



Universidade Federal de São Carlos
Centro de Ciências Agrárias
Curso de Engenharia Agrônoma



ANA CAROLINA DA CRUZ ALVES

**COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO BIOTRANSFORMADO COMO FONTE DE
NUTRIENTES NO CULTIVO DE *Philodendron* “Pink Princess”**

ARARAS – SP
2025



Universidade Federal de São Carlos
Centro de Ciências Agrárias
Curso de Engenharia Agrônoma



ANA CAROLINA DA CRUZ ALVES

**COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO BIOTRANSFORMADO COMO FONTE DE NUTRI-
ENTES NO CULTIVO DE *Philodendron* “Pink Princess”**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Agrônoma – CCA/ UFSCar para obtenção do título de Engenheira Agrônoma.

Orientador: Prof. Dr. Jean Carlos Cardoso

Coorientadora: Prof. Dr.^a Dânia Elisa Christofolletti Mazzeo Morales

ARARAS - SP
2025

Alves, Ana Carolina da Cruz

COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO
BIOTRANSFORMADO COMO FONTE DE NU-TRIENTES
NO CULTIVO DE Philodendron "Pink Princess" / Ana
Carolina da Cruz Alves -- 2025.
89f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,
campus Araras, Araras
Orientador (a): Jean Carlos Cardoso
Banca Examinadora: Dânia Elisa Christofolletti Mazzeo
Morales, Arien Van Vliet
Bibliografia

1. Nutrição mineral de plantas. 2. Lodo de esgoto
biotransformado. 3. Plantas ornamentais. I. Alves, Ana
Carolina da Cruz. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Helena Sachi do Amaral - CRB/8
7083

AGRADECIMENTOS

Ao Deus e Pai, Aquele que criou tudo e todos, e enviou Seu único Filho, Jesus Cristo, que se despojou de toda Sua glória e veio até o mundo para salvar aqueles que são Seus, agradeço pelo dom da vida, pela salvação que me foi concedida, e por me ensinar a descansar em Seu amor e cuidado durante toda a minha jornada.

Agradeço imensamente a minha família, à minha mãe Flávia Cilene Alves, por nunca permitir que eu desistisse, por ser minha fortaleza e meu abrigo nos dias difíceis, por comemorar comigo cada alegria e dividir cada dor; ao meu pai, Jaime Alves, por me instruir com sabedoria e me ensinar a ter um olhar paciente; à minha irmã, Mariana Alves, por compartilhar cada risada e lágrima, por me ajudar com seus infinitos conhecimentos em cálculo, e principalmente por ser minha outra metade, a pessoa que Deus me presenteou para que eu pudesse aprender a amar, a respeitar, a reconhecer meus erros e dividir cada conquista. Ao meu namorado, Gabriel Scanavachi, por me apoiar em meus sonhos e dividir outros ainda maiores, por me incentivar a acreditar em mim mesma e estar ao meu lado nos dias mais difíceis, sendo uma fonte constante de amor e motivação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jean Carlos Cardoso, por me receber de braços abertos em seu laboratório e grupo de pesquisa, por todos os aprendizados e vivências, pelo incentivo em meu crescimento e por acreditar em meu potencial. A todos os alunos e colaboradores do Laboratório de Fisiologia Vegetal e Cultura de Tecidos (LFVCT) e Grupo de Pesquisa em Fisiologia Aplicada à Agricultura (PhysAgri) que conheci desde 2022 e contribuíram com a minha formação, a técnica de laboratório Ana Lúcia, aos meus amigos e amigas Carla, Nicolly, Beatriz, Julia, Mariana, Giovani, Gabriel Zayas e em especial ao Antonio Mesaque Coimbra e a Ana Victoria Conde, que sempre me apoiaram e não mediram esforços para me ajudar.

À minha co-orientadora Prof. Dr.^a Dânia Elisa Christofolletti Mazzeo Morales, pelos ensinamentos e aprendizados, e principalmente por fornecer o insumo base (composto de lodo de esgoto biotransformado) para que este trabalho pudesse ser realizado. Agradeço ao LAMAM (Laboratório de Microbiologia Agrícola e Molecular) por fornecer a estrutura e os materiais para as análises, especialmente à Prof. Dr.^a Sandra Regina Ceccato Antonini e Prof. Dr.^a Márcia Maria Rosa Magri por toda a ajuda e orientação para que as análises pudessem ocorrer, à todos os estudantes e principalmente à mestre Liz Evelyn Grimaldi Gómez e doutora Isabella Carvalho Tanganini por terem dividido comigo os desafios de trabalhar com análises enzimáticas.

