

LODO DE ESTACÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Perspectivas de Aplicação Agrícola



*Wander Gustavo Botero
Luciana Camargo de Oliveira*



Lodo de Estação de Tratamento de Água:

Perspectivas de Aplicação Agrícola



Lodo de Estação de Tratamento de Água:

Perspectivas de Aplicação Agrícola

Wander Gustavo Botero
Luciana Camargo de Oliveira



AYA EDITORA
2026

Direção Editorial

Prof.º Dr. Adriano Mesquita Soares

Organizadores

Prof.º Dr. Wander Gustavo Botero

Prof.ª Dr.ª Luciana Camargo de Oliveira

Capa

AYA Editora©

Revisão

Os Autores

Executiva de Negócios

Ana Lucia Ribeiro Soares

Produção Editorial

AYA Editora©

Imagens de Capa

DALL E 3

Área do Conhecimento

Ciências Exatas e da Terra

Conselho Editorial

Prof.º Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva (UNIDAVI)

Prof.ª Dr.ª Adriana Almeida Lima (UEA)

Prof.º Dr. Aknaton Toczec Souza (UCPEL)

Prof.º Dr. Alaerte Antonio Martelli Contini (UFGD)

Prof.º Dr. Argemiro Midonês Bastos (IFAP)

Prof.º Dr. Carlos Eduardo Ferreira Costa (UNITINS)

Prof.º Dr. Carlos López Noriega (USP)

Prof.ª Dr.ª Claudia Flores Rodrigues (PUCRS)

Prof.ª Dr.ª Daiane Maria de Genaro Chirolí (UTFPR)

Prof.ª Dr.ª Danyelle Andrade Mota (IFPI)

Prof.ª Dr.ª Déa Nunes Fernandes (IFMA)

Prof.ª Dr.ª Déborah Aparecida Souza dos Reis (UEMG)

Prof.º Dr. Denison Melo de Aguiar (UEA)

Prof.º Dr. Emerson Monteiro dos Santos (UNIFAP)

Prof.º Dr. Gilberto Zammar (UTFPR)

Prof.º Dr. Gustavo de Souza Preussler (UFGD)

Prof.ª Dr.ª Helenadja Santos Mota (IF Baiano)

Prof.ª Dr.ª Heloísa Thaís Rodrigues de Souza (UFS)

Prof.ª Dr.ª Ingridi Vargas Bortolaso (UNISC)

Prof.ª Dr.ª Jéssyka Maria Nunes Galvão (UFPE)

Prof.º Dr. João Luiz Kovaleski (UTFPR)

Prof.º Dr. João Paulo Roberti Junior (UFRR)

Prof.º Dr. José Enildo Elias Bezerra (IFCE)

Prof.º Dr. Luiz Flávio Arreguy Maia-Filho (UFRPE)

Prof.ª Dr.ª Maralice Cunha Verciano (CEDEUAM-Unisalento - Lecce - Itália)

Prof.ª Dr.ª Marcia Cristina Nery da Fonseca Rocha Medina (UEA)
Prof.ª Dr.ª Maria Gardênia Sousa Batista (UESPI)
Prof.º Dr. Myller Augusto Santos Gomes (UTFPR)
Prof.º Dr. Pedro Fauth Manhães Miranda (UEPG)
Prof.º Dr. Rafael da Silva Fernandes (UFRA)
Prof.º Dr. Raimundo Santos de Castro (IFMA)
Prof.ª Dr.ª Regina Negri Pagani (UTFPR)
Prof.º Dr. Ricardo dos Santos Pereira (IFAC)
Prof.º Dr. Rômulo Damasclin Chaves dos Santos (ITA)
Prof.ª Dr.ª Silvia Gaia (UTFPR)
Prof.ª Dr.ª Tânia do Carmo (UFPR)
Prof.º Dr. Ygor Felipe Távora da Silva (UEA)

Conselho Científico

Prof.º Me. Abraão Lucas Ferreira Guimarães
Prof.ª Dr.ª Andreia Antunes da Luz (UniCesumar)
Prof.º Dr. Clécio Danilo Dias da Silva (UFRGS)
Prof.ª Ma. Denise Pereira (FASU)
Prof.º Dr. Diogo Luiz Cordeiro Rodrigues (UFPR)
Prof.º Me. Ednan Galvão Santos (IF Baiano)
Prof.ª Dr.ª Eliana Leal Ferreira Hellvig (UFPR)
Prof.º Dr. Fabio José Antonio da Silva (HONPAR)
Prof.º Dr. Gilberto Sousa Silva (FAESF)
Prof.ª Ma. Jaqueline Fonseca Rodrigues (FASF)
Prof.ª Dr.ª Karen Fernanda Bortoloti (UFPR)
Prof.ª Dr.ª Leozenir Mendes Betim (FASF)
Prof.ª Dr.ª Lucimara Glap (FCSA)
Prof.ª Dr.ª Maria Auxiliadora de Souza Ruiz (UNIDA)
Prof.º Dr. Milson dos Santos Barbosa (UniOPET)
Prof.ª Dr.ª Pauline Balabuch (FASF)
Prof.ª Dr.ª Rosângela de França Bail (CESCAGE)
Prof.º Dr. Rudy de Barros Ahrens (FASF)
Prof.º Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares (UFPI)
Prof.ª Dr.ª Silvia Aparecida Medeiros Rodrigues (FASF)
Prof.ª Dr.ª Sueli de Fátima de Oliveira Miranda Santos (UTFPR)
Prof.ª Dr.ª Tássia Patrícia Silva do Nascimento (UEA)
Prof.ª Dr.ª Thaisa Rodrigues (IFSC)

© 2026 - AYA Editora. O conteúdo deste livro foi enviado pelos autores para publicação em acesso aberto, sob os termos da Licença Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY 4.0). Esta obra, incluindo textos, imagens, análises e opiniões nela contidas, é resultado da criação intelectual exclusiva dos autores, que assumem total responsabilidade pelo conteúdo apresentado. As interpretações e posicionamentos expressos neste livro representam exclusivamente as opiniões dos autores, não refletindo, necessariamente, a visão da editora, de seus conselhos editoriais ou de instituições citadas. A AYA Editora atuou de forma estritamente técnica, prestando serviços de diagramação, produção e registro, sem interferência editorial sobre o conteúdo. Esta publicação é fruto de pesquisa e reflexão acadêmica, elaborada com base em fontes históricas, dados públicos e liberdade de expressão intelectual garantida pela Constituição Federal (art. 5º, incisos IV, IX e XIV). Personagens históricos, autoridades, entidades e figuras públicas eventualmente mencionadas são citados com base em registros oficiais e noticiosos, sem intenção de ofensa, injúria ou difamação. Reforça-se que quaisquer dúvidas, críticas ou questionamentos decorrentes do conteúdo devem ser encaminhados exclusivamente aos autores da obra.

B748 Botero, Wander Gustavo

Lodo de estação de tratamento de água : perspectivas de aplicação agrícola [recurso eletrônico]. / Wander Gustavo Botero, Luciana Camargo de Oliveira -- Ponta Grossa: Aya, 2026. 100 p.

Inclui biografia

Inclui índice

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

ISBN: 978-65-5379-956-1

DOI: 10.47573/aya.5379.1.458

1. Solos e nutrição de plantas. 2. Agronomia (Solos). 3. Adubos e fertilizantes. I. Oliveira, Luciana Camargo. III Título.

CDD:630.7

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Bruna Cristina Bonini - CRB 9/1347

International Scientific Journals Publicações de Periódicos e Editora LTDA

AYA Editora©

CNPJ: 36.140.631/0001-53

Fone: +55 42 3086-3131

WhatsApp: +55 42 99906-0630

E-mail: contato@ayaeditora.com.br

Site: <https://ayaeditora.com.br>

Endereço: Rua João Rabello Coutinho, 557
Ponta Grossa - Paraná - Brasil
84.071-150

Dedicamos esse livro a todos os guerreiros que fazem ciência no Brasil (estudantes, professores, técnicos e pesquisadores), que mesmo diante de inúmeros desafios, seguem firmes na construção do conhecimento científico e no desenvolvimento do país.

AGRADECIMENTOS

Escrever este livro foi uma jornada repleta de aprendizados, conquistas e entusiasmo ao compilar trabalhos desenvolvidos pelos nossos grupos de pesquisa. Nada disso teria sido possível sem o apoio de pessoas especiais que estiveram ao nosso lado ao longo desse caminho.

Agradecemos, primeiramente, às nossas famílias, pelo amor, incentivo e compreensão nos momentos em que precisamos nos dedicar intensamente a este projeto. Vocês foram nossa base e motivação constante.

Aos nossos alunos que fazem parte dos capítulos desse livro. Sem o trabalho de vocês não teríamos avançado nesse tópico de pesquisa e obtivo resultados tão relevantes.

As agências de fomento que proporcionaram bolsas de estudos aos estudantes e auxílio financeiro para o desenvolvimento da pesquisa, sendo um agradecimento especial a Fundação de Amparo a pesquisa do estado de Alagoas (FAPEAL), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível superior (CAPES), Fundação de Amparo a Pesquisa do estado de São Paulo (FAPESP) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Universidade Federal de São Carlos - Campus Sorocaba e a Universidade Federal de Alagoas.

Aos leitores, esperamos que esta obra possa contribuir, inspirar e gerar reflexões positivas para o desenvolvimento e crescimento do estudo abordando lodo de ETA no Brasil.

SUMÁRIO

PREFÁCIO	11
APRESENTAÇÃO	12
CAPÍTULO 1 - LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA: CARACTERÍSTICAS E POSSIBILIDADE DE APLICAÇÕES	13
Potabilização da água e geração de resíduos	13
Lodo de Estações de Tratamento de Água (ETA)	15
Reciclagem do Lodo de ETA: Alternativas de Reaproveitamento ..	19
Caracterização do lodo de ETA de Alagoas (Arapiraca e Penedo)	21
Aplicação de lodo em sistemas ambientais.....	25
CAPÍTULO 2 - MATÉRIA ORGÂNICA E SUBSTÂNCIAS HÚMICAS DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA)	27
Matéria Orgânica Aquática	27
Substâncias Húmicas.....	29
Importância Ambiental das Substâncias Húmicas.....	32
Extração das Substâncias Húmicas.....	33
Substâncias Húmicas de Lodo de ETA	34
CAPÍTULO 3 - CARACTERÍSTICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DE LODO DE ETA E PERSPECTIVAS DE APLICAÇÃO AGRÍCOLA.....	35
Importância da Caracterização das Substâncias Húmicas	35
Técnicas de Caracterização das Substâncias Húmicas	36
Aplicação de SH na Agricultura	41
CAPÍTULO 4 - APLICAÇÃO DE LODO DE ETA NO CULTIVO DE ALFACE IRRIGADA: AVALIAÇÕES DE CRESCIMENTO E DESENVOLVIMENTO DA PLANTA.....	44
Importância Agronômica e Socioeconômica da Alface.....	44
Avaliação Multivariada da Cultura da Alface	45
Variáveis Biométricas.....	46

Variáveis Produtivas.....	47
Aplicação de SH na Cultura da Alface Irrigada	48
Colheita	51
CAPÍTULO 5 - APLICAÇÃO DE LODO DE ETA NA GERMINAÇÃO DE ESPÉCIES EM ÁREAS DEGRADADAS	66
Plantas que Recuperam Áreas Degradadas.....	66
Tratamento Pré-germinativo de Sementes de <i>Chloroleucon Dumosum</i> com Substâncias Húmicas de Lodo de ETA	68
REFERÊNCIAS	75
SOBRE OS AUTORES.....	93
ÍNDICE REMISSIVO	94

PREFÁCIO

A leitura inicial e atenta desta obra foi um privilégio e também um feliz testemunho de trajetória, tendo em vista que assumi essa tarefa com responsabilidade ainda maior pelo fato de conhecer de muito perto o percurso acadêmico e científico dos autores e autoras.

A obra está distribuída em cinco capítulos, contemplando desde conceitos importantes de caráter geral até aqueles mais específicos da área de Química Ambiental, bem como de áreas afins, evidenciando assim, a ampla abrangência do público-alvo do livro.

“Lodo de Estação de Tratamento de Água: Perspectivas de Aplicação Agrícola” insere-se em um contexto no qual os desafios ambientais exigem respostas cada vez mais integradas, inovadoras e sustentáveis. Nesse sentido, a abordagem principal acerca do saneamento básico e dos resíduos gerados nesse processo converge para a importante perspectiva da economia circular.

Mais do que discutir um resíduo, a obra contribui para a clara ressignificação de um passivo ambiental, que passa a ser direcionado e confirmado como um recurso em potencial. Com isso, evidencia-se sua relevância como alternativa de aplicação, especialmente no campo da agricultura sustentável e da recuperação de áreas degradadas.

Os estudos de caso realizados em Alagoas conferem à obra significativa relevância regional e a torna um referencial comparativo e metodológico aplicável a quaisquer outras regiões.

Com a convicção de que se trata de um livro construído com empenho por autores e autoras verdadeiramente comprometidos com a produção e a disseminação do conhecimento científico, convido a apreciar esta contribuição bibliográfica.

Prof. Dr. André Gustavo Ribeiro Mendonça

Instituto de Química e Biotecnologia

Universidade Federal de Alagoas

APRESENTAÇÃO

O livro “Lodo de Estação de Tratamento de Água: Perspectivas de Aplicação Agrícola” apresenta uma abordagem científica e multidisciplinar sobre a geração, caracterização e potencial de reaproveitamento do lodo proveniente de Estações de Tratamento de Água (ETA), com ênfase em soluções ambientalmente sustentáveis. A obra discute um dos principais desafios contemporâneos do saneamento básico: a gestão adequada dos resíduos gerados durante o processo de potabilização da água.

Inicialmente, o livro contextualiza o papel das ETAs na garantia da qualidade da água destinada ao consumo humano, destacando as etapas convencionais do tratamento, como coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção. A obra evidencia que a destinação inadequada desse resíduo pode estar associada à ocorrência de impactos ambientais relevantes, além de configurar desconformidade com a legislação ambiental brasileira, a qual orienta e incentiva práticas de reutilização e reciclagem como estratégias voltadas à mitigação de danos ambientais.

Na sequência, o livro aprofunda a discussão sobre a matéria orgânica presente no lodo de ETA, com destaque para as substâncias húmicas, que representam a fração mais complexa e ambientalmente relevante desse material. Outro ponto central do livro é a análise do potencial agrônomo do lodo de ETA. Estudos experimentais apresentados demonstram que esse resíduo pode atuar como condicionador de solo e fonte alternativa de nutrientes, promovendo melhorias na fertilidade, no desenvolvimento radicular e no crescimento vegetal. A obra destaca resultados positivos obtidos em culturas agrícolas e em processos de recuperação de áreas degradadas, reforçando o papel do lodo como insumo sustentável. Entretanto, os autores ressaltam a necessidade de monitoramento rigoroso da composição química do material, assegurando sua utilização segura e ambientalmente responsável.

Assim, o livro evidencia que a valorização do lodo de ETA representa não apenas uma alternativa para a redução de impactos ambientais, mas também uma oportunidade para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis, alinhadas aos princípios da economia circular e da gestão integrada de resíduos.

CAPÍTULO 1 - LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA: CARACTERÍSTICAS E POSSIBILIDADE DE APLICAÇÕES

Jardielson da Silva Santos

Vanda Duarte de Andrade

Mayara de Almeida Ribeiro Carvalho

Luciana Camargo de Oliveira

Andrea Pires Fernandes

Wander Gustavo Botero

Potabilização da água e geração de resíduos

A potabilização das águas naturais, subterrâneas e superficiais, tem como principal finalidade torná-las adequadas ao consumo humano, em conformidade com os padrões estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021 (Brasil, 2026). Esses padrões visam assegurar que a água distribuída à população não apresente riscos à saúde.

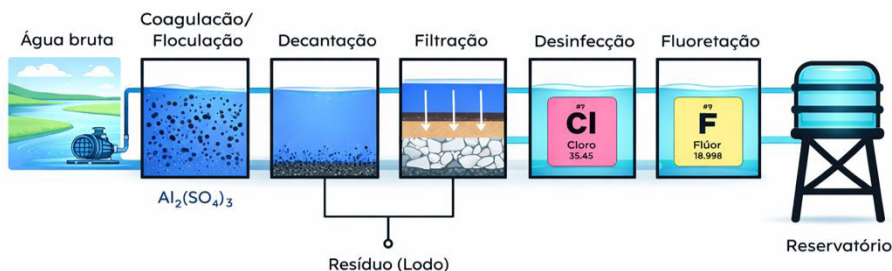
Além dos requisitos microbiológicos e químicos exigidos pela Portaria nº 888/2021, o processo de potabilização deve considerar a variabilidade das fontes de abastecimento, que pode ser influenciada por fatores como sazonalidade das chuvas, contaminação e poluição antrópica, bem como mudanças climáticas. A água bruta proveniente de mananciais superficiais e subterrâneos pode conter sedimentos, microrganismos patogênicos, metais e compostos químicos de origem industrial ou agrícola, o que torna o tratamento essencial para garantir sua qualidade (Brasil, 2006).

Nesse contexto, para atender aos critérios de potabilidade, é necessário realizar uma sequência de etapas que incluem captação da água bruta, tratamento, armazenamento e distribuição (Ramirez, 2015). As Estações de Tratamento de Água (ETAs) desempenham papel central nesse ciclo, transformando a água bruta — geralmente inadequada para consumo humano — em água potável (Katayama, 2014).

No Brasil, existem aproximadamente 7.500 ETAs, sendo a maioria projetada com ciclo completo de tratamento, que compreende, principalmente, as etapas de coagulação, floculação, decantação e filtração, conforme ilus-

trado na Figura 1 e detalhado no Quadro 1. Em função da presença de impurezas na água bruta e da adição de produtos químicos durante o tratamento, essas etapas geram resíduos, dentre os quais se destaca o lodo (Achon et al., 2013).

Figura 1 – Principais processos em um sistema convencional de tratamento de água.



Quadro 1 – Principais processos no tratamento convencional da água.

Processo	Definição
Coagulação	Processo em que são formados coágulos promovendo um estado de equilíbrio eletrostaticamente instável das partículas na massa líquida. Geralmente, são utilizados coagulantes como sais de alumínio ou ferro, sendo o sulfato de alumínio o mais comum no Brasil. Esse processo depende de uma série de variáveis, incluindo temperatura, pH, cor, turbidez, sólidos totais dissolvidos, força iônica e tamanho das partículas.
Floculação	Ocorre imediatamente após a coagulação. Durante esse processo, as partículas eletricamente desestabilizadas, também conhecidas como coágulos, se agrupam para formar flocos maiores, que são mais suscetíveis a serem removidos nas etapas subsequentes de decantação e filtração.
Decantação/Sedimentação	Trata-se do processo pelo qual as partículas suspensas mais densas são separadas devido à ação da gravidade. Essas partículas seguem um movimento descendente, depositando-se no fundo do tanque e formando um lodo que é removido periodicamente.
Filtração	Compreende o processo de remoção das partículas suspensas, colóides e microrganismos presentes na água conforme ela passa por um meio filtrante, no qual as impurezas são retidas. Esse sistema de filtração comumente inclui uma combinação de pedras, areia e carvão antracito.

Processo	Definição
Desinfecção	É habitualmente realizada a cloração com o objetivo de remover ou inativar microrganismos patogênicos, capazes de produzir doenças, e outros organismos indesejáveis. Recentemente, ETAs têm agregado além da cloração outros processos de desinfecção como a ozonização.
Fluoretação	Nessa etapa, são adicionados compostos de flúor às águas dos sistemas de abastecimento público, visando promover uma melhor saúde bucal entre os usuários.

Fonte: Adaptado de Ramirez (2015).

Como resultado dos processos mencionados, obtém-se a água potável, adequada ao consumo humano. Entretanto, o tratamento realizado nas ETAs também gera resíduos, tanto líquidos como sólidos, como a água residual proveniente da lavagem dos filtros e o lodo gerado nas etapas de coagulação, floculação e decantação.

Lodo de Estações de Tratamento de Água (ETA)

Contextualização e geração do resíduo

O crescimento populacional, tanto em áreas urbanas quanto rurais, aliado à busca por melhor qualidade de vida e ao avanço tecnológico, tem intensificado a demanda por recursos essenciais à sobrevivência humana, como saúde, alimentos e água. Esse aumento exerce impacto direto sobre os processos produtivos de diversos setores, incluindo agropecuária e indústria, contribuindo para o aumento significativo na geração de resíduos, como lixo doméstico, efluentes e lodos provenientes de estações de tratamento de água e esgoto (Conceição; Teixeira, 2021; Lu *et al.*, 2024).

O lodo de ETA é um resíduo sólido gerado durante o processo de transformação da água bruta — captada principalmente de rios e reservatórios — em água potável destinada ao consumo humano.

Segundo Ramirez (2015), o lodo de ETA é composto por uma mistura de água, sólidos suspensos e colóides presentes na água bruta, além dos produtos químicos adicionados durante o tratamento. Esse resíduo é constituído por areia, argila, substâncias inorgânicas, matéria orgânica, macro e micronutrientes e minerais precipitados da água bruta, que se agregam aos

hidróxidos de alumínio ou ferro formados a partir dos coagulantes utilizados. Além disso, o lodo pode conter metais potencialmente tóxicos (Teixeira *et al.*, 2005; Katayama, 2014; Bittencourt *et al.*, 2012).

Fatores que Influenciam a Composição do Lodo de ETA

De acordo com Carneiro e Andreoli (2013), a composição química do lodo de ETA pode variar em função de:

- Tipologia e qualidade dos mananciais utilizados para captação;
- Características da bacia hidrográfica (substrato geológico, tipo de solo, tipologia florestal, relevo e declividade);
- Uso e ocupação do solo;
- Fatores climáticos;
- Tipo de coagulante empregado no tratamento.

Crittenden *et al.* (2012) reforçam que a composição do lodo de ETA está intimamente relacionada à qualidade da água bruta e aos produtos utilizados no processo de tratamento. Assim, suas características podem variar significativamente conforme a localização da ETA e as condições ambientais do entorno.

Classificação Ambiental do lodo de ETA

Mesmo apresentando elevado teor de água em sua composição, o lodo de ETA é classificado como resíduo sólido conforme a ABNT NBR 10004:2004 (ABNT, 2004).

Do ponto de vista ambiental, o lodo de ETA enquadra-se como resíduo Classe IIA – Não Inerte, o que indica potencial de liberar substâncias químicas ou biológicas e, conseqüentemente, representar risco de contaminação ao ambiente, dependendo da composição da água bruta tratada (Oliveira; Holanda, 2008).

Problemas associados ao descarte

Nos últimos anos, a quantidade de resíduos gerados pelas ETAs tem aumentado consideravelmente, representando um desafio crescente para as companhias de abastecimento. Em muitos casos, os sistemas de tratamento concentram-se prioritariamente no produto — a água potável — negligenciando o manejo e a destinação adequada do lodo de ETA (Cunha *et al.*, 2019).

O descarte final do lodo de ETA é uma operação complexa, com implicações técnicas, econômicas, sociais e ambientais. Parte significativa desse resíduo ainda é descartada de forma inadequada, inclusive em cursos d'água, o que contraria a legislação vigente e pode gerar impactos ambientais relevantes (Santos *et al.*, 2021; Katayama *et al.*, 2015; Achon *et al.*, 2013; Neves *et al.*, 2024; Lin *et al.*, 2024).

Conforme a Lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2026), é vedado o lançamento de resíduos sólidos em mananciais de captação. O lodo de ETA deve ser reutilizado, reciclado ou destinado de forma ambientalmente adequada, visando reduzir sua quantidade e minimizar impactos ambientais.

Vale destacar que o volume de lodo gerado nos decantadores das ETAs corresponde a aproximadamente 60% a 95% do total produzido, enquanto o resíduo proveniente da lavagem dos filtros representa cerca de 5% a 40% (Chávez Porras, 2007).

