774504>.

Khanal A, Hur HG, Fredrickson JK, Lee JH (2021). Direct and indirect reduction of Cr(VI) by fermentative Fe(III)-reducing *Cellulomonas* sp. strain Cellu-2a. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 31, p. 1519–1525.

Kiihl T, Neto R (2014). Mamona. In: Aguiar AT et al. (Eds.). **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas**. Campinas: Instituto Agronômico, p. 39–40. (Boletim Técnico, 200).

Kolln OT, Silva SR, Paludetto A (2022). **Soil: the basis for plant production**. 46 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1150999/1/EBO-OK-Sistemas-para-producao-agropecuaria-19122022-15-60.pdf>.

Kucey RMN, Janzen HH, Legget ME (1989). Microbially mediated increases in plant-available phosphorus. **Advances in Agronomy**, New York, v. 42, p. 199–228.

Kumar V, Ferreira LFR, Madan S, Joginder S (2021). Fitoextração de metais pesados e alterações ultraestruturais de *Ricinus communis* L. cultivada em lodo organometálico complexo descarregado de destilaria de álcool. **Environmental Technology & Innovation**, v. 22, p. 101382. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101382>.

Lal R (2016). Beyond COP21: potential and challenges of the “4 per Thousand” initiative. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 71, n. 1.

Lange A, Martines AM, Camacho MAS, Soreano MCM, Cabral CP, Malavolta E (2005). Micronutrient deficiency effect on the nutritional status of the castor bean cultivar Iris. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 1. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000100009>.

Leippert F, Darmaun M, Bernoux M, Mpheshea M (2020). **O potencial da agroecologia para construir meios de subsistência e sistemas alimentares resilientes ao clima**. Roma: FAO e Biovisão, 154 p. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cb0438>.

Li S, Liu J, Yao Q, Yu Z, Li Y, Jin J (2022). Short-term lime application impacts the composition and potential function of microbial community in an acidic black soil. **Plant and Soil**, v. 470, n. 1–2, p. 35–50. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04913-0>.

Lin Y, Aarts MGM (2012). The molecular mechanism of zinc and cadmium stress response in plants. **Cellular and Molecular Life Sciences**, v. 69, p. 3187–3206. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00018-012-1089-z>.

Liu S, Cen B, Yu Z, Qiu R, Gao T, Long X (2025). The key role of biochar in amending acidic soil: reducing soil acidity and improving soil acid buffering capacity. **Biochar**, v. 7, artigo 52. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42773-025-00432-8>. Acesso em: 2 jun. 2025.

Liu Y, Zhu ZQ, He XS, Yang C, Du YQ, Huang YD, Xue YJ (2018). Mechanisms of rice straw biochar effects on phosphorus sorption characteristics of acid upland red soils. **Chemosphere**, v. 207, p. 267–277.

Lombi E, Zhao FJ, Dunham SJ, McGrath SP (2001). Phytoremediation of heavy metal-contaminated soils: natural hyperaccumulation versus chemically enhanced phytoextraction. **Journal of Environmental Quality**, v. 30, n. 6, p. 1919–1926. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/jeq2001.1919>.

Ma Q, Kuzyakov Y et al. (2021a). Substrate control of sulphur utilisation and microbial stoichiometry in soil: results of ¹³C, ¹⁵N, ¹⁴C, and ³⁵S quad labelling. **The ISME Journal**, v. 15, p. 3148–3158.

Machado LOA (2017). **Fracionamento físico do solo por densidade e granulometria para a quantificação de compartimentos da matéria orgânica do solo**. Rio de Janeiro: Embrapa. Disponível em: <https://api.core.ac.uk/oai/oai:www.infoteca.cnptia.embrapa.br/doc/338085>. Acesso em: 1 jun. 2025.

Maia DL, Fernandes FA (2019). Effects of operating conditions on the copolymerization of castor oil maleate–styrene by suspension polymerization. **Macromolecular Reaction Engineering**, v. 13, n. 5, p. 1900017.