Aos amigos que fiz durante o período de graduação que me acompanharam desde o período o início das nossas aulas à distância e perduraram até o final. E a todos aqueles que de alguma forma participaram da minha caminhada, se cheguei até aqui, é por todos vocês.

“Vinde a mim, todos os que estais cansados e oprimidos, e eu vos aliviarei. Tomai sobre vós o meu jugo, e aprendei de mim, que sou manso e humilde de coração, e encontrareis descanso para a vossa alma. Porque o meu jugo é suave, e meu fardo é leve”.

Mateus 11:28-30.

RESUMO

Em um cenário de crescente demanda por soluções sustentáveis, principalmente devido à alta dependência nacional de fertilizantes importados, a vulnerabilidade do Brasil frente a crises econômicas e geopolíticas e à utilização de recursos naturais finitos na produção desses insumos, fontes alternativas de reaproveitamento de nutrientes, como o lodo de esgoto, têm ganhado destaque. Após processos de detoxificação, como a biorremediação, o lodo de esgoto pode ser transformado em um composto biotransformado, viabilizando seu uso como fertilizante. Sob essa perspectiva, o presente estudo avaliou o desempenho do composto de lodo de esgoto biotransformado como fonte alternativa de nutrientes à fertilização mineral no cultivo de *Philodendron* "Pink Princess". O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com seis tratamentos e 12 repetições. Os tratamentos foram formulados a partir da dose máxima de 3,0 g L⁻¹ do fertilizante mineral de liberação lenta Basacote®. Para determinar o potencial do composto como fonte de nutrientes (P), os cálculos consideraram as porcentagens de P₂O₅ presentes em cada fonte (fertilizante mineral: 8% e composto de lodo: 5,9%, sendo o lodo presente em 20% do composto). Desta forma, foram avaliados os seguintes tratamentos: adubação com 100% do composto; 20% Basacote® e 80% composto; 40% Basacote® e 60% composto; 60% Basacote® e 40% composto; 80% Basacote® e 20% composto; e 100% Basacote® (controle). Os dados obtidos foram submetidos ao teste de Tukey a 5% de significância. De acordo com os resultados, o tratamento com 40% Basacote® e 60% composto resultou nas maiores médias para altura da planta (22,4 cm) e comprimento da maior folha (13,2 cm). Nos teores de clorofila a, b e total, os tratamentos com 100% e 80% composto apresentaram os menores valores, enquanto os tratamentos com 40% Basacote® e 60% de composto, bem como 100% Basacote®, mostraram os melhores resultados. Para análises de fenóis e proteínas totais, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos. As enzimas Glutathione S-transferase (GST) e Fenilalanina amônia-liase (PAL) tiveram maiores médias no tratamento com 100% composto, indicando maior atividade de enzimas antioxidantes. Esse cenário sugere que as plantas ativaram mecanismos antioxidantes para mitigar os efeitos de compostos reativos associados ao composto de lodo biotransformado. Além disso, a deficiência de nitrogênio, bem como a alta concentração de alumínio neste tratamento favoreceu a alta atividade enzimática. Em relação à condutância estomática, o tratamento com 100% composto apresentou redução significativa, prejudicando a abertura estomática e trocas gasosas. Paralelamente, a eficiência do fotossistema II foi afetada, reduzindo a capacidade fotossintética, possivelmente devido ao baixo teor de nitrogênio (N) nas plantas submetidas a este tratamento. No entanto, a substituição parcial, com substituição de até 60% da dose do fertilizante mineral pelo composto de lodo de esgoto biotransformado teve resultados promissores. Nesse sentido, conclui-se que embora a substituição total do fertilizante mineral pelo composto não seja viável, muito provavelmente, pelo menor teor de N no

composto, sua substituição parcial apresentou bons resultados para o cultivo de *Philodendron* “Pink Princess”, configurando-se como uma solução viável para a redução de resíduos urbanos, favorecendo a substituição de fontes minerais de fertilizantes e promovendo uma agricultura mais sustentável e autossuficiente.

Palavras-chave: fertilizante mineral; tratamento de efluentes urbanos; biorremediação; casca de arroz; *Pleurotus ostreatus*; *Philodendron* Pink Princess.