Aspectos legais

O lodo gerado nas Estações de Tratamento de Água (ETAs), conforme a NBR 10.004/2004, é classificado como resíduo sólido (ABNT, 2004). Essa classificação técnica estabelece o lodo como um resíduo com características específicas que exigem uma gestão adequada, considerando seu potencial impacto ambiental. No contexto da legislação ambiental brasileira, o lodo de ETA é classificado como Classe IIA - Não Inerte, o que implica que ele pode representar um risco à saúde pública e ao meio ambiente ao liberar substâncias químicas e/ou biológicas (Oliveira; Holanda, 2008).

De acordo com a Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a gestão de resíduos sólidos deve seguir critérios rigorosos para garantir a destinação final adequada e minimizar riscos ambientais e à saúde pública. A PNRS define como resíduo sólido qualquer

material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas, e estabelece que a destinação de resíduos deve ser feita em estado sólido ou semissólido. Além disso, inclui gases em recipientes e líquidos cujas características impossibilitem seu lançamento em redes de esgoto ou corpos d'água (Brasil, 2026). A Lei enfatiza que esses resíduos devem ter destinação final ambientalmente adequada, como reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação ou aproveitamento energético, de forma a evitar danos à saúde pública, à segurança e minimizar os impactos ambientais (Brasil, 2026). A Lei nº 12.305/2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) - define os conceitos relacionados aos resíduos sólidos em seu art. 3º, que estabelece:

XVI - resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível; (Brasil, 2026).

Segundo a PNRS, os resíduos sólidos devem ser destinados de forma ambientalmente adequada, conforme estabelecido no art. 3º, incluindo práticas como:

VII - destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos; (Brasil, 2026).

O lodo de ETA, classificado como resíduo sólido, deve ser gerenciado de acordo com diretrizes estabelecidas pela PNRS (Lei 12.305/2010). Essa política prioriza ações como não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, além de garantir a disposição final ambientalmente adequada para esses rejeitos.

No Brasil, o lançamento de resíduos em corpos d'água é regulamentado pela Resolução CONAMA nº 430/2011 (Brasil, 2026). Quando constatadas

irregularidades que resultem em danos ambientais, as empresas responsáveis podem ser responsabilizadas nas esferas civil, administrativa e criminal, conforme previsto na Lei nº 9605/1998, conhecida como Lei de Crimes Ambientais (Brasil, 2026).

Pesquisas científicas evidenciam os riscos ambientais decorrentes do descarte inadequado de lodo proveniente das ETAs (Yang; Huang; Lai, 2017). A disposição inadequada desse resíduo pode acarretar sérios impactos no meio ambiente. Portanto, é imprescindível uma gestão eficiente desses resíduos, considerando que seu volume pode representar uma fração significativa em relação ao volume total de água tratada (Achon *et al.*, 2013).

Reciclagem do Lodo de ETA: Alternativas de Reaproveitamento

A destinação final do lodo gerado nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) representa um dos maiores desafios enfrentados pelas empresas de saneamento básico. Essa dificuldade decorre, em grande parte, da necessidade de transportar o resíduo e cumprir as exigências ambientais (Hoppen, 2006). No entanto, diversas alternativas têm sido propostas e implementadas, combinando viabilidade econômica e ambiental, sendo algumas possibilidades explicitadas a seguir (Machado; Villanova, 2022; Bittencourt *et al.*, 2012).

Aplicação na construção civil

Uma alternativa promissora para o reaproveitamento desses resíduos é sua aplicação em materiais voltados à construção civil, área na qual diversos estudos e produtos têm sido desenvolvidos. Oliveira *et al.* (2004) investigaram o uso de lodo de ETA proveniente do Rio de Janeiro como matéria-prima para a fabricação de produtos cerâmicos. O estudo demonstrou que o lodo apresentou grande potencial para ser incorporado à massa argilosa. De forma semelhante, Araújo *et al.* (2015) realizaram a caracterização física do lodo com o objetivo de utilizá-lo no processo de fabricação de materiais para construção civil. Os resultados mostraram que o resíduo pode ser empregado como adição e/ou matéria-prima na produção de materiais cerâmicos como tijolos, telhas e outros. Além disso, os autores obtiveram resultados satisfatórios ao utilizar o lodo de ETA em misturas de cimento Portland, em combinação com outros agregados, para produção de artefatos de concreto.

Outra possibilidade explorada é o uso do lodo de ETA calcinado como substituto parcial do cimento na fabricação de concreto. Gastaldini *et al.* (2015) constataram que essa abordagem melhora a resistência mecânica das misturas de concreto, superando o desempenho de composição que utilizam cinza de casca de arroz ou sílica ativa como aditivos.

Potencial de uso agrícola

Além de aplicações na construção civil, o lodo de ETA também é considerado uma alternativa para uso agrícola, devido à sua composição rica em matéria orgânica, macro e micronutrientes, semelhante ao lodo de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) (Alloway; Jackson, 1991). Teixeira *et al.* (2005) avaliaram os efeitos da aplicação de lodo de ETA em solos degradados, observando melhorias na concentração de macronutrientes, no carbono orgânico total e na condutividade eletrolítica do solo. O estudo também identificou alterações no pH do solo, que impactam os processos de adsorção e solubilização de nutrientes. Botero *et al.* (2009) reforçam o potencial do lodo de ETA para uso agrícola, destacando sua riqueza em matéria orgânica, micro e macro nutrientes (Botero *et al.*, 2009).

Diante da escassez de estudos aprofundados sobre o uso agrícola do lodo de ETA, torna-se fundamental a caracterização detalhada de suas propriedades físico-químicas, especialmente no que se refere ao teor e à composição da matéria orgânica, a fim de avaliar adequadamente seu potencial como aditivo agrícola. Essa abordagem pode representar alternativa viável para a destinação ambientalmente adequada de um resíduo que, tradicionalmente, é tratado como passivo ambiental.

Uma das principais preocupações associadas ao uso do lodo está relacionada à sua composição heterogênea e à presença de elementos potencialmente tóxicos, incluindo metais como o alumínio, frequentemente encontrado em elevadas concentrações devido à sua utilização como agente coagulante no processo de tratamento de águas, conforme mencionado anteriormente.

Caracterização do lodo de ETA de Alagoas (Arapiraca e Penedo)

Área de estudo e justificativa

Para exemplificar os tipos de caracterização aplicáveis ao lodo de ETA, foram coletadas amostras em Estações de Tratamento de Águas, uma localizada no município de Arapiraca e em outra na cidade de Penedo, ambas em Alagoas. A escolha da região justifica-se pela relevância de sua rede de recursos hídricos, que integra a bacia do Rio São Francisco, um dos mais importantes rios do Brasil.

A drenagem do estado de Alagoas é composta por bacias hidrográficas do Rio São Francisco, a oeste, e do Atlântico Nordeste Oriental, a leste (Barros *et al.*, 2012). Entre os principais rios da região destacam-se Mundaú, Camaragibe, Coruripe, Ipanema, Manguaba e o próprio Rio São Francisco, conhecido como “Velho Chico”, fundamental para o abastecimento hídrico estadual.

Coleta e preparo das amostras

A coleta dos lodos nas Estações de Tratamento de Águas (ETA) foi realizada durante o período de retirada do lodo da ETA no município de Arapiraca e de Penedo - AL. As amostras de lodo foram transferidas para bandejas de plástico de 40 x 25 cm e submetidas à secagem. Em seguida, as amostras foram desagregadas e peneiradas a 2 mm.

Determinação da matéria orgânica

O teor de matéria orgânica (MO) foi determinado em triplicata pelo método de calcinação, utilizando 1,0 g de amostra seca, que foi aquecida em mufla a 750 °C por 4 horas (Botero *et al.*, 2009). Em seguida, as amostras foram acondicionadas em dessecador e posteriormente pesadas. O teor de MO foi calculado pela diferença de massa entre a amostra in natura e a amostra calcinada e, sendo expresso em relação à quantidade de amostra inicial, conforme a fórmula: $(\text{Amostra in natura} - \text{Amostra calcinada}) \times 100\%$ (Rosa *et al.*, 2000).

$MO (\%) = (Amostra \text{ in natura} - Amostra \text{ calcinada}) \times 100 / Amostra \text{ inicial}$

Determinação de nutrientes e acidez potencial

Os cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , além de N, P e a acidez potencial (H + Al), foram determinados conforme o procedimento descrito por Teixeira *et al.* (2017) e Lopes *et al.* (1997).

O fósforo foi determinado pelo método azul de molibdênio, utilizando solução Mehlich-1 para a extração, seguida de leitura no espectrofotômetro UV-Vis, com comprimento de onda de 660 nm. O potássio e sódio foram determinados por espectrofotometria de chama.

A extração da acidez potencial do lodo de ETA foi realizada com acetato de cálcio tamponado a pH 7,0, e a determinação volumétrica foi feita com solução de NaOH, utilizando fenolftaleína como indicador. O cálcio e o magnésio trocáveis foram determinados pelo método complexométrico com o uso de EDTA. O nitrogênio da matéria orgânica do lodo de ETA foi determinado por digestão Kjeldhal.

Parâmetros de fertilidade

A análise para avaliação da fertilidade é fundamental para determinar a concentração de macro e micronutrientes disponíveis nos lodos. Uma das principais características dos resíduos aplicados ao solo com o objetivo de melhorar sua fertilidade é a capacidade de troca de cátions (CTC), que representa a quantidade de íons positivos que podem ser retidos por atração eletrostática, desempenhando papel essencial na dinâmica de nutrientes no solo (Botero *et al.*, 2009).

Os principais cátions trocáveis no solo incluem H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ e Al^{3+} . Entre os macronutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas destacam-se P, K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} . O complexo de troca de cátions é representado pelas equações a seguir, mostrando como podem ser determinados os parâmetros: soma de bases trocáveis (SB), a capacidade de troca de cátions (CTC) e a saturação por bases (V):

$$SB = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+$$

$$CTC = SB + H + Al^{3+}$$

$$V = 100 (SB/CTC)$$

Assim como todos os seres vivos, as plantas dependem da água e de diferentes moléculas orgânicas para sua sobrevivência. Os elementos constituintes da água (H₂O) e das moléculas orgânicas (C, O, H) são fundamentais e sua essencialidade para o crescimento vegetal está totalmente comprovada. Esses elementos são absorvidos pelas plantas por meio da água absorvida pelas raízes (Dechen; Nachtigall, 2007). Além desses elementos, as plantas também requerem outros nutrientes em quantidades superiores, conhecidos como macronutrientes. Entre eles, destacam-se o nitrogênio (N), fósforo (P), enxofre (S), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), que desempenham papéis vitais no desenvolvimento e fisiologia das plantas.

A acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$) é um parâmetro importante para a avaliação da fertilidade. O fósforo é decisivo para o crescimento das plantas, influenciando a formação das folhas, a expansão foliar e a taxa de fotossíntese por unidade de área foliar (Cromer *et al.*, 1983; Jacob; Lawlor 1991, Rao; Terry 1989). O cálcio, absorvido pelas plantas como Ca^{2+} , é crucial para a ativação de enzimas envolvidas no metabolismo do fósforo e ajuda a planta a lidar com estresses, como a presença de metais potencialmente tóxicos ou salinidade. A falta de cálcio influi no desenvolvimento e funcionamento das raízes. Já o potássio (K^+) tem um papel importante como ativador enzimático, influenciando o metabolismo proteico e a fotossíntese, além de ser essencial para a formação dos frutos. Sua deficiência pode levar a sérias alterações metabólicas (Dechen; Nachtigall, 2007). O magnésio (Mg^{2+}), por sua vez, é necessário para a fotossíntese e a formação de clorofila, e sua carência afeta significativamente o metabolismo das plantas (Dechen; Nachtigall, 2007). O nitrogênio (N), elemento essencial para o crescimento vegetal, é fundamental para a produção de clorofila e para a realização das funções metabólicas essenciais (Lopes, 1997).

Na análise da amostra de lodo coletada na ETA de Arapiraca – AL e de Penedo - AL, determinaram-se os teores de matéria orgânica, Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , P, N, e acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$). Além disso, foram calculadas a capacidade de troca de cátions (CTC), a soma de bases trocáveis (SB) e os valores de saturação por bases (V). Os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Teores de nutrientes, acidez potencial e propriedades do lodo da ETA de Arapicara – AL e de Penedo - AL.

	MO%	Na ⁺ mmol/ dm ³	K ⁺ mmol/ dm ³	Ca ²⁺ mmol/ dm ³	Mg ²⁺ mmol/ dm ³	P mg/ dm ³	N g/ kg	V %	H ⁺ + Al ³⁺ mmol/ dm ³	S. B mmol/ dm ³	C.T.C mmol/ dm ³
ETA Arapiraca – AL (este trabalho)	44,8	0,90	0,80	64,0	7,3	64	8,3	64	40	73	114
ETA Penedo – AL (este trabalho)	29,6%	0.43	0,70	76,0	30,3	7,08	8,7	53	93,5	107,4	110,4
ETA Jaboticabal-SP (Botero 2009)	20,5	-	2,1	143	23	6	-	82	38	172	210
ETA Taquaritinga-SP (Botero 2009)	32,5	-	2,3	154	28	5	-	84	35	184	219
ETA Manaus-AM (Botero 2010)	68,9	-	2,9	205	45	17	-	91	25	253	8
(Canelas 2001)	-	-	0,2	2,5	0,5	8	-	-	-	-	-
ETA de Campos dos Goy- tacazes, RJ (Oliveira 2004)	0,95	14,8	1,9	25,1	28,0	-	-	-	28,7	-	9,85

O teor de matéria orgânica presente no lodo da ETA de Arapiraca e de Penedo está apresentado na Tabela 1 e refere-se à matéria orgânica total determinada por calcinação. Os resultados indicam que o lodo apresenta um alto teor de matéria orgânica, embora os teores do lodo de Penedo sejam inferiores aos de Arapiraca, ambos corroboram resultados da literatura (Botero *et al.*, 2009; Oliveira *et al.*, 2004).

Ao comparar os resultados da análise de fertilidade dos lodos de ETA (Tabela 1) com os dados da literatura (Tabela 2), observa-se que os teores de cálcio, fósforo e magnésio são relativamente elevados. O teor de fósforo foi superior no lodo obtido em Arapiraca em comparação ao de Penedo, apresentando valores significativamente mais altos. Por outro lado, os teores de potássio foram considerados baixos em ambos os lodos. Os valores de cálcio, magnésio e potássio estão em conformidade com aqueles relatados na literatura para lodos de ETAs de diferentes regiões (Oliveira *et al.*, 2004; Canellas *et al.*, 2001; Botero *et al.*, 2009). Em relação ao fósforo, o lodo de Arapiraca apresentou concentrações superiores às descritas na literatura, enquanto o lodo de Penedo apresentou resultados compatíveis com os valores reportados.

A amostra de lodo de ETA analisada apresentou um índice de saturação de bases de 64% para o lodo de Arapiraca e 53% para o lodo de Penedo (Tabela 1). Quando comparados ao valor encontrado na literatura (Tabela 2), esse índice é considerado médio, o que sugere que essas matrizes têm um potencial moderado para ser utilizado como aditivo agrícola.

Tabela 2 - Intervalos de teores de K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, P e da saturação por bases descritos na literatura.

Teor	K ⁺ mmol/ dm ³	Ca ²⁺ mmol/ dm ³	Mg ²⁺ mmol/ dm ³	P _{resina} mmol/ dm ³	Saturação por bases %
Muito baixo	0,0 – 0,7	-	-	0 – 2	0 -25
Baixo	0,8 – 1,5	0 – 3	0 – 4	3 – 5	26 – 50
Médio	1,6 – 3,0	4 – 7	5 – 8	6 – 10	51 – 70
Alto	3,1 – 6,0	> 7	> 8	10– 20	71 – 90
Muito alto	> 6,0	-	-	> 20	> 90

Fonte: Rajj *et al.* (2001).

Aplicação de lodo em sistemas ambientais

A destinação final do lodo gerado em Estações de Tratamento de Água (ETA) costuma envolver seu descarte em aterros sanitários ou sua aplicação controlada no solo. Uma das principais formas de reutilização é na recuperação de áreas degradadas (Motta *et al.*, 2005). Além disso, diversos estudos têm explorado o potencial do lodo de ETA como insumo agrícola, destacando sua capacidade de fornecer macronutrientes como nitrogênio e fósforo, bem como micronutrientes essenciais, como zinco, cobre, ferro, manganês e molibdênio.

Segundo Bittencourt *et al.* (2012), o lodo de ETA pode ser utilizado em conjunto com o lodo proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) na recuperação de áreas degradadas. Ambos os resíduos apresentam potencial agrônomo devido à composição orgânica e ao aporte nutricional. No entanto, para que possam ser aplicados de forma segura no solo, é imprescindível que passem por tratamentos prévios que assegurem a estabilidade dos compostos e a redução dos contaminantes. O lodo de esgoto, por exemplo, quando higienizado por processos alcalinos, também pode atuar como corretivo de acidez do solo.

O avanço dos estudos sobre o uso do lodo de ETA como fonte alternativa de adubação orgânica tem reforçado sua relevância como insumo agrícola. Suas características físico-químicas o tornam mais semelhante ao solo que o lodo de esgoto, o que é especialmente vantajoso para a recuperação de solos degradados e a fertilização de culturas não destinadas ao consumo humano direto (Moreira *et al.*, 2009). A aplicação do lodo de ETA em atividades de reflorestamento apresenta vantagens importantes, uma vez que esse tipo de uso não está diretamente associado à produção de alimentos e, geralmente, ocorre em áreas afastadas de centros urbanos, com menor risco de exposição humana e animal. Além disso, o nitrogênio e a matéria orgânica presentes no lodo de ETA tendem a apresentar maior estabilidade e menor reatividade, além de concentrações mais baixas, o que favorece seu uso em solos degradados (Abreu Junior *et al.*, 2005).

Dessa forma, a aplicação controlada do lodo de ETA em sistemas ambientais representa não apenas uma solução sustentável para sua destinação final, mas também uma contribuição significativa para o manejo sustentável do solo e a mitigação dos impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado desse resíduo. Entretanto, é fundamental monitorar e controlar os teores de elementos potencialmente tóxicos em sua composição, garantindo segurança ambiental e agrônoma de sua utilização.

CAPÍTULO 2 - MATÉRIA ORGÂNICA E SUBSTÂNCIAS HÚMICAS DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA)

Jardielson da Silva Santos

Vanda Duarte de Andrade

Mayara de Almeida Ribeiro Carvalho

Luciana Camargo de Oliveira

Wander Gustavo Botero

A matéria orgânica (MO) é um dos componentes mais complexos e ainda amplamente investigados, devido à sua complexidade estrutural e sua contínua transformação (Verrone *et al.*, 2024). Quando se explicita sobre matéria orgânica, está sendo feita referência a todo material resultante da decomposição e transformação de resíduos vegetais e animais, bem como de metabólitos microbianos e produtos de síntese biológica, sendo fundamental para o equilíbrio ecológico do planeta, uma vez que funciona como uma reciclagem natural de diversos elementos. Microrganismos desempenham um papel central no processo de formação e transformação da matéria orgânica (Oliveira, 2007; Azevedo, 2008).

A maior fração dessa MO encontra-se sob a forma de compostos de estrutura química indefinida, enquanto uma fração menor se refere a moléculas de estrutura química definida, como carboidratos, aminoácidos e hidrocarbonetos (Rocha, Rosa e Cardoso, 2009).

A matéria orgânica pode ser classificada conforme sua origem: a alóctone é introduzida no ambiente por meio de descartes, despejos ou carreamento de materiais; já a autóctone é produzida localmente no próprio ambiente (CETESB, 2025). A MO é amplamente encontrada em diversos ambientes naturais, incluindo águas, solos e depósitos orgânicos, como sedimentos lacustres e turfeiras.

Matéria Orgânica Aquática

Quando se trata do lodo gerado em Estações de Tratamento de Água (ETA), sua composição é resultado da remoção de partículas minerais, mi-

crorganismos e, principalmente, da matéria orgânica natural (MON) presente nas águas de captação. Durante a etapa de coagulação/floculação, nos coagulantes metálicos ocorre a hidrólise e formam hidróxidos amorfos, que promovem a adsorção e incorporação da MON aos flocos formados. Esses flocos sedimentam, originando o lodo de ETA.

Embora a fração inorgânica, composta majoritariamente por hidróxidos metálicos, represente a matriz estrutural do lodo, a matéria orgânica exerce papel fundamental na sua formação, reatividade e potencial de aplicação, especialmente no que se refere às substâncias húmicas. Assim, o lodo de ETA pode ser compreendido como um material híbrido, no qual a fração orgânica removida da água de captação assume relevante importância ambiental e funcional (Baird, 2012; Mwh, 2012).

A matéria orgânica presente em ambientes aquáticos constitui uma mistura complexa e heterogênea de compostos orgânicos, resultantes da decomposição de plantas terrestres, da atividade microbiana e de organismos aquáticos como algas e plâncton (Stumm and Morgan, 1996; Wetzel, 2001; Lennon; Pfaff, 2005). Essa matéria orgânica (MO) pode ter origem autóctone (produzida no próprio sistema aquático), alóctone (proveniente de fontes externas, como solos e vegetação periférica). Sob o ponto de vista operacional, é comumente fracionada em matéria orgânica particulada (POM) e matéria orgânica dissolvida (DOM), sendo esta última definida como a fração que atravessa filtros de 0,45 µm. Em contextos de abastecimento público, utiliza-se frequentemente o termo matéria orgânica natural (NOM), que engloba principalmente a fração dissolvida e representa um dos principais desafios nos processos de coagulação, adsorção e desinfecção em ETAs. Vale ressaltar que, no meio aquático, a matéria orgânica independentemente de sua forma, seja dissolvida (DOM), particulada (POM) ou coloidal desempenha papel fundamental nos ciclos biogeoquímicos, na complexação de metais e na dinâmica ecológica dos corpos hídricos (Artifon *et al.*, 2019).

De maneira geral, a MO aquática é composta por substâncias onipresentes em fontes naturais de água, sendo operacionalmente fracionada em componentes hidrofóbicos e hidrofílicos (Dilling, Kaiser, 2002; Matilainen *et al.*, 2010). As frações hidrofóbicas são geralmente associadas a maior conteúdo de carbono aromático, estruturas fenólicas e ligações duplas C=C conjugadas (Hua & Reckhow, 2007; Świetlik *et al.*, 2004). Em contraste, as frações hidrofílicas tendem a apresentar maior proporção de grupos funcionais

polares, como amina, carboxílico, carbonila e éster (Hua & Reckhow, 2007; Świetlik *et al.*, 2004; Cui *et al.*, 2024).

Substâncias Húmicas

O conceito, a origem, a composição e a organização estrutural das substâncias húmicas (SH) ainda constituem objeto de intenso debate na comunidade científica. Apesar dos avanços significativos, persistem lacunas relacionadas à sua estrutura molecular, mecanismos de formação e reatividade, refletindo a elevada complexidade dessas substâncias (Sutton e Sposito, 2005).

De acordo com a Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas (*International Humic Substances Society* – IHSS), as SH são misturas complexas e heterogêneas de materiais polidispersos formados por reações bioquímicas e químicas durante a decomposição e transformação de restos vegetais e microbianos, em um processo denominado humificação (IHSS, 2007).

Segundo Rosa *et al.* (2005), a humificação é definida como a transformação de matéria orgânica macromorfologicamente identificável em estruturas orgânicas progressivamente mais complexas e quimicamente transformadas, englobando as mudanças que ocorrem pela degradação de resíduos via lixiviação, trituração e catabolismo (Santos, 2014).

As SH são os componentes mais abundantes da MO e da natureza, presentes em solos, águas, depósitos orgânicos geológicos, como sedimentos lacustres e turfeiras, representando a maior reserva de carbono orgânico da superfície terrestre (IHSS, 2007; Canellas, 2015). Elas podem compor até 80% da matéria orgânica de um solo, exercendo efeitos benéficos nos aspectos físicos e químicos do solo (Piccolo, 2002).

