

**AValiação fitotoxicológica e físico-química de solos sob
influência de lixão ativo no município de Crateús-CE utilizando
Allium cepa e Lactuca sativa**

**PHYTOTOXICOLOGICAL AND PHYSOCHEMICAL ASSESSMENT OF SOILS
UNDER THE INFLUENCE OF AN ACTIVE LANDFILL IN THE MUNICIPALITY
OF CRATEÚS-CE USING ALLIUM CEPA AND LACTUCA SATIVA**

Iago Furtado Nunes*
Thayres de Sousa Andrade**

RESUMO

A disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos é um dos maiores desafios ambientais no Brasil, especialmente na região nordeste, onde a persistência da disposição em lixões a céu aberto compromete a qualidade dos recursos naturais. O lixiviado, um líquido poluente que se origina da decomposição dos resíduos sólidos, é capaz de causar contaminação ao carregar metais pesados, sais e compostos orgânicos que se infiltram no solo. Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo investigar a qualidade ambiental do solo na área do lixão municipal ativo de Crateús, no Ceará, buscando entender como a presença desses resíduos altera as características químicas do solo e se essas mudanças podem prejudicar o desenvolvimento inicial das plantas e avaliar a viabilidade dos ensaios fitotoxicológicos para o monitoramento da área. Para realizar essa investigação, foram selecionados três locais de coleta: dois pontos situados na área de descarte de lixo (P1 e P2) e um terceiro ponto localizado a cerca de 500 metros de distância (P3), servindo como uma referência de solo em estado natural para fins de comparação. No laboratório, foram realizadas as análises físico-químicas do solo e posteriormente as amostras passaram por um processo de extração para retirar as substâncias presentes, e os extratos obtidos foram testados em sementes de cebola (*Allium cepa*) e alface (*Lactuca sativa*). O extrato final foi reconstituído com acetona, que é um solvente que pode apresentar toxicidade em concentrações moderadas a alta, por isso os ensaios ecotoxicológicos foram realizados com uma diluição de 0,1% desses extratos. As análises químicas revelaram que o solo do lixão possui algumas alterações importantes, como a presença de arsênio no Ponto 1 em níveis acima do valor de investigação recomendado pela resolução CONAMA nº 420, além de uma quantidade elevada de sais no Ponto 2, que é uma área de descarte mais antiga. No entanto, ao observar o comportamento das sementes, os resultados mostraram que a toxicidade do solo é baixa e não atinge toda a área de forma igual. No Ponto 1, as sementes apresentaram germinação e desenvolvimento inicial das raízes. Já no Ponto 2, notou-se uma dificuldade no crescimento das raízes da alface, o que parece estar mais relacionado ao excesso de sais e à salinidade do solo. O estudo conclui que, embora existam sinais de alerta na composição química do solo, como o arsênio e a salinidade, o potencial de causar danos imediatos às plantas é pequeno nas condições observadas.

Palavras-chave: Fitotoxicológico; Solo de lixão; Físico-químico.

* Iago Furtado Nunes, graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária, iago.furtado.n@gmail.com.

** Thayres de Sousa Andrade, Professora da Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, thayresandrade@crateus.ufc.br.

ABSTRACT

The inadequate disposal of municipal solid waste is one of the greatest environmental challenges in Brazil, especially in the northeast region, where the persistence of disposal in landfills compromises the quality of natural resources. Leachate, a polluting liquid that originates from decomposition of solid waste, can cause contamination by carrying heavy metals, salts, and organic compounds that infiltrate the soil. Given this scenario, the objective of this work was to investigate the environmental quality of the soil in the area of the active municipal landfill of Crateús, in Ceará, seeking to understand how the presence of these wastes alters the chemical characteristics of the soil and whether these changes can harm the initial development of plants and to evaluate the feasibility of phytotoxicological assays for monitoring the area. To perform this investigation, three collection sites were selected: two points located in the waste disposal area (P1 and P2) and a third point located about 500 meters away (P3), serving as a reference for soil in its natural state for comparison purposes. In the laboratory, physicochemical analyses of the soil were performed, and subsequently, the samples underwent an extraction process to remove the substances present, and the extracts obtained were tested on onion (*Allium cepa*) and lettuce (*Lactuca sativa*) seeds. The final extract was reconstituted with acetone, which is a solvent that can present toxicity in moderate to high concentrations; therefore, the ecotoxicological tests were performed with a 0.1% dilution of these extracts. Chemical analyses revealed that the landfill soil has some important alterations, such as the presence of arsenic at Point 1 at levels above the investigation value recommended by CONAMA Resolution No. 420, in addition to a high amount of salts and ammonium at Point 2, which is an older disposal area. However, when observing the behavior of the seeds, the results showed that the soil toxicity is low and does not affect the entire area equally. At Point 1, the seeds showed germination and initial root development. At Point 2, a difficulty in the growth of lettuce roots was noted, which seems to be more related to the excess of salts and soil salinity. The study concludes that, although there are warning signs in the chemical composition of the soil, such as arsenic and salinity, the potential to cause immediate damage to plants is small under the observed conditions.

Keywords: Phytotoxicology; Landfill Soils; Physicochemical.

1 INTRODUÇÃO

A gestão inadequada de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) representa um dos maiores desafios ambientais da sociedade contemporânea, com profundas implicações a saúde pública e a integridade dos ecossistemas (Nascimento, 2022). Em resposta a este desafio, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, estabeleceu diretrizes para a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado deste tipo de resíduo, estabelecendo como uma de suas metas a erradicação de lixões e aterros controlados, promovendo a disposição final ambientalmente adequada para os rejeitos (Brasil, 2010). Contudo, a meta inicial de encerramento dos lixões foi posteriormente alterada pelo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026/2020), que estendeu o prazo para a disposição final ambientalmente adequada, escalonando-o de 2021 a 2024, a depender do porte populacional do município (Brasil, 2020).

Apesar dos avanços legislativos, o cenário de 2023, conforme o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, indicou que o prazo final para a erradicação dos lixões, encerrado em agosto de 2024, ainda estava distante de ser alcançado. Em 2023, do total de 81 milhões de toneladas de RSU gerados no país, cerca de 71,1 milhões de toneladas (87,8%) foram coletadas.

Desse total, a destinação final ambientalmente adequada em aterros sanitários correspondeu a 64,5% dos resíduos coletados, enquanto 35,5% ainda foram destinados a lixões e aterros controlados. Na região Nordeste, a situação é ainda mais crítica: apenas 48,2% dos resíduos coletados tiveram destinação adequada, e a região foi responsável por 34,7% do total de resíduos destinados a lixões e aterros controlados (ABREMA, 2024).

A persistência da disposição inadequada de RSU, especialmente em lixões e aterros controlados, resulta em impactos diretos na qualidade do solo e dos recursos hídricos (Mor; Ravindra, 2023; Lino et al., 2023). O principal vetor dessa contaminação é o lixiviado, um efluente líquido complexo e de alta toxicidade, formado pela percolação da água da chuva ou de umidade interna de resíduos em decomposição. Este líquido é caracterizado por uma composição extremamente heterogênea, contendo elevadas concentrações de matéria orgânica, amônia, sais inorgânicos e metais pesados, o que lhe confere um alto potencial de toxicidade (Mor; Ravindra, 2023; Ranzi et al., 2024). A contribuição do lixiviado para a contaminação do solo ocorre devido à ausência de sistemas de impermeabilização e drenagem adequados nos lixões, permitindo que o efluente migre e se infiltre no solo e subsolo. Essa infiltração altera as propriedades físico-químicas do solo, introduzindo poluentes que podem ser absorvidos pela biota e, criticamente, atingir o lençol freático, comprometendo a qualidade ambiental e a saúde pública (Lino et al., 2023).

A integração dos impactos biológicos de todos os contaminantes presentes, independentemente de sua identificação química, torna a avaliação da toxicidade um requisito metodológico essencial (Ghosh et al., 2017). Isso ocorre porque a identificação e quantificação de poluentes específicos, como metais pesados e compostos orgânicos, não reflete a biodisponibilidade real para os organismos, além de desconsiderar os efeitos combinados (sinérgicos ou antagônicos) que a mistura complexa de substâncias exerce sobre a biota (Ghosh et al., 2017; Rosa, 2004). Consequentemente, a avaliação da qualidade ambiental de matrizes complexas, como o lixiviado de aterros sanitários, não pode ser adequadamente realizada apenas por meio de análises físico-químicas isoladas (Ghosh et al., 2017; Thode Filho, 2017).