Malavolta E (2006). **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 631 p.

Malavolta E, Vitti GC, Oliveira AS (1989). **Avaliação do estado nutricional das plantas**. Piracicaba: Associação Brasileira de Pesquisa da Potafos, 1. ed., 201 p.

Malik MY, Mumtaz H, Muhammad JS, Bashir A (2018). Yield response of castor to NPK fertilizers under arid climate conditions. **Pakistan Journal of Agricultural Research**, v. 31, n. 2, p. 180–185. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17582/journal.pjar/2018/31.2.180.185>.

Marchuk S, Tait S, Sinha P, Harris P, Antille DR, McKabe BK (2023). Biosolids-derived fertilizers: a review of challenges and opportunities. **Science of the Total Environment**, v. 875, p. 162555. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162555>.

Marek RS, Richardson JB (2020). Investigating surficial geologic controls on soil properties, inorganic nutrient uptake, and hardwood growth in northwestern Massachusetts, USA. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 3, p. 901–911.

Marques MC, Nascimento CWA (2014). Tolerance of castor bean to zinc assessed by chlorophyll fluorescence and plant nutrition. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000300016>.

Marques MO (1996). **Incorporação de biossólido em solo cultivado com cana-de-açúcar**. Tese (Livre-docência) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP.

Martins SF, Esperancini MST, Quintana NRG, Barbosa FS (2021). Análise econômica da produção de lodo de esgoto compostado para fins agrícolas na estação de tratamento de esgoto de Botucatu-SP. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 36, n. 2, p. 218–229. ISSN 2359-6562.

Mascarenhas HAA, Tanaka RT, Carmello QAC, Gallo PB, Ambrosiano GMB (2000). Calcário e potássio para a cultura da soja. **Scientia Agricola**, v. 57, p. 445–449.

McBride MB, Spiers G (2001). Trace elements content of selected fertilizers and dairy manures as determined by ICP-MS. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 32, p. 139–156.

Melaku S, Dams R, Moens L (2005). Determination of trace elements in agricultural soil samples by inductively coupled plasma-mass spectrometry: microwave acid digestion versus aqua regia extraction. **Analytica Chimica Acta**, v. 543, p. 117–123. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.04.055>.

Mellis EV, Cruz MCP, Casagrande JC (2004). Nickel adsorption by soils in relation to pH, organic matter and iron oxides. **Scientia Agricola**, v. 61, p. 190–195.

Melo LCA, Silva CA, Dias BO (2008). Caracterização da matriz orgânica de resíduos de origens diversificadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 101–110. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/9kzwjibBMCPg3p45nKyDDNxg/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 30 mar. 2024.

Melo V (2020). **Metais pesados nos solos e práticas de remediação ambiental**. III SIMDAQBI – UFTPR, palestra virtual, 28–30 set. 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=SL3N7sdHCGk&t=3218s>. Acesso em: 1 out. 2024.

Melo VF, Andrade M, Batista AH, Favaretto N, Grassi MT, Campos MS (2012). Chumbo e zinco em águas e sedimentos de área de mineração e metalurgia de metais. **Química Nova**, v. 35, n. 1, p. 22–29.

Melo VP, Beutler NA, Souza ZM, Centurion JF, Melo WJ (2004). Atributos físicos de Latossolos adubados durante cinco anos com bio sólido. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 1, p. 67–72.

Moody PW, Aitken RL, Dickson T (1998). Melhoria de campo de solos ácidos no sudeste de Queensland: relações entre a resposta do rendimento do milho e as propriedades do solo não alteradas e calcárias. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 49, n. 4, p. 649–656.

Moura F (2024). Elevada importação de fertilizantes deixa agricultura brasileira vulnerável, alerta Embrapa. **Brasil 61**. Disponível em: <https://brasil61.com/noticias/elevada-importacao-de-fertilizantes-deixa-agricultura-brasileira-vulneravel-alerta-embrapa>. Acesso em: 23 mar. 2024.