Como mencionado anteriormente, as substâncias húmicas ainda não estão definidas estruturalmente devido à sua complexidade. Contudo, levando em consideração suas características de solubilidade em meio aquoso, podem ser definidas e fracionadas operacionalmente. Elas são divididas em três principais frações: os ácidos húmicos (AH), que correspondem à fração solúvel em extrato alcalino e que precipita após acidificação; os ácidos fúlvicos (AF), que constituem a fração solúvel em qualquer intervalo de pH; e a humina, que é pouco solúvel em qualquer intervalo de pH (IHSS, 2007; Mohinuzzaman *et al.*, 2020; Tang *et al.*, 2014).

Desde a década de 70, inúmeros estudos foram desenvolvidos na tentativa de esclarecer aspectos relacionados à origem e formação das SH, porém a estrutura, reatividade e massa molar desta classe de substâncias permanecem parcialmente compreendidas, especialmente no que se refere à organização supramolecular, interações intermoleculares e comportamento dinâmico em solução (Canellas *et al.*, 2005; Chen, Tarchizky, 2012).

Estrutura das substâncias húmicas

Embora muitos aspectos das substâncias húmicas (SH) sejam bem compreendidos, como os processos de formação, composição, coloração e comportamento no ambiente, ainda não existe um modelo amplamente aceito pela comunidade científica que descreva de maneira definitiva sua composição química, estrutura, forma e massa molar. De acordo com Oliveira (2007), essa lacuna se deve, em grande parte, não apenas à complexidade e heterogeneidade estrutural das SH, mas também à identidade estrutural genérica. Essa identidade é fortemente influenciada pelo grau e pelo mecanismo de decomposição envolvidos em sua formação

No tocante à estrutura das SH, a abordagem mais aceita é apresentada pela IHSS (2025), que descreve três modelos principais: o macromolecular, o micelar e o supramolecular. Esses modelos compartilham uma característica central: a matéria orgânica desempenha um papel fundamental na formação e estabilização dos agregados (Chen, Tarchitzky, 2012).

O modelo macromolecular, amplamente defendido por Schnitzer e Khan (1972), Kononova (1982), Stevenson (1994) e Camargo *et al.* (1999), sugere que as substâncias húmicas são macromoléculas orgânicas compostas por estruturas complexas e variadas, com características similares às de macromoléculas biológicas, como proteínas, polissacarídeos, ácidos nucléicos e ligninas (Swift, 1996). Essa abordagem descreve as SH como grandes moléculas com variações conformacionais que permitem explicar sua reatividade química, sendo utilizada para interpretar dados experimentais obtidos em estudos de química do solo e ambientais (Canellas, 2005). O modelo macromolecular, proposto por Schulten e Schnitzer (1995), descreve as substâncias húmicas como macromoléculas orgânicas complexas, com espaços vazios que destacam sua organização e complexidade funcional. Apesar dessa aceitação, a conformação e a estrutura detalhada das SH ainda geram controvérsias. Stevenson (1994) adotou o modelo macromolecular

para descrever a gênese, a composição e as reações químicas do húmus. Posteriormente, Clapp e Hayes (1999), ao organizarem o volume 164 da revista *Soil Science*, dedicado às substâncias húmicas, reforçaram a centralidade dessa abordagem ao promoverem um debate aprofundado sobre suas propriedades e comportamento.

O modelo micelar, desenvolvido por Wershaw e Aiken (1985) e Wershaw (1993), introduziu uma abordagem inovadora ao propor que as SH não são polímeros lineares polidispersos, mas sim agregados de partículas de diferentes tamanhos organizados. Segundo essa visão, as SH aparentam ter uma macroestrutura, cujas propriedades macromoleculares resultam de associações fracas de pequenas moléculas não polares, como ácidos graxos, longas cadeias alifáticas de hidrocarbonetos, ésteres e compostos similares à suberina (uma cera sintetizada pelas células mortas de plantas vasculares com crescimento secundário). Esse arranjo explica a capacidade das SH de interagir com diversos compostos no ambiente. No entanto, o modelo enfrentou desafios significativos para explicar certos resultados experimentais, limitando sua aceitação ampla na literatura científica (Canellas *et al.*, 2005; Baldotto, 2014).

Piccolo (2002) introduziu o conceito de supramolecularidade, desafiando a ideia tradicional de que as SH seriam macromoléculas. Ele propôs que as SH são compostas por pequenas moléculas heterogêneas de diversas origens, organizadas espontaneamente em conformações supramoleculares. Esse arranjo explicaria o elevado tamanho molecular das SH.

O modelo supramolecular recebeu suporte de Simpson *et al.* (2002), que demonstraram que as SH extraídas dos solos constituem em misturas de substâncias agregadas de baixa massa molar, próximo de 2000 Da. Esses pesquisadores propuseram um modelo estrutural para ilustrar como as principais estruturas químicas identificadas nas SH podem se agregar na presença de cátions metálicos, comumente encontrados nos ecossistemas terrestres.

Entre os três principais modelos estruturais das substâncias húmicas – macromolecular, micelar e supramolecular -, o modelo supramolecular é atualmente o mais amplamente aceito pelos pesquisadores da área (Piccolo, Drosos 2024; Chaaban, 2016; IHSS, 2007; Sutton e Sposito, 2005; Piccolo, 2002). Contudo, de acordo com Baldotto e Baldotto (2014), tanto o modelo macromolecular quanto o supramolecular continuam a ser debatidos dentro dessa comunidade científica, pois ambos apresentam evidências e fundamentos teóricos consistentes para sua postulação.

De acordo com Santos (2014), o maior desafio para a definição de um modelo estrutural que explique completamente a composição, tamanho e a reatividade química das SH é sua heterogeneidade. Essa variabilidade decorre das diferenças naturais entre as SH presentes em ecossistemas aquáticos e terrestres. Apesar da ausência de um modelo que abranja todas as características das SH, o estudo e a compreensão de suas estruturas são indispensáveis para entender melhor sua atividade e dinâmica no ambiente.

Importância Ambiental das Substâncias Húmicas

As substâncias húmicas (SH) constituem a principal forma de matéria orgânica (MO) distribuída no planeta, sendo encontradas não apenas em solos, mas também em águas naturais, turfas, pântanos, sedimentos aquáticos e marinhos (Rocha e Rosa, 2003). Essas substâncias desempenham um papel fundamental na regulação de diversos processos ecológicos e ambientais cruciais (Canellas, 2015).

As SH influenciam significativamente o comportamento e a mobilidade de diversas espécies metálicas no ambiente, afetando diretamente sua disponibilidade para as plantas (Arslan, Pehlivan, 2008; Rocha e Rosa, 2003;). Essa interação ocorre devido à presença de uma variedade de grupos funcionais, como fenóis, ácidos carboxílicos e quinonas, que possibilitam a interação com íons metálicos e outros nutrientes essenciais, contribuindo para sua dinâmica no meio ambiente (Arslan, Pehlivan, 2008; Campitelli, Ceppi, 2008).

Outra propriedade relevante das SH é sua interação com compostos orgânicos, como pesticidas e herbicidas, facilitando a degradação desses produtos no ambiente (Pantano, 2012). Além disso, as SH promovem diversos benefícios ao solo, incluindo a retenção de água, que ajuda a manter a umidade e a prevenir a erosão. Elas também se combinam com argilomineerais, melhorando a troca de gases, aumentando a permeabilidade e formando complexos húmus-argilomineerais que estabilizam a estrutura do solo. Por fim, as SH contribuem para a mineralização, disponibilizando nutrientes essenciais para o crescimento das plantas (Ahamandou *et al.*, 2013; Schulten and Schnitzer, 1995).

As SH desempenham um papel fundamental como bioestimulantes na horticultura, promovendo a germinação de sementes, o desenvolvimento de raízes, o crescimento das plantas e outros processos relacionados (Lipczyńska-Kochany, 2018). Além disso, essas substâncias agem diretamente

nas plantas, aumentando a produção de adenosinatrifosfatases (ATPase) e modulando a atividade de diversas enzimas, podendo aumentar ou inibir sua ação (Nardi *et al.*, 2007; Mora *et al.*, 2010; Vaccaro *et al.*, 2015). O manejo adequado dessas substâncias pode melhorar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, reduzindo a necessidade de fertilizantes sintéticos e mitigando impactos ambientais, como a emissão de CO₂ (Lal, 2003; Opfergelt *et al.*, 2014). Conseqüentemente, o uso agrícola de produtos à base de SH, como fertilizantes orgânicos, condicionadores de solo e estimuladores fisiológicos, tem crescido significativamente (Gluhic, 2017).

Extração das Substâncias Húmicas

As substâncias húmicas são definidas de forma operacional, o que implica que sua caracterização depende diretamente dos procedimentos adotados para sua extração e fracionamento. Nesse contexto, para fins comparativos, é fundamental a utilização de metodologias semelhantes. Contudo, ainda não há um método de extração oficialmente padronizado e universalmente aceito pela comunidade científica. De modo geral, as técnicas disponíveis podem ser agrupadas em duas categorias principais de agentes extratores:

- moderados;
- alcalinos.

Os extratores moderados são menos agressivos durante o processo de extração, mas também apresentam menor eficiência em comparação aos extratores alcalinos (Mendonça, 2010). Entre os principais extratores moderados destacam-se o pirofosfato de sódio (Na₄P₂O₇), os agentes complexantes orgânicos em meio aquoso, como a acetilacetona e a 8-hidroxiquinolina, além do ácido fórmico, entre outros (Pantano, 2012).

Por outro lado, a extração alcalina é amplamente divulgada e é o método mais utilizado pelos pesquisadores da área conforme explicitado pelo IHSS (IHSS, 2025; Chang *et al.*, 2014; Cordovil *et al.*, 2014; Swift, 1996). Este procedimento consiste na utilização de solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹, com uma razão solo/extrator de 1:10 (m/v), realizado sob atmosfera inerte, em temperatura ambiente, por 4 horas sob agitação contínua (Rosa *et al.*, 2005). Após esse período é realizada a centrifugação separando as SH solúveis do material pouco solúvel. A fração solúvel pode ser submetida ao fracionamento em função da solubilidade obtendo-se as frações de ácidos húmicos e fúlvicos. Já na fração pouco solúvel está contida a humina, que pode ser obtida a partir de submissões desse material a soluções específicas (IHSS, 2007).

Esse método tem sido preferido devido à sua eficácia na solubilização de SH, tornando-o uma prática rotineira em muitos estudos.

Substâncias Húmicas de Lodo de ETA

Embora as substâncias húmicas (SH) estejam presentes em diversos ambientes aquáticos, incluindo águas superficiais tratadas em Estações de Tratamento de Água (ETA), até o momento, poucos estudos descrevem a extração e caracterização dessas substâncias a partir do lodo gerado especificamente em ETAs. A maioria das pesquisas se concentra no lodo proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), especialmente em sistemas de digestão anaeróbia (Anielak *et al.*, 2023). Essa lacuna evidencia a necessidade de investigações direcionadas à valorização do lodo de ETA como uma potencial fonte de SH, considerando que esse resíduo também acumula matéria orgânica predominantemente de origem natural, podendo incluir frações autóctones e alóctones durante o processo de tratamento da água. Tais investigações serão abordadas nos capítulos posteriores.

Além disso, estudos recentes têm explorado as substâncias tipo húmicas (STH) provenientes de lodo de ETA, que vêm ganhando destaque devido ao potencial de valorização do resíduo. Essas STH apresentam propriedades agroambientais comparáveis às de SH extraídas de águas, solos e compostos orgânicos. Por exemplo, Rosadi *et al.* (2023) investigaram a transformação da matéria orgânica dissolvida durante a incubação aeróbia e anaeróbia de lodo de ETA armazenado por diferentes períodos e temperaturas. Os autores observaram que, especialmente em condições aeróbias e elevadas temperaturas, intensificou-se a formação de compostos semelhantes a substâncias húmicas. Esses compostos, classificados como substâncias tipo húmicas, exibiram maior intensidade de fluorescência e massa molecular mais baixa, mas mais heterogênea, em comparação aos formados sob incubação anaeróbia. Isso demonstra que o lodo de ETA pode se transformar em uma fonte de matéria orgânica reativa, com potencial funcional comparável ao de substâncias húmicas naturais encontradas em águas.

CAPÍTULO 3 - CARACTERÍSTICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DE LODO DE ETA E PERSPECTIVAS DE APLICAÇÃO AGRÍCOLA

Vanda Duarte de Andrade

Alverlan da Silva Araújo

Mayara de Almeida Ribeiro Carvalho

Luciana Camargo de Oliveira

Andrea Pires Fernandes

Wander Gustavo Botero

Importância da Caracterização das Substâncias Húmicas

Como explicitado no Capítulo 2, a matéria orgânica apresenta elevada complexidade estrutural e heterogeneidade composicional, sendo influenciada tanto pela natureza dos materiais precursores quanto pelas condições ambientais sob as quais se formam e se transformam. Por não possuir uma estrutura química única e bem definida, sua caracterização é fundamental para compreender suas propriedades estruturais, sua reatividade e sua variabilidade entre diferentes matrizes ambientais (Pantano, 2012).

No lodo de Estações de Tratamento de Água (ETA), essa matéria orgânica corresponde à fração removida da água bruta durante a coagulação e a floculação. Trata-se, em grande parte, de substâncias húmicas originalmente presentes na fase dissolvida. Esses compostos, formados principalmente por ácidos húmicos e fúlvicos, apresentam diversidade estrutural e diferentes grupos funcionais, o que favorece sua complexação com espécies metálicas e outros compostos orgânicos.

De acordo com Nardi *et al.* (2002), o conhecimento das estruturas das SH é essencial para entender a sustentabilidade dos diferentes sistemas, incluindo os agrícolas, a lixiviação de espécies químicas e o ciclo global de carbono. Esses processos podem causar impactos ambientais significativos, como o empobrecimento do solo e a poluição das águas.

Diversos métodos químicos, físicos e espectroscópicos, amplamente utilizados com sucesso em química orgânica e em estudos de macromoléculas,

las, têm sido empregados para elucidar a composição e a estrutura geral das substâncias húmicas (Mendonça, 2010).

Entre as técnicas mais utilizadas para a caracterização das substâncias húmicas (SH), destacam-se a espectrofotometria na região do ultravioleta/visível e a espectroscopia na região do infravermelho, análise elementar, ressonância magnética nuclear, ressonância paramagnética eletrônica e fluorescência molecular (Primo *et al.*, 2011). Essas técnicas são preferidas por não alterarem a natureza da amostra, além de oferecerem a vantagem de requererem pequenas quantidades de amostras (Mendonça, 2010).

Técnicas de Caracterização das Substâncias Húmicas

Espectrofotometria de absorção da radiação UV-Vis

A espectrofotometria na região do UV-Vis é uma técnica amplamente utilizada para fornecer informações relevantes sobre a composição e a origem das substâncias húmicas (SH) (Loureiro, 2015). Sua ampla aplicação deve-se ao fácil manuseio, ao custo relativamente baixo dos equipamentos e à rapidez na obtenção dos resultados (Primo *et al.*, 2011).

Um dos principais parâmetros empregados na caracterização espectrofotométrica das SH é a razão entre as absorbâncias em 465 nm e 665 nm (E_{465}/E_{665}). De acordo com a teoria da lignina aplicada ao processo de humificação, o avanço da humificação está associado ao aumento da condensação aromática e à formação de estruturas mais complexas. Assim, valores elevados da razão E_{465}/E_{665} indicam menor grau de condensação aromática e menor grau de humificação, refletindo a predominância de estruturas menos aromáticas e relativamente mais alifáticas (Saab; Martin-Neto, 2007; Botero, 2010).

Além da razão E_{465}/E_{665} , outros índices espectrofotométricos são utilizados para complementar a caracterização das SH. A razão E_{250}/E_{365} está inversamente relacionada ao tamanho molecular médio das substâncias húmicas, enquanto a razão E_{270}/E_{407} está associada à presença de derivados da lignina e inversamente relacionada à contribuição de estruturas porfirínicas (Azevedo; Nozaki, 2008; Tadini *et al.*, 2014).

De modo geral, a razão E_{465}/E_{665} constitui um importante indicativo do grau de aromaticidade e da condensação estrutural das macromoléculas húmicas. Valores inferiores a 4 são normalmente associados à presença de estruturas aromáticas mais condensadas, enquanto valores superiores a 4 indicam menor grau de condensação (Rosa *et al.*, 2000).

Neste capítulo, estão apresentados resultados experimentais obtidos a partir da caracterização de substâncias húmicas extraídas de lodo de ETA, empregando-se espectrofotometria na região do UV-Vis e espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) (Santos, 2021).

Para a análise em espectrofotômetro UV-Vis (Global Trade), 100 mg da amostra de substâncias húmicas extraídas de lodo coletado em uma ETA localizada no município de Arapiraca e no município de Penedo ambos em Alagoas, foram dissolvidos em 5 mL de solução de NaHCO_3 0,05 mol L^{-1} . As leituras foram realizadas nos comprimentos de onda de 250, 270, 365, 407, 465 e 665 nm. A partir desses valores, calcularam-se as razões E_{465}/E_{665} , E_{250}/E_{365} e E_{270}/E_{407} para a caracterização das substâncias húmicas presentes (Santos, 2021)

Os resultados indicaram que as SH presentes no lodo de ETA apresentavam menor grau de condensação aromática, uma vez que a razão E_{465}/E_{665} foi superiores a 4 para ambas as amostras (Tabela 3), sugerindo predominância de estruturas menos aromáticas e menor grau de humificação.

A razão E_{250}/E_{365} é inversamente proporcional ao tamanho ou à agregação molecular das substâncias húmicas (Sloboda *et al.*, 2009). Em estudos com substâncias húmicas aquáticas (SHA) de diferentes tamanhos moleculares, os autores observaram que, à medida que a razão E_{250}/E_{365} aumentava, o tamanho molecular diminuía. Com base nos valores obtidos (Tabela 3), pode-se inferir que as SH presentes nos lodos de ETA têm um tamanho molecular menor, corroborando os resultados da razão E_4/E_6 . Isso está de acordo com os estudos de Sanches *et al.* (2007), que investigaram substâncias húmicas por tamanho molecular (em kDa) e concluíram que, quanto menor o tamanho molecular, maior a razão E_4/E_6 .

Quanto à razão E_{270}/E_{407} , valores baixos estão associados a uma maior participação de estruturas porfirínicas (com absorção em 407 nm, atribuída à banda Soret de porfirinas) (Boyle *et al.*, 2009). Por outro lado, valores altos para essa razão indicam uma maior participação de plantas terrestres, com predominância de estruturas de ligninas (absorção em 270 nm) (Rodríguez-Zunia *et al.*, 2008). Os valores obtidos para a razão E_{270}/E_{407} (Tabela 3) sugerem a presença de estruturas derivadas da lignina e uma maior participação de plantas terrestres na origem das substâncias húmicas.

Tabela 3 - Caracterização de substâncias húmicas extraídas de lodo de ETA de Arapiraca - AL e de Penedo - AL por espectroscopia ultravioleta-visível.

Parâmetro	Amostra de Arapiraca - AL	Amostra de Penedo - AL
E_{465}/E_{665}	6,3	5,2
E_{250}/E_{365}	7,3	7,7
E_{270}/E_{407}	11,7	4,9

Em resumo, os resultados obtidos para ambas as amostras indicam uma menor presença de estruturas aromáticas condensadas, com menor tamanho molecular e a presença de estruturas derivadas da lignina, o que sugere um grau reduzido de humificação do material orgânico das SH extraídas dos lodos de ETA.

Espectroscopia na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier

A espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica relativamente simples e de baixo custo quando comparada a outros métodos espectroscópicos, além de permitir a análise com baixos teores de massa (por exemplo, 2 mg). Essa técnica pode fornecer informações fundamentais para a caracterização das substâncias húmicas (Benites *et al.*, 1999).

A radiação infravermelha induz a vibração de átomos ou grupos de átomos em um composto, e essas vibrações podem ocorrer com diferentes amplitudes e velocidades. As energias dessas vibrações são quantizadas, ou seja, existem valores específicos de energia que provocam as oscilações dos grupos atômicos (Capana, 2009). A técnica, que envolve a absorção de energia pelas moléculas orgânicas, converte essa energia em rotação molecular. A absorção é quantificada, gerando sinais discretos de absorção (Canellas,

2005). O espectro de infravermelho é representado graficamente pela correlação entre a intensidade de absorvância (A) ou transmitância (T) e a energia da radiação infravermelha, que é expressa em número de ondas (Primo *et al.*, 2011).

O espectro infravermelho resulta em um conjunto abrangente de bandas de absorção. A análise dessas bandas é associada a determinados grupos funcionais de uma molécula, por meio do exame do espectro e consulta a tabelas de dados, oferecendo informações valiosas sobre a estrutura da molécula (Capana, 2009). Algumas dessas bandas são difíceis de interpretar com precisão, como é o caso das bandas obtidas em estruturas complexas como matéria orgânica (MO). Para as SH, a abordagem comparativa é recomendada, ou seja, o confronto entre espectros diferentes para gerar um maior número de informações sobre essas substâncias (Primo *et al.*, 2011).

Para efeito demonstrativo de espectros de infravermelho para substâncias húmicas, amostras de SH extraídas de lodos de ETA (Arapiraca e Penedo – AL) foram submetidas a espectrofotômetro Nicolet IR200. As amostras foram preparadas com pastilhas de KBr, contendo 2 % de amostra, secas a 150°C, prensadas. As análises foram realizadas no modo de transmissão, na faixa de 4.000 a 400 cm^{-1} , com resolução de 8 cm^{-1} e acumulação de 64 varreduras.

Os espectros indicaram bandas características para um espectro de SH como: banda larga e intensa centrada em cerca de 3400 cm^{-1} , bandas em 1600 cm^{-1} , banda na região de 1400 cm^{-1} , bandas entre 1200 e 1150 cm^{-1} e bandas entre 950 e 670 cm^{-1} (Figura 2).

A banda larga e intensa centrada em cerca de 3400 cm^{-1} é característica das SH e está associada a vibrações de alongamento OH, típicas de álcoois, fenóis e ácidos carboxílicos (Tabela 4) (Rodríguez *et al.*, 2016).

As bandas em 1600 cm^{-1} indicam a aromaticidade das SH, característica do estiramento C=C do anel aromático (Sloboda *et al.*, 2009). A banda na região de 1400 cm^{-1} pode ser atribuída à deformação OH e ao estiramento C-O em grupos fenólicos e carboxilatos (Tabela 4) (Pantano, 2012).

Bandas entre 1200 e 1150 cm^{-1} estão relacionadas ao alongamento das vibrações em fenóis, enquanto a faixa de 1130-1000 cm^{-1} é característica do alongamento de vibrações em C-O de álcoois, fenóis, éteres, ésteres e ácidos carboxílicos (Tabela 4) (Rocha e Rosa, 2003; Vergnoux *et al.*, 2011).

As bandas entre 950 e 670 cm^{-1} estão relacionadas à deformação CH de anéis aromáticos (Tabela 4) (Rocha e Rosa, 2003).

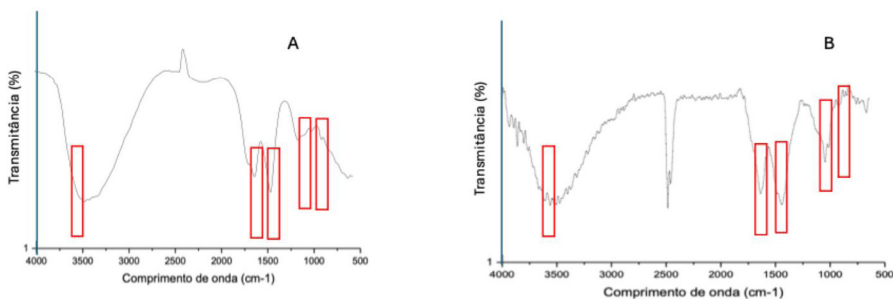
Na Tabela 4 estão as principais bandas presentes nos espectros das substâncias húmicas e os grupos funcionais ou tipos de vibração aos quais essas bandas estão associadas (Rocha e Rosa, 2003; Stevenson, 1994).