Os ensaios de fitotoxicidade, em particular, desempenham um papel crucial ao utilizar organismos vegetais, como *Allium cepa*, que representa a base da cadeia trófica e é altamente sensível a uma ampla gama de poluentes (Anand et al., 2022). Além de fornecerem uma resposta biológica rápida, sensível e de baixo custo, os testes de fitotoxicidade permitem a determinação de concentrações efetivas (CE50) que são diretamente aplicáveis ao monitoramento ambiental e a avaliação da eficácia de processos de tratamento e remediação de áreas contaminadas (Thode Filho, 2017; Rosa, 2004). Ademais, a resposta fitotóxica, manifestada pela inibição da germinação e do crescimento radicular, oferece um indicador direto do potencial de risco para a saúde do ecossistema terrestre em solos impactados por lixiviados (Thomas et al., 2024). Pesquisas conduzidas por Christudoss et al. (2025) e Nicuță (2025) reafirmam o papel do *Allium cepa* e da *Lactuca sativa* como organismos modelo na avaliação da toxicidade de lixiviados de aterros e efluentes, destacando sua eficácia na detecção de danos fisiológicos e citogenéticos. No Brasil, trabalhos como os de Maluf et al. (2026) corroboram o uso desses bioindicadores na investigação do potencial fitotóxico de lodos de tratamento, evidenciando que a inibição do alongamento radicular nessas espécies constitui um indicador de estresse ambiental.

Nesse contexto, considerando a importância de se obter uma avaliação integrada dos impactos ambientais decorrentes da disposição inadequada de resíduos, o presente estudo teve como objetivo realizar a análise dos parâmetros físico-químicos de três pontos amostrais de solo e ecotoxicológica dos extratos destes solos coletados na área do lixão do município de

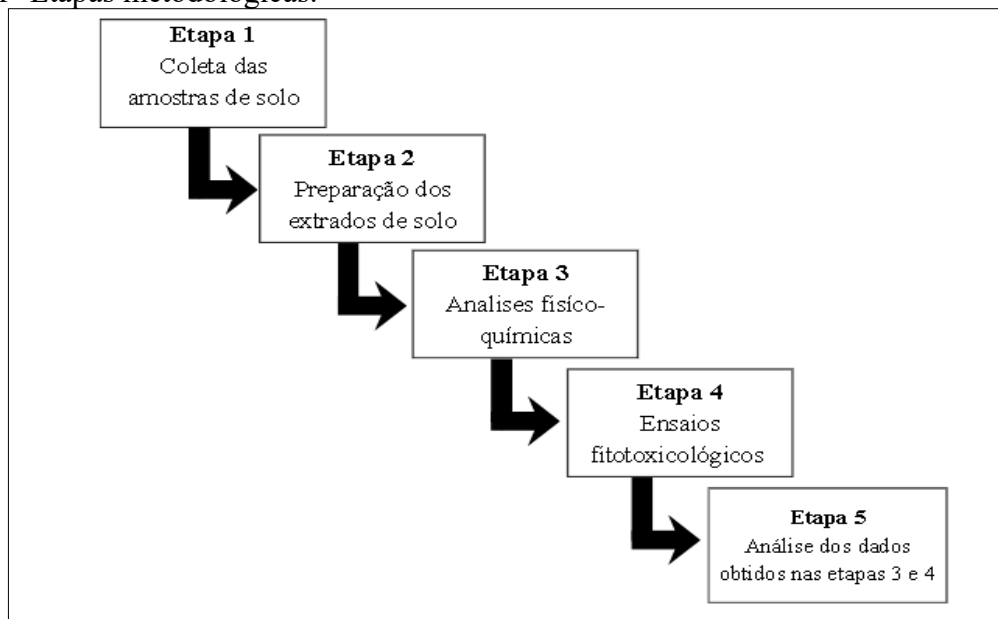
Crateús, no Ceará, visando também avaliar a viabilidade da aplicação desses ensaios como ferramenta para o monitoramento ambiental da área. A avaliação ecotoxicológica foi conduzida utilizando sementes de cebola (*Allium cepa* L.) e alface (*Lactuca sativa* L.) como bioindicadoras, permitindo assim correlacionar a composição química do solo com a sua toxicidade e fornecer dados essenciais para o monitoramento e a gestão ambiental da área.

2 METODOLOGIA

2.1 Etapas Metodológicas

A metodologia empregada neste estudo foi organizada em cinco fases distintas, cuja seqüência e interconexão estão visualmente representadas no fluxograma da Figura 1.

Figura 1- Etapas metodológicas.

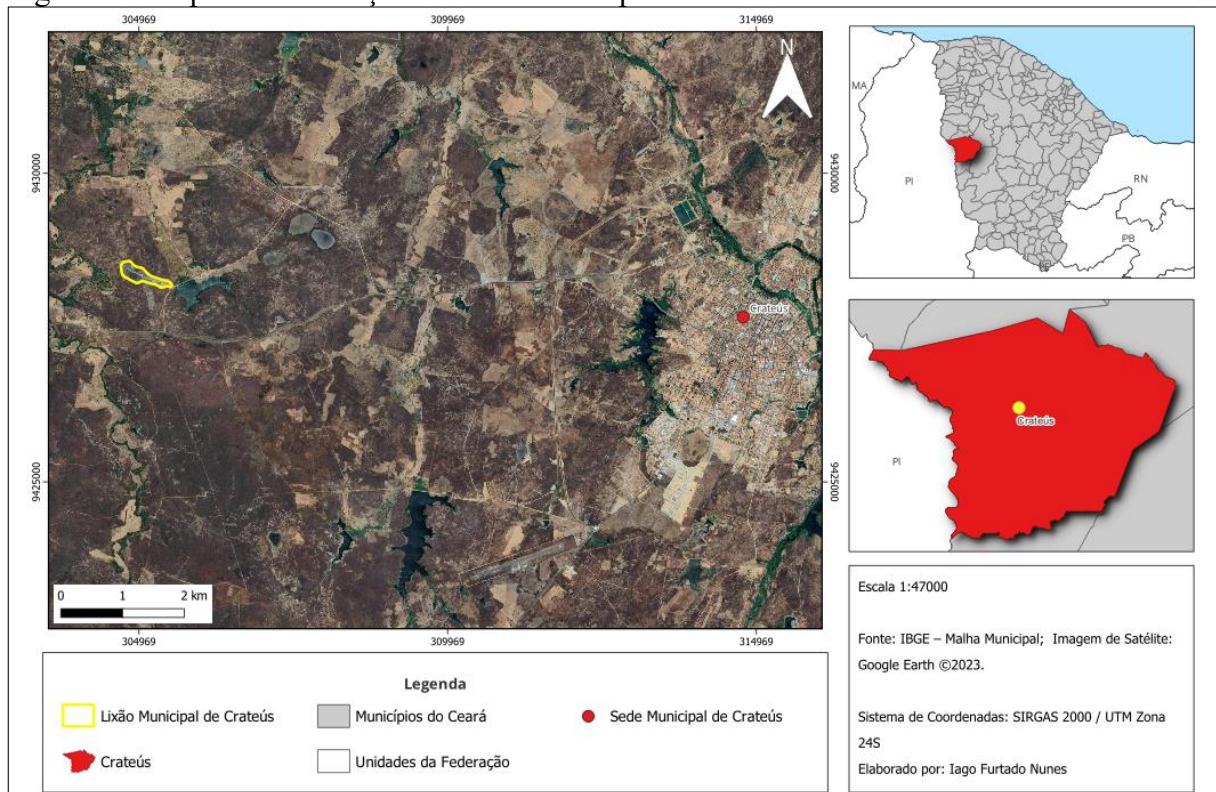


Fonte: Autor (2026)

2.2 Área de Estudo

O município de Crateús está localizado a 350 km da capital Fortaleza, no oeste do estado do Ceará, nas coordenadas 5°10'14"S e 40°40'07"W, e faz parte da Região Sertão de Crateús. O município possui uma área territorial de 2.981,459km², possui clima Tropical Quente Semiárido, com uma população de 76.390 habitantes em 2022 (IBGE, 2022). O lixão municipal de Crateús, está localizado a cerca de 9,9 km da sede municipal próximo da rodovia estadual CE-469, é o atual receptor dos resíduos sólidos urbanos do município de Crateús, possuindo uma área de 15,46 hectares. A figura 2 a seguir mostra a localização do lixão municipal de Crateús.