Mudgal V, Raninga M, Patel D, Ankoliya D, Mudgal AA (2023). Review on phytoremediation: sustainable method for removal of heavy metals. **Materials Today: Proceedings**, v. 77, p. 201–208. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.261>.

Nakagawa J, Neptune AML (1971). Marcha de absorção de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio na cultura da mamoneira (*Ricinus communis* L.) cultivar “Campinas”. **Anais da ESALQ**, v. 28, p. 323–337.

Nascimento C, Barros D, Melo E, Oliveira A (2004). Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 385–392. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000200017>.

Nascimento MS (2009). **Marcha de absorção de nutrientes em dois híbridos de mamona de porte baixo**. 100 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias, UNESP, Botucatu. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/393d5324-471e-4750-8503-cd3ea688da37>.

Neina D (2019). The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2019, p. 1–9. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>.

Nieder R, Benbi DK, Scherer HW (2011). Fixação e defixação de amônio em solos: uma revisão. **Biology and Fertility of Soils**, v. 47, p. 1–14. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00374-010-0506-4>.

Nogueira TAR, Oliveira LR, Melo WJ, Fonseca IM, Melo GMP, Melo VP, Marques MO (2008). Cadmium, chromium, lead and zinc in maize plants and Oxisol after nine annual applications of sewage sludge. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500040>.

Nunes WAGA, Pires AMM (2025). **Fertilizantes: vulnerabilidade brasileira e algumas ações para revertê-la**. Embrapa Agropecuária Oeste. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/99497318/artigo---fertilizantes-vulnerabilidade-brasileira-e-algumas-aco-es-para-reverte-la>. Acesso em: 17 out. 2025.

Oladejo KD, Omolola FA, Odedayo A (2024). Evaluation of the effects of nutrient omissions on the growth and seed yield of two castor plant varieties in Southwest Nigeria. **International Journal of Plant & Soil Science**, v. 36, n. 5, p. 578–588. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/379535168_Number_of_Capsules_N_C_and_Seed_Weight_SW_Original_Research_Article_Oladejo_et_al.

Oliveira KW, Melo WJ, Pereira GT, Melo VP, Melo GMP (2005). Heavy metals in Oxisols amended with biosolids and cropped with maize in a long-term experiment. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 4, p. 381–388.

Oliveira LR (2008). **Metais pesados e atividade enzimática em Latossolos tratados com lodo de esgoto e cultivados com milho**. 125 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) – UNESP, Jaboticabal. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/4ea02877-a2c8-477e-b2ba-143a2a95a8ea/content>. Acesso em: 21 out. 2025.

Pandey VC (2012). Phytoremediation of heavy metals from fly ash pond by *Azolla caroliniana*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 82, p. 8–12. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.05.002>.

Pang Z, Yang X, Zhang H, Luo J, Peng H, Li T, Liang Y (2025). Grafting technique accelerates heavy metal phytoextraction by *Sedum alfredii* and preserves its beneficial effects on soil microorganisms. **Rhizosphere**, v. 34, p. 101090. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2025.101090>.

Pereira JS, Amorim NCC, Olszewski PTSS, Paiva MVC, Donzeli VP (2023). Potencial de uso agrícola de biossólido oriundo de estação de tratamento de esgoto, Petrolina (PE). **Revista Agroambiental**, v. 16, n. 4, e11698. Disponível em: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2023v16n4e11698>.

Pierzynski GM, Sims JT, Vance GF (2006). **Soil and environmental quality**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press.

Pires AMM, Andrade CA, Coscione AR (2006). Metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto. In: Spadotto CA, Ribeiro WC (Eds.). **Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria**. Botucatu: FEPAF, cap. 9, p. 205–232. Disponível em: <https://www.bibliotecaagptea.org.br/administracao/agroindustria/livros/GESTAO%20DE%20RESIDUOS%20NA%20AGRICULTURA%20E%20AGROINDUSTRIA.pdf>.