ABSTRACT

In a scenario of increasing demand for sustainable solutions, mainly due to Brazil's high dependence on imported fertilizers, its vulnerability to economic and geopolitical crises, and the use of finite natural resources in fertilizer production, alternative sources for nutrient recycling, such as sewage sludge, have gained prominence. After detoxification processes like bioremediation, sewage sludge can be transformed into a biotransformed compost, enabling its use as a fertilizer. Under this perspective, the present study evaluated the performance of biotransformed sewage sludge compost as an alternative nutrient source to mineral fertilization in the cultivation of *Philodendron 'Pink Princess'*. The experiment was conducted in a completely randomized design with six treatments and 12 replications. The treatments were formulated based on the maximum dose of 3.0 g L^{-1} of the slow-release mineral fertilizer Basacote®. To determine the potential of the compost as a nutrient source (P), calculations considered the P_2O_5 percentages in each source (mineral fertilizer: 8% and sludge compost: 5.9%, with sludge accounting for 20% of the compost). The evaluated treatments were: fertilization with 100% compost; 20% Basacote® and 80% compost; 40% Basacote® and 60% compost; 60% Basacote® and 40% compost; 80% Basacote® and 20% compost; and 100% Basacote® (control). Data were subjected to Tukey's test at a 5% significance level. According to the results, the treatment with 40% Basacote® and 60% compost resulted in the highest means for plant height (22.4 cm) and largest leaf length (13.2 cm). Regarding chlorophyll a, b, and total contents, treatments with 100% and 80% compost showed the lowest values, whereas treatments with 40% Basacote® and 60% compost, as well as 100% Basacote®, presented the best results. For phenol and total protein analyses, no significant differences were observed among treatments. The enzymes Glutathione S-transferase (GST) and Phenylalanine Ammonia-Lyase (PAL) had higher means in the 100% compost treatment, indicating increased antioxidant enzyme activity. This suggests that plants activated antioxidant mechanisms to mitigate the effects of reactive compounds associated with the biotransformed sludge compost. Additionally, nitrogen deficiency and the high aluminum concentration in this treatment contributed to the high enzymatic activity. Regarding stomatal conductance, the 100% compost treatment showed a significant reduction, impairing stomatal opening and gas exchange. Similarly, the efficiency of photosystem II was affected, reducing photosynthetic capacity, possibly due to the low nitrogen (N) content in plants subjected to this treatment. However, partial replacement, with up to 60% of the mineral fertilizer dose substituted by the biotransformed sewage sludge compost, showed promising results. In this sense, it is concluded that although total replacement of mineral fertilizer with the compost is not viable—most likely due to its lower N content—partial replacement presented positive results for *Philodendron 'Pink Princess'* cultivation. This approach emerges as a viable solution for reducing urban waste, promoting the replacement of mineral fertilizer sources, and fostering a more sustainable and self-sufficient

agriculture.

Keywords: mineral fertilizer; urban wastewater treatment; bioremediation; rice husk; *Pleurotus ostreatus*; *Philodendron* Pink Princess.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Curva padrão ácido gálico.	36
Figura 2 - Curva padrão de BradFord.	38
Figura 3 - Curva padrão ácido trans-cinâmico.....	39
Figura 4 - Plantas de Philodendron “Pink Princess” ao final do experimento (90 dias). Da esquerda para direita: 0% Basacote® e 100% composto; 20% Basacote® e 80% composto; 40% Basacote® e 60% com-posto; 60% Basacote® e 40% composto; 80% Basacote® e 20% composto; 100% Basacote® e 0% composto.	45
Figura 5 - Teor de clorofila a avaliado quinzenalmente em um período de 12 semanas (0 = dia da instalação do experimento) aferido com o auxílio do equipamento Clorofilômetro Falker.	46
Figura 6 - Teor de clorofila b avaliado quinzenalmente em um período de 12 semanas (0 = dia da instalação do experimento) aferido com o auxílio do equipamento Clorofilômetro Falker.	47
Figura 7 - Teor de clorofila a+b avaliado quinzenalmente em um período de 12 semanas (0 = dia da instalação do experimento) aferido com o auxílio do equipamento Clorofilômetro Falker.	47
Figura 8 - Extratos metanólicos obtidos após preparação para leitura de fenóis totais. Da esquerda para direita: 0% Basacote® e 100% composto; 20% Basacote® e 80% composto; 40% Basacote® e 60% com-posto; 60% Basacote® e 40% composto; 80% Basacote® e 20% composto; 100% Basacote® e 0% composto.	49
Figura 9 - Quantificação de Proteínas Totais pelo método de BradFord, adaptado por Colombini, Ceccato-Antonini e Rosa-Magri (2022), dos tratamentos com Basacote® e composto de lodo de esgoto bio-transformado. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey à 5% de significância (não significativo se > 0,05).	49
Figura 10 - Atividade da enzima Glutationa S-transferase (GST) pelo método de Hemingway (1998), conforme Brasil (2006), dos tratamentos com Basacote® e composto de lodo de esgoto biotransformado. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey à 5% de significância (não significativo se > 0,05).....	50
Figura 11 - Atividade da enzima Peroxidase (POD) pelo método de Lusso e Pascholati (1999), adaptado por Colombini, Ceccato-Antonini e Rosa-Magri (2022), dos tratamentos com Basacote® e composto de lodo de esgoto biotransformado. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey à 5% de significância (não significativo se > 0,05). Os dados foram submetidos a transformação (x+1), uma vez que as variâncias dos	