Tabela 4 – Número de onda das bandas de absorção e atribuições das SH.

Número de onda / cm^{-1}	Atribuições
3500 – 3300	Estiramento OH de álcoois e/ou fenóis e/ou ácidos carboxílicos
3200	Estiramento CH de alcenos e/ou aromáticos
~ 2930 – 2860	Estiramento CH alifáticos
1710 – 1720	C=O de cetonas, aldeídos e ácidos carboxílicos
1630 – 1650	C-O de íons carboxilatos aromáticos, C=C de alcenos e/ou aromáticos, C=O e deformação N-H de amidas aromáticas
~ 1580	Estiramento C=C aromático
1380 – 1420	C-H alifáticos, OH de álcoois e ácidos
1240	C-O de álcoois e fenóis
~ 1030 e 1080	C-O de álcoois, fenóis, éteres, ésteres e ácidos carboxílicos
950 – 670	Deformação CH de anéis aromáticos

Fonte: Rocha e Rosa, 2003; Stevenson, 1994.

Figura 2 – Espectro de FTIR (4.000 - 400 cm^{-1}) das substâncias húmicas de lodos de ETA de Arapicara – AL (A) e de Penedo – AL (B).



Os resultados espectroscópicos indicam uma composição rica e complexa de grupos funcionais em diferentes regiões espectrais. A presença de anéis aromáticos, grupos fenólicos, carboxílicos e polissacarídeos reforça a ideia de que as substâncias húmicas do lodo de ETA têm uma alta capa-

cidade de interagir com nutrientes e contaminantes. Essas características são especialmente relevantes para a utilização do lodo como fertilizante ou aditivo agrícola.

Aplicação de SH na Agricultura

Um dos principais desafios enfrentados pela agricultura moderna é equilibrar a crescente demanda por alimentos de alta qualidade e quantidade com a exploração sustentável do ambiente. O sucesso de muitas lavouras está diretamente relacionado ao uso intensivo de insumos, que, apesar de promoverem resultados visíveis no crescimento, desenvolvimento e produtividade das plantas, por vezes, podem ser onerosos e, quando não manejados corretamente a longo prazo, causar impactos ambientais negativos na ecologia da região agrícola (Caron *et al.*, 2015).

Dentro deste contexto, destacam-se os produtos à base de substâncias húmicas, que têm demonstrado potencial para estimular alterações fisiológicas nas plantas, contribuindo para o seu melhor desenvolvimento e, conseqüentemente, para ganhos em produtividade (Canellas *et al.*, 2015; Caron *et al.*, 2015).

Na Tabela 5 são resumidos diversos estudos sobre a aplicação de bioestimulantes à base de SH em culturas de hortaliças. Nos experimentos, as concentrações ideais de SH variam de acordo com a planta e o método de aplicação (pulverização foliar ou rega direta no solo) (Canellas *et al.*, 2015).

Hernandez *et al.* (2015), ao utilizar humatos como biofertilizantes na produção de alface, observaram aumento na atividade de nitrato redutase e fenilalanina amônia-liase nas folhas. Além disso, os autores relataram uma redução significativa no comprimento do ciclo de produção após aplicação de material húmico.

Baldotto *et al.* (2009) relataram aceleração do crescimento inicial de abacaxi durante o estágio de aclimação, especialmente quando as mudas apresentavam dificuldades de enraizamento. Após o transplante, as SH mostraram-se úteis para auxiliar as mudas a superar o estresse no campo. Olivares *et al.* (2015) também observaram que o uso de ácido húmico isolado de vermicomposto, potencializou o crescimento das mudas de tomate em casa de vegetação, favorecendo o desenvolvimento inicial de mudas de tomate transplantadas para o campo. Esse estímulo ao crescimento das mudas pode ser especialmente benéfico para plantas que apresentam problemas de germinação, como o maracujá amarelo (Cavalcante *et al.*, 2013).

Oliveira (2020) avaliou o efeito de um bioestimulante à base de SH no desenvolvimento de milho, observando um aumento no sistema radicular e na biomassa das plantas, mediado principalmente pela atividade das H⁺-ATPase de membranas plasmáticas, um mecanismo associado ao crescimento ácido, proporcionado pela aplicação do bioestimulante.

De acordo com Canellas *et al.* (2015), é fundamental entender os mecanismos de ação das SH no metabolismo das plantas, a fim de apoiar o desenvolvimento e a implementação bem-sucedida de tecnologias baseadas em materiais húmicos. Além disso, é importante destacar que as respostas das plantas às SH podem ser variáveis, dependendo de diversos fatores, como a espécie testada, a origem das substâncias húmicas, sua concentração, o grau de purificação do material e as condições experimentais em que os testes foram realizados (Nardi *et al.*, 2002; Trevisan *et al.*, 2010).

Tabela 5 – Efeito de substâncias húmicas (HS) em vegetais e frutas.

Colheita	Descrição do ensaio	Efeitos observados	Referência
Damasco	Solo e pulverização foliar de ácido húmicos comerciais em diferentes doses	Aumento do rendimento de 16 a 33%	Fathy <i>et al.</i> (2010)
Fava	Aplicação de ácido húmico nas sementes	Aumento da germinação, rendimento, absorção de nutrientes, peso e comprimento da raiz	Akinci <i>et al.</i> (2009)
Brócolis	SH líquida comercial com NPK, fertirrigação	Aumento de 15% do rendimento comercial	Selim; Mosa (2012)
Pepino	Aplicação de AF de 20 a 2000 ppm	Aumento de crescimento, desenvolvimento e absorção de nutrientes e floração	Rauthan; Schnitzer (1981)
Beringela	Pulverização foliar de AH comercial com diferentes doses de N, experimento de campo	Maior rendimento de frutos (23 a 63%)	Azarpour <i>et al.</i> (2012)
Alho	AH de turfa em diferentes doses, pulverização foliar, experimento de campo	Aumento da eficiência dos nutrientes e de ácido pirúvico de 1,96 para 2,28	Denre <i>et al.</i> (2014)
Uva	Pulverização foliar de AH em diferentes estágios da planta	Aumento do tamanho da baga (largura e peso), melhor qualidade da fruta	Ferrara; Brunetti (2010)

Colheita	Descrição do ensaio	Efeitos observados	Referência
Cebola	Solução comercial de SH de leonardita, aplicada ao substrato, experimento em estufa	Aumento do peso seco da raiz (42 a 102%)	Bettoni <i>et al.</i> (2014)
Tomate e pepino	Vermicomposto aplicado ao substrato, diferentes doses, experimento em estufa	Aumento do crescimento de tomate e pepino	Atiyeh <i>et al.</i> (2002)

Fonte: Adaptado de Canellas *et al.* (2015).

Assim, os estudos apresentados evidenciam que bioestimulantes à base de substâncias húmicas podem promover melhorias significativas no crescimento, no desenvolvimento e na produtividade de diferentes culturas, atuando por meio de alterações fisiológicas e metabólicas nas plantas. No entanto, a magnitude dessas respostas depende de diversos fatores, incluindo a espécie vegetal, a origem e a composição das SH, bem como a forma e as condições de aplicação. Dessa forma, o aprofundamento na compreensão dos mecanismos de ação dessas substâncias torna-se fundamental para otimizar seu uso e ampliar o desenvolvimento de tecnologias agrícolas baseadas em materiais húmicos.

CAPÍTULO 4 - APLICAÇÃO DE LODO DE ETA NO CULTIVO DE ALFACE IRRIGADA: AVALIAÇÕES DE CRESCIMENTO E DESENVOLVIMENTO DA PLANTA

Jardielson da Silva Santos
Mayara de Almeida Ribeiro Carvalho
Cicero Gomes dos Santos
Luciana Camargo de Oliveira
Wander Gustavo Botero

Importância Agronômica e Socioeconômica da Alface

A alface (*Lactuca sativa L.*) é uma dicotiledônea anual herbácea, pertencente à família Asteraceae, da subfamília Cichorioideae e do gênero *Lactuca* (Filgueira, 2003). A alface é a hortaliça folhosa mais importante no mundo sendo consumida, principalmente, in natura na forma de saladas (Sala e Costa, 2012). Possui grande importância alimentar, contendo em sua composição química em torno de 95% de água, além de fibras, carboidratos, açúcares, vitaminas e outros nutrientes.

Entre os maiores produtores mundiais de alface, a China, com 23,6 milhões de toneladas (que corresponde a 52% da produção mundial), lidera a produção, seguida de Estados Unidos e Índia (Demartelaere *et al.*, 2020).

A alface é uma das hortaliças mais produzidas e consumidas no Brasil, destacando-se no segmento de folhosas (ABCSEM, 2025). No país, 108.603 propriedades produzem um total de 908.186 toneladas de alface por ano (IBGE, 2017). Ao contrário dos sistemas de produção norte-americano e europeu, que, devido à diversidade e à qualidade dos modais de transporte, contam com excelente sistema logístico integrado à cadeia de frio, o modelo brasileiro fundamenta-se na produção de alface em 'cinturões verdes' próximos aos centros consumidores, o que contribui para o escoamento da produção (Sala e Costa, 2012)

Em Alagoas, destaca-se a criação de um cinturão verde concentrado na produção de hortaliças na mesorregião do Agreste, configurando uma espécie de polo de desenvolvimento regional. Essa mesorregião compreende

os municípios de Arapiraca, Feira Grande, Junqueiro, Lagoa da Canoa, Limoeiro de Anadia, São Sebastião e Taquarana (Assunção, 2016). Atualmente, a região produz e comercializa cerca de 90% das hortaliças folhosas consumidas no Estado e abastece parte dos mercados de Pernambuco, Sergipe e Bahia (Seplande, 2012).

Diante da importância econômica da cultura da alface no cenário nacional e do interesse crescente na valorização agrícola de resíduos, como o lodo de ETA, foram realizados experimentos utilizando substâncias húmicas extraídas desse material, com o objetivo de investigar seu potencial agrônomo na germinação e no desenvolvimento inicial das plantas.

Avaliação Multivariada da Cultura da Alface

Nas últimas décadas, as abordagens estatísticas aplicadas às ciências agrárias têm evoluído significativamente, acompanhando o avanço das ferramentas computacionais e o aumento da complexidade dos dados experimentais. Nesse contexto, a análise multivariada tem se consolidado como uma estratégia robusta para a interpretação simultânea de múltiplas variáveis, permitindo uma avaliação integrada das respostas fisiológicas e agrônomicas das culturas. Diferentemente das análises univariadas tradicionais, essa abordagem possibilita identificar padrões, correlações e agrupamentos que não seriam evidenciados quando as variáveis são analisadas isoladamente. Importante ressaltar que em termos de cultivares tanto variáveis biométricas como as variáveis produtivas são fundamentais para avaliar o desenvolvimento vegetal.

Neste contexto, a fim de exemplificar e também apresentar resultados obtidos da aplicação de lodo de ETA no desenvolvimento vegetal, a análise multivariada de doze variáveis da cultura da alface irrigada (altura da planta, área foliar, diâmetro da copa, número de folhas, tamanho da raiz, massa fresca da parte aérea, massa seca da parte aérea, massa fresca da raiz, massa seca da raiz, índice de clorofila, teor de água nas folhas e eficiência do uso da água) em dois diferentes tipos de solo (arenoso e argiloso) foi realizada em amostras de alfaces enriquecidas com SH extraídas de lodo de ETA.

Variáveis Biométricas

Em Ciências Agrárias, as variáveis biométricas são medidas quantitativas obtidas de organismos vivos (plantas, animais ou microrganismos) utilizadas para avaliar crescimento, desenvolvimento, produtividade, qualidade ou estado fisiológico. Elas permitem análises estatísticas, comparação de tratamentos e interpretação de respostas a condições ambientais ou manejos experimentais (Rani *et al.*, 2026).

Altura da planta (AP)

Antes da colheita, utilizou-se uma régua, medindo-se a distância entre o ápice da folha até o colo da planta.

Diâmetro da copa (DC)

Antes da colheita, o DC foi medido no sentido perpendicular à linha de plantio.

Área foliar (AF)

As plantas foram colhidas e lavadas para a medição da AF por meio do medidor de área foliar LI-COR, modelo LI-3100, com resultados expressos em cm² planta⁻¹.

Número de folhas (NF)

Após a colheita, foram separadas com auxílio de um estilete todas as folhas de cada planta de todos os tratamentos e realizou-se a contagem do número de folhas por planta. A escolha das folhas para a contagem considerou aquelas que possuíam tamanho mínimo de 3 cm.

Tamanho da raiz (TR)

A mensuração do TR ocorreu após a colheita, utilizando uma régua.

Variáveis Produtivas

Variáveis produtivas são medidas relacionadas à produção final ou ao desempenho produtivo de um organismo ou sistema agrícola, expressando a eficiência de conversão de recursos (água, nutrientes, alimento, manejo) em produto comercializável (grãos, frutos, carne, leite, fibras, biomassa etc.) (Mosquera *et al.*, 2026).

Massa fresca da parte aérea (MFPA)

Após a colheita, separou-se a parte aérea das raízes, e com auxílio de uma balança analítica, realizou-se a pesagem total desta parte aérea. Posteriormente as amostras foram embaladas e devidamente identificadas.

Massa seca da parte aérea (MSPA)

Após a pesagem da matéria fresca, as amostras foram mantidas em estufa com temperatura constante a 65°C com circulação de ar forçada por 72 horas, e após este processo realizou-se novamente a pesagem.

Massa fresca da raiz (MFR)

Após a lavagem e medição do sistema radicular, com o auxílio de uma balança de precisão, as amostras foram pesadas, embaladas e devidamente identificadas.

Massa seca da raiz (MSR)

Após a lavagem e a medição do comprimento, as amostras foram mantidas em estufa com temperatura de 65°C, durante 72 horas e após este processo realizou-se novamente a pesagem.

Índice de clorofila (SPAD)

Antes da colheita, para mensurar a intensidade de verde, foi utilizado o clorofilômetro digital SPAD-502 (Soil Plant Analyser Development), cujo

método de medição consiste na diferença de densidade ótica entre dois comprimentos de onda, obtendo-se a média por parcela. Foram realizadas sete leituras em uma única folha, em pontos distintos, de cada planta. A folha escolhida era a que apresentava maior tamanho, coloração verde mais acentuada, sem doenças ou manchas (Gil *et al.*, 2008).

Produtividade da alface (PROD)

Já para determinar a PROD foi mensurada a matéria fresca da parte aérea (MFPA), ou seja, separada as folhas (parte comercial da cultura da alface) da raiz. Em seguida, calculou-se o produto do peso das folhas (MFPA) pelo total de plantas por hectare.

$$PA = MFPA * Qp * 10^{-6}$$

Em que: PA = produtividade da cultura da alface ($t\ ha^{-1}$); MFPA = matéria fresca da parte (g); Qp = número de plantas por hectare.

Análise estatística

Utilizando o software estatístico R v. 3.6.3 (R Core Team, 2020) as variáveis foram submetidas à análise de variância pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$), e quando significativas submetidas à análise de regressão.

Aplicação de SH na Cultura da Alface Irrigada

A aplicação das substâncias húmicas do lodo de ETA na cultura da alface irrigada foi realizada em ambiente protegido (casa de vegetação) na Universidade Federal de Alagoas, localizada na mesorregião Agreste de Alagoas, com coordenadas geodésicas ($9^{\circ} 45' 09'' S$, $36^{\circ} 39' 40'' W$, altitude de 325 metros) e ($09^{\circ} 48' 40,3'' S$ e $36^{\circ} 37' 19,7'' W$, altitude de 325 m).

Esta região é uma transição entre a Zona da Mata e o Sertão Alagoano, cujo clima é classificado como do tipo 'As' tropical com estação seca de Verão, pelo critério de classificação de Köppen (1948). A estação chuvosa inicia-se no mês de abril e se estende até o início de agosto, com precipitação pluvial média de $854,27\ mm\ ano^{-1}$, já a estação seca vai de setembro a março, sendo dezembro o mês mais seco do ano (Xavier; Dornellas, 2010). O solo utilizado foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico (Embrapa, 2013), não salino, coletado na profundidade de 0,0-0,2 m, (Tabela 6).

Tabela 6 – Características químicas do solo utilizado no experimento em campo e ambiente protegido.

pH	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H
(H ₂ O)	(mg dm ⁻³)	----- (mmol dm ⁻³) -----			-----		
6,3	14,83	1,9	0,5	72	18	0,0	38

Fonte: Autor, 2021.

Montagem do experimento em casa de vegetação

Foi utilizada a cultivar alface lisa (*Lactuca sativa L.*). As mudas foram adquiridas por produtores de viveiros comerciais existentes na cidade de Arapiraca- AL. O transplântio em ambiente protegido foi realizado colocando-se uma planta por recipiente. Tal cultura vem se destacando no mercado, induzindo aos produtores a cultivá-la, principalmente pelo seu ciclo curto e cultivo fácil, podendo ser produzida em pequenas áreas, durante todo o ano. Realizou-se a adubação de fundação baseada nas recomendações da 2ª aproximação para recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco (Tabela 7).

Tabela 7 – Cálculo de adubação para a cultura da alface baseada nas recomendações da 3ª ed. do manual de recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco.

Adubação mineral (kg ha)	
Nitrogênio (N)	0,31 g de ureia
Fósforo (P)	0,70 g de MAP
Potássio (K)	0,22 g de KCl

O delineamento experimental (Figura 3) foi em blocos ao acaso (DBC), possuindo 4 repetições, em esquema fatorial 5x5, com 25 tratamentos e 100 unidades experimentais. Os tratamentos foram representados por 5 níveis de SH (S₁ = 0,0; S₂=50,0; S₃=100,0; S₄=200,0 e S₅=400,0 mg L⁻¹) 5 doses de adubação mineral (D₁= 0,0; D₂=25; D₃=50; D₄=75 e D₅=100 %, da recomendação de adubação). A evapotranspiração da cultura (ETc) obtida por meio do SLIMCAP (Sistema lisimétrico de informações para monitoramento do consumo de água pelas plantas) (Santos *et al.*, 2020).

Figura 3 – Esquema demonstrativo do delineamento experimental em blocos ao acaso (DBC) do experimento realizado em casa de vegetação utilizando a cultura da alface tipo lisa. Uma planta por balde representa uma parcela do experimento.



	BLOCO 1	BLOCO 2	BLOCO 3	BLOCO 4
	S5D2	S5D3	S4D1	S3D4
	S2D2	S2D1	S1D1	S1D5
	S1D3	S5D2	S2D4	S2D5
	S3D3	S4D2	S2D1	S4D2
	S4D1	S2D3	S2D3	S3D1
	S2D4	S4D4	S5D1	S2D4
	S5D3	S1D1	S5D5	S3D2
	S5D5	S3D4	S1D5	S4D1
	S4D2	S1D5	S3D1	S5D3
	S1D5	S3D3	S4D2	S5D2
	S3D4	S3D5	S2D5	S3D5
	S3D1	S5D4	S1D4	S3D3
	S5D4	S3D2	S4D4	S5D1
	S4D5	S4D3	S5D4	S4D4
	S4D3	S5D5	S5D3	S5D4
	S5D1	S2D2	S3D2	S4D5
	S2D5	S1D4	S4D3	S1D3
	S1D1	S3D1	S5D2	S1D1
	S3D2	S2D5	S1D3	S1D4
	S1D4	S2D4	S3D5	S4D3
	S2D1	S4D1	S4D5	S2D2
	S2D3	S1D3	S2D2	S5D5
	S4D4	S5D1	S3D3	S2D3
	S1D2	S1D2	S3D4	S2D1
	S3D5	S4D5	S1D2	S1D2

Utilizaram-se recipientes de plástico com capacidade para 4,0 L, que foram perfurados na sua base inferior, colocou-se ao fundo, na perfuração, uma tela de náilon e em seguida, foram preenchidos com aproximadamente 2,0 cm de brita zero tendo por objetivo a drenagem da água evitando a passagem de sedimentos. Por fim, os recipientes foram preenchidos com 3,5 kg de solo devidamente peneirado coletado da área experimental (Figura 4).

Figura 4 – Recipientes de plástico com capacidade para 4L (A) perfurados em sua base inferior, posteriormente (B) colocado uma tela de náilon, (C) preenchido com brita a fim de evitar a passagem de sedimentos e (D) preenchidos com solo devidamente peneirado.



Os recipientes foram fechados em sua base, adicionando água até não infiltrar mais no solo, preenchendo todos os espaços porosos, ocasionando a saturação. Posteriormente, a água foi drenada e 24 horas após o solo encontrava-se em capacidade de campo.

Irrigação

A irrigação foi realizada diariamente pela manhã, com base no consumo de água das plantas de cinco lisímetros de drenagem. Na primeira irrigação, um dia após todos os vasos estarem em capacidade de campo, aplicou-se 500 mL de água por planta. Após 24 horas da aplicação nos lisímetros, realizou-se a coleta da água dos cinco recipientes. Em seguida os dados foram inseridos no aplicativo SLIMCAP que forneceu a quantidade diária de água necessária para a irrigação a ser aplicada nos vasos.

Aplicação das SH de lodo de ETA

A aplicação das SH foi realizada de acordo com os níveis definidos: $S_1 = 0,0$; $S_2 = 50,0$; $S_3 = 100,0$; $S_4 = 200,0$ e $S_5 = 400,0$ mg L⁻¹. Foram aplicado 10,0 mL de cada concentração nos respectivos tratamentos. Sendo realizada seis dias depois do transplântio das mudas, a fim de garantir a adaptação das plantas.

Colheita

Após 30 dias do transplântio (DAT) das mudas na casa de vegetação, as plantas foram colhidas e levadas ao laboratório para análise.

Resultados da aplicação de SH de lodo de ETA em alface

Após a aplicação de doses de substâncias húmicas e de doses de adubação mineral, na cultura de alface, os dados referentes às variáveis altura de planta (AP), área foliar (AF), comprimento da raiz (CR), diâmetro da copa (DC), número de folhas (NF), Índice de clorofila (SPAD), matéria fresca da parte aérea (MFPA), matéria fresca da raiz (MFR), matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca da raiz (MSR), teor de água nas folhas (TAF) estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resumo da análise de variância da cultura da alface em resposta a níveis de substâncias húmicas de lodo de ETA.

Fator de variação	GL	Quadrado médio: Variáveis Biométricas					
		AP	DC	TR	AF	NF	SPAD
Doses de (SH)	4	8,41*	15,54ns	16,24**	100006,41***	7,11*	7,75**
Doses de (NPK)	4	127,48***	141,49***	25,09***	808947,48***	85,65***	0,81 ns
SH x NPK	16	8,50***	10,35ns	27,20***	55173,67***	6,25**	2,23 ns
Blocos	2	7,89*	1,09	2,60	4848,25	3,88	1,65
Resíduo	48	2,31	7,46	4,22	10269,17	2,30	1,51
CV (%)		5,44	7,26	9,45	7,22	7,12	6,65
Fator de variação	GL	Quadrado médio: Variáveis Produtivas					
		MFPA	MFR	MSPA	MSR	PROD	pH solo
Doses de (SH)	4	705,00***	9,48***	2,38***	0,11*	11,01***	0,14ns
Doses de (NPK)	4	14025,83***	13,53***	31,36***	0,44***	219,17***	0,19ns
SH x NPK	16	252,71***	5,19***	0,95**	0,18***	3,95***	0,09ns
Blocos	2	72,33	4,35	1,20	0,01	1,13	0,45

Fator de variação	GL	Quadrado médio: Variáveis Produtivas					
Resíduo	48	55,32	0,57	0,30	0,03	0,87	0,08
CV (%)		6,38	8,15	8,61	12,62	6,38	4,66

* e ^{ns}, significativo a 0.05, 0.01, 0.001 e não significativo pelo teste F, respectivamente.