Pivetta LG, Zanotto MD, Tomaz CA, Pivetta LA, Fioreze ACL, Zoz T (2015). Avaliação de genótipos de mamona em diferentes níveis de adubação. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 2, n. 2, p. 9–18.

PNF – Plano Nacional de Fertilizantes (2021). **As reservas minerais para fertilizantes no Brasil**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes/as-reservas-minerais-para-fertilizantes-no-brasil>.

Portugal AF, Jucksch I, Schaefer CEGR, Wendling BA (2008). Determinação de estoques totais de carbono e nitrogênio e suas frações em sistemas agrícolas implantados em Argissolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2091–2100. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500030>.

Prado RM (2020). **Nutrição de plantas**. 2. ed. São Paulo: Editora UNESP, 214 p. ISBN 978-85-393-0824-8.

Prasad MNV, Kiran BR (2017). *Ricinus communis* L. (Castor bean): a potential multi-purpose environmental crop for improved and integrated phytoremediation. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 27, p. 1–16. Disponível em: <https://doi.org/10.24190/ISSN2564-615X/2017/02.01>.

Prates AR, Kawakami KC, Coscione AR, Filho MCMT, Arf O, Abreu-Junior CH, Oliveira FC, Moreira A, Galindo FS, He Z, Jani AD, Capra GF, Ganga A, Nogueira TAR (2022). Composted sewage sludge sustains high maize productivity on an infertile Oxisol in the Brazilian Cerrado. **Land**, v. 11, n. 8, p. 1246. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land11081246>.

PURDUE UNIVERSITY (2025). **About Norman Borlaug**. Center for Global Food Security, Purdue University, West Lafayette, IN. Disponível em: <https://www.purdue-edu.translate.goog/discoverypark/food/programs/borlaug-fellows/norman-borlaug.php>. Acesso em: 16 maio 2025.

Quaggio JA, Cantarella H, Zambrosi FCB (2022). Leguminosas e oleaginosas. In: Cantarella H (Ed.). **Boletim 100: recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônômico (IAC), p. 239–242.

Raij BV (1981). **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato; Instituto Internacional da Potassa, 142 p.

Raij BV (1991). **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Ceres; Piracicaba: Potafos, 343 p.

Raij BV (2011). **Fertilidade do solo e dos nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 420 p.

Raij BV, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA (2001). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico – Fundação IAC, 285 p. Disponível em: https://lab.iac.sp.gov.br/Publicacao/Raij_et_al_2001_Metod_Anal_IAC.pdf. Acesso em: 31 out. 2025.

Raij BV, Cantarella H, Quaggio JA, Hiroce R, Furlani MC (Eds.) (1996). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 285 p. (IAC. Boletim Técnico, 100).

Rassaei F, Hoodaji M, Abitahi AS (2020). Cadmium speciation as influenced by soil water content and zinc and the studies of kinetic modeling in two soils textural classes. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 8, n. 3, p. 286–294. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.05.003>.

Reetz HF (2017). **Fertilizantes e o seu uso eficiente**. São Paulo: ANDA, v. 178.

Ribeiro MR, Biondi CM, Nascimento CWA, Fabrício NAB, Bosiacki M, Kleiber T, Kaczmarek J (2013). Evaluation of suitability of *Amaranthus caudatus* L. and *Ricinus communis* L. in phytoextraction of cadmium and lead from contaminated substrates. **Archives of Environmental Protection**, v. 39, n. 3, p. 47–59.

Ribeiro JF, Walter BMT (2008). As principais fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: Sano SM, Almeida SP, Ribeiro JF (Eds.). **Cerrado: ecologia e flora**. Planaltina: Embrapa Cerrados, p. 151–212.

Ronquim CC (2010). **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 26 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 8). ISSN 1806-3322. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/882598/1/BPD8.pdf>. Acesso em: 1 jan. 2025.