Figura 2 – Mapa de localização do lixão municipal de Crateús-CE

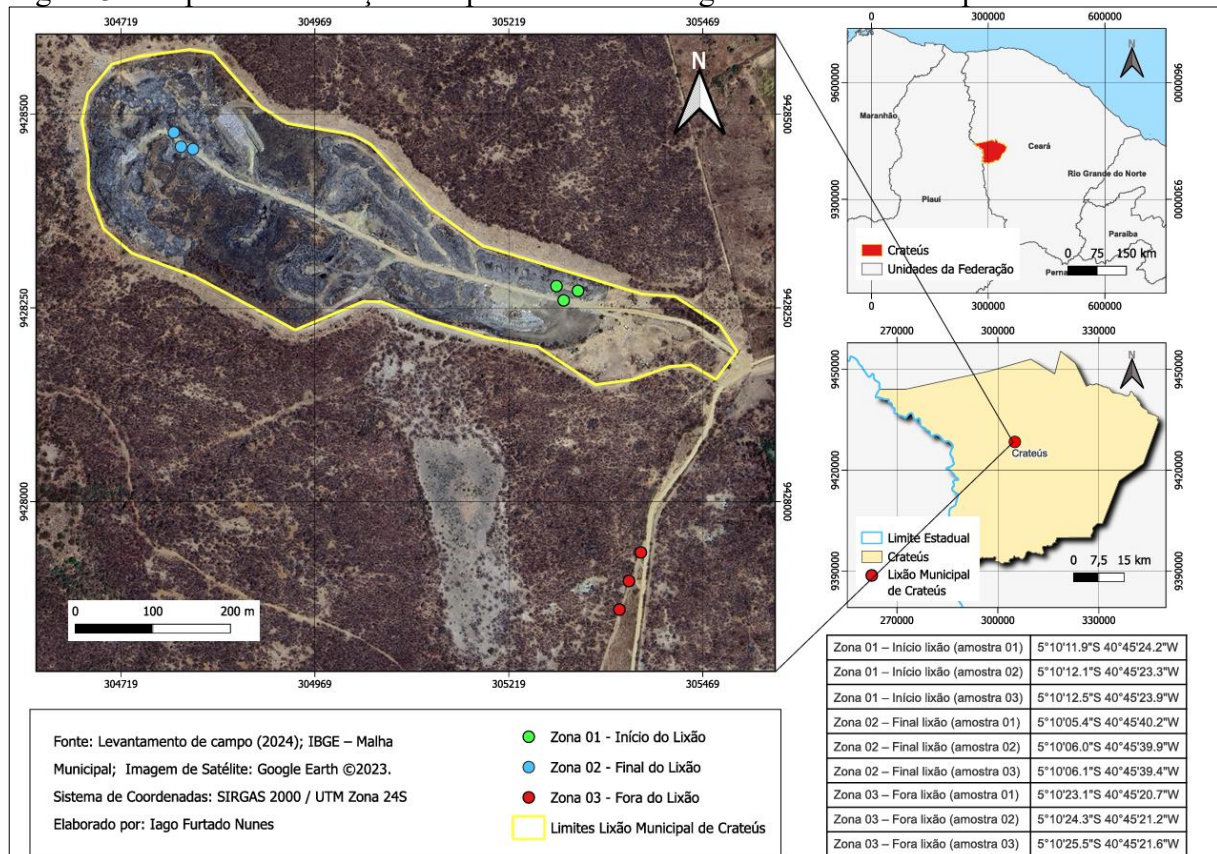


2.3 Procedimento de coleta

A coleta das amostras de solo foi conduzida mediante a adaptação dos procedimentos estabelecidos pelo Manual de Procedimentos de Coleta de Amostras da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa, 2006). O delineamento amostral envolveu a definição de três áreas distintas para a coleta, foram estabelecidas duas zonas de amostragem na área do lixão ativo, as quais foram localizadas para abranger o início e o final da disposição de RSU, priorizando a proximidade a pontos de maior volume de resíduos. Adicionalmente, foi definido um ponto de coleta de referência (controle) a uma distância aproximada de 500 metros do perímetro do lixão, em uma área sem influência direta da disposição de resíduos, garantindo um solo em condições próximas as naturais para fins comparativos. As áreas de coleta foram classificadas como Zona 1(início do lixão), Zona 2(final do lixão) e Zona 3(situada a aproximadamente 500 metros do lixão), em cada uma dessas zonas foram coletadas três amostras de solo, cada amostra com 15 kg de solo, extraídos da camada superficial, a uma profundidade de cerca de 15 cm, tais amostras foram homogeneizadas com o objetivo de obter uma única amostra representativa para cada zona, as amostras representativas foram então identificadas adotando a nomenclatura P1, P2 e P3, correspondendo respectivamente as Zona 1, Zona 2 e Zona 3.

A localização geográfica da área de estudo e a distribuição espacial dos pontos de amostragem estão representadas na Figura 3. Este mapa ilustra a disposição do lixão ativo, a área de influência direta e a posição do ponto de controle (P3).

Figura 3 - Mapa de localização dos pontos de amostragem no lixão municipal de Crateús - CE



Fonte: Autor (2026)

O procedimento de coleta foi realizado com o auxílio de ferramentas manuais. Inicialmente, utilizou-se enxada e pá vanga para a remoção e limpeza da camada superficial do solo. Em seguida, a coleta das amostras de solo propriamente ditas foi efetuada com o uso de picareta. Após a extração, as amostras foram acondicionadas em baldes de coleta e identificadas com etiquetas.

Por fim, as amostras coletadas e acondicionadas foram transportadas para o laboratório de geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC), campus de Crateús, onde foram preparadas para posterior envio ao laboratório H2OAnalysis Laboratórios & Engenharia Ambiental, responsável pelas análises químicas.

2.4 Preparação dos Extratos de Solo

O processo de extração iniciou-se com o preparo das amostras de solo. O material foi inicialmente colocado em um liofilizador por um período de dois dias (48 horas) para a eliminação da umidade. Após a secagem, os sedimentos foram macerados e passados por uma peneira de 2 mm, removendo-se assim detritos e partículas de maior dimensão. Para cada área de coleta, foi criada uma amostra de 30 g, composta por 10 g de cada uma das três amostras de solo. Posteriormente estas amostras foram colocadas em recipientes do tipo Erlenmeyer (125 ml), destinados ao preparo dos extratos.

A extração dos compostos ocorreu em cinco etapas sequenciais, utilizando solventes orgânicos distintos. Em cada fase, 40 ml de solvente foram adicionados ao sedimento, na seguinte ordem: (1) propanona (acetona), (2) etanoato de etila (acetato de etila), (3) diclorometano, (4) hexano e (5) uma mistura de 10 ml de cada um dos solventes anteriores (totalizando 40 ml). Em cada ciclo, a amostra foi submetida a um banho de ultrassom por 20

minutos, facilitando a liberação dos compostos. Em seguida, as soluções foram transferidas para tubos de centrífuga de 50 mL e centrifugadas a 2000 rpm por 15 minutos. Os sobrenadantes das cinco extrações foram combinados em balões volumétricos de 100 ml. Os extratos combinados foram, então, pré-concentrados por rotoevaporação até atingirem um volume aproximado de 2 ml. A secagem final foi efetuada sob fluxo de gás nitrogênio, e os extratos foram reconstituídos com 2 ml de propanona (acetona).

2.5 Análises Físico-químicas

As análises físico-químicas das amostras de solo foram realizadas por um Provedor Externo Acreditado (PE02 - CRL 0687). O laboratório contratado opera sob o sistema de gestão da qualidade em conformidade com a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005. Os ensaios foram conduzidos seguindo metodologias da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA), que incluem métodos de digestão e extração (EPA 3050 B: 1996, EPA 3051 A: 2007) e métodos de análise instrumental para metais e compostos orgânicos voláteis (EPA 6010 D: 2018, EPA Method 5021 A: 2014, EPA 8260 D: 2018). Para a determinação de íons inorgânicos, foram empregados o Método 4110 B da 24ª edição do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SMWW) e o método EPA Method 300.1: 1999 (e suas erratas). Adicionalmente, a determinação de Matéria Orgânica seguiu o método 15 do Capítulo 1 do Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Outros parâmetros foram analisados conforme protocolos internos do laboratório (PR-Tb-FQ 318, PR-Tb-FQ 038, PR-Tb-FQ 161, PR-Tb-FQ 188, PR-Tb-FQ 401, PR-Tb-FQ 358). O gerenciamento e o registro dos dados foram realizados por meio do software Ultra Lims (Versão: v.00).

2.6 Teste de Ecotoxicológicos com Sementes de *Allium cepa* L. e *Lactuca sativa* L.

O procedimento experimental foi delineado com o objetivo de mensurar o grau de fitotoxicidade do extrato de amostras de solo coletadas na área do lixão municipal de Crateús. O ensaio foi conduzido sob condições controladas, utilizando bioensaios de germinação e crescimento radicular. Os organismos teste utilizados foram sementes de *L. sativa* (Alface) da marca Isla® (Lote: 178257-000), e *A. cepa* (Cebola) da marca Feltrin® (Lote: 0076002230024020). Os ensaios foram conduzidos com base nas diretrizes estabelecidas pela USEPA (1996) e pelas Regras para Análise de Sementes – RAS (2009), incorporando ajustes metodológicos fundamentados no procedimento descrito por Peduto, Jesus e Kohatsu (2019). O delineamento experimental consistiu na avaliação do potencial de toxicidade de extratos de amostras de solo provenientes de três pontos de coleta: dois pontos localizados na área do lixão (P1 e P2), considerados potencialmente impactados, e um ponto externo à área, utilizado como fundo de referência na avaliação (P3 - solo não contaminado). A montagem do bioensaio foi realizada em 150 placas de Petri, nas quais um papel filtro foi disposto como substrato. O substrato foi umedecido com 4 ml da solução de exposição, que consistiu em uma diluição de 0.1 % do extrato do solo correspondente, tal diluição foi selecionada em função da utilização de acetona na reconstituição dos extratos, que é um solvente capaz de apresentar toxicidade dependendo da concentração e do tempo de exposição a sementes. Em cada placa, foram distribuídas 10 sementes de forma equidistante. Após a adição da solução, as placas foram fechadas e seladas com filme plástico. Posteriormente as placas foram deixadas sobre condições controladas, mantendo a temperatura constante de 20±1 °C, com um regime de iluminação

estabelecido por um fotoperíodo de 12 horas de luz e 12 horas de escuro, garantindo a uniformidade das condições para a germinação e o desenvolvimento inicial das plântulas. Cada ponto de coleta foi avaliado em triplicata. O período de exposição foi de sete dias (168 horas), após o qual as plântulas foram avaliadas.