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) (Tabela 3) e quando significativas submetidas à análise de regressão.

A altura da planta respondeu significativamente aos fatores isoladamente e a interação. Para ambos os fatores, o modelo de regressão cúbica foi o que melhor se ajustou aos dados. A dose de NPK 75 kg ha⁻¹ foi a que proporcionou maior altura da planta (32 cm). A dose de SH 100 mg L⁻¹ foi a que mais contribuiu para a altura das plantas (26,33 cm) (Figura 5A e 5B e Figura 6).

Observou-se que a utilização de SH promoveu um incremento de até 17 % na altura das plantas, o que corrobora os dados de Freitas *et al.* (2013), que avaliaram a ação de diferentes ácidos húmicos na formação de mudas de alface, observaram incrementos de até 28,26% na altura das plantas.

Figura 5 – Altura da planta (AP), para as doses de SH (A) e doses de NPK (B).

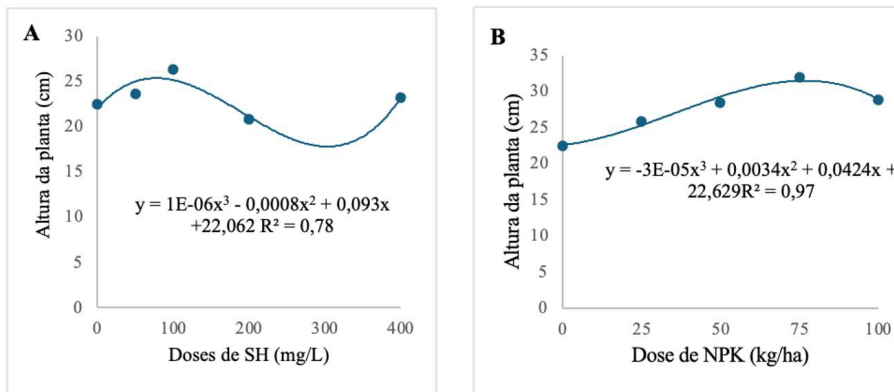
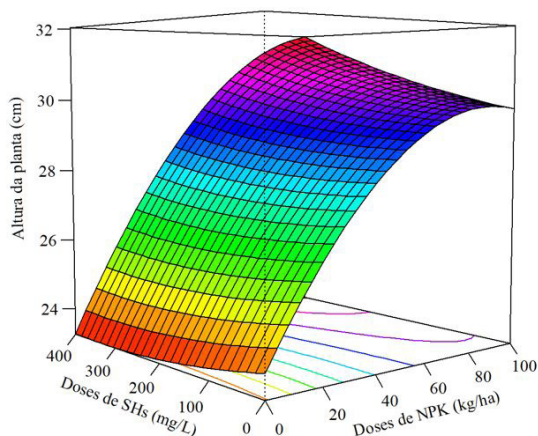


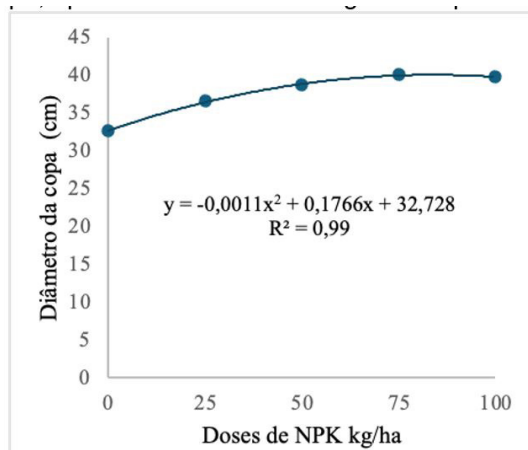
Figura 6 – Altura da planta (AP), para a alface tipo lisa, em função da interação entre as doses de SH e doses de NPK.



$$AP = 23,88 - 0,003747 \cdot H + 0,1333 \cdot A + 0,0000056 \cdot H^2 - 0,000743 \cdot A^2 + 0,0000717 \cdot H \cdot A \quad (1)$$

O diâmetro da copa respondeu significativamente apenas para o fator doses de NPK, o modelo de regressão que melhor ajustou-se aos dados, foi a função quadrática, apresentando o ponto de máximo na dose 80,27 kg ha⁻¹(Figura 7).

Figura 7 – Diâmetro da copa, apresentou modelo de regressão quadrático para as doses de NPK.



A variável número de folhas apresentou efeito significativo para as doses de SH, de NPK e para a interação entre os fatores (Figura 7). O modelo quadrático com concavidade para cima, foi o que melhor ajustou-se aos dados das doses de NPK, apresentando o ponto máximo na dose 62,85 kg ha⁻¹ (Figura 8B). As doses de SH ajustaram-se melhor ao modelo linear, diminuindo o número de folhas à medida que se aumentava a concentração de SH. Para a interação, o modelo de regressão quadrática foi o que melhor ajustou-se aos dados (Figura 8A e Figura 9).

Quando comparado o efeito das SH com a dose controle, observou-se que a dose de SH 50 mg L⁻¹ contribuiu para a mesma quantidade de número de folhas que na dose controle, podendo ser observado uma diminuição do número de folhas à medida que se aumentava a concentração de SH. Os resultados diferem dos obtidos por Borcioni *et al.*, (2016), que avaliando o efeito de ácidos fúlvicos em alface americana, observaram que soluções contendo ácidos fúlvicos promoveram o aumento do número de folhas.

O número de folhas é uma característica importante, principalmente pelo fato da alface ser uma hortaliça folhosa, cujas folhas constituem a parte comercial (Filgueira, 2008) e pelo fato de que o consumidor efetua a compra por unidade e não por peso, observando assim a aparência, volume e número de folhas por planta (Diamante *et al.*, 2013).

Figura 8 – Número de folhas, para as doses de SH (A) e doses de NPK (B).

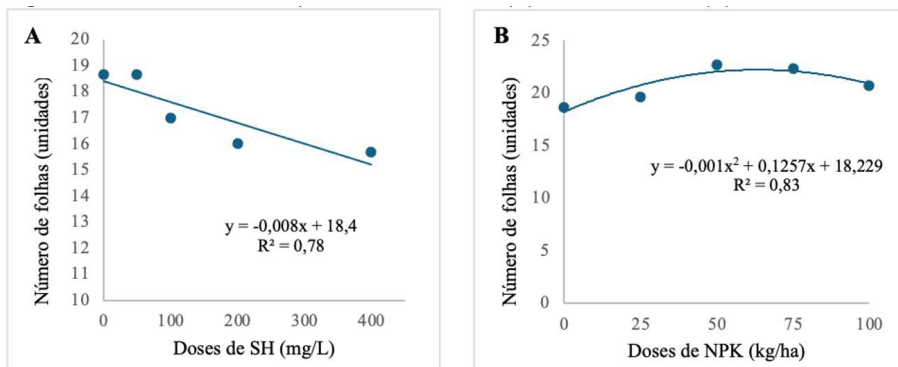
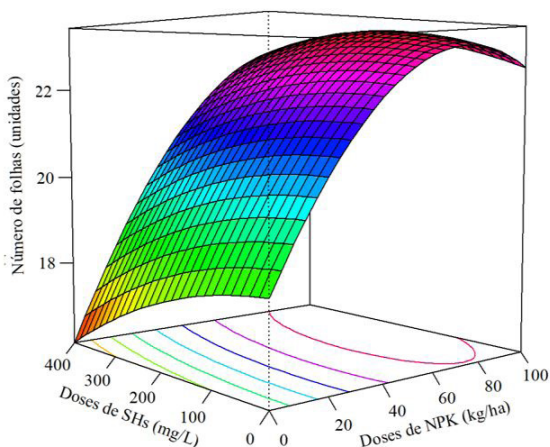


Figura 9 – Número de folhas, para a alface tipo lisa, em função da interação entre as doses de SH e doses de NPK.



$$NF = 18,2 - 0,000904 \cdot H + 0,125 \cdot A - 0,0000108 \cdot H^2 - 0,000815 \cdot A^2 + 0,0000667 \cdot H \cdot A \quad (2)$$

A área foliar é considerada de grande importância, uma vez que, é um parâmetro indicativo de produtividade, pois o processo fotossintético depende da interceptação da energia luminosa e sua conversão em energia química, sendo este um processo que ocorre diretamente na folha (Taiz; Zeiger, 2009). A aferição da área foliar de plantas, é uma ação relevante, que proporciona ao pesquisador obter indicativo de resposta de tratamentos aplicados e lidar com uma variável que se relaciona diretamente com a capacidade fotossintética e de interceptação da luz, interfere na cobertura do solo, na competição com outras plantas e em várias outras características (Severino *et al.*, 2005).

A área foliar apresentou resultado significativo para ambos os fatores isolados e para a interação (Figura 11). A dose de NPK 50 mg L⁻¹ foi a que proporcionou maior área foliar (1539,33 dm²) (Figura 10B). Apesar do valor R²= 0,38, para o fator doses de SH não ser satisfatório, foi o modelo que melhor se ajustou aos dados. Sendo a dose 100 mg L⁻¹ que contribuiu para uma maior área foliar (1117,67 dm²), promovendo um incremento de 1,45% na área foliar da alface. Foi notado que à medida que se aumentava a concentração de SH, houve uma diminuição da área foliar (Figura 10A). A área foliar da cultura é essencial para a produção de fotoassimilados e em seguida para a distribuição e acúmulo de fitomassa (Caron *et al.*, 2004).

Figura 10 – Área foliar, para as doses de SH (A) e doses de NPK (B).

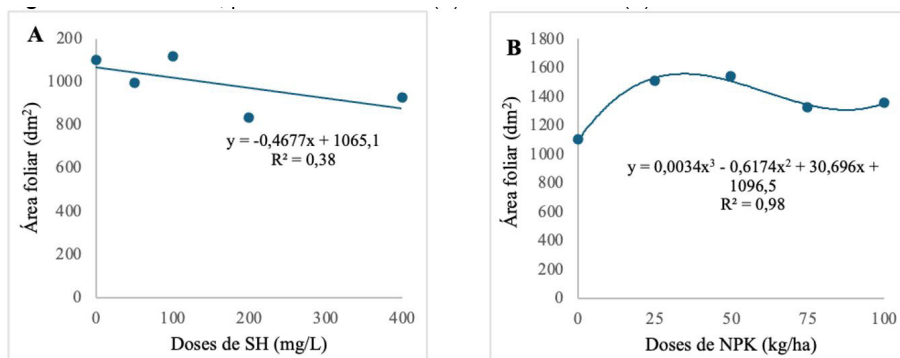
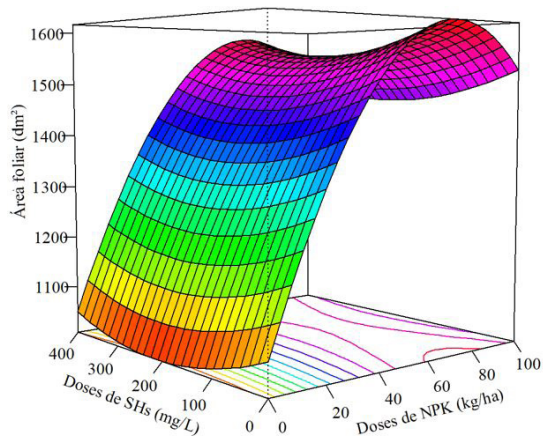


Figura 11 – Área foliar, para a alface tipo lisa, em função da interação entre as doses de SH e doses de NPK.



$$AF = 1067 - 0,5387 \cdot H + 15,4 \cdot A + 0,001244 \cdot H^2 - 0,108 \cdot A^2 - 0,000068 \cdot H \cdot A \quad (3)$$

De acordo com Hamada, & Testezlaf (1995) a maior área foliar resulta em maior material produzido no processo de fotossíntese. Assim, para uma cultura como a alface, a área foliar é uma medida fundamental na determinação do desenvolvimento da planta, porque, é mais interessante que a alface tenha maior área foliar que um maior número de folhas ou até mesmo uma altura satisfatória para o período de cultivo.

Os níveis de SH e doses de NPK afetaram significativamente a componente de produção MFPA. O modelo quadrático, foi tido como o melhor para os dados das doses de NPK, sendo com concavidade para baixo. A dose de NPK de 75 kg ha⁻¹ foi a que proporcionou a maior produção de MFPA (143,33 g planta⁻¹). Para as doses de SH o modelo de regressão cúbica se ajustou melhor aos dados. A dose de SH 100 mg L⁻¹ foi a que promoveu maior produção de MFPA (81,67 g planta⁻¹), apresentando um decréscimo à medida que se aumentava a concentração de SH (Figura 12 A).

A adição de SH aumentou a produção de MFPA em até 26 %. Estima-se que o rendimento máximo de MFPA foi obtido com a dose 100 mg L⁻¹ (81,67 g planta⁻¹). Esses resultados corroboram os obtidos por Rocha *et al.* (2009), que avaliando o efeito de SH no crescimento de feijão, observaram que a utilização deste material proporcionou um incremento de até 30% na massa fresca da parte aérea das plantas.

A maior produção de MFPA, não foi obtida com os níveis máximos dos fatores, assim, torna-se inviável aumentar a concentração além das concentrações que proporcionaram maior produção de MFPA, para ambos os fatores (Figura 14).

A produção de MFPA da alface está diretamente relacionada com a área foliar da planta (Caron *et al.*, 2004). Tal afirmativa está de acordo com os dados obtidos para as doses de SH, que corresponde a dose que mais proporcionou maior área foliar e maior produção de MFPA.

A MSPA também apresentou efeito significativo para ambos os fatores e para a interação (Figura 13A). O modelo de regressão cúbica foi tido como o melhor ajuste para os dados das doses de SH. Enquanto para as doses de NPK, o modelo quadrático foi o que melhor se ajustou aos dados (Figura 13B). A dose de SH 100 mg L⁻¹ foi a que proporcionou maior produção de MSPA (4,65 g planta⁻¹), sendo observado uma diminuição quando se aumentava a concentração de SH. Para as doses de NPK, a maior produção de MSPA foi obtida com a dose de 50 kg ha⁻¹ (7,23 g planta⁻¹).

As doses de SH aumentaram em até 21,7% na MSPA. Esses resultados confirmam os obtidos por Atiyeh *et al.* (2002), que estudando a aplicação de ácidos húmicos em tomateiro, os autores observaram um aumento de 43,4% na MSPA.

Figura 12 – Matéria fresca parte aérea, para as doses de SH (A) e doses de NPK (B).

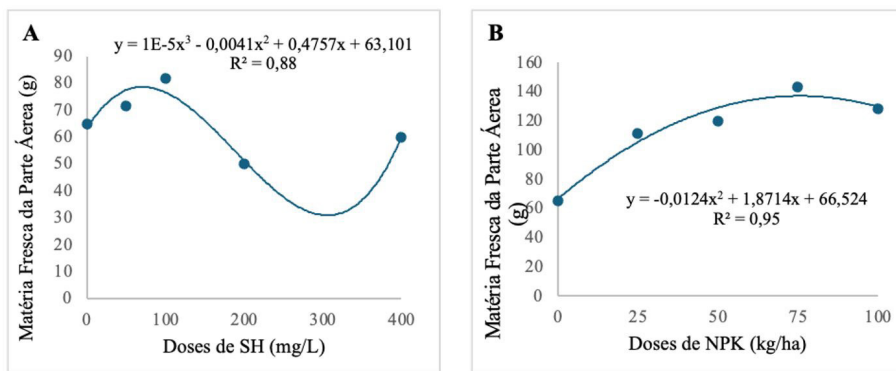


Figura 13 – Matéria seca na parte aérea, para as doses de SH (A) e doses de NPK (B).

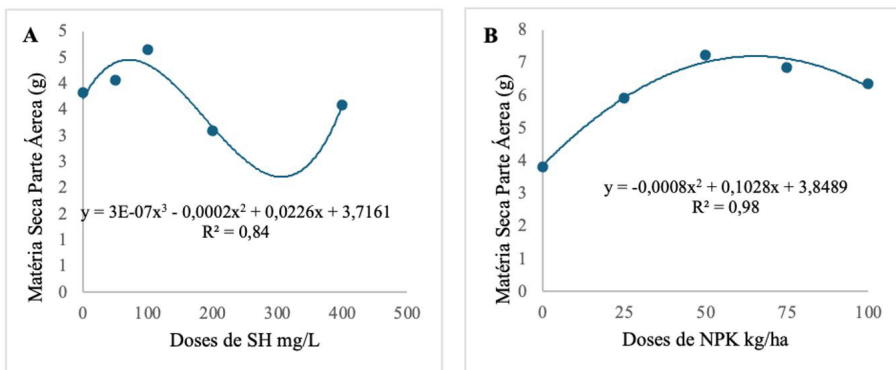
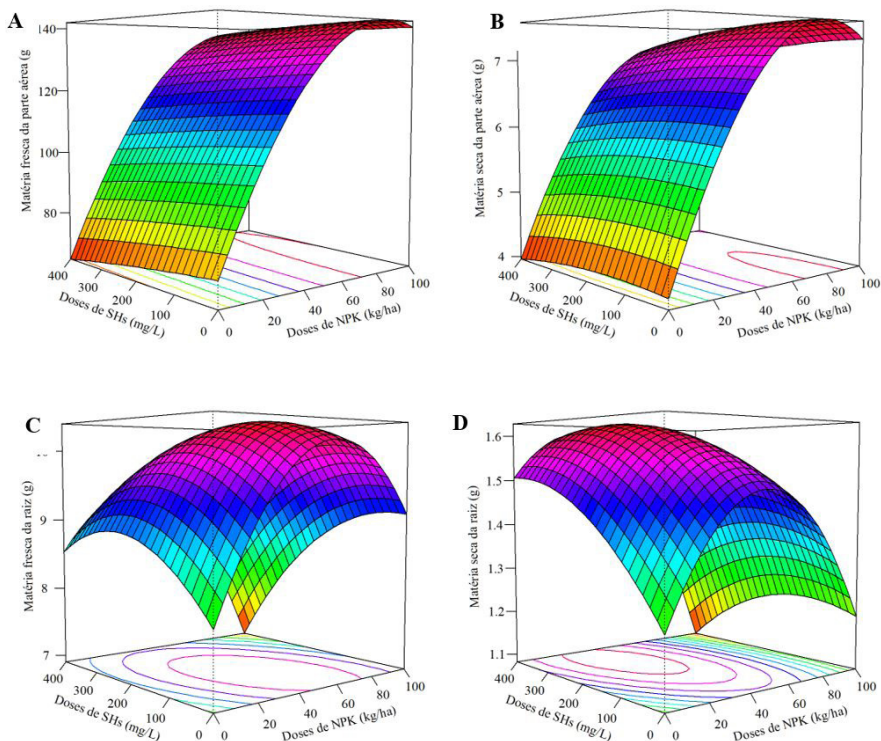


Figura 14 – Interação entre os fatores doses de SH e doses de NPK para as variáveis matéria fresca da parte aérea (A), matéria seca da parte aérea (B), matéria fresca da raiz (C) e matéria seca da raiz (D) analisadas na alface do tipo lisa.



$$MFPA_A = 72,36 - 0,014 * H + 1,629 * A - 0,0000134 * H^2 - 0,009524 * A^2 + 0,000167 * H * A \quad (4)$$

$$MSPA_B = 4,1 + 0,00065 * H + 0,0886 * A - 0,00000249 * H^2 - 0,000565 * A^2 - 0,00000591 * H * A \quad (5)$$

$$MFR_C = 1,226 + 0,001458 * H + 0,01067 * A - 0,0000019 * H^2 - 0,000109 * A^2 - 0,000009947 * H * A \quad (6)$$

$$MSR_D = 7,887 + 0,008175 * H + 0,075 * A - 0,0000164 * H^2 - 0,0006276 * A^2 - 0,00007146 * H * A \quad (7)$$

A variável MFR, respondeu significativamente aos fatores isolados e à interação. O fator dose de NPK, se ajustou melhor ao modelo de regressão cúbica. Sendo a dose 25 kg ha⁻¹, a que mais contribuiu para o teor de MFR (9,83 g planta⁻¹) (Figura 15B). Apesar do valor R²= 0,38, para o fator doses de SH não ser satisfatório, foi o modelo que melhor se ajustou aos dados. A dose de SH 100 mg L⁻¹ foi a que mais contribuiu para a maior produção de MFR (11,72 g planta⁻¹), diminuindo em seguida, com o aumento da concentração de SH (Figura 15A).

Verificou-se que as doses de SH contribuíram para o aumento de até 48% da MFR. Esses resultados estão de acordo com os encontrados por Borcioni *et al.* (2016), que avaliando o crescimento e produtividade da alface americana, observaram que houve um aumento da MFR, com a adição de SH.

As doses de SH e doses de NPK afetaram significativamente a variável MSR, ambos os fatores se ajustaram melhor ao modelo de regressão cúbica. A dose de NPK 50 kg ha⁻¹ proporcionou a maior produção de MSR (1,43 g planta⁻¹) (Figura 16B). Apesar do valor R²= 0,29, para o fator dose de SH não ser satisfatório, foi o modelo que melhor se ajustou aos dados. Sendo a dose 100 mg L⁻¹ a que mais contribuiu para a maior produção de MSR (1,76 g planta⁻¹), podendo ser observado uma diminuição à medida que se aumentava a concentração de SH (Figura 16A).

O uso de SH aumentou em 38,5 % a MSR. Esses resultados ratificam os obtidos por Atiyeh *et al.* (2002), estes autores observaram que a aplicação de ácidos húmicos aumentou em 79,3% a MSR de tomateiro. Rosa *et al.* (2009) também observaram um aumento de 41% na MSR de feijão com o uso de SH.

Figura 15 – Matéria fresca da raiz, para as doses de SH (A) e doses de NPK (B).

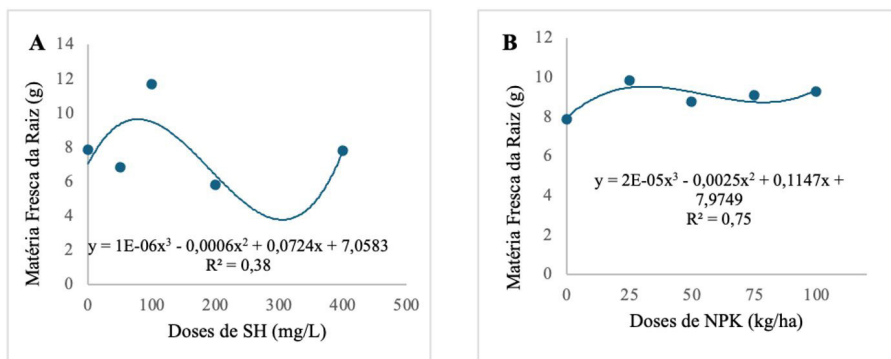
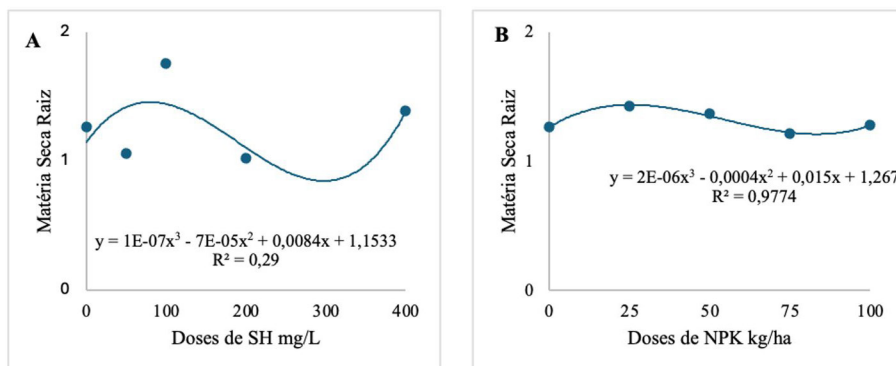


Figura 16 – Matéria seca da raiz, para as doses de SH (A) e doses de NPK (B).