tratamentos não foram homogêneas através do Teste de Shapiro Wilk, que não atestou normalidade dos dados, e o coeficiente de variação (CV) mostrou-se elevado.....	50
Figura 12 - Atividade da enzima Polifenol-oxidase (PPO) pelo método de Duangmal e Apenten (1999), adaptado por Colombini, Ceccato-Antonini e Rosa-Magri (2022), dos tratamentos com Basacote® e composto de lodo de esgoto biotransformado. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey à 5% de significância (não significância se > 0,05).	51
Figura 13 - Atividade da enzima Fenilalanina amônia-liase (PAL) pelo método de Umesha (2006), adaptado por Colombini, Ceccato-Antonini e Rosa-Magri (2022), dos tratamentos com Basacote® e composto de lodo de esgoto biotransformado. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey à 5% significância (não significativo se > 0,05).	52
Figura 14 - Eficiência de fotossistema 2 (PhiPS2) às 10h.	54
Figura 15 - Eficiência de fotossistema 2 (PhiPS2) às 11h20.	54
Figura 16 - Condutância estomática (GSW) às 10h.	55
Figura 17 - Condutância estomática (GSW) às 11h20.	55
Figura 18 - Diferença entre temperatura da planta e ambiente (Delta T°C) às 10h.	55
Figura 19 - Diferença entre temperatura da planta e ambiente (Delta T°C) às 11h20.	56
Figura 20 - pH do substrato em solução dos diferentes tratamentos com Basacote ® e composto orgânico de lodo de esgoto tratado. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey à 5% de significância (não significativo se > 0,05).....	57
Figura 21 - Condutividade elétrica (CE) do substrato em solução dos diferentes tratamentos com Basacote ® e composto de lodo de esgoto biotransformado. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey à 5% de significância (não significância se > 0,05).	58
Figura 22 - Fosfato (em mg/L) do substrato em solução dos diferentes tratamentos com Basacote ® e composto de lodo de esgoto biotransformado. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey à 5% de significância (não significativo se > 0,05).	59
Figura 23 - Soluções dos substratos imersos em água submetidos a diferentes doses de fertilizante mineral e composto. Da esquerda para direita: 0% Basacote® e 100% composto; 20% Basacote® e 80% composto; 40% Basacote® e 60% composto; 60% Basacote® e 40% composto; 80% Basacote® e 20% composto; 100% Basacote® e 0% composto.	59
Figura 24 - Correlação entre acúmulo de biomassa e teor de clorofila total (a+b).	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Delineamento experimental com base na dosagem de Basacote®.	31
Tabela 2 - Cálculos para aplicação do fertilizante mineral de liberação lenta Basacote® e composto de lodo de esgoto biotransformado.....	32
Tabela 3 - Informação nutricional do fertilizante mineral de liberação lenta Basacote®.....	32
Tabela 4 - Composição nutricional do LE.	33
Tabela 5 - Metais pesados presentes no LE.....	33
Tabela 6 - Parâmetros avaliados no dia da instalação do experimento (dia 0).	42
Tabela 7 - Parâmetros avaliados ao 45º dia de experimento.....	43
Tabela 8 - Parâmetros avaliados no 90º dia de experimento.....	44
Tabela 9 - Massa fresca e seca da parte aérea e raiz, comprimento da maior raiz avaliadas no 90º dia de experimento	45
Tabela 10 - Fenóis totais (em ug equivalente ácido gálico (EAG)/g de amostra) dos tratamentos com diferentes doses de Basacote® e compostos de lodo de esgoto biotransformado.....	48
Tabela 11 - Parâmetros fisiológicos avaliados em plantas de Philodendron “Pink Princess” submetidas a diferentes doses de fertilizante mineral e composto de lodo de esgoto biotransformado.....	53
Tabela 12 - Análise foliar de macronutrientes ao final do experimento das plantas de Philodendron “Pink Princess” submetidas aos tratamentos com Basacote® e composto de lodo de esgoto biotransformado.....	61
Tabela 13 - Análise foliar de micronutrientes ao final do experimento das plantas de Philodendron “Pink Princess” submetidas aos tratamentos com Basacote® e composto de lodo de esgoto biotransformado.....	62
Tabela 14 - Análise foliar de metais pesados ao final do experimento das plantas de Philodendron “Pink Princess” submetidas aos tratamentos com Basacote® e composto de lodo de esgoto biotransformado.....	63
Tabela 15 - Faixa de teores de nutrientes considerados adequados para Antúrio.....	77
Tabela 16 - Valores máximos permitidos de substâncias químicas no bio sólido a ser destinado para uso, em solos.	79