A validade do ensaio foi condicionada à obtenção de uma porcentagem de germinação mínima de 90% no controle negativo (CN) realizado com água destilada, servindo como referência para o crescimento não inibido das plântulas. Adicionalmente, devido à utilização de acetona no procedimento de obtenção dos extratos do solo, um controle de solvente (CA) com acetona foi incluído para isolar e quantificar qualquer potencial efeito tóxico ou inibitório do solvente orgânico no desenvolvimento das sementes.

A avaliação da fitotoxicidade do extrato de solo foi realizada por meio da análise de diversos índices ecotoxicológicos que quantificam os efeitos de inibição ou estímulo no desenvolvimento das plântulas. Os parâmetros primários mensurados foram a Germinação Absoluta (GA %), que indica o efeito do extrato na viabilidade da semente, e o Crescimento Relativo da Raiz (CRR %), considerado o indicador mais sensível de toxicidade aguda, calculado mediante a equações 1 (PINHO et al., 2017),

$$CRR\% = \text{comprimento da raiz da amostra da amostra} / \text{comprimento da raiz da amostra do controle} \quad (1)$$

A partir destes, foi calculado o Índice de Germinação (IG %), equação 2 Trautmann e Krasny (1997), uma métrica composta que integra os efeitos de germinação e crescimento. Para análises mais detalhadas, foram determinados o Índice de Germinação Normalizado (IGN %), calculado por meio da equação 3 (Gonzalez et al., 2011), e o Índice de Efeito na Radícula (IER), dado pela equação 4 (Gonzalez et al., 2011).

$$IG \% = (GA\% * CRR\%) / 100 \quad (2)$$

$$IGN \% = (\% \text{Germinação na amostra} - \% \text{germinação no controle}) / \% \text{germinação no controle} \quad (3)$$

$$IER\% = (\text{comprimento médio da radícula das sementes germinadas em cada amostra} - \text{comprimento médio da radícula das sementes germinadas no controle}) / \text{comprimento médio da radícula das sementes germinadas no controle} \quad (4)$$

Adicionalmente, o efeito no crescimento foi avaliado por meio do Índice de Crescimento Relativo (ICR), em relação ao controle negativo (CN), através da equação 5.

$$ICR\% = \text{Média das raízes da amostra} / \text{Média das raízes do controle negativo} \quad (5)$$

Com base no IG obtido, utilizado como indicador do nível de fitotoxicidade do extrato avaliado, procedeu-se à classificação do grau de toxicidade conforme os critérios propostos por Trautmann e Krasny (1997), conforme apresentado na **Tabela 1**.

Tabela 1 – Classificação do grau de fitotoxicidade.

FAIXA DO ESTUDO	Classificação	Classificação
-----------------	---------------	---------------

IG > 80%	Sem inibição	Não fitotóxico
60% < IG < 80%	Inibição leve	Pouco fitotóxico
40% < IG < 60%	Inibição forte	Fitotóxico
IG < 40%	Inibição grave	Muito fitotóxico

Fonte: Adaptado de Trautmann e Krasny (1997)

A interpretação dos resultados do ICR foi realizada segundo a metodologia descrita por Young et al. (2012), que estabelece classes de efeito fitotóxico a partir do comprimento das raízes das sementes expostas ao lixiviado, conforme descrito na **Tabela 2**.

Tabela 2 – Classificação dos efeitos a partir do ICR

Classificação	ICR
Inibição no alongamento da raiz	< 0,8
Sem efeito	$\geq 0,8 \leq 1,2$
Estimulação no alongamento da raiz	> 1,2

Fonte: Adaptado de Young et al. (2012)

Os valores percentuais dos índices de IGN e de Inibição do IER foram analisados quanto ao nível de toxicidade com base na classificação proposta por González et al. (2011), conforme apresentado na **Tabela 3**.

Tabela 3 – Nível de toxicidade com relação ao IGN e IER

Nível de toxicidade	IGN(%)	IER(%)
Baixa	0 a -0,25	0 a -0,25
Moderada	-0,25 a -0,5	-0,25 a -0,5
Alta	-0,5 a -0,75	-0,5 a -0,75
Muito Alta	-0,75 a -1,0	-0,75 a -1,0
Hormese	>0	>0

Fonte: González et al. (2011)

2.7 Tratamentos e análise

Cada grupo experimental foi submetido a análises estatísticas para avaliar a significância das diferenças observadas. Inicialmente, a normalidade da distribuição dos dados foi verificada por meio do teste de Shapiro-Wilk. Para os dados que apresentaram distribuição normal, a comparação entre os grupos foi realizada por meio da Análise de Variância (ANOVA) one-way, seguida pelo teste post-hoc de Dunnett para comparações múltiplas ($p < 0,05$). Todas as análises estatísticas foram conduzidas utilizando o software GraphPad Prism 10.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização físico-química do solo

Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros físico-químicos das amostras de solos.

Tabela 4 – Parâmetros físico-químicos das amostras de solo.

Parâmetro	Unidade	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
------------------	----------------	----------------	----------------	----------------

Arsênio Total	mg/kg	46,019	<1,010	<1,010
Cádmio	mg/kg	<0,106	<0,106	<0,106
Chumbo Total	mg/kg	16,773	<1,337	<1,337
Cromo Total	mg/kg	37,244	7	<1,823
Mercúrio Total	mg/kg	0,074	<0,002	<0,002
Níquel Total	mg/kg	<1,847	7,717	<1,847
Fósforo Total	mg/kg	3126,855	1125,957	40,711
Nitratos	mg/kg	50,4	78,8	9,57
Potássio Total	mg/kg	326,1	3702,9	988
Amônio	mg/kg	316,07	36,12	518,3
Nitrogênio Amoniacal Total	mg/kg	259,07	29,6	424,84
Nitrogênio Total	mg/kg	421,72	336,35	445,97
Cálcio Total	mg/kg	3044,3	3991,7	343,7
Enxofre Total	mg/kg	2643,579	101,421	60,067
Magnésio	mg/kg	108	3651	832
Cobre Total	mg/kg	15,8	10,677	1,912
Ferro Total	mg/kg	8921,851	9987,327	3244,214
Manganês Total	mg/kg	12,768	409,713	157,057
Zinco	mg/kg	7,333	<1,209	9,117
Cloreto	mg/kg	186,83	311,36	5,73
Sulfato	mg/kg	561,29	28,659	7,51
Alcalinidade de Bicarbonato	mg/kg	50	18,9	2,83
Alcalinidade de Carbonato	mg/kg	0,00001	Ausente	Ausente
Alcalinidade Total	mg/kg	50	18,9	2,83
Condutividade Elétrica (Extrato Aquoso)	µS/cm	1921	2100	524
Sódio Total	mg/kg	27,7	299,53	222,8
pH	pH	8,78	7,92	6,58
Carbono Orgânico Total	mg/kg	9417,81	8072,15	5128,94
DBO	mg/kg	7,43	9,57	2,06
DQO	mg/kg	7081,06	6069,29	3856,35

Fonte: elaborada pelo autor.

A caracterização físico-química do solo sob influência direta da disposição de RSU revelou um perfil de contaminação, cujos resultados foram analisados e comparados com os Valores de Prevenção (VP) e Valores de Investigação (VI) estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420 (BRASIL, 2009), além de critérios agronômicos e ecotoxicológicos. A análise dos parâmetros demonstra que a área apresenta um risco ambiental, resultante da

combinação de metais potencialmente tóxicos, excesso de nutrientes e condições de salinidade e alcalinidade que modulam a biodisponibilidade e a toxicidade dos contaminantes. Marinho et al. (2022) realizaram um estudo em 12 lixões desativados no nordeste brasileiro e observaram que os solos dessas áreas apresentavam, em média, um pH de 7,39, condutividade elétrica de 321,54 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e teores de fósforo de 1028,99 mg/kg além da presença de metais, que segundo o estudo os solos dos lixões continham teores de metais muito superiores aos solos naturais, sendo 36 vezes mais cobre, 33 vezes mais cromo, 18 vezes mais níquel e chumbo, e 7 vezes mais zinco. Podemos observar resultados ainda mais acentuados para alguns parâmetros no lixão municipal de Crateús, como condutividade elétrica, possivelmente devido a persistência da disposição de RSU no local.