Rukhsar (2018). Genetic variability, character association and genetic divergence studies in castor (*Ricinus communis* L.). **Annals of Agrarian Science**, v. 16, p. 143–148.

Companhia de Saneamento do Estado do Paraná – **SANEPAR** (2022). Sanepar ganha prêmio-destaque por uso do lodo de esgoto na agricultura. Disponível em: <https://www.sanepar.com.br/noticias/sanepar-ganha-premio-destaque-por-uso-do-lodo-de-esgoto-na-agricultura>. Acesso em: 17 out. 2025.

Sahar NSM, Wajid IMA, Abdul RA (2024). Assessment of growth, metal uptake efficiency and yield characteristics of castor bean genotypes for phytoremediation of lead-contaminated soils in Chakera-Faisalabad with long-term wastewater irrigation history. **Industrial Crops & Products**, v. 222, p. 119454. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119454>.

Sampaio TF, Guerrini IA, Backes C, Heliodoro JCA, Ronchi HS, Tanganelli KM, Carvalho NC, Oliveira FC (2012). Lodo de esgoto na recuperação de áreas degradadas: efeito nas características físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1637–1645. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/WYTb8qTK8hg5kzqrhc3qNkk/?lang=pt>. Acesso em: 26 mar. 2024.

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumbrreras JF, Coelho MR, Almeida JÁ, Cunha TJF, Oliveira JB (2021). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs>. Acesso em: 16 out. 2025.

Santos M, Lima V, Haandel A, Beltrão N, Souza A (2006). Salinidade de um solo irrigado com água residuária e adubado com biossólido. **Revista Agropecuária Técnica**, Areia, v. 27, n. 1, p. 30–36.

Savy Filho A (2005). **Mamona: tecnologia agrícola**. Campinas: Emopi, 105 p.

Severino LS, Ferreira GB, Moraes CRA, Gondim TMS, Freire WSA, Castro DA, Cardoso GD, Beltrão NEM (2006). Crescimento e produtividade da mamoneira adubada com macronutrientes e micronutrientes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 4, p. 563–568. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/qfBzhrw7f9zmTcFS54RgWCw/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 29 abr. 2004.

Sengik E, Albuquerque KP (2003). **Os colóides do solo**. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 18 p. Disponível em: <http://www.nupel.uem.br/coloides-2003.pdf>. Acesso em: 17 out. 2025.

Shaddel S, Davijany HB, Kabbe C, Dadgar S, Osterhus SW (2019). Sustainable sewage sludge management: from current practices to emerging nutrient recovery technologies. **Sustainability**, v. 11, n. 12, p. 3435. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su11123435>.

Siles JA, Margesin R (2016). Abundance and diversity of bacterial, archaeal and fungal communities along an altitudinal gradient in alpine forest soils: determining factors. **Microbial Ecology**, v. 72, n. 1, p. 207–220. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00248-016-0748-2>.

Silva CT (2020). Remedial capacity of diclosulam by cover plants in different edaphoclimatic conditions. **International Journal of Phytoremediation**, v. 23, n. 6, p. 609–618.

Silva FC (2009). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 627 p.

SINDICOM (2023). Lodo de esgoto – panorama e boas práticas ESG. Disponível em: <https://abconsindcon.com.br/lodo-de-esgoto/>.

Siqueira AM, Pamplona EO (2012). Utilização das medidas de desempenho do TOC (Theory of Constraints) como instrumento de decisão. **Anais do Congresso Brasileiro de Custos – ABC**. Disponível em: <https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/view/1600>.

Siqueira-Silva AI, Silva LC, Azevedo AA, Oliva MA (2012). Iron plaque formation and morphoanatomy of roots from species of *restinga* subjected to excess iron. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 78, p. 265–275. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.11.030>.

SNIS (2019). **Série Histórica: Água e Esgotos**. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Disponível em: <http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/>.