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1. Panorama dos Fertilizantes no Brasil: Importância, Consumo e Dependência	19
2.2. Fósforo: Base da Sustentabilidade na Agricultura e na Fisiologia Vegetal	20
2.2.1 Fósforo, Ambiente e Agricultura	20
2.2.2 Fósforo e o Metabolismo das Plantas	21
2.3. Tratamento de Efluentes e Reaproveitamento Sustentável de Lodo de Esgoto	22
2.3.1. Tratamento de Efluentes no Brasil	22
2.3.2. Lodo de esgoto (LE) biotransformado	25
2.4. Mercado de plantas ornamentais no mundo e no Brasil	27
3. OBJETIVOS	29
3.2. Objetivo Geral	29
3.3. Objetivos específicos	29
4. MATERIAL E MÉTODOS	30
4.1. Material Vegetal	30
4.2. Delineamento Experimental dos Tratamentos.....	30
4.3. Composto de lodo de esgoto biotransformado	34
4.4. Avaliação do desenvolvimento vegetativo	34
4.5. Análises bioquímicas	34
4.5.1. Análise de Fenóis Totais	35
4.5.2. Análises Enzimáticas	36
4.6. Análise de condutância estomática (GSW), eficiência de fotossistema 2 (PhiPS2) e temperatura da folha (Delta T°C)	40
4.7. Condutividade elétrica (CE), pH e fosfato (mg/L) na solução do substrato	41
4.8. Análise Nutricional	41
4.9. Análise dos resultados	41
5. RESULTADOS	42
5.1. Desenvolvimento vegetativo a cada 45 dias.....	42

5.2. Teores de clorofila a, b e a+b avaliados quinzenalmente	46
5.3. Análise de Fenóis Totais	48
5.4. Análises Enzimáticas	49
5.5. Condutância estomática (GSW), eficiência de fotossistema 2 (PhiPS2) e diferença de temperatura entre folha e ambiente (Delta T°C).....	52
5.6. Condutividade elétrica (CE), pH e fosfato (mg/L) do substrato em solução	56
5.7. Macronutrientes, micronutrientes e metais pesados.....	60
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	63
6.1. Desenvolvimento vegetativo e teores de clorofila a, b e a+b	63
6.2. Análises Bioquímicas	66
6.3. Condutância estomática (GSW), eficiência do fotossistema 2 (PhiPH2) e diferença entre temperatura da folha e ambiente (Delta T°C).....	71
6.4. Condutividade elétrica, pH e fosfato.....	75
6.5. Macronutrientes, micronutrientes e metais pesados.....	76
6.6. Economia de fertilizantes pelo uso do composto de lodo de esgoto e impactos na redução de descartes ambientais	80
7. CONCLUSÕES.....	82
8. REFERÊNCIAS	83

1. INTRODUÇÃO

A agricultura desempenha um papel fundamental na economia e na segurança alimentar do Brasil, sendo responsável por 22% do PIB do país (CEPEA, 2025), consolidando-o como um dos principais produtores no cenário mundial. Esse desempenho está intrinsecamente ligado ao uso de fertilizantes, insumos essenciais para sustentar a produtividade agrícola e atender à crescente demanda (Martins, 2022). Contudo, a dependência de fertilizantes minerais tem gerado preocupações, especialmente devido aos elevados custos de importação (Chae *et al.*, 2018; Bettioli *et al.*, 2023), ao risco de exaustão das reservas minerais e da vulnerabilidade do setor.

A crise recente no abastecimento de fertilizantes, intensificada pelo conflito entre Rússia e Ucrânia, expôs fragilidades significativas na cadeia de suprimentos. Mais de 85% da demanda dos insumos utilizados no país é importada, sendo a Rússia a principal fornecedora, com 22% da importação nacional, o que elevou custos e gerou incertezas no setor (Martins *et al.*, 2023). Essa conjuntura reforça a importância de diversificar fontes e buscar soluções internas para reduzir a dependência de insumos importados diante das oscilações no mercado internacional e de eventos geopolíticos (Espinoza, 2023; Horta e Duarte, 2021).