O Arsênio Total (As) no Ponto 1 atingiu 46,019 mg/kg, um valor que excede o Valor de Investigação para o cenário agrícola de 25 mg/kg, conforme a Resolução CONAMA nº 420 (BRASIL, 2009), classificando o solo como fortemente anômalo. Este teor elevado de arsênio é um fator de risco primário, conhecido por sua citotoxicidade e mutagenicidade (Leme; Marin-Morales, 2009). Em contraste, o Cádmio (Cd) e o Mercúrio (Hg) apresentaram concentrações abaixo dos limites de detecção ou dos VPs, indicando que, para estes elementos, o risco imediato de contaminação não é o fator preponderante. O Chumbo Total (Pb) e o Cromo Total (Cr) apresentaram teores abaixo dos respectivos VPs (72 mg/kg e 75 mg/kg), contudo, a concentração de cromo de 37,244 mg/kg no ponto 1 sugere um acúmulo deste metal que, embora não ultrapasse o limite legal, requer monitoramento contínuo devido ao potencial de toxicidade e bioacumulação (Milhome et al., 2018). Outros metais como Níquel (Ni), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn) e Zinco (Zn) também apresentaram variações, com destaque para o Ferro e Manganês, cujos teores totais muito elevados, embora comuns em solos, podem ter sua solubilidade e toxicidade aumentadas em condições de anaerobioses como resultado de suas reduções (DeVore et al., 2022).

O desequilíbrio é acentuado pela dinâmica de nutrientes, especialmente o Fósforo Total (P), que alcançou 3126,855 mg/kg no Ponto 1. Este valor é classificado como excessivo, sendo característico do aporte de resíduos e cinzas, e representa um risco ambiental de eutrofização de corpos d'água por lixiviação (Dong et al., 2025). A dinâmica do nitrogênio é um indicador crucial da decomposição de RSU, com o Amônio (NH_4^+) apresentando valores elevados nos 3 locais de coleta. Tais concentrações são resultado da intensa decomposição anaeróbia da matéria orgânica e são diretamente fitotóxicas, estudos como de Zhang et al. (2021) mostram que a exposição a concentrações moderadas a altas de NH_4^+ são um fator de inibição do alongamento das raízes e comprometem a integridade celular das plantas. O Potássio Total (K), Cálcio Total (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre Total (S) também se encontram em níveis elevados, contribuindo para a salinidade do solo e podendo causar desequilíbrios nutricionais por antagonismo iônico, como a deficiência de potássio induzida pelo excesso de cálcio e magnésio (EMBRAPA, 2021).

A salinidade constitui um fator de estresse ambiental preponderante, com a Condutividade Elétrica (CE) no extrato aquoso atingindo 2100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no Ponto 2, o que classifica o solo como salino. Esta alta CE, impulsionada pelos teores elevados de Cloreto e Sulfato, impõe um severo estresse osmótico às plantas, dificultando a absorção de água e nutrientes (Q. Su et al., 2025). O Sódio Total elevado (299,53 mg/kg no Ponto 2) agrava o risco de sodificação, um processo de degradação comum em solos das regiões áridas e semiáridas, caracterizado pelo acúmulo de sódio trocável, que resulta em aumento da pressão osmótica do solo e toxicidade (Cordeiro e Mansefú, 2001). O pH do solo no Ponto 1 (8,78) é levemente alcalino, um resultado típico da decomposição de resíduos e da presença de carbonatos. Embora o pH alcalino possa reduzir a mobilidade de alguns metais, ele diminui drasticamente a

biodisponibilidade de micronutrientes como ferro, zinco e manganês, induzindo deficiências nutricionais nas plantas (EMBRAPA, 2021).

A alta carga orgânica, confirmada pelo Carbono Orgânico Total (9417,81 mg/kg) e pelos valores elevados de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO), favorece a condição de anaerobiose. Esta condição redutora pode aumentar a solubilidade e a mobilidade de metais potencialmente tóxicos, como o ferro e o manganês, para a água subterrânea, consolidando a toxicidade do solo de lixão (Preziosi et al., 2024).

3.1 Ensaios fitotoxicológicos com extratos dos solos

3.1.1 Ensaios com sementes de *Allium Cepa*

A Tabela 5 abaixo apresenta os resultados da germinação das sementes expostas a solução de 0.1% do extrato de solo.

Tabela 5 – Parâmetros de germinação para as sementes de *A. Cepa L.*

Ponto	NOE	PMG	GRS (%)	CRR (%)	IG (%)	IGN (%)
P1	10	90%	103,13	113,14	116,68	0,031
P2	10	77%	89,06	87,86	78,25	-0,109
P3	10	93%	118,75	100,78	119,68	0,188
CN	10	90%	100,00	100,00	100,00	0,000
CA	10	77%	100,00	89,99	89,99	0,000

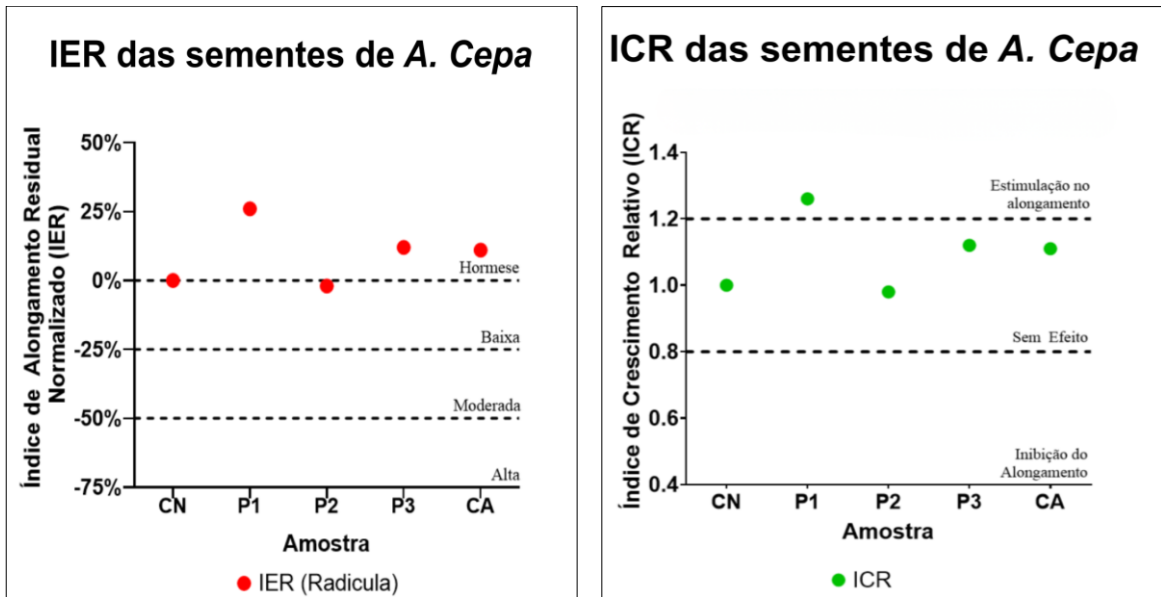
NOE: número de organismos expostos; PMG: porcentagem média de germinação; GRS: germinação relativa das sementes; CRR: crescimento relativo da radícula; IG: Índice de germinação; IGN: Índice de porcentagem de germinação residual normalizado.

Fonte: elaborada pelo autor.

A análise dos parâmetros de germinação, demonstrou padrões variados entre os pontos amostrados. O controle de solvente (CA) confirma que a acetona não afetou significativamente a germinação na concentração testada. No Ponto 1 (P1), o IG de 116,68% e o IGN de 0,031 indicaram ausência de inibição aguda, classificando o extrato como não fitotóxico. O Ponto 3 (P3), controle de área não contaminada, apresentou IG de 119,68% e IGN de 0,188, reafirmando sua condição de controle ambiental com efeito de hormese. Em contraste, o Ponto 2 (P2) exibiu um IG de 78,25%, caracterizando inibição leve e classificando o extrato como pouco fitotóxico, com IGN de -0,109, indicativo de toxicidade baixa.