Soares R, Santos MCB, Maddock JEL, Bertolino LC, Santelli RE, Campos DVB (2018). Aqua regia as an alternative extractor for the environmental diagnosis of areas impacted by industrial waste: case study – Queimados (RJ). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 5, p. 995–1000. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018167298>.

Sobral LF (2015). **Guia prático para interpretação de resultados de análise de solo**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 13 p. (Documento, 206).

Sousa DMG (2007). Acidez do solo e sua correção. In: **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 205–274.

Sousa JMS, Souza JC, Moraes GP, Pitombeira JB, Romero RE, Costa MCG (2013). Teores de macronutrientes em cultivares de mamona no semiárido cearense. **XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 28 jul.–2 ago. 2013, Florianópolis, SC. Disponível em: <https://www.sbcs.org.br/cbcs2013/anais/arquivos/1829.pdf>.

Souto LS, Silva LM, Lobo TF, Fernandes DM, Lacerda NB (2005). Níveis e formas de aplicação de lodo de esgoto na nutrição e crescimento inicial da mamoneira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, supl. 1. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v9nsup274-277>.

Sparks DL (2003). **Química ambiental do solo**. 2. ed. Amsterdã: Academic Press.

Stamatelatou K, Christodoulou A (2016). Overview of legislation on sewage sludge management in developed countries worldwide. **Water Science and Technology**, v. 73, n. 3, p. 453–462.

Strauch D (1991). Sobrevivência de microrganismos patogênicos e parasitas em excrementos, esterco e lodo de esgoto. **Revista Scientifique et Technique de l'OIE**, v. 10, n. 3, p. 813–846.

Stumm W (1992). **Chemistry of the solid-water interface: processes at the mineral–water and particle–water interface in natural systems**. New York: John Wiley & Sons, 428 p.

Sugurbekova G, Nagyzbekkyzy E, Sarsenova A, Danlybayeva G, Anuarbekova S, Kudaibergenova R, Frochot C, Achera S, Zhatkanbayev Y, Moldagulov AN (2023). Sewage sludge management and application in the form of sustainable fertilizer – review. **Sustainability**, v. 15, p. 6112. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15076112>.

Swartjes FA, Breemen EM, Otte PF, Beelen P, Rikken MGJ, Tuinstra J, Spijker J, Lijzen JPA (2007). Human health risks due to consumption of vegetables from contaminated sites. **RIVM Report 711701040**. Bilthoven: RIVM.

Taiz L, Zeiger E (2013). **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, p. 796–801.

Takijima Y, Katsumi F, Koizumi S (1973). Cadmium contamination of soils and rice plants caused by zinc mining. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, p. 183–193. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00380768.1973.10432587>.

Tang S, Ma Q, Marsden KA, Chadwick DR, Yu L, Yakov K, Lianghuan W, Davey LJ (2023). Microbial community succession in soil is mainly driven by carbon and nitrogen contents rather than phosphorus and sulphur contents. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 180, 109019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109019>.

Tang S, Zhou J, Pan W, Tang R, Ma Q, Xu M, Qi T, Ma Z, Fu H, Wu L (2022). Impact of N application rate on tea (*Camellia sinensis*) growth and soil bacterial and fungal communities. **Plant and Soil**, v. 475, p. 343–359.

Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Teixeira WG (2017). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 573 p. ISBN 978-85-7035-771-7.

Trannin ICB, Siqueira JO, Moreira FMS (2008). Atributos químicos e físicos de um solo tratado com biossólido industrial e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 223–230. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000300001>.

Tripathi S, Sharma P, Purchase D, Chandra R (2021). Distillery wastewater detoxification and management through phytoremediation employing *Ricinus communis* L. **Bioresource Technology**, v. 333, 125192. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125192>.

Tukey JW (1949). Comparing individual means in the analysis of variance. **Biometrics**, v. 5, n. 2, p. 99–114.