Nesse contexto, o Brasil, responsável por 8% do consumo global de fertilizantes (Espinoza, 2023), importa aproximadamente 55% de sua demanda de fósforo (P), um macronutriente essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Tamarindo; Pires, 2025). O fósforo é um dos elementos mais relevantes para a fertilidade do solo e nutrição vegetal, desempenhando funções cruciais nos processos metabólicos das plantas, atuando diretamente no sistema bioquímico, como no metabolismo energético das plantas através da síntese de ATP (adenosina trifosfato), armazenando e fornecendo energia para o transporte de assimilados (Caione; Lange; Schoninger, 2012); é um elemento estrutural das células, representando um dos principais componentes dos lipídeos (fosfolipídeos) e de proteínas presentes nas membranas celulares (Souza *et al.*, 2013), por meio da constituição de nucleoproteínas necessárias à divisão celular; exerce o papel de intermediário da respiração e da fotossíntese (açúcares fosfato) (Taiz *et al.*, 2017); compõe os nucleotídeos do DNA e RNA e age diretamente sobre o desenvolvimento do sistema radicular (Martins *et al.*, 2013).

No entanto, apesar de sua importância, mais de 50% das reservas globais de fósforo podem ser esgotadas até 2100, devido à exploração intensiva de rochas fosfatadas, majoritariamente sedimentares (85%), o que torna ainda mais urgente o desenvolvimento de alternativas sustentáveis para a adubação (Horta e Duarte, 2021; Espinoza, 2023; Macedo, 2022). Por esse motivo, resíduos sólidos orgânicos, como os provenientes do tratamento de efluentes urbanos, têm se destacado como possíveis fontes de reaproveitamento de nutrientes, o que os tornam uma boa alternativa para áreas agrícolas, sendo classificados como resíduos regionais e de baixo custo (Lins; Lima, 2022; Scheer *et al.*, 2012). Contando com uma produção na ordem de centenas de milhões de toneladas por ano, o Lodo de Esgoto (LE), um subproduto das Estações de Tratamento de esgoto (ETEs), apresenta alta quantidade de matéria orgânica, macro e micronutrientes. Em 2021, o Brasil produziu cerca de 370 mil toneladas de LE em matéria seca, com tendência de aumento devido à modernização das ETEs (Riveros, 2024).

Em países como os Estados Unidos e o Canadá, o LE tem sido implementado na agricultura devido à sua riqueza em nutrientes. No Brasil, a regulamentação para o uso agrícola do lodo foi estabelecida inicialmente pela CETESB, em 1999, com a Norma Técnica P4.230, e posteriormente ampliada pela Resolução CONAMA nº 375, de 2006, que define os critérios e procedimentos para a sua aplicação em solos agrícolas. Essa prática tem ganhado espaço no país, especialmente em estados como Paraná, São Paulo, Rio Grande do Sul e Distrito Federal, embora ainda não seja amplamente disseminada em todo o território nacional (Lins; Lima, 2022).

Contudo, o uso do lodo de esgoto *in natura* apresenta desafios consideráveis, como a presença de metais pesados, contaminantes orgânicos e microrganismos patogênicos. Por esse motivo, a Resolução CONAMA nº 498/2020 estabelece limites rigorosos para esses elementos e recomenda que o lodo passe por processos que diminuam a atratividade de vetores. No entanto, existe a necessidade de submeter o lodo às condições de detoxificação, de modo a minimizar a carga tóxica e transformá-la em substâncias menos nocivas.

Técnicas pertencentes à biorremediação, como a bioestimulação, promove o aumento na aeração e descompactação do lodo por meio da adição de resíduos complementares, e a bioaugmentação, que otimiza a decomposição e melhoram a qualidade do composto final através da atividade de microrganismos específicos, como fungos lignolíticos (Riveros, 2024). Após passar por este processo, o lodo é conhecido

como composto de lodo de esgoto biotransformado (Riveros, 2024), sendo, portanto, uma alternativa sustentável e viável, representando uma solução promissora para mitigar os impactos ambientais, diversificar fontes de nutrientes e reduzir a dependência de fertilizantes minerais importados (Yamashita *et al.*, 2024).

Diante desse cenário, a aplicação do lodo biotransformado em culturas agrícolas não apenas contribui para práticas mais sustentáveis, mas também impacta diretamente os custos de produção. Esse efeito é especialmente relevante no setor de flores e plantas ornamentais, onde o uso de fertilizantes derivados do lodo biotransformado pode ser vantajoso. Por se tratar de produtos destinados à ornamentação e não ao consumo humano, a aceitação dos consumidores tende a ser mais positiva, ampliando as possibilidades de utilização desse insumo (Almeida, Fanhani, Oliveira, 2005; Alves, 2023).

A relevância desse setor no Brasil reforça o potencial de integração de práticas sustentáveis. Entre 2020 e 2021, o mercado de flores e plantas ornamentais no país apresentou um crescimento de 15%, conforme dados do IBRAFLOR (2023). Em 2022, o Brasil contava com cerca de 8,2 mil produtores dedicados a essa atividade, abrangendo o cultivo de aproximadamente 2,5 mil espécies e mais de 3 mil variedades, distribuídas por uma área total de 15 mil hectares (MAPA, 2022). Em 2023, o mercado registrou um aumento de 8% no consumo, movimentando cerca de R\$ 10 bilhões (Clara *et al.*, 2024).