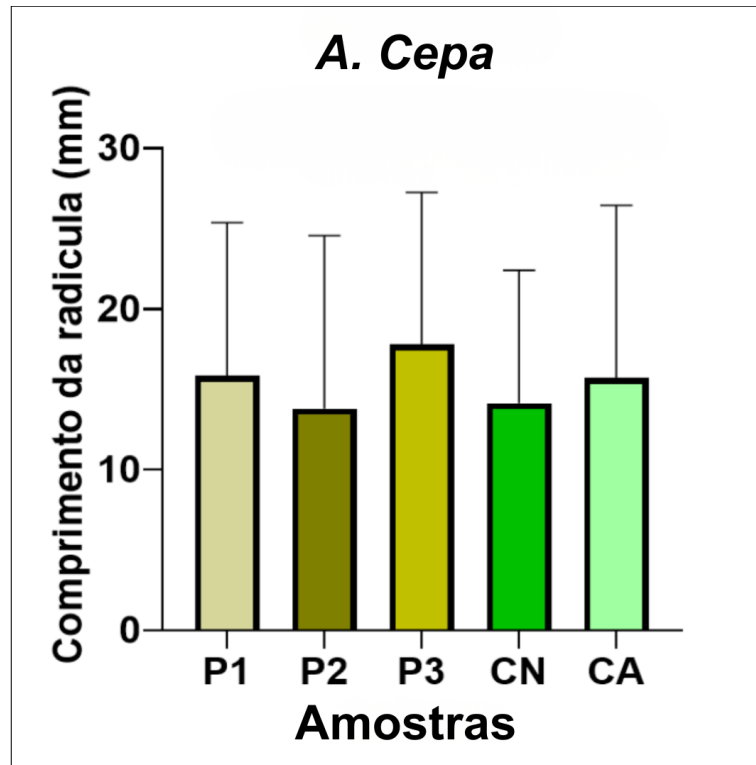
Os índices de efeito no crescimento radicular, IER e ICR, corroboraram as tendências observadas na germinação, mas com maior sensibilidade. No P1, o ICR de 1,26 e o IER de 0,26 caracterizaram o efeito de hormese, sugerindo uma estimulação no alongamento radicular. Este fenômeno pode ser entendido como um padrão bifásico de resposta à dose, no qual a exposição a pequenas quantidades de um determinado agente provoca efeitos positivos ou estimulantes, enquanto exposições a concentrações mais altas resultam em efeitos negativos, inibitórios ou tóxicos (Mushak, 2013). No P2, o IER de -0,02 confirmou uma tendência de inibição no alongamento radicular, indicando um nível de toxicidade baixa. A complexidade das interações e a variação dos efeitos nos diferentes pontos são evidenciadas ao se analisar o comportamento do IER e ICR, conforme ilustrado nos Gráficos 1 e 2, respectivamente.

Gráfico 1 e 2 – Efeitos da exposição as soluções de extratos de solo a concentração de 0,1% nos parâmetros de IER e ICR para as sementes de *A. Cepa L.*



Em relação ao alongamento radicular, a análise estatística por ANOVA não revelou diferenças significativas entre os pontos amostrados para *Allium cepa*, embora os índices de IER e ICR tenham indicado uma tendência de inibição no P2. O comprimento médio da radícula para cada ponto é apresentado no Gráfico 3. O extrato de solo não provocou efeito significativo sobre o crescimento radicular de *Allium cepa*, pois apesar da espécie ser amplamente reconhecida como bioindicador de genotoxicidade e a mutagenicidade, a alta carga orgânica e a presença de amônio no P1, por exemplo, criam um ambiente quimicamente dinâmico onde a biodisponibilidade de metais pode ser modulada, reduzindo a toxicidade imediata, mas favorecendo a persistência de contaminantes na fração sólida do solo (Zhang et al., 2025).

Gráfico 3 – Efeitos da exposição a amostras de lixiviado de lixão no crescimento da radícula para sementes de *A. Cepa L.*



Fonte: elaborada pelo autor.

3.1.2 Ensaios com sementes de *Lactuca Sativa*

Os ensaios realizados com *Lactuca sativa L.* demonstraram que esta espécie apresenta uma sensibilidade em relação aos contaminantes provenientes do lixão. A Tabela 6 abaixo apresenta os resultados da germinação das sementes expostas a solução de 0.1% do extrato de solo

Tabela 6 – Parâmetros de germinação para as sementes de *Lactuca Sativa*.

Ponto	NOE	PMG	GRS (%)	CRR (%)	IG (%)	IGN (%)
P1	10	90%	107,91	110,61	119,36	0,079
P2	10	77%	97,12	83,13	80,74	-0,029
P3	10	93%	107,91	103,59	111,79	0,079
CN	10	90%	100,00	100,00	100,00	0,000
CA	10	77%	107,91	105,00	113,31	0,079

NOE: número de organismos expostos; PMG: porcentagem média de germinação; GRS: germinação relativa das sementes; CRR: crescimento relativo da radícula; IG: Índice de germinação; IGN: Índice de porcentagem de germinação residual normalizado.

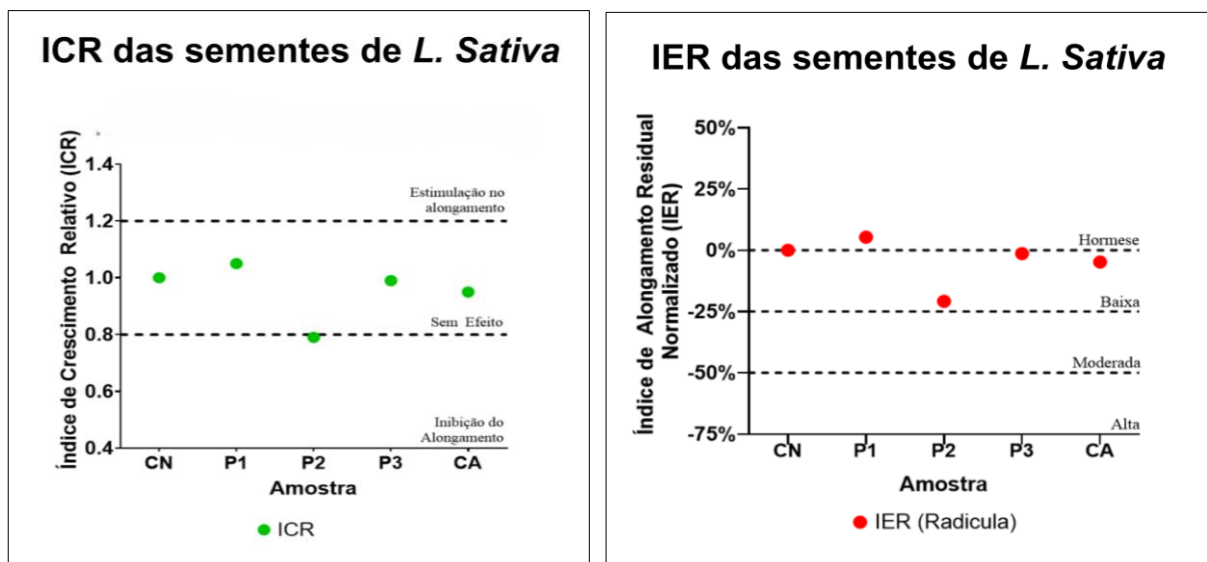
Fonte: elaborada pelo autor.

A análise dos índices de germinação revelou que, no Ponto 1 (P1), os resultados de IG (119,36%) e IGN (0,079) indicaram um efeito de estimulação no desenvolvimento inicial das plântulas. No Ponto 2 (P2), o IG de 80,74% situou-se no limite da classificação de não

fitotóxico, enquanto o IGN de -0,029 revelou um nível de toxicidade baixa. O Ponto 3 (P3), controle externo, apresentou IG de 111,79% e IGN de 0,079, também com efeito de hormese. A *L. sativa* responde positivamente a matrizes ricas em matéria orgânica e nutrientes como o nitrogênio amoniacal, que no P1 atingiu 259,07 mg/kg, que pode atuar como um fertilizante inicial e mascarar a presença de metais potencialmente tóxicos. Nos estudos realizados por Aparicio et al. (2021), foi utilizado um meio contendo nitrato de amônio, onde alongamento da radícula foi estimulado, devido à rápida incorporação de nitrogênio pela planta.

Os índices de efeito no crescimento radicular, IER e ICR, para *Lactuca sativa* também apresentaram variações entre os pontos. No P1, o ICR de 1,26 e o IER de 0,26 indicaram estimulação no alongamento da raiz, reforçando o efeito de hormese. No P2, o ICR de 0,98 e o IER de -0,02 revelaram um nível de toxicidade baixa, com inibição no alongamento radicular indicando baixa toxicidade, porém com inibição sutil do alongamento radicular. Estudos como os de Aguilar-Ascón et al. (2025), utilizaram *Lactuca sativa* como organismo-teste demonstram que a radícula é um parâmetro sensível em ensaios ecotoxicológicos, respondendo mesmo a concentrações reduzidas de compostos tóxicos ou misturas complexas, o que permite identificar impactos que não são detectados apenas pela germinação ou por índices globais de crescimento. Assim, a leve inibição observada em P2 sugere que, embora o risco ecotoxicológico seja baixo, ainda há interferência no desenvolvimento inicial das plântulas, reforçando a importância do uso de indicadores subletais para a avaliação da recuperação ambiental de áreas contaminadas, conforme discutido por García-Carmona et al. (2017). A complexidade das interações e a variação dos efeitos nos diferentes pontos são ilustradas nos Gráficos 4 e 5, que apresentam o comportamento do IER e ICR, respectivamente.