As doses de SH, de NPK e a interação entre os fatores, influenciaram significativamente na produtividade da alface. As doses de NPK ajustam-se melhor ao modelo quadrático, tendo o ponto de máximo na dose 77,97 kg ha⁻¹ (Figura 17B). O modelo de regressão cúbica foi tido como o melhor ajuste para os dados das doses de SH.

A dose de SH 100 mg L⁻¹ foi a que mais contribui para a produtividade da alface (10,21 kg ha⁻¹), tendo um incremento na produtividade de até 25,5 % (Figura 17A). Esses resultados corroboram com Ruwer (2019), que observou um incremento de até 4% na produtividade de soja utilizando SH (Figura 18).

Figura 17 – Produtividade da alface, para as doses de SH (A) e doses de NPK (B).

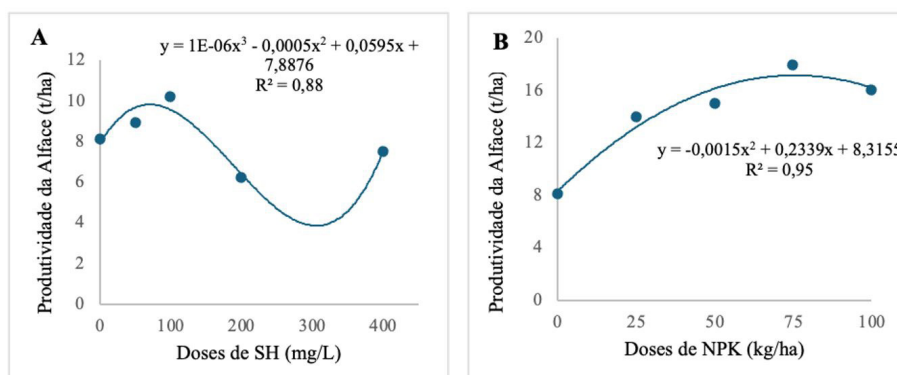
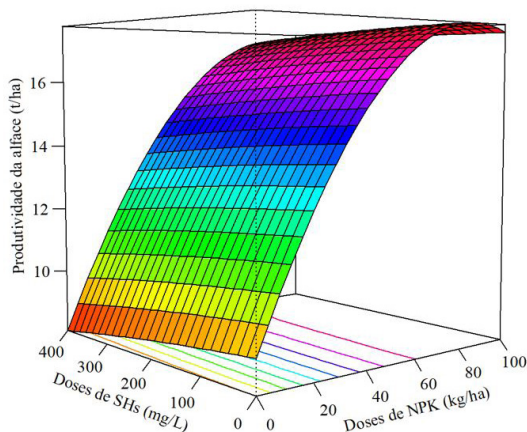


Figura 18 – Produtividade, para a alface tipo lisa, em função da interação entre as doses de SH e doses de NPK.



$$\text{PROD} = 9,046 - 0,00174 \cdot H + 0,2036 \cdot A - 0,0000169 \cdot H^2 - 0,00119 \cdot A^2 + 0,00002073 \cdot H \cdot A \quad (8)$$

As doses de SH e de NPK isoladamente e a interação, influenciaram significativamente o tamanho da raiz de alface. Ambos os fatores se ajustaram melhor ao modelo de regressão quadrática com concavidade para cima. A dose 400 mg L⁻¹ de SH e a dose 25 kg ha⁻¹ de NPK foram as que proporcionaram o maior crescimento da raiz, (23,53 g planta⁻¹) e (22,67 g planta⁻¹) respectivamente (Figura 19A e 19B). Em ambos os fatores, o tamanho da raiz foi inferior ao tratamento controle (Figura 20).

Segundo Valio (2001) a biomassa das raízes está diretamente relacionada ao aumento da biomassa da parte aérea (folhas e caules). De acordo com Silva *et al.* (2011) o aumento no crescimento das raízes é um dos principais efeitos fisiológicos das substâncias húmicas e depende tanto da espécie e idade das plantas como da fonte e concentração utilizada.

Muscolo *et al.* (2007) postularam que a interação entre a matéria húmica e o sistema radicular é possível na rizosfera quando moléculas húmicas em solução têm tamanho suficiente para permitir seu fluxo no apoplasto e atingir as membranas celulares.

A dose 400 mg/L de SH foi a que influenciou no maior crescimento da raiz, (23,53 g planta⁻¹). Porém, quando comparado com o crescimento radicular na dose controle, é observado menor contribuição das doses de SH. Os resultados, diferem dos obtidos por Borcioni *et al.* (2016) que avaliaram a influência de ácido fúlvico no crescimento radicular da alface americana. Os

autores observaram que as plantas as quais foram submetidas à aplicação de diferentes doses de ácido fúlvico apresentaram resposta crescente, para o comprimento radicular.

Figura 19 – Tamanho da raiz, para as doses de SH (A) e doses de NPK (B).

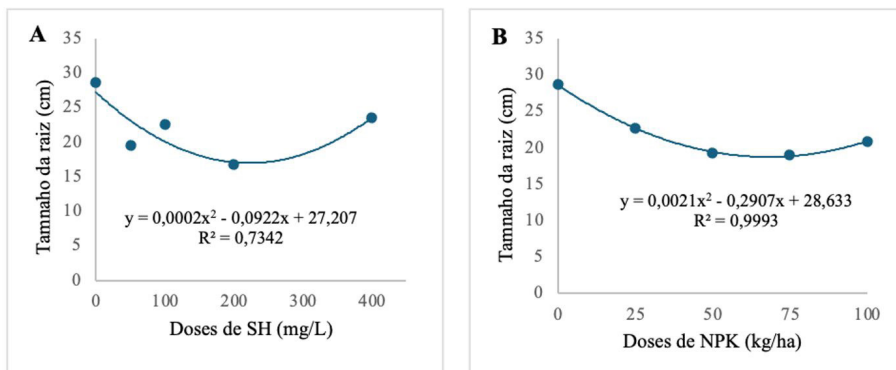
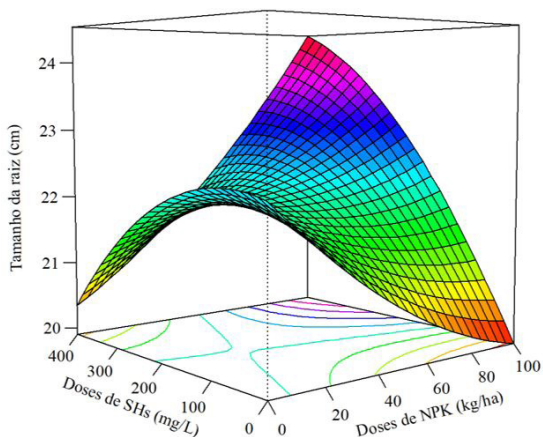


Figura 20 – Tamanho da raiz, para a alface tipo lisa, em função da interação entre as doses de SH e doses de NPK.



$$TR = 22,3 + 0,00264*H - 0,0398*A - 0,0000188*H^2 + 0,000158*A^2 + 0,000165*H*A \quad (9)$$

Não foi possível identificar efeito significativo com as doses de SH para variáveis pH do solo após a colheita e diâmetro da copa.

A partir dos resultados obtidos foi observado que a dose 100 mg L⁻¹ de SH, foi a que influenciou a maioria das variáveis como: AP, AF, SPAD, MFPA, MSPA, MFR, MSR, PROD, sendo considerada a melhor dose resposta. Foi

observado que com o aumento da concentração de SH (200 e 400 mg L⁻¹), ocorreu uma diminuição das variáveis analisadas.

Os resultados obtidos, corroboram os observados por Silva (2018), que avaliando o crescimento de coentro com as mesmas concentrações de SH, identificou que a partir da dose 100 mg L⁻¹, houve um decréscimo no crescimento radicular. Resultado semelhante foi observado por Anjos (2010), que avaliando o efeito de SH no metabolismo de nitrogênio de plantas de rúcula, observou uma diminuição no efeito das SH, a partir da dose de 100 mg L⁻¹.

Rodda (2003) e Rodda *et al.* (2006) estudando o efeito de humatos de diferentes fontes de vermicomposto em mudas de alface, observaram que a dose de 25 mg de C L⁻¹ de humatos extraídos de vermicomposto de esterco de curral foi responsável pelo maior incremento no comprimento radicular. Sendo observado também nessa concentração, aumento significativo na hidrólise de ATP pelas bombas de H⁺, responsáveis pela geração de energia necessária à absorção de íons e pelo crescimento celular. Segundo os autores, à medida que as concentrações das doses de humatos se elevam os incrementos e estímulos decaem, pois elevadas concentrações de humatos reduzem o crescimento e a hidrólise de ATP das raízes.

Essa hipótese pode ser confirmada por resultados encontrados na literatura de que doses crescentes de substâncias húmicas tendem a diminuir os incrementos proporcionados pelas doses mais baixas (Anjos, 2010). Esse efeito negativo a partir de determinada concentração pode ser explicado pelo descrito por Camargo *et al.* (2001) que alguns ácidos orgânicos podem provocar fitotoxicidade limitando a germinação e o desenvolvimento das plantas.

De maneira geral, as SH estudadas, contribuíram para o crescimento e desenvolvimento das plantas de alface. Para a maioria das variáveis analisadas as substâncias húmicas estudadas, apresentou efeito significativo, tanto isoladamente, quanto na interação com as doses de NPK. A dose de SH 100 mg L⁻¹, foi tida como a melhor dose de resposta. Sendo observado uma diminuição dos efeitos nas variáveis analisadas, à medida que se aumentava a concentração de SH. Nesse sentido, observa-se a necessidade de trabalhos com menores concentrações de SH para aplicação nesse tipo de cultura.

CAPÍTULO 5 - APLICAÇÃO DE LODO DE ETA NA GERMINAÇÃO DE ESPÉCIES EM ÁREAS DEGRADADAS

Vanda Duarte de Andrade

Alverlan da Silva Araújo

Mayara de Almeida Ribeiro Carvalho

Luciana Camargo de Oliveira

Andrea Pires Fernandes

Wander Gustavo Botero

Plantas que Recuperam Áreas Degradadas

Os processos de degradação dos ecossistemas naturais avançam com o passar dos anos, isso se deve à grande expansão da fronteira agrícola, pecuária e crescimento informal nos centros urbanos. Com o uso intensivo ao longo do tempo, vários problemas ambientais estão sendo desencadeados, tornando essas áreas suscetíveis à compactação do solo, redução da biodiversidade, extinção de espécies animais e vegetais, perda da fertilidade natural e, portanto, degradação ambiental, necessitando da adoção de práticas sustentáveis que visem à sua recuperação e redução dos problemas ambientais (Melo *et al.*, 2013; Brancalion *et al.*, 2015).

O surgimento de áreas degradadas aumenta consideravelmente ao longo dos anos, no Brasil a preocupação com o ambiente começou a ter destaque na década de 60 e sendo mais evidente na década de 70, com a participação do Governo Brasileiro em Convenções internacionais para tratar dos inúmeros prejuízos ao meio ambiente. Área degradada pode ser definida como um ambiente alterado por uma obra de engenharia ou submetido a processos erosivos intensos que o modificam, tornando difícil o seu retorno ao seu estado anterior pelo processo natural, exigindo, assim, a intervenção do homem para sua recuperação (Noffs *et al.*, 2002; Russo, 2012).

As plantas auxiliam no processo de recuperação de áreas degradadas neutralizando processos erosivos, recobrando o solo, facilitando a infiltração de água etc., por isso, tal cenário de degradação dessas áreas, torna-se indiscutível a prioridade em recuperar e reabilitar suas funções. O uso de espécies nativas de rápido crescimento é indicado para a recuperação dessas

áreas, as plantas nativas são as espécies que compõem o grupo ecológico das pioneiras e, em um período curto, elas podem proporcionar melhores condições ao solo, além de fornecerem alimento para a fauna. (Martínez-Garza, Bongers e Poorter, 2013; Brancalion *et al.*, 2015).

Existe um potencial grande entre as espécies nativas, porém, para uma restauração florestal eficaz, é imprescindível a compreensão do crescimento das plantas e os requisitos nutricionais de espécies vegetais nativas, empregadas para tal finalidade, evitando assim a aquisição de mudas de procedência duvidosa e de espécies exóticas (Seddon *et al.*, 2014; Nussbaumer *et al.*, 2016; Carvalho *et al.*, 2018). De modo geral, as áreas que sofreram processos de degradação em solos brasileiros apresentam pouca fertilidade, o que é um fator limitante para o crescimento vegetal na fase inicial e consequentemente inviabiliza as diversas formas de vida que ali pudessem existir (Vale, Costa e Miranda, 2014; Grant *et al.*, 2001; Barros, Neves e Novais, 2004).

Estudos realizados pela Embrapa (2025) indicam que a recuperação de áreas degradadas tem como objetivo restabelecer a funcionalidade ambiental por meio da seleção e introdução de leguminosas arbóreas e arbustivas, espécies capazes de se desenvolver sob condições adversas. A eficácia dessa estratégia está na associação simbiótica entre as plantas, rizóbios e fungos micorrízicos, a qual favorece o rápido estabelecimento e crescimento das espécies, mesmo independentemente da disponibilidade de nitrogênio no solo. Atualmente existem mais de cem espécies de leguminosas arbóreas e arbustivas recomendadas para plantio nos biomas Mata Atlântica, Cerrado, Amazônia e Caatinga. Vale destacar que, para cada bioma é indicado determinada espécie vegetal nativa da região (Embrapa, 2025).

Trabalhos realizados no semiárido brasileiro de fitossociologia, demonstraram quais espécies são importantes para a restauração ecológica nessa região, são elas: juremas (*Mimosa sp*, Mart), umburana de cambão (*Commiphora leptophloeos*, Mart.), baraúna (*Schinopsis brasiliensis* Engl.), pinhão (*Jatropha sp.*, L.), pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart.), catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul.), aroeira (*Myracrodruon urundeuva*, Engl.), angico (*Anadenanthera macrocarpa*, Benth.), dentre outras, como as mais importantes da caatinga. Muitas dessas espécies possuem informações ecológicas e silviculturais para trabalhos de reflorestamento na região, todavia, informações a respeito da maioria ainda são escassas (Lima, 2004).

Técnicos e biólogos apontam o reflorestamento com plantas nativas como a solução mais viável para esse problema. A espécie arapiraca, *Chloroleucon dumosum* (Benth) é um exemplo de leguminosa do semiárido nordestino, nativa da região semiárida, que auxilia e melhora as propriedades físicas do solo da região. Isso ocorre pois, protege o solo contra a erosão; ameniza o clima e diminui a incidência dos raios solares, mantendo, assim, a umidade do solo (Sobrinho *et al.*, 2016). A craibeira é o nome comum mais conhecido na Caatinga para a espécie *Tabebuia aurea* (Manso) Benth. e Hook. F., espécie heliófita, ou seja, adaptada ao crescimento em ambiente aberto ou exposto à luz direta, é também decídua perdendo as folhas em determinada época do ano. Ecologicamente, pertence ao grupo das espécies secundárias iniciais e importante na recuperação de solos degradados (Lorenzi, 2009).

Tratamento Pré-germinativo de Sementes de *Chloroleucon Dumosum* com Substâncias Húmicas de Lodo de ETA

As substâncias húmicas, compostas principalmente por ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e huminas, têm sido amplamente estudadas como bioestimulantes no processo de pré-germinação de sementes. Quando utilizadas em tratamentos como embebição ou condicionamento fisiológico (*seed priming*), essas substâncias atuam na ativação metabólica inicial, estimulando enzimas relacionadas à mobilização de reservas e promovendo maior vigor germinativo. Estudos indicam que as substâncias húmicas podem modular rotas hormonais associadas principalmente às auxinas, favorecendo o alongamento radicular e o desenvolvimento inicial do sistema radicular (Nardi *et al.*, 2002; Canellas, Olivares, 2014).

No contexto agrônomico, a aplicação de substâncias húmicas no pré-germinação pode resultar em maior percentual e uniformidade de germinação, além de melhor estabelecimento inicial das plântulas, especialmente sob condições de estresse abiótico, como salinidade e déficit hídrico. Esses efeitos estão associados ao aumento da permeabilidade de membranas, maior eficiência na absorção de água e ativação de mecanismos antioxidantes, refletindo positivamente no crescimento inicial e, potencialmente, na produtividade das culturas (Rose *et al.*, 2014; Du Jardin, 2015). Nesse sentido, buscou-se a aplicação de substâncias húmicas de lodo de ETA de Penedo, discutida nos Capítulos 1 e 3 deste livro.

O uso das SH de lodo de ETA foi aplicado em sementes de *Chloro-leucon dumosum*, conhecida popularmente como Arapiraca, que foram fornecidas pela Mineradora Vale Verde, onde foram coletadas em uma área de caatinga localizada no município de Craíbas, Alagoas. As sementes foram enviadas para a Universidade Federal de Alagoas onde foram beneficiadas, retirando-se as sementes com sinais de injúrias causadas por insetos-broca e/ou com sintomas de algum patógeno, deixando-se apenas aquelas fisicamente saudáveis.

Para o preparo das soluções de SH de lodo de ETA de Penedo foi pesado em balança semianalítica o equivalente a cada concentração a ser usada nos experimentos, em seguida foram transferidas para Becker de 2 L e avolumadas com água deionizada, em seguida tiveram o pH ajustado para 7,0.

Após o beneficiamento, foi realizada a implantação dos experimentos aplicando as SH de lodo de ETA de Penedo, como tratamento pré-germinativo. As sementes de Arapiraca foram submetidas a embebição nas diferentes concentrações de substâncias húmicas de lodo de ETA coletados em Penedo - AL (0 mg/L (controle com água deionizada), 25 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L e 200 mg/L), contidas em béquer com 500 mL da solução de cada concentração. Após 48 horas de embebição nos tratamentos com SH as sementes foram retiradas e transferidas para placas de Petri contendo dois papéis germitest sobrepostos, previamente umedecidos com água deionizada. O experimento foi implantado em triplicata com 16 sementes por placa, totalizando 48 sementes por tratamento, em um delineamento inteiramente casualizado (DIC). Os ensaios foram realizados em condições de BOD (*Biochemical oxygen demand*) a uma temperatura fixa de 25 C° e fotoperíodo de 12 horas.

As avaliações foram realizadas a cada dois dias, sempre no horário matutino entre 8 e 11 horas. As variáveis avaliadas foram o IVG (Índice de Velocidade de Germinação), TMG (Tempo Médio de Germinação) e o IG (Índice de Germinação – expresso em porcentagem).

- Índice de velocidade de germinação (IVG): calculado pela fórmula $IVG = \sum (n_i / t_i)$, em que: n_i = número de sementes que germinaram no tempo 'i'; t_i = tempo após instalação do teste; Unidade: adimensional (Maguire, 1962).
- Tempo médio de germinação (TMG): calculado pela fórmula $TMG = (\sum n_i t_i) / \sum n_i$, em que: n_i = número de sementes germinadas por dia; t_i = tempo de incubação. Unidade: dias

- Índice de Germinação (G): calculada pela fórmula $G = (N/100) \times 100$, em que: N = número de sementes germinadas ao final do teste. Unidade: %.

Os dados foram submetidos à análise de variância e teste de comparação de média, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, em seguida realizou-se a análise de regressão. Os modelos foram ajustados conforme o nível de significância dos coeficientes de determinação, com as equações expostas nos gráficos. Todas as análises foram realizadas no software SIS-VAR® versão 5.6 (Ferreira, 2014).

Avaliação da aplicação de substâncias húmicas na germinação de sementes de *Chloroleucon dumosum*

Houve diferença significativa entre os tratamentos com diferentes concentrações de substâncias húmicas para as variáveis germinativas avaliadas, além disso, a germinação das sementes de *Chloroleucon dumosum* distribuiu-se de maneira distinta entre as concentrações de SH de lodo, sendo que a concentração de 100 mg/L proporcionou os maiores resultados em termos de valores médios, apresentando as maiores médias para as variáveis índice de velocidade de germinação (IVG) e índice de germinação (IG), enquanto que houve uma redução acentuada do tempo médio de germinação. Ressalta-se que quanto maior o IVG e o IG e menor o IVG, melhor a resposta da semente em função do tratamento (Tabela 9).

Em relação ao índice de velocidade de germinação (IVG) quanto maior o valor médio desta variável maior é a germinação média diária. Caron (2015), relata que o aumento da germinação das sementes é proporcional à quantidade de substâncias húmicas aplicadas. Nesse sentido, os maiores índices foram obtidos nas concentrações de 50 mg/L e 100 mg/L, que por sua vez diferiram estatisticamente dos demais tratamentos, entretanto foram iguais entre si.

Para o tempo médio de germinação, constatou-se que houve uma redução gradativa das médias com o aumento da concentração até 100 mg/L, porém não houve diferença significativa desta em relação às concentrações mais baixas. Além disso, observou-se que no tratamento contendo 200 mg/L de substâncias húmicas houve um aumento significativo do TMG.

De maneira geral, observou-se que nas maiores concentrações (50 mg/L, 100 mg/L e 200 mg/L) obteve-se os maiores índices médios de germinação, além disso, ambas as três concentrações apesar de não apresentarem diferenças significativas entre si foram diferentes estatisticamente das concentrações mais baixas (0 mg/L e 25 mg/L), sugerindo que as maiores doses de SH de lodo de estação de tratamento de água promovem o aumento da porcentagem de germinação de sementes de *C. dumosum*, visto que esta espécie possui dormência física.

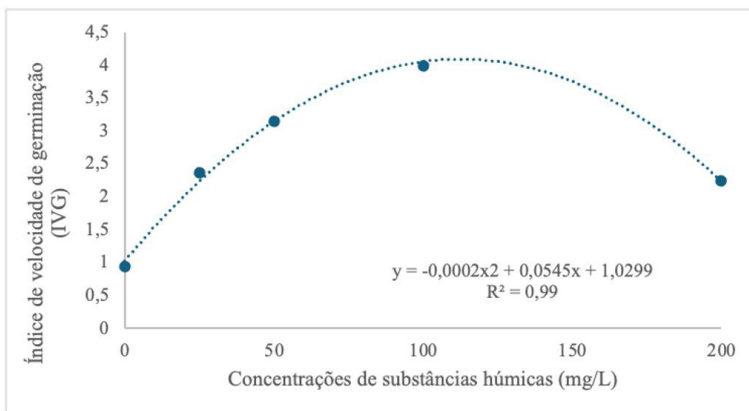
Tabela 9 - Valores médios de germinação para as variáveis analisadas em sementes de *C. dumosum*.

Tratamento	IVG	TMG	IG (%)
0 mg/L	0,94 ± 0,08c	5,00 ± 0,02ab	29 ± 1,70c
25 mg/L	2,37 ± 0,13b	4,46 ± 0,47ab	33 ± 0,60bc
50 mg/L	3,15 ± 0,30ab	4,40 ± 0,12ab	46 ± 0,51ab
100 mg/L	4,0 ± 0,35a	2,73 ± 1,17a	54 ± 0,94a
200 mg/L	2,25 ± 0,25b	5,56 ± 0,02b	58 ± 0,45a
CV (%)	17,6	21,4	13,1

Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. As médias são os valores de três repetições ± o erro.