Esse campo de produção tem se consolidado como uma importante atividade econômica no Brasil, demonstrando grande potencial para geração de emprego e renda. Enquanto outras culturas empregam cerca de 1 a 2 trabalhadores por hectare, o cultivo de flores e plantas ornamentais alcança uma média de 10 a 15 funcionários por hectare, gerando, no total, 120 mil empregos diretos e indiretos (Correa *et al.*, 2010). A produção de mudas de plantas ornamentais desempenha um papel fundamental na cadeia agrícola global, sendo essencial para a melhoria da qualidade ambiental em áreas urbanas, o estímulo à biodiversidade e o fortalecimento da economia de diversos países. No cenário internacional, o mercado de mudas de plantas ornamentais é altamente competitivo, com diversos países buscando se destacar tanto na exportação quanto na importação desses produtos (Maninho, 2023).

Sob essa perspectiva, o gênero *Philodendron* (Araceae), o segundo maior e mais diverso da família, se destaca com suas mais de 500 espécies, sendo essas

nativas de regiões tropicais e subtropicais das Américas e das Índias Ocidentais, possuem uma vasta gama de características morfológicas, como a diversidade no tamanho, formato e cor das folhas, além de uma variedade de hábitos de crescimento, desde trepadeiras até formas arbustivas. Tais características tornam as plantas de *Philodendron* extremamente populares no mercado de plantas ornamentais devido à sua folhagem atraente e resistência a ambientes internos (Ala-waadh *et al.*, 2020; Klanrit *et al.*, 2023).

Entre as variedades de *Philodendron*, aquelas de crescimento ereto se destacaram nas últimas quatro décadas, com a introdução de híbridos com folhagens vibrantes em tons de vermelho, amarelo ou laranja (Chen *et al.*, 2012). Um exemplo notável dessa tendência é o *Philodendron erubescens*, popularmente conhecido como *Philodendron* “Pink Princess”. Este híbrido é altamente valorizado no mercado por sua rara combinação de folhas cordiformes com tonalidades de verde-púrpura escuro e variações de rosa contrastante, tornando-se uma escolha atrativa tanto para cultivadores quanto para consumidores (Klanrit *et al.*, 2023).

Em vista do exposto, este estudo visa avaliar o potencial do composto de lodo de esgoto biotransformado como fonte de nutrientes, em especial o fósforo (P), em substituição do fertilizante mineral, no cultivo de plantas *Philodendron* “Pink Princess”.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Panorama dos Fertilizantes no Brasil: Importância, Consumo e Dependência

Os fertilizantes minerais, compostos principalmente por macronutrientes como nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), desempenham um papel de extrema importância na produtividade agrícola mundial, especialmente diante da crescente demanda por alimentos. No Brasil, a relevância desses insumos é ainda mais evidente devido a importância do agronegócio para a economia nacional. No entanto, a dependência de fertilizantes minerais apresenta desafios significativos para a sustentabilidade e segurança alimentar do país.

Atualmente, o Brasil é um dos maiores mercados consumidores de fertilizantes do mundo. Em 2018, ocupava a quarta posição no consumo de nitrogênio, a terceira no de fósforo e a segunda no de potássio, segundo a Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANANDA). Em conjunto com países como China, Índia e Estados Unidos, o Brasil consome cerca de 58% dos fertilizantes minerais comercializados anualmente no mundo (Alves, 2023). Apesar desse protagonismo, a produção nacional de fertilizantes é insuficiente para atender a demanda interna, o que intensifica a necessidade de importações e a consequente dependência do mercado externo (Costa; Silva, 2012).

Essa dependência é agravada pela vulnerabilidade do Brasil diante de crises econômicas e geopolíticas. A pandemia de Covid-19, por exemplo, impactou diversos setores, incluindo o de energia, essencial para a produção de fertilizantes, resultando em elevações de preços (Ogino; Gasques, 2023). Além disso, o conflito entre Rússia e Ucrânia, declarado em 2022, expôs ainda mais essas fragilidades diante da falta de disponibilidade desses insumos. Como a Rússia é um dos maiores fornecedores globais de fertilizantes, inclusive para o Brasil, o impacto foi significativo no custo de produção agrícola nacional, causando mudanças no planejamento produtivo, afetando diretamente a quantidade produzida (Ibendahl, 2022).