UFMG (2018). Uso do lodo de esgoto na agricultura desafia pesquisadores e empresas. **Pesquisa e Inovação – Universidade Federal de Minas Gerais**. Disponível em: <https://ufmg.br/comunicacao/noticias/seminario-na-engenharia-vai-discutir-utilizacao-do-lodo-de-esgoto-na-agricultura>. Acesso em: 10 maio 2025.

Umlauf G, Christoph EH, Lanzini L, Savolainen R, Skejo H, Bidoglio G, Clemens J, Goldbach H, Scherer H (2011). PCDD/F and dioxin-like PCB profiles in soils amended with sewage sludge, compost, farmyard manure, and mineral fertilizer. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 18, p. 461–470.

Ure AM, Quevauviller PH, Muntau H, Griepink B (1993). Speciation of heavy metals in solids and sediments: an account of the improvement and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BCR of the Commission of the European Communities. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, v. 51, p. 135–151.

USEPA (1986). **Standards for the use and disposal of sewage sludge**. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency. (Code of Federal Regulations 40 CFR Part 503).

USEPA (1998a). **Method 3050B – Acid digestion of sediments, sludges, and soils**. Disponível em: <http://www.epa.gov/SW-846/pdfs/3050b.pdf>. Acesso em: fev. 2024.

USEPA (1998b). **Method 3051A – Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils**. Disponível em: <http://www.epa.gov/SW-846/3051a.pdf>. Acesso em: mar. 2024.

Pandey VC (2012). Phytoremediation of heavy metals from fly ash pond by *Azolla caroliniana*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 82, p. 8–12. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.05.002>.

Vasconcellos CA, Santos HL, Pitta GVE, Bahia AFC (1980). Avaliação da eficiência de fosfatos de rocha na cultura do sorgo s.n.t. In: **XIII Reunião Brasileira de Milho e Sorgo**. Londrina, PR: IAPAR.

Vieira VF (2017). **Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas**. Brasília, DF: Embrapa, 163 p. ISBN 978-85-7035.

Walkley A, Black IA (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 37, p. 29–38. Disponível em: <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>.

Wang D, Li H, Yi WB, Chen LK, Zhao P, Long GQ (2022). Promoting the effect of potato intercropping on the functional diversity of soil microbial metabolism and nitrogen regulation. **Chinese Journal of Eco-Agriculture**, v. 30, n. 7, p. 1164–1173. Disponível em: <https://doi.org/10.12357/cjea.20210604>.

Wang F, Peng L, Zhou X, Zeng Q, Luo S (2021). Typical sources of Cd to paddy fields in different contaminated areas and their impacts on Cd accumulation in topsoil and rice in Changzhutan, China. **Environmental Research**, v. 193, 110523.

Wang N, Chen H, Tiuan Y (2024). Effects of nickel, lead, and copper stress on the growth and biochemical responses of *Aegilops tauschii* seedling. **Scientific Reports**, v. 14, 24832. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-77143-w>.

Wang Q, Huang Q, Wang J, Khan MA, Guo G, Liu Y, Hu S, Jin F, Wang J, Yu Y (2021). Dissolved organic carbon drives nutrient cycling via microbial community in paddy soil. **Chemosphere**, v. 285, 131472.

Wang Y, Michel FM, Choi Y, Eng PJ, Levard C, Siebner H, Gu B, Bargar JR, Brown GE (2016). Pb, Cu, and Zn distributions at humic acid-coated metal-oxide surfaces. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 188, p. 407–423.

Warman PR (1986). Effects of fertilizer, pig manure, and sewage sludge on timothy and soils. **Journal of Environmental Quality**, v. 15, p. 95–100. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/jeq1986.00472425001500020001x>.

Washington AFP (2023). Morre o “Pai da Revolução Verde”. **Jornal O Estado de São Paulo**. Disponível em: <https://www.estadao.com.br/emails/morre-o-pai-da-revolucao-verde>. Acesso em: 16 maio 2024.

World Health Organization – WHO (1992). **Cadmium: environmental aspects**. Geneva: World Health Organization, 156 p. (Environmental Health Criteria 135). Disponível em: <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc135.htm>. Acesso em: 20 nov. 2018.