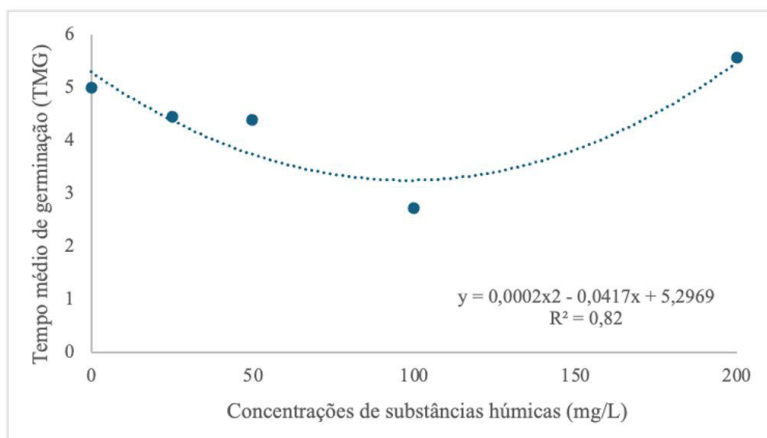
Com relação às análises de regressão, observou-se que o índice de velocidade de germinação apresentou resposta quadrática, havendo um aumento do índice em função do aumento da concentração de substância húmica, atingindo um IVG médio de 4,0 na dose de 100 mg/L, decaindo logo em seguida na concentração de 200 mg/L (IVG= 2,25), sugerindo que concentrações superiores a 100 mg/L afeta o desempenho do IVG de *C. dumosum* (Figura 21).

Figura 21 - Índice de velocidade de germinação de sementes de *Chloroleucon dusomum* em função do tratamento pré-germinativo com substâncias húmicas de lodo.



O modelo que melhor se ajustou ao tempo médio de germinação de sementes de *C. dumosum* tratadas com diferentes concentrações de SH foi o quadrático. Os valores médios se comportaram de maneira decrescente em função do aumento da concentração, sendo a de 100 mg/L a que proporcionou a melhor resposta (TMG= 2,73). Concentrações maiores como a de 200 mg/L podem afetar o desempenho da variável (TMG= 5,56) (Figura 22).

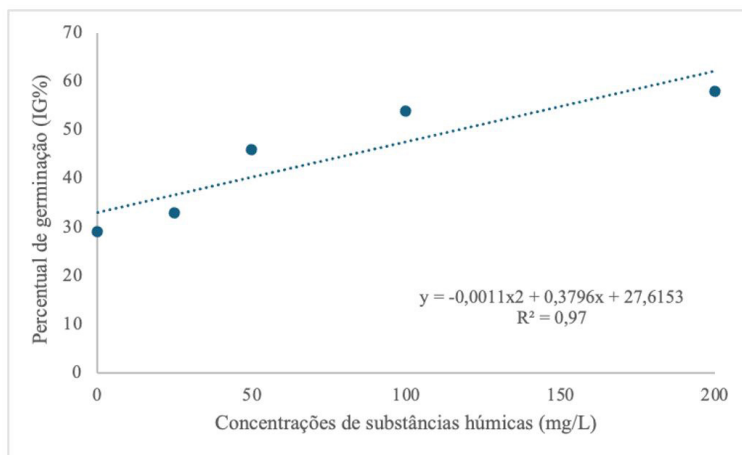
Figura 22 - Tempo médio de germinação de sementes de *C. dumosum* submetidas ao tratamento pré-germinativo com substâncias húmicas de lodo.



O modelo que melhor se ajustou ao índice de germinação foi o linear, apresentando aumento crescente da porcentagem de sementes germinadas

à medida que se aumenta a concentração de SH de lodo de estação de tratamento de água (0mg/L= 29%, 25mg= 33%, 50mg/L= 46%, 100mg/L= 54 %, 200mg/L= 58% (Figura 23).

Figura 23 - Índice de germinação de sementes de *C. dumosum* submetidas ao tratamento pré-germinativo com substâncias húmicas de lodo.



Os efeitos das SH sobre a germinação estão relacionados com a síntese de hormônios vegetais, como a auxina, e ainda de enzimas que promovem outros efeitos nas plantas, e que por sua vez favorecem a germinação, florescimento e crescimento da parte aérea, além disso, o incremento do fluxo de nutrientes que incrementam a respiração e divisão celular promovendo o crescimento radicular e a atividade enzimática das sementes (Eyheraguibel *et al.*, 2008).

Estudos encontrados na literatura sobre os efeitos das SH na germinação, são diversos e variam com a espécie, fonte e concentração de SH utilizada, sendo reportados efeitos positivos na germinação e o índice de velocidade de germinação de sementes de Aroeira do Sertão (*Myracrodruon urundeuva Fr. All*), acelerando o processo de germinação das sementes e promovendo o crescimento e florescimento (Mota *et al.*, 2016).

Dentre as diversas propriedades atribuídas aos ácidos húmicos e fúlvicos, destaca-se sua capacidade de estimular a síntese de fitormônios, como as auxinas, além de modular a atividade enzimática nas plantas. Esses compostos também promovem efeitos fisiológicos relevantes, favorecendo a germinação, o florescimento e o desenvolvimento da parte aérea, contribuindo, de modo geral, para o crescimento vegetal (Caron, 2015).

Embora não tenha sido avaliado neste estudo o crescimento das plantas, vários autores relatam que as substâncias húmicas podem ainda influenciar no crescimento e desenvolvimento das plantas, alterando diretamente o metabolismo bioquímico dos vegetais, além de afetar a permeabilidade das membranas por meio das bombas de prótons, contribuindo, desta maneira para uma maior absorção de nutrientes (Rosa *et al.*, 2009; Zandonadi *et al.*, 2014).

Neste sentido, busca-se práticas de manejo que possibilitem a um melhor estabelecimento e desenvolvimento e absorção de nutrientes no solo entre as diversas culturas vegetais, diminuindo o uso de fertilizantes químicos e impactos ambientais (Ahemad, Kibret, 2014).

REFERÊNCIAS

ALAGOAS. **Secretaria de Estado do Planejamento e do Desenvolvimento Econômico (SEPLANDE)**. Perfil socioeconômico de Alagoas: Região Agreste e produção de hortaliças. Maceió: SEPLANDE, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: resíduos sólidos – classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. Disponível em: <https://analiticaqmresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-ClassificacaoDe-Residuos-Solidos.pdf>. Acesso em: 13 maio 2020.

ABREU JUNIOR, C. H.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T.; KIEHL, J. C. Uso agrícola de resíduos orgânicos potencialmente poluentes: propriedades químicas do solo e produção vegetal. In: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L. R. F.; COOPER, M.; SILVA, A. P.; CARDOSO, E. J. (org.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. v. 4, p. 391-470.

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. **Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro**. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 115-122, 2013.

AHAMANDOU, B.; HUANG, Q.; YAPING, L.; IQBAL, J. Composition and structure of humic substances in long-term fertilization experimental soils of southern China. **Journal of Soil Science and Environmental Management**, v. 4, n. 4, p. 77-86, 2013.

AHEMAD, M.; KIBRET, M. Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: current perspective. **Journal of King Saud University – Science**, v. 26, n. 1, p. 1–20, 2014.

AKINCI, S.; AKINCI, I.; SAYAR, S.; YILMAZ, E. **The effect of various micronutrient deficiencies and humic acid application on apple seedlings**. Scientia Horticulturae, v. 121, n. 2, p. 158-164, 2009.

ALLOWAY, B. J.; JACKSON, A. P. **The behaviour of heavy metals in sewage sludge-amended soils**. Science of the Total Environment, v. 100, p. 151-176, 1991.

ANIELAK, A. M.; KŁECZEK, A.; ŁUSZCZEK, B. **Innovative method of extraction of humic substances from digested sludge and assessment of their impact on the growth of selected plants**. Energies, v. 16, n. 3, p. 1283, 2023.

ANJOS, O. O. **Substâncias húmicas no metabolismo de nitrogênio em plantas de rúcula**. 2010. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2010.

ARAÚJO, F. C.; SCALIZE, P. S.; ALBUQUERQUE, A. J. C.; ANGELIM, R. R. **Physical characterization of the residue of a water treatment plant for use in building materials**. *Cerâmica*, São Paulo, v. 61, n. 360, p. 450-456, 2015.

ARSLAN, G.; PEHLIVAN, E. **Uptake of Cr³⁺ from aqueous solution by lignite-based humic acids**. *Bioresource Technology*, v. 99, n. 16, p. 7597-7605, 2008.

ARTIFON, V.; ZANARDI-LAMARDO, E.; FILLMANN, G. **Aquatic organic matter: classification and interaction with microcontaminants**. *Science of the Total Environment*, v. 649, p. 1620-1635, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO COMÉRCIO DE SEMENTES E MUDAS (ABCSEM). BARRETO, M. (coord. geral). **Manual técnico: cultivo de hortaliças**. 5. ed. São Paulo: ABCSEM, 2025.

ASSUNÇÃO, Mayara Castro. **Levantamento de Meloidogyne spp. em áreas de cultivo de alface na região agreste do estado de Alagoas**. 2016. 48 f. Dissertação (Mestrado em Proteção de Plantas) – Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Proteção de Plantas, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2016.

ATIYEH, R. M.; LEE, S.; EDWARDS, C. A.; ARANCON, N. Q.; METZGER, J. D. The influence of humic acids derived from earthworm-processed organic wastes on plant growth. *Bioresource Technology*, v. 84, p. 7-14, 2002.

AZARPOUR, E.; MOHAMMADI, R.; BRIX, H. Effect of humic acid on salinity tolerance of tomato (*Solanum lycopersicum*). **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**, v. 4, n. 18, p. 1234-1240, 2012.

AZEVEDO, J. C. R.; NOZAKI, J. **Análise de fluorescência de substâncias húmicas extraídas da água, solo e sedimento da Lagoa dos Patos-MS**. *Química Nova*, v. 31, n. 6, p. 1324-1329, 2008.

BAIRD, C.; CANN, M. **Environmental chemistry**. 5. ed. New York: W. H. Freeman and Company, 2012.

BALDOTTO, L. E. B.; BALDOTTO, M. A.; GIRO, V. B.; CANELLAS, L. P.; OLIVARES, F. L.; BRESSAN-SMITH, R. Performance of 'Vitória' pineapple in response to humic acid application during acclimatization. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 979-990, 2009.

BALDOTTO, M. A.; BALDOTTO, L. E. B. Ácidos húmicos. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 61, p. 859-881, 2014.

BARROS, A. H. C.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SILVA, A. B.; SANTIAGO, G. A. C. F. **Climatologia do estado de Alagoas**. Recife: Embrapa Solos, 2012. 32 p.

BENITES, V. M.; MADARI, B.; MACHADO, P. L. O. A. Caracterização dos ácidos húmicos extraídos de um Latossolo Vermelho-Amarelo e de um Podzol por análise termodiferencial e espectroscopia no infravermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 543-551, 1999.

BETTONI, J. A.; FRANCIOSI, E.; ZUCOLOTO, J.; *et al.* Humic acid rate effect on soil fertility and maize production. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 14, n. 2, p. 281-295, 2014.

BITTENCOURT, S.; SERRAT, B. M.; AISSE, M. M.; MARIN, L. M. K. S.; SIMÃO, C. C. **Aplicação de lodos de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto em solo degradado**. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 17, n. 3, p. 315-324, 2012.

BORCIONI, E.; SILVA, A. A.; MAGRO, F. O.; *et al.* Aplicação de ácido fúlvico em mudas influenciando o crescimento radicular e produtividade de alface americana. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 47, n. 3, p. 509-515, 2016.

BOTERO, W. G.; SANTOS, A.; OLIVEIRA, L. C.; ROCHA, J. C. **Characterization of sludge generated in water treatment plants: prospects for agricultural application**. Química Nova, São Paulo, v. 32, n. 8, p. 2018-2022, 2009.

BOTERO, W. G. **Substâncias húmicas: interações com nutrientes e contaminantes**. 2010. 75 f. Tese (Doutorado em Química) – Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Araraquara, 2010.

BOYLE, E. S.; GUERRIERO, N.; DEL VECCHIO, R.; BLOUGH, N. V. **Optical properties of humic substances and chromophoric dissolved organic matter: relation to structure**. Environmental Science & Technology, v. 43, n. 7, p. 2262-2268, 2009.

BRANCALION, P. H. S.; VIANI, R. A. G.; RODRIGUES, R. R.; GANDOLFI, S. **Avaliação e monitoramento de áreas em processo de restauração**. In: MARTINS, S. V. (ed.). Restauração ecológica de ecossistemas degradados. 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2015. p. 262-293.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. **Estabelece os padrões de potabilidade da água para consumo humano e dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano.** Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2021. Disponível em: <https://bvsmms.saude.gov.br>. Acesso em: jan. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Secretaria de Vigilância em Saúde.** Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2006. 212 p. (Série B. Textos Básicos de Saúde).

CAMARGO, F. A. O.; ZONTA, E.; SANTOS, G. A.; ROSSIELLO, R. O. P. **Aspectos fisiológicos e caracterização da toxidez de ácidos orgânicos voláteis em plantas.** Ciência Rural, Santa Maria, v. 31, n. 3, p. 523-529, 2001.

CAMARGO, F. A. O.; SANTOS, G. A.; GUERRA, G. M. Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (ed.). Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: Genesis, 1999. p. 27-40.

CAMPITELLI, P.; CEPPI, S. **Effects of composting technologies on the chemical and physicochemical properties of humic acids.** Geoderma, v. 144, n. 1-2, p. 325-333, 2008.

CANELLAS, L. P.; OLIVARES, F. L.; AGUIAR, N. O.; JONES, D. L.; NEB-BIOSO, A.; MAZZEI, P.; PICCOLO, A. **Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture.** Scientia Horticulturae, v. 196, p. 15-27, 2015.

CANELLAS, L. P.; SANTOS, G. A.; RUMJANEK, V. M.; MORAES, A. A.; GURIDI, F. **Distribution of organic matter and humic acid characteristics in soils with addition of residues of urban origin.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 36, n. 12, p. 1529-1538, 2001.

CANELLAS, L. P. **Humosfera: tratado preliminar sobre a química das substâncias húmicas.** Campos dos Goytacazes: L. P. Canellas, 2005.

CANELLAS, L. P.; OLIVARES, F. L. **Physiological responses to humic substances as plant growth promoter.** Chemical and Biological Technologies in Agriculture, v. 1, p. 3, 2014.

CAPANA, A. S. **Caracterização e estudo do comportamento térmico de resíduo (lodo) proveniente de estações de tratamento de água e de esgoto do município de Araraquara-SP.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Araraquara, 2009.

CARNEIRO, C.; ANDREOLI, C. V. **Caracterização do lodo de ETA gerado no Estado do Paraná.** In: CARNEIRO, C.; ANDREOLI, C. V. (coord.). Lodo de estação de tratamento de água: gestão e perspectivas tecnológicas. Curitiba: Sanepar, 2013. p. 131-178.

CARON, B. O.; LOPES, S. J.; SCHMIDT, D.; MANFRON, P. A. Crescimento da alface em diferentes substratos. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 3, n. 2, p. 97-104, 2004.

CARON, V. C.; GRAÇAS, J. P.; CASTRO, P. R. C. **Condicionadores do solo: ácidos húmicos e fúlvicos.** Piracicaba: ESALQ/USP, 2015. 46 p. (Série Produtor Rural, n. 58).

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras.** Brasília: Embrapa Florestas, 2018.

CAVALCANTE, Í. H. L.; SILVA-MATOS, R. R. S.; ALBANO, F. G.; SILVA JUNIOR, G. B.; SILVA, A. M.; COSTA, L. S. Foliar spray of humic substances on seedling production of yellow passion fruit. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 11, n. 2, p. 301–304, 2013.

CHAABAN, A.; **Study of the structural organization of humic nanocolloids.** Environmental Science, v. 7, n. 1, p.78-98, 2016.

CHANG, R.; SZABÓ, C.; TÓTH, T.; SZÉKELY, E.; TÓTH, Z. **A comparison of the compositional differences between humic fractions isolated by the IHSS and exhaustive extraction procedures.** Naturwissenschaften, v. 101, n. 3, p. 197–209, 2014.

CHÁVEZ PORRAS, Á. A. **Producción y caracterización de lodos generados en plantas de potabilización de agua.** 2007. Dissertação (Maestría en Ingeniería Ambiental) – Universidad de los Andes, Bogotá, 2007.

CHEN, Y.; TARCHITZKY, J. **Humic substances and soil structure: dispersing agents or stabilizers?** In: Humic Substances in Ecosystems (HSE9). 2012. p. 25.

CLAPP, C. E.; HAYES, M. H. B. **Sizes and shapes of humic substances.** Soil Science, v. 164, n. 11, p. 777-789, 1999.

CONCEIÇÃO, M. M. M.; TEIXEIRA, L. C. G. M. Relação entre produção de resíduos sólidos urbanos e crescimento populacional na região Norte. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**, v. 14, n. 3, p. 1383-1396, 2021.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Matéria orgânica e nutrientes**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/mortandade-peixes/alteracoes-fisicas-e-quimicas/materia-organica-e-nutrientes/>. Acesso em: jul. 2025.

CORDOVIL, M. C. O.; MENDONÇA, A. G. R.; BOTERO, W. G.; SANTOS, A.; ROCHA, J. C.; MELLO, K.; TOPPA, R. H.; OLIVEIRA, L. C. **Análise espacial e quimiométrica da distribuição de espécies metálicas em solos alagáveis e não alagáveis da Bacia do Médio Rio Negro, Amazônia**. Química Nova, São Paulo, v. 37, n. 5, p. 770-775, 2014.

CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; HAND, D. W.; HOWE, K. J.; TCHOBANOGLOUS, G. **MWH's water treatment: principles and design**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.

CUI, J.; TANG, Z.; LIN, Q.; YANG, L.; DENG, Y. **Interactions of ferrate(VI) and aquatic humic substances in water treatment**. Science of the Total Environment, v. 919, 170919, 2024.

CUNHA, G. D.; LIMA, J. A. V.; STACHIW, R.; TRONCO, K. M. Q. **Caracterização e destinação ambientalmente corretas do lodo gerado pelas estações de tratamento de água**. Nature and Conservation, v. 12, n. 2, p. 19-30, 2019.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. **Elementos requeridos à nutrição de plantas**. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (ed.). Fertilidade do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 91-132.

DEMARTELAERE, A. C. F.; SOUSA, G. G.; VIANA, T. V. A.; AZEVEDO, B. M.; MESQUITA, E. F.; SILVA, G. L. O cultivo hidropônico de alface com água de reuso. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 11, p. 90206-90224, 2020.

DENRE, M.; KUMAR, V.; SINGH, D. Effect of humic acid on growth, yield and nutrient uptake of okra (*Abelmoschus esculentus* L.). **Journal of Plant Nutrition**, v. 37, n. 4, p. 640-654, 2014.

DIAMANTE, M. S.; SEABRA JÚNIOR, S.; INAGAKI, A. M.; SILVA, M. B.; DALLACORT, R. Produção e resistência ao pendoamento de alfaces tipo lisa cultivadas sob diferentes ambientes. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 1, p. 133-140, 2013.

DILLING, J.; KAISER, K. **Estimation of the hydrophobic fraction of dissolved organic matter in water samples using UV photometry**. Water Research, v. 36, n. 20, p. 5037-5044, 2002.

DU JARDIN, P. Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, v. 196, p. 3-14, 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Recuperação de áreas degradadas: pesquisas voltadas para a recuperação da funcionalidade ambiental por meio da seleção e introdução de leguminosas arbóreas e arbustivas capazes de crescer sob condições adversas.** Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agrobiologia>. Acesso em: março de 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.

EYHERAGUIBEL, B.; SILVESTRE, J.; MORARD, P. **Effects of humic substances derived from organic waste enhancement on the growth and mineral nutrition of maize.** *Bioresource Technology*, v. 99, n. 10, p. 4206-4212, 2008.

FATHY, H. M.; ALI, A. A.; ALI, E. M. Effect of humic acid and magnesium on yield and chemical constituents of lettuce grown under saline conditions. **World Journal of Agricultural Sciences**, v. 6, n. 3, p. 283-289, 2010.

FERRARA, G.; BRUNETTI, G. **Humic acid application improves yield and quality parameters of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.).** *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, v. 11, n. 4, p. 567-572, 2010.

FERREIRA, D. F. **Sisvar: a computer statistical analysis system.** *Ciência e Agrotecnologia, Lavras*, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças.** 2. ed. Viçosa, MG: UFV, 2003. 412 p.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças.** 3. ed. Viçosa, MG: UFV, 2008. 98 p.

FREITAS, G. A.; RIBEIRO, R. R.; BARROS, H. B.; VAZ-DE-MELO, A.; ABRAHÃO, W. A. P. Produção de mudas de alface em função de diferentes combinações de substratos. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 1, p. 159-166, 2013.

GASTALDINI, A. L. G.; HOPPEN, C.; MARCHIONATTI, J. F.; LUCENA, R. C.; VIEIRA, G. L. **The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition.** Construction and Building Materials, v. 94, p. 513-520, 2015.

GIL, S. C.; FURLANI JÚNIOR, E.; PEREIRA, E. C.; SILVA, A. C. **Uso do medidor portátil SPAD-502 para avaliação da intensidade de verde e teor de clorofila em folhas.** Horticultura Brasileira, Brasília, v. 26, n. 3, p. 252-258, 2008.

GLUHIĆ, D. **Humic substances and humic acid application in agriculture.** Glasnik Zaštite Bilja, v. 40, n. 3, p. 6-12, 2017.

GRANT, C. A.; BITTMAN, S.; MONTREAL, M.; TOMASIEWICZ, D. J. **Fertilizer recommendations for agronomic crops in western Canada: soil nutrient sufficiency levels and crop response.** Manitoba: Manitoba Agriculture and Food, 2001. (Agdex 530-6).

HAMADA, E.; TESTEZLAF, R. **Desenvolvimento e produtividade da alface submetida a diferentes lâminas de água através da irrigação por gotejamento.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 30, n. 9, p. 1201-1209, 1995.

HEMAD, M.; KIBRET, M. Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: current perspective. **Journal of King Saud University – Science**, v. 26, p. 1-20, 2014.

HERNANDEZ, O. L.; CALDERÍN, A.; HUELVA, R.; MARTÍNEZ-BALMORI, D.; GURIDI, F.; AGUIAR, N. O.; OLIVARES, F. L.; CANELLAS, L. P. **Humic substances from vermicompost enhance urban lettuce production.** Agronomy for Sustainable Development, v. 35, p. 225-232, 2015.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; BARTH, E.; SALES, A.; ANDREOLI, C. V.; PAULON, V. A. **Uso de lodo de estação de tratamento de água centrifugado em matriz de concreto de cimento Portland para reduzir o impacto ambiental.** Química Nova, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 79-84, 2006.

HUA, G.; RECKHOW, D. A. **Characterization of disinfection byproduct precursors based on hydrophobicity and molecular size.** Environmental Science & Technology, v. 41, n. 9, p. 3309-3315, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário 2017: resultados definitivos.** Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://censoagro2017.ibge.gov.br>. Acesso em: 14 mar. 2026.

INTERNATIONAL HUMIC SUBSTANCES SOCIETY (IHSS). **Isolation of IHSS soil fulvic and humic acids**. Disponível em: <https://humic-substances.org/isolation-of-ihss-soil-fulvic-and-humic-acids/>. Acesso em: ago. 2025.

INTERNATIONAL HUMIC SUBSTANCES SOCIETY (IHSS). **What are humic substances? 2007**. Disponível em: <https://humic-substances.org/what-are-humic-substances-2/>. Acesso em: ago. 2025.

JACOB, J.; LAWLOR, D. W. Stomatal and mesophyll limitations of photosynthesis in phosphate-deficient sunflower, maize and wheat leaves. **Journal of Experimental Botany**, v. 42, n. 8, p. 1003-1011, 1991.

KATAYAMA, V. T.; PORTO, M. F. A.; ANDREOLI, C. V.; SOUZA, M. P. **Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 20, n. 4, p. 559-569, 2015.

KATAYAMA, V. T. **Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica**. 2014. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

KONONOVA, M. M. **Matéria orgânica del suelo: su naturaleza, propiedades y métodos de investigación**. Barcelona: Oikos-Tau, 1982. 365 p.