Não obstante, a produção de fertilizantes minerais depende de recursos naturais, especialmente as matérias-primas de fertilizantes fosfatados e potássicos, que apresentam disponibilidade limitada. Em 2020, 71% das reservas de rocha fosfática

estavam localizadas no Marrocos e no Saara Ocidental, enquanto as reservas de rochas potássicas se concentravam principalmente no Canadá, Belarus, Rússia e China (Brasil, 2021). Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de estratégias para reduzir a dependência externa (Oliveira; Coutinho, 2023). Em resposta a esses desafios, foi criado o Programa Nacional de Fertilizantes (PNF), que visa diminuir gradualmente a dependência externa e estimular a produção interna de insumos agrícolas até 2050. O programa também promove a sustentabilidade ambiental e social, incentivando a adoção de novas tecnologias e insumos, além de fomentar a produção nacional para atender às demandas futuras do agronegócio brasileiro (Ogino; Gasques, 2023).

O planejamento do PNF, que abrange o período de 2022 a 2050, busca reduzir a importação de fertilizantes de 85% para 45%, mesmo com o aumento da demanda. Em 11 de março de 2022, foi publicado o Decreto 10.991/2022, que oficializou o PNF e definiu objetivos como a redução das importações de fertilizantes, a adequação das empresas nacionais a critérios de sustentabilidade ambiental e social, o estímulo ao desenvolvimento de produtos e processos tecnológicos mais eficientes e a ampliação da oferta de novos insumos para a nutrição de plantas (Martins *et al.*, 2023).

Nesse contexto, a busca por fontes alternativas e sustentáveis de nutrientes é essencial para alcançar maior autossuficiência e fortalecer a competitividade do agronegócio brasileiro. Essa abordagem também visa reduzir os impactos ambientais, econômicos e sociais associados ao uso intensivo de fontes minerais solúveis (Alovisi *et al.*, 2020).

2.2. Fósforo: Base da Sustentabilidade na Agricultura e na Fisiologia Vegetal

2.2.1 Fósforo, Ambiente e Agricultura.

O fósforo (P) é um elemento essencial para a produção agrícola, desempenhando um papel central no aumento da produtividade de culturas ao redor do mundo (Rodrigues *et al.*, 2023). Estima-se que até 2035 a demanda por fósforo superará sua disponibilidade, tornando fundamental o uso mais eficiente do elemento, bem como a adoção de estratégias de recuperação e reaproveitamento de P. Até 2050, prevê-se um aumento de 70% a 100% na demanda de fósforo por países emergentes, em função de suas economias fortemente dependentes do setor agrícola e da exportação de

commodities como soja e arroz (Sasabuchi *et al.*, 2023).

No Brasil, quarto maior consumidor de fertilizantes do mundo, cerca de 60% dos adubos fosfatados utilizados na agricultura são importados. No entanto, as reservas de rocha fosfática são recursos finitos, podendo ser exauridas nos próximos 100 anos, além disso, a perda da qualidade tem resultado em maior custo com o beneficiamento, e por consequência há a diminuição da viabilidade da exploração (Espinoza, 2023), tornando o país vulnerável a flutuações no mercado internacional.

Os impactos ambientais também são motivo de preocupação, pois a utilização inadequada de fertilizantes fosfatados pode levar ao acúmulo de nutrientes nos solos e águas, contribuindo para a poluição ambiental e afetando a saúde humana e animal. Diante disso, é essencial que o Brasil desenvolva estratégias alternativas para reduzir sua dependência de fertilizantes minerais, promovendo uma agricultura mais sustentável e rentável (Bononi *et al.*, 2020).

2.2.2 Fósforo e o Metabolismo das Plantas

O fósforo é um nutriente de grande importância em diversos processos fisiológicos e bioquímicos das plantas. Ele está associado à fotossíntese, respiração, armazenamento e transferência de energia, além de ser componente essencial de ácidos nucleicos, fosfolipídios e coenzimas (Lambers, 2022). A hidrólise do trifosfato de adenosina (ATP) para produzir ADP e fosfato inorgânico (Pi) é uma das principais fontes de energia bioquímica, necessária para o crescimento e reprodução vegetal (Wang; Chen; Wu, 2020; Bang *et al.*, 2020).

As plantas absorvem fósforo predominantemente nas formas de ortofosfato (H_2PO_4^- e HPO_4^{2-}), dependendo do pH do solo. Uma ampla gama de enzimas catalisa reações envolvendo fosfatos, como processos de fosforilação e desfosforilação que regulam a atividade de proteínas, estabilizando-as, facilitando interações ou promovendo sua degradação (Anand; Kumari; Mallick, 2016; Bang *et al.*, 2020). Essas frações desempenham papéis importantes na fisiologia vegetal e são essenciais para a manutenção de processos metabólicos para o desenvolvimento das