Wijesekara H, Colyvas K, et al. (2021). Carbon sequestration value of biosolids applied to soil: a global meta-analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 284, 112008.

Wolf FB, Kenworthy AL, Wolf LJ, Wolf JG (1971). A new reagent for the determination of boron in soil and plant material. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 2, n. 4, p. 307–313.

Wu HW, Cui HL, Fu CX, Li R, Qi FY, Liu ZL, Yang G, Xiao KQ, Qiao M (2024). Unveiling the crucial role of soil microorganisms in carbon cycling: a review.

Science of the Total Environment, v. 909, 168627. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168627>.

Yadav KKN, Gupta A, Kumar LM, Reece N, Singh S, Rezaia AS, Khan (2018). Mechanistic understanding and holistic approach of phytoremediation: a review on application and future prospects. **Ecological Engineering**, v. 120, p. 274–298. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.039>.

Yan C, Li Y, Sharma P, Chen Q, Li B, Shang J (2022). Influence of dissolved organic matter, kaolinite, and iron oxides on aggregation and transport of biochar colloids in aqueous and soil environments. **Chemosphere**, v. 306, 135555. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135555>.

Yang M, Zhou D, Hang H, Chen S, Liu H, Su J, Lv H, Jia H, Zhao G (2024). Effects of exchangeable cation balance Ca, Mg and K on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedling growth based on increased soil cation exchange capacity. **Agronomy**, v. 14, n. 3, p. 629. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy14030629>.

Yang Z, Yang F, Liu JL, Wu HT, Yang H, Shi Y, Liu J, Zhang YF, Luo YR, Chen KM (2022). Heavy metal transporters: functional mechanisms, regulation, and application in phytoremediation. **Science of the Total Environment**, v. 809. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151099>.

Yeboah A, Jiannong L, Shuailei G, Yuzhen S, Hanna A, Kawadwo GAB, Yin X (2020). The utilization of *Ricinus communis* in the phytomanagement of heavy metal contaminated soils. **Environmental Reviews**, v. 28, p. 466–477. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/er-2020-0016>.

Yoon J (2006). Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing in a contaminated Florida site. **Science of the Total Environment**, v. 368, n. 2, p. 456–464. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.01.016>.

Yu S, Zehra A, Sahito ZA, Wang W, Chen S, Feng Y, He Z, Yang X (2024). Cytokinin-mediated shoot proliferation and its correlation with phytoremediation effects in Cd-hyperaccumulator ecotype of *Sedum alfredii*. **Science of the Total Environment**, v. 912, 168993. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168993>.

Yu XL, Zhou JY, et al. (2021). SCycDB: a curated functional gene database for metagenomic profiling of sulphur cycling pathways. **Molecular Ecology Resources**, v. 21, p. 924–940.

Zhang B, Wang Z, Shi J, Dong H (2020). Sulfur-based mixotrophic bio-reduction for efficient removal of chromium (VI) in groundwater. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 268, p. 296–309. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.10.0111>.

Zhang L, Chen X, Xu Y (2020). Frações de carbono orgânico lábeis no solo e atividades enzimáticas do solo após 10 anos de fertilização contínua e incorporação de resíduos de trigo. **Scientific Reports**, v. 10, 11318. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68163-3>.

Zhou Z, Latta DE, Noor N, Thompson A, Borch T, Scherer MM (2018). Fe(II)–transformação de matéria orgânica catalisada por Fe(II)–ferrihidrita coprecipitados: a close look using Fe isotopes. **Environmental Science and Technology**, v. 52, p. 11142–11150. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.8b03407>.

Zhu XJ, Ros GH, Xu MG, Xu DH, Cai ZJ, Sun N, Duan YH, de Vries W (2024). The contribution of natural and anthropogenic causes to soil acidification rates under different fertilization practices and site conditions in southern China. **Science of the Total Environment**, v. 934, 172986. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172986>.