Gráfico 4 e 5 – Efeitos da exposição a amostras de lixiviado de lixão no crescimento da radícula para sementes de *L. Sativa L.*

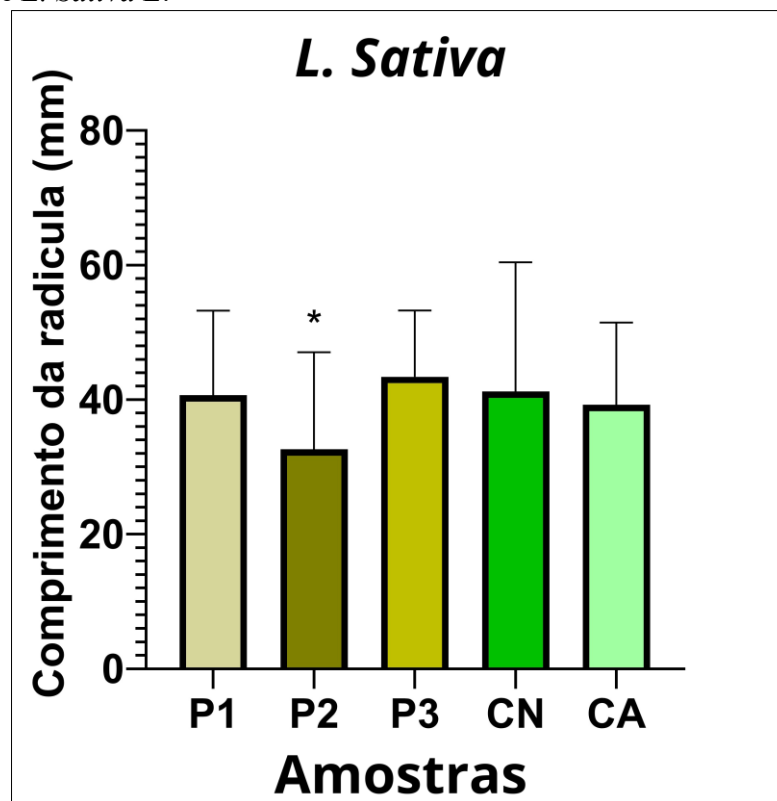


Fonte: elaborada pelo autor.

Em relação ao alongamento radicular, a análise estatística para *Lactuca sativa* revelou diferenças significativas. O teste post-hoc de Dunnett indicou uma diferença estatisticamente significativa ($p = 0,0122$) no comprimento radicular entre o Ponto 2 e o Ponto 3 (solo de referência). Este resultado corrobora a contaminação e os efeitos fitotóxicos sobre as sementes no Ponto 2, que representa uma área de disposição antiga. Com base nos resultados apresentados por Parviainen et al. (2022), o alongamento das raízes mostrou-se um dos

parâmetros mais sensíveis na avaliação ecotoxicológica conduzida no estudo. Os autores observaram que, mesmo em situações nas quais a germinação não foi significativamente afetada, o crescimento radicular apresentou reduções mensuráveis, evidenciando a presença de efeitos subletais associados à exposição aos contaminantes avaliados. A inibição do alongamento das raízes foi relacionada principalmente à biodisponibilidade residual de compostos tóxicos no meio, capazes de interferir nos processos fisiológicos iniciais das plântulas, como divisão e alongação celular. O estudo reforça que o crescimento radicular responde de forma mais precoce e sensível ao estresse químico quando comparado a outros endpoints, sendo, portanto, um indicador robusto para detectar impactos ambientais de baixa intensidade. A redução no crescimento médio da radícula no P2, em comparação com o P3, demonstrada no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Efeitos da exposição a amostras de lixiviado de lixão no crescimento da radícula para sementes de *L. Sativa L.*



Fonte: elaborada pelo autor.

Este efeito inibitório pode ser atribuído à salinidade elevada e ao excesso de sódio (299,53 mg/kg) no P2, condição reconhecida na literatura como limitante ao desenvolvimento inicial das plantas, que age prejudicando a absorção de água e nutrientes essenciais. No Ponto 1, a ausência de toxicidade imediata, apesar do alto teor de arsênio, corrobora a ideia de que os poluentes podem não estar em concentrações biodisponíveis suficientes para interromper o desenvolvimento da alfaca. Por outro lado, a literatura sugere que o crescimento das raízes é frequentemente mais influenciado por variações de pH e salinidade do que pela carga metálica isolada (Urionabarrenetxea et al. 2022). Isso explica o comportamento observado no Ponto 2, onde a inibição estatisticamente significativa do alongamento radicular pode ser resultado do desequilíbrio químico e físico do solo, e não necessariamente pelos metais pesados.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados dos testes físico-químicos revelaram contaminação por Arsênio no Ponto 1 (46,019 mg/kg), cujos teores superam os limites de prevenção estabelecidos pela Resolução CONAMA nº420/2009. Além da presença de metais, os valores de condutividade elétrica e de nitrogênio amoniacal no Ponto 2 indicam alterações químicas comuns em locais de disposição inadequada de resíduos sólidos.

Os ensaios de fitotoxicidade demonstraram que *Lactuca sativa* é um indicador sensíveis e complementar para o monitoramento de solos impactados. Observou-se o fenômeno de estimulação de crescimento no Ponto 1, onde a presença de nutrientes e a diluição de contaminantes podem ter estimulado o desenvolvimento inicial das sementes. Em contrapartida, o Ponto 2 apresentou inibição no alongamento radicular de *Lactuca sativa*, demonstrada pelo ANOVA seguida pelo teste post-hoc de Duunet ($p = 0,0122$), o que corrobora a fitotoxicidade detectada. Para os testes com sementes de *Allium cepa*, apesar da contaminação química detectada (como o Arsênio no P1), o extrato do solo apresentou baixíssima toxicidade aguda na diluição testada (0,1%), o Ponto 2 foi o único a apresentar uma leve inibição (IG de 78,25%), sendo classificado como pouco fitotóxico. Essa sutil diferença em relação ao P1 sugere que a idade do lixo e a salinidade local (2100 $\mu\text{S}/\text{cm}$) têm um impacto inibitório maior do que a presença isolada de metais pesados, a ANOVA seguida pelo teste post-hoc de Duunet confirmou que não houve diferenças significativas no alongamento radicular da *Allium cepa* entre os pontos do lixão e o controle na concentração de 0,1% dos extratos de solo.

Em suma, o estudo confirma que a análise físico-química sendo integrada a bioensaios é indispensável para compreender a biodisponibilidade e os efeitos antagônicos dos contaminantes. Como recomendações para pesquisas futuras, sugere-se a realização de ensaios com diferentes concentrações de extratos na solução de exposição, a fim de determinar os limiares de toxicidade aguda com maior precisão. Adicionalmente, recomenda-se a aplicação de testes genotoxicológicos, como o teste de micronúcleo, em sementes de *Allium cepa*, visando investigar danos ao material genético que podem ocorrer mesmo na ausência de inibição do crescimento radicular, garantindo assim uma avaliação mais abrangente da toxicidade da área.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005: requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABREMA. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024**. São Paulo: ABREMA, 2024.

AGUILAR-ASCÓN, Edwar; MARRUFO-SALDAÑA, Liliana; BARRA-HINOJOSA, Julio; BULEJE-DEL-CARPIO, Robert. **Assessment of tannery effluents quality treated by electrocoagulation and ozonation: physicochemical and ecotoxicological characterization**. PLOS One, San Francisco, v. 20, n. 7, e0328654, 2025. DOI: 10.1371/journal.pone.0328654.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 24. ed. Washington, DC: APHA/AWWA/WEF, 2017. Método 4110 B.

ANAND, N.; PALANI, S. G. **A comprehensive investigation of toxicity and pollution potential of municipal solid waste landfill leachate**. *Science of the Total Environment*, v. 838, p. 155891, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155891.

APARICIO, J. D. et al. **Evaluation of the sequential coupling of a bacterial treatment with a physicochemical process for the remediation of wastewater containing Cr and organic pollutants**. *Journal of Hazardous Materials*, v. 418, p. 126307, 2021. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126307.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. **Lei nº 14.026**, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 16 jul. 2020.

CHRISTUDOSS, A. C. et al. **Aging of disposable face masks in landfill leachate poses a risk to terrestrial plants**. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 211, p. 108655, 2025. DOI: 10.1016/j.plaphy.2024.109472.

CORDEIRO, G. G.; MANSEFÚ, A. R. **Degradação de terras por salinidade no Nordeste do Brasil e medição instrumental da salinidade**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2001. 32 p. (Documentos, 175).