LAL, R. **Soil erosion and the global carbon budget**. Environment International, v. 29, p. 437-450, 2003.

LENNON, J. T.; PFAFF, L. E. **Source and supply of terrestrial organic matter affects aquatic microbial metabolism**. Aquatic Microbial Ecology, v. 39, p. 107-119, 2005.

LIMA, P. C. F. **Áreas degradadas: métodos de recuperação no semiárido brasileiro**. In: XXVII Reunião Nordestina de Botânica, 2004, Petrolina. Anais [...]. Petrolina, 2004.

LIN, H.; WANG, Y.; DONG, Y. A review of methods, influencing factors and mechanisms for phosphorus recovery from sewage and sludge from municipal wastewater treatment plants. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 1, 111657, 2024.

LIPCZYNSKA-KOCHANY, E. **Humic substances, their microbial interactions and effects on biological transformations of organic pollutants in water and soil: a review**. Chemosphere, v. 202, p. 420-437, 2018.

LOPES, A. S. (org.). **Manual internacional de fertilidade do solo**. 2. ed. rev. e ampl. Piracicaba: POTAFOS, 1998. 177 p.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. v. 2. 3. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2009. 384 p.

LU, M.; ZHOU, C.; WANG, C.; JACKSON, R. B.; KEMPES, C. P. **Worldwide scaling of waste generation in urban systems**. *Nature Cities*, v. 1, p. 126-135, 2024.

MACHADO, V. F.; VILLANOVA, D. L. Lodo de estação de tratamento de água: destinação e reciclagem. **Revista Liberato**, v. 23, n. 40, p. 113-222, 2022.

MAGUIRE, J. D. **Speed of germination: aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor**. *Crop Science*, v. 2, p. 176–177, 1962.

MARTÍNEZ-GARZA, C.; BONGERS, F.; POORTER, L. **Are functional traits good predictors of species performance in restoration plantings in tropical abandoned pastures?** *Forest Ecology and Management*, v. 303, p. 35–45, 2013.

MATILAINEN, A.; VEPSÄLÄINEN, M.; SILLANPÄÄ, M. **Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: a review**. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 159, n. 2, p. 189–197, 2010.

MELO, A. L.; LIMA, A. L. A.; MENEZES, T. G. C.; CORDEIRO, R. S.; SANTOS, E. S.; FARIAS, S. G. G.; SILVA, S. V.; CALDAS, D. R. M.; MATOS, S. S.; MELO, R.; LIMA, L. R.; CORDEIRO, W. P. F. S.; GOMES, A. P. S.; RODAL, M. J. N. Flora vascular terrestre. In: SANTOS, E. M.; MELO JUNIOR, M. de; CAVALCANTI, J. S. S.; ALMEIDA, G. V. L. (org.). **Parque Estadual Mata da Pimenteira: riqueza natural e conservação da Caatinga**. Recife: EDUFRPE, 2013. p. 83-103.

MENDONÇA, A. G. R. **Turfa: interações com espécies metálicas e estudo de parâmetros que influenciam na utilização em setores agrícolas**. 2010. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2010.

MOHINUZZAMAN, M.; YUAN, J.; YANG, X.; SENESI, N.; LI, S.-L.; ELLAM, R. M.; MOSTOFA, K. M. G.; LIU, C.-Q. **Insights into solubility of soil humic substances and their fluorescence characterisation in three characteristic soils**. *Science of the Total Environment*, v. 720, p. 137395, 2020.

MORA, V.; BAIGORRI, R.; BACAICOA, E.; ZAMARREÑO, A. M.; GARCÍA-MINA, J. M. Action of humic acid on promotion of cucumber shoot growth involves nitrate-related changes associated with the root-to-shoot distribution of cytokinins, polyamines and mineral nutrients. **Journal of Plant Physiology**, v. 167, n. 8, p. 633–642, 2010.

MOREIRA, R. C. A.; GUIMARÃES, E. M.; BOAVENTURA, G. R.; MOMES-SO, A. M.; LIMA, G. L. **Estudo geoquímico da disposição de lodo de estação de tratamento de água em área degradada**. Química Nova, v. 32, n. 8, p. 2085-2093, 2009.

MOSQUERA, Y. B.; TORRES-TORRES, J. J.; GONZÁLEZ FORERO, R.; BARRIOS MATURANA, F. **Efeitos de biocarvão na produtividade de milho**. Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 56, e83417, 2026.

MOTA, A. R.; JOSÉ, R.; SOUZA, P. B.; OLIVEIRA, L. M. **Efeito da substância húmica na germinação de sementes de Myracrodruon urundeuva**. Revista Verde, 2016.

MOTTA, A. C. V.; HOPPEN, C.; ANDREOLI, C. V.; TAMANINI, C. R.; FERNANDES, C. V. S.; PEGORINI, E. S.; SOCCOL, V. T. **Disposição final de lodos de estação de tratamento de água: parecer técnico**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná – UFPR, 2005. 43 p.

MUSCOLO, A.; SIDARI, M.; FRANCIOSO, O.; TUGNOLI, V.; NARDI, S. The auxin-like activity of humic substances is related to membrane interactions in carrot cell cultures. **Journal of Chemical Ecology**, v. 33, n. 1, p. 115–129, 2007.

MWH. **Water treatment: principles and design**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.

NARDI, S.; PIZZEGHELLO, D.; MUSCOLO, A.; VIANELLO, A. **Relationship between molecular characteristics of soil humic fractions and glycolytic pathway and Krebs cycle in maize seedlings**. Soil Biology and Biochemistry, v. 39, n. 12, p. 3138–3146, 2007.

NARDI, S.; SCHIAVON, M.; FRANCIOSO, O. **Chemical structure and biological activity of humic substances define their role as plant growth promoters**. Molecules, v. 26, n. 8, art. 2256, 2021.

NARDI, S.; PIZZEGHELLO, D.; MUSCOLO, A.; VIANELLO, A. **Physiological effects of humic substances on higher plants**. Soil Biology & Biochemistry, v. 34, p. 1527–1536, 2002.

NEVES, F. A.; SCOLARO, T. P.; OLIVEIRA, T. A.; SCHNEIDER, R.; SAVARIS, G.; RAMOS, J. G. V. S. Efeitos da substituição parcial do solo por lodo de estação de tratamento de água em tijolos de solo-cimento. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 17, n. 1, e11418, 2024.

NOFFS, P. S.; GALLI, L. F.; GONÇALVES, J. C. **Recuperação de áreas degradadas da Mata Atlântica**. 2. ed. São Paulo: CESP, 2002.

NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

NUSSBAUMER, A.; WALDNER, P.; ETZOLD, S.; GESSLER, A.; BENHAM, S.; THIMONIER, A.; WALTHERT, L.; RIGLING, A.; DOBBERTIN, M. **Patterns of natural regeneration after forest disturbance**. *Forest Ecology and Management*, v. 359, p. 272–283, 2016.

OLIVARES, F. L.; AGUIAR, N. O.; ROSA, R. C. C.; CANELLAS, L. P. **Substrate biofortification in combination with humic substances and plant growth-promoting bacteria improves tomato seedling growth**. *Scientia Horticulturae*, v. 192, p. 82–89, 2015.

OLIVEIRA, L. C. A. **Substâncias húmicas: estrutura, propriedades e aplicações ambientais**. *Química Nova*, São Paulo, v. 30, n. 2, p. 393–405, 2007.

OLIVEIRA, E. M. S.; HOLANDA, J. N. F. **Influência da adição de resíduo (lodo) de estação de tratamento de águas nas propriedades e microestrutura de cerâmica vermelha**. *Cerâmica*, v. 54, n. 330, p. 167-173, 2008.

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. **Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha**. *Cerâmica*, v. 50, n. 316, p. 324-330, 2004.

PANTANO, G. **Interações entre substâncias húmicas e pesticidas: implicações ambientais e na mobilidade de contaminantes**. 2012. 120 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2012.

PICCOLO, A. **The supramolecular structure of humic substances: a novel understanding of humus chemistry and implications in soil science**. *Advances in Agronomy*, v. 75, p. 57–134, 2002.

PICCOLO, A.; DROSOS, M. **The supramolecular structure of the soil humeome and the significance of humification.** *Advances in Agronomy*, v. 188, p. 405–455. July 2024.

PRIMO, L. P.; GARCIA, A. C.; SILVA, L. S.; REZENDE, C. E. **Espectroscopia no infravermelho aplicada à caracterização de materiais orgânicos e inorgânicos.** *Química Nova*, São Paulo, v. 34, n. 3, p. 473–480, 2011.

RAMIREZ, K. G. **Viabilidade do aproveitamento de resíduo de estação de tratamento de água (ETA) na confecção de concretos.** 2015. 132 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2015.

RANI, M.; KUMARI, I.; SALARIA, N. **Impact of different biofertilizers on growth and yield of chilli crop in northern plains of Jammu, India.** *Discover Sustainability*, v. 6, p. 1075, 2025.

RAUTHAN, H. S.; SCHNITZER, M. **Effect of humic substances on growth and yield of plants.** *Soil Biology and Biochemistry*, v. 13, n. 2, p. 219–223, 1981.

ROCHA, J. C.; ROSA, A. H. **Substâncias húmicas aquáticas: interações com espécies metálicas.** São Paulo: Editora UNESP, 2003.

ROCHA, J. C.; ROSA, A. H.; CARDOSO, A. A. **Introdução à química ambiental.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

RODDA, M. R. C.; CANELLAS, L. P.; FAÇANHA, A. R.; ZANDONADI, D. B.; GUERRA, J. G. M.; ALMEIDA, D. L.; SANTOS, G. A. Improvement of lettuce seedling root growth by humic acids from cattle manure vermicompost. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 657–664, 2006.

RODDA, M. R. C. **Efeito de substâncias húmicas extraídas de vermicomposto no crescimento e desenvolvimento de plantas.** 2003. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Campos dos Goytacazes, 2003.

RODRÍGUEZ-ZÚÑIGA, U. F.; MILORI, D. M. B. P.; MARTIN-NETO, L.; COLNAGO, L. A. Characterization of organic matter in aquatic systems using spectroscopic techniques. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, Campinas, v. 19, n. 7, p. 1307–1313, 2008.

ROSA, A. H.; ROCHA, J. C.; MARTIN-NETO, L.; MILORI, D. M. B. P. **Substâncias húmicas em solos e sedimentos: caracterização e importância ambiental**. In: ROCHA, J. C.; ROSA, A. H.; CARDOSO, A. A. (org.). *Introdução à química ambiental*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. p. 171–200.

ROSADI, Maulana Yusup; ANGGREINI, Sri; YAMADA, Toshiro; HUDORI; DENG, Zhiyi; LI, Fusheng. **Characteristics of organic matter released from drinking water treatment sludge under different storage conditions: Evaluation based on activated carbon adsorbability**. *Chemosphere*, v. 339, p. 139679, 2023.

ROSE, M. T.; PATTI, A. F.; LITTLE, K. R.; BROWN, A. L.; JACKSON, W. R.; CAVAGNARO, T. R. **A meta-analysis and review of plant-growth response to humic substances: practical implications for agriculture**. *Advances in Agronomy*, v. 124, p. 37–89, 2014.

RUSSO, J. C. **Recuperação de áreas degradadas: conceitos, métodos e experiências**. Curitiba: Editora UFPR, 2012.

RUWER, P. H. **Efeito de substâncias húmicas na produtividade da soja**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Cruz Alta, Cruz Alta, 2019.

SAAB, S. C.; MARTIN-NETO, L. **Anéis aromáticos condensados e relação E4/E6: estudo de ácidos húmicos de gleissolo por RMN de ^{13}C no estado sólido utilizando a técnica CP/MAS com desacoplamento defasado**. *Química Nova*, v. 30, n. 2, p. 260-263, 2007.

SALA, F. M. S.; COSTA, A. V. **Caracterização da produção e importância da alface (*Lactuca sativa* L.) no cenário agrícola mundial e brasileiro**. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, Ponta Grossa: UEPG, 2012.

SANCHES, S. M.; CAMPOS, S. X.; VIEIRA, E. M. **Caracterização das frações das substâncias húmicas de diferentes tamanhos moleculares**. *Eclética Química*, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 49-56, 2007.

SANTOS, C. H. **Estudo da matéria orgânica e composição elementar de solos arenosos de regiões próximas a São Gabriel da Cachoeira no Amazonas**. 2014. 173 f. Tese (Doutorado em Ciências – Química Analítica e Inorgânica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

SANTOS, J. S. **Avaliação da produtividade da alface irrigada sob cultivo protegido em resposta à aplicação de lodo de estação de tratamento de água**. 2021. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente) – Universidade Federal de Alagoas, Arapiraca, 2021.

SANTOS, L. A. R.; MICHELAN, D. C. G.; JESUS, T. M. Verification of the production of WTP sludge as a function of the quantity and quality of raw water. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 15, n. 2, p. 235-258, 2021.

SCHNITZER, M.; KHAN, S. U. **Humic substances in the environment**. New York: Marcel Dekker, 1972.

SCHULTEN, H. R.; SCHNITZER, M. **Three-dimensional models for humic acids and soil organic matter**. *Naturwissenschaften*, v. 82, n. 11, p. 487-498, 1995.

SEDDON, P. J.; GRIFFITHS, C. J.; SOORAE, P. S.; ARMSTRONG, D. P. **Reversing defaunation: restoring species in a changing world**. *Science*, v. 345, n. 6195, p. 406-412, 2014.

SELIM, S.; MOSA, A. Humic acid and nano-humic acid may improve growth and yield of cucumber. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 6, n. 13, p. 185–193, 2012.

SEVERINO, L. S.; CARDOSO, G. D.; VALE, L. S. do; SANTOS, J. W. dos. **Método para determinação da área foliar da mamoneira**. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, Campina Grande, PB: Embrapa Algodão*, n. 55, p. 1-20, 2005.

SILVA, A. C.; CANELLAS, L. P.; OLIVARES, F. L.; DOBBS, L. B.; AGUIAR, N. O.; FRADE, D. Â. R.; REZENDE, C. E.; PERES, L. E. P. Promoção do crescimento radicular de plântulas de tomateiro por substâncias húmicas isoladas de turfeiras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1609-1617, 2011.

SIMPSON, M. J.; KINGERY, W. L.; HAYES, M. H. B.; SPRAUL, M.; HUMPFER, E.; DVORTSAK, P.; KERSSEBAUM, R.; GODEJOHANN, M.; HOFMANN, M.; AHMED, M. **Molecular structures and associations of humic substances in the terrestrial environment**. *Naturwissenschaften*, v. 89, n. 2, p. 84–88, 2002.

SLOBODA, A.; RUSSO, R. O.; CAMPOS, S. X.; MARTIN-NETO, L.; MILORI, D. M. B. **Espectroscopia aplicada ao estudo de substâncias húmicas de solos brasileiros**. *Química Nova*, São Paulo, v. 32, n. 6, p. 1580–1586, 2009.

SOBRINHO, J. G. S.; SANTOS, J. C. F.; SILVA, J. A.; LIMA, V. L. A. *Chloroleucon dumosum* (Benth.) G.P. Lewis: espécie nativa do semiárido com potencial para recuperação de áreas degradadas. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 11, n. 4, p. 71–76, 2016.

SOUZA, H. M.; IZIDRO SOBRINHO, J. **Reflorestamento com espécies leguminosas nativas: potencial de melhoria das propriedades físicas do solo e proteção contra processos erosivos no semiárido brasileiro.** Ciências Rurais em Foco, v. 3, n. 2, 2016.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions.** 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1994.

STUMM, W.; MORGAN, J. J. **Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters.** 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

SUTTON, R.; SPOSITO, G. **Molecular structure in soil humic substances: the new view.** Environmental Science & Technology, v. 39, n. 23, p. 9009–9015, 2005.

ŚWIETLIK, J.; SIKORSKA, E.; ZDANOWSKI, B. **Characterization of natural organic matter fractions separated by ultrafiltration.** Water Research, Oxford, v. 38, n. 18, p. 3791–3799, 2004.

SWIFT, R. S. **Organic matter characterization.** In: SPARKS, D. L. (ed.). Methods of soil analysis: Part 3 – Chemical methods. Madison: Soil Science Society of America; American Society of Agronomy, 1996. p. 1011–1069.

SWIFT, R. S. **Macromolecular properties of soil humic substances: fact, fiction, and opinion.** Soil Science, v. 164, n. 11, p. 790–802, 1999.

TADINI, A. M.; PEDROSA, C. L. F.; XAVIER, A. A. P.; BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; MARTIN-NETO, L. **Espec-troscopia aplicada ao estudo da matéria orgânica do solo.** São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2014.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal.** 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.

TAIZ, Lincoln; ZEIGER, Eduardo. **Fisiologia vegetal.** 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.

TANG, W.; SHAN, B.; ZHANG, H.; MAO, Z. Characterization of humic substances in natural waters and sediments using spectroscopic techniques. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, p. 1590–1601, 2014.

TEIXEIRA, S. T.; MELO, W. J.; SILVA, E. T. Aplicação de lodo de estação de tratamento de água em solo degradado: efeitos nas propriedades químicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 767–775, 2005.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa Solos, 2017.

TREVISAN, S.; FRANCIOSO, O.; QUAGGIOTTI, S.; NARDI, S. **Humic substances biological activity at the plant–soil interface: from environmental aspects to molecular factors**. *Plant Signaling & Behavior*, v. 5, n. 6, p. 635–643, 2010.

VALE, F. R.; COSTA, A. C. S.; MIRANDA, J. C. C. **Fertilidade do solo e nutrição de plantas em áreas degradadas**. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (ed.). *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2014. p. 1001–1046.

VÁLIO, I. F. M. **Crescimento e desenvolvimento das plantas**. In: KERBAUY, G. B. (org.). *Fisiologia vegetal*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2001. p. 1–19.

VAN RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (org.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), 2001. 285 p.

VERGNOUX, A.; DI ROLLO, R.; BARAN, N.; PROBST, A. **Spectroscopic characterization of humic substances in agricultural soils and effects of long-term organic amendments**. *Soil & Tillage Research*, v. 111, n. 1, p. 53–59, 2011.

VERRONE, V.; GUPTA, A.; LALOO, A. E.; DUBEY, R. K.; HAMID, N. A. A.; SWARUP, S. **Organic matter stability and lability in terrestrial and aquatic ecosystems: a chemical and microbial perspective**. *Science of the Total Environment*, v. 906, p. 167757, 2024.

WERSHAW, R. L.; AIKEN, G. R. **Molecular aggregation of humic substances**. *Environmental Science & Technology*, Washington, v. 19, n. 8, p. 707–710, 1985.

WERSHAW, R. L. **Model for humus in soils and sediments**. *Environmental Science & Technology*, Washington, v. 27, n. 5, p. 814–816, 1993.

WETZEL, R. G. **Limnology: lake and river ecosystems**. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2001.

YANG, T.; HUANG, H.; LAI, F. **Pollution hazards of heavy metals in sewage sludge from four wastewater treatment plants in Nanchang, China.** Transactions of Nonferrous Metals Society of China, v. 27, n. 10, p. 2249-2259, 2017.

ZANDONADI, D. B; SANTOS, M. P; MEDICI LO; SILVA J. **Ação da matéria orgânica e suas frações sobre a fisiologia de hortaliças.** Horticultura Brasileira, [s.l], v.32, n.1, p.14-20, 2014.

SOBRE OS AUTORES

Wander Gustavo Botero

Possui Doutorado e Mestrado em Química e é Licenciado em Química pela Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” (UNESP). Atuou em Pós-doutorado na Universidade do Algarve, Portugal e atualmente é professor da Universidade Federal de Alagoas. Tem experiência na área de química ambiental, matéria orgânica natural e substâncias húmicas.

Luciana Camargo de Oliveira

Possui Doutorado e Mestrado em Química e é Bacharel em Química pela Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” (UNESP). Atuou em Pós-doutorado na UNESP, e atualmente é professora da Universidade Federal de São Carlos – Campus Sorocaba. Tem experiência na área de química ambiental, matéria orgânica natural e substâncias húmicas e atualmente é coordenadora do Laboratório de Pesquisas em Metais e Matéria orgânica Natural.

ÍNDICE REMISSIVO

A

- ácido fúlvico 63, 64, 77
- ácidos fúlvicos 29, 55, 68
- ácidos húmicos 29, 33, 35, 53, 59, 61, 68, 73, 77, 79, 88
- aclimatação 41
- adubação mineral 49, 52
- adubação orgânica 26
- agrícola 13, 20, 25, 26, 33, 41, 45, 47, 66, 75, 88
- água bruta 13, 14, 15, 16, 35
- água potável 13, 15, 17
- águas naturais 13, 32
- água tratada 19
- ambientais 11, 12, 16, 17, 18, 19, 25, 26, 30, 32, 33, 35, 41, 46, 66, 74, 86
- análise elementar 36
- áreas urbanas 15
- aterros sanitários 25
- avanço tecnológico 15

B

- bioestimulantes 32, 41, 43, 68
- biogeoquímicos 28
- biomassa 42, 47, 63

C

- coagulação 12, 13, 14, 15, 28, 35

composição química 12, 16, 30, 44

consumo 12, 13, 15, 26, 49, 51, 78

D

danos ambientais 12, 19

desenvolvimento 7, 8, 12, 22, 23, 32, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 58, 65, 68, 73, 74, 87, 91

E

economia circular 11, 12

espectrofotômetro 22, 37, 39

espectroscópicos 35, 38, 40

estratégias 12

estruturas aromáticas 37, 38

estruturas porfíricas 36, 38

F

fisiológicas 41, 43, 45

G

gestão 12, 17, 19, 79

H

hidrofóbicos 28

húmicas 12, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 48, 52, 63, 65, 68, 69, 70, 72, 73, 74, 76, 77, 78, 86, 87, 88, 89, 93

I

insumo 12, 25, 26

L

legislação 12, 17

leitura 11, 22

lodo 8, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 34, 35, 37, 38, 40, 41, 45, 48, 51, 52, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 78, 79, 80, 82, 83, 85, 86, 88, 90

M

macromoleculares 31

materiais húmicos 42, 43

material orgânico 38

matéria orgânica 12, 15, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 34, 35, 39, 78, 88, 90, 92, 93

matéria-prima 19

meio ambiente 17, 19, 32, 66

meio aquático 28

metabólicas 23, 43

microbianos 27, 29

microbiológicos 13

microrganismos 13, 14, 15, 27, 46

molecular 29, 31, 34, 36, 37, 38, 82, 85, 91

moléculas 23, 27, 30, 31, 38, 63

O

orgânicas 23, 29, 30, 38

P

plantas terrestres 28, 38

processo 11, 12, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 27, 29, 33, 34, 36, 47, 56, 58, 66, 68, 73, 77

processos 12, 14, 15, 20, 26, 28, 30, 32, 35, 66, 67, 90

Q

qualidade de vida 15

R

regressão 48, 53, 54, 55, 58, 60, 61, 62, 63, 70, 71

resíduos 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 22, 26, 27, 29, 45, 75, 79

resíduo sólido 15, 16, 17, 18

ressonância 36

S

saneamento básico 11, 12, 19

saúde 6, 13, 15, 17, 18

serviços 6

solo 12, 16, 20, 22, 25, 26, 29, 30, 32, 33, 35, 41, 45, 48, 49, 50, 51, 52, 56, 64, 66, 67, 68, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 84, 86, 90, 91

substâncias húmicas 12, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 48, 52, 63, 65, 68, 69, 70, 72, 73, 74, 76, 78, 86, 87, 88, 89, 93

supramolecular 30, 31, 86, 87

sustentáveis 11, 12, 66

sustentável 11, 12, 26, 41

T

tecnologias agrícolas 43

transplante 49, 51

tratamiento 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 34, 63, 69, 70, 71, 72, 73, 75, 77, 78, 79, 80, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 90

tratamientos previos 26



AYA EDITORA
2026