DEVORE, C. L. et al. **Mobilization of As, Fe, and Mn from Contaminated Sediment in Aerobic and Anaerobic Conditions: Chemical or Microbiological Triggers?** *ACS Earth and Space Chemistry*, v. 6, n. 7, p. 1644-1654, jul. 2022. DOI: 10.1021/acsearthspacechem.1c00370.

DONG, Xiaohan; VERA, Alfonso; GARCÍA-DÍAZ, Celia; GARCÍA, Carlos; ZHANG, Weidong; BASTIDA, Felipe. **Excessive phosphorus (P) fertilization reduces the soil priming effect in a Mediterranean soil**. *Applied Soil Ecology*, Amsterdam, v. 218, p. 106715, 2026. DOI: 10.1016/j.apsoil.2025.106715.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. Método 15.

FILIZOLA, H. F.; GOMES, M. A. F.; SOUZA, M. D. de (ed.). **Manual de procedimentos de coleta de amostras em áreas agrícolas para análise da qualidade ambiental: solo, água e sedimentos**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 169 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/15292>. Acesso em: 15 set. 2025.

GARCÍA-CARMONA, M. et al. **Evaluation of remediation techniques in soils affected by residual contamination with heavy metals and arsenic**. *Journal of Environmental Management*, v. 191, p. 228-236, 2017. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.12.041.

GHOSH, P.; THAKUR, I. S.; KAUSHIK, A. **Bioassays for toxicological risk assessment of landfill leachate: A review.** *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 141, p. 259-270, 2017. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.03.023.

GONZALES, J. L. S.; VALERI, S. V.; PAULA, R. de C. **Qualidade fisiológica de sementes de diferentes árvores matrizes de *Corymbia citriodora* (Hook.) KD Hill & LAS Johnson.** *Scientia Forestalis/Forest Sciences*, p. 171-178, 2011

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2022: população residente, área territorial e densidade demográfica.** Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/crateaus/panorama>. Acesso em: 15 set. 2025.

LEME, D. M.; MARIN-MORALES, M. A. **Allium cepa test in environmental monitoring: A review on its application.** *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, v. 682, n. 1, p. 71-81, 2009. DOI: 10.1016/j.mrrev.2009.06.002

LINO, F. A. M.; ISMAIL, K. A. R.; CASTAÑEDA-AYARZA, J. A. **Municipal solid waste treatment in Brazil: A comprehensive review.** *Energy Nexus*, v. 11, p. 100232, 2023. DOI: 10.1016/j.nexus.2023.100232.

MALUF, C. R. et al. **Reduction of sewage sludge toxicity through chemical stabilization and natural attenuation.** *Science of The Total Environment*, v. 965, p. 181234, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.181262>.

MARINHO, Ana Paula França de; NASCIMENTO, Clístenes Williams Araújo do; CUNHA, Karina Patrícia Vieira da. **Soil degradation and Cu, Cr, Ni, Pb and Zn contamination in dumpsites of humid and semiarid tropical regions in northeastern Brazil.** *Environmental Monitoring and Assessment, Cham*, v. 194, art. 459, 2022. DOI: 10.1007/s10661-022-10122-8.

MILHOME, M. A. L. et al. **Diagnóstico da contaminação do solo por metais tóxicos provenientes de resíduos sólidos urbanos e a influência da matéria orgânica.** *Revista de Geociências*, v. 37, n. 2, p. 381-395, 2018. DOI: 10.21577/1984-6835.20180007

MOR, S.; RAVINDRA, K. **Municipal solid waste landfills in lower- and middle-income countries: Environmental impacts, challenges and sustainable management practices.** *Process Safety and Environmental Protection*, v. 174, p. 510-530, 2023. DOI: 10.1016/j.psep.2023.04.014

MUSHAK, P. **How prevalent is chemical hormesis in the natural and experimental worlds?.** *Science of The Total Environment*, v. 443, p. 573-581, 2013. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.11.028.

NASCIMENTO, S. C. et al. **Variação sazonal de indicadores físico-químicos e fitotóxicológicos em lixiviado de aterro sanitário localizado no semiárido brasileiro.** *Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro*, v. 27, n. 2, p. 289-296, 2022. DOI: 10.1590/S1413-415220210172.

NICUȚĂ, D. **The Allium cepa Model: A Review of Its Application as a Bioindicator for Environmental Risk Assessment.** *Methods and Protocols*, v. 8, n. 4, p. 88, 2025. DOI: 10.3390/mps8040088.

PARVIAINEN, A. et al. **Human health risks associated with urban soils in mining areas.** *Environmental Research*, v. 206, p. 112514, 2022. DOI: 10.1016/j.envres.2021.112514.

PEDUTO, T. A. G.; JESUS, T. A.; KOHATSU, M. Y. **Sensibilidade de diferentes sementes em ensaio de fitotoxicidade.** *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação, Uberaba*, v. 4, n. 2, p. 200-212, jul./set. 2019. DOI: 10.18554/rbcti.v4i2.3698.

PINHO, I. A.; LOPES, D. V.; MARTINS, R. C.; QUINA, M. J. **Phytotoxicity assessment of olive mill solid wastes and the influence of phenolic compounds.** *Chemosphere*, v. 185, p. 258–267, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.002>.

PREZIOSI, E. et al. **A comprehensive monitoring approach for a naturally anoxic aquifer beneath a controlled landfill.** *Chemosphere*, v. 362, p. 142657, 2024. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.142657.

Q. SU, et al. **The growing trend of saltwater intrusion and its impact on coastal agriculture: Challenges and opportunities.** *Science of the Total Environment*, [S. l.], v. 970, p. 178701, 2025. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178701.

RANZI, B. D. et al. **Landfill leachate treatment by evaporation in open and closed systems under low temperature in southern Brazil.** *Desalination*, v. 587, p. 117931, 2024. DOI: 10.1016/j.desal.2024.117931.

Regras para Análise de Sementes (RAS) / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. – Brasília : Mapa/ACS, 2009.

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. *Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30 dez. 2009.*

ROSA, E. V. C. da. **Reaproveitamento de lodo têxtil em solo florestal: estudos dos aspectos físico-químicos, agronômicos e ecotoxicológicos.** 2004. 139 f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

THODE FILHO, S. **Avaliação dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado de óleos vegetais residuais em solos Brasileiros.** 2017. 154 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

THOMAS, S. C. et al. **Phytotoxicity and hormesis in common mobile organic compounds in leachates of wood-derived biochars.** *Biochar*, v. 6, n. 51, 2024. DOI: 10.1007/s42773-024-00339-w.

TRAUTMANN, N.M.; KRASNY, M.E. **Composting in the Classroom - Scientific Inquiry for High School Students.** 1997.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). **Method 300.1: determination of inorganic anions in drinking water by ion chromatography.** Revision 1.0. Washington, DC: US EPA, 1999.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). **Method 3050B: acid digestion of sediments, sludges, and soils.** Washington, DC: US EPA, 1996.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). **Method 3051A: microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils.** Washington, DC: US EPA, 2007.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). **Method 5021A: volatile organic compounds in soils and other solid matrices using equilibrium headspace analysis.** Washington, DC: US EPA, 2014.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). **Method 6010D: inductively coupled plasma–atomic emission spectrometry.** Washington, DC: US EPA, 2018.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). **Method 8260D: volatile organic compounds by gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS).** Washington, DC: US EPA, 2018.

URIONABARRENETXEA, E. et al. **Impacts of sewage sludges deposition on agricultural soils: Effects upon model soil organisms.** *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, v. 255, p. 109276, 2022. DOI: 10.1016/j.cbpc.2022.109276.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **USEPA 712-C-96- 167: Seed germination/root elongation toxicity test.** Ecological effects test guidelines. Washington: 1996.

Valores Orientadores para Solo e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo e os procedimentos para sua aplicação. São Paulo: CETESB, 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/solo/valores-orientadores-para-solo-e-agua-subterranea/>. Acesso em: 2 nov. 2025.

YOUNG, B. J.; RIERA, N. I.; BEILY, M. E.; BRES, P. A.; CRESPO, D. C.; RONCO, A. E. **Toxicity of the effluent from an anaerobic bioreactor treating cereal residues on *Lactuca sativa*.** *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 76, n. 1, p. 182–186, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.09.019>.

ZHANG, L. et al. **Induction of S-nitrosoglutathione reductase protects root growth from ammonium toxicity by regulating potassium homeostasis in *Arabidopsis* and rice.** *Journal of Experimental Botany*, v. 72, n. 12, p. 4548–4564, 2021. DOI: 10.1093/jxb/erab140.

ZHANG, Zezhou; FAROOQ, Muhammad Raza; LIU, Xianbiao; SHEN, Lidong; CHEN, Youtao; REHMAN, Abdul; YIN, Xuebin; SONG, Jiaping. **The behavior of heavy metals in soil and groundwater at abandoned smelter sites: chemical processes and migration patterns.** *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 13, n. 6, p. 120424, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.120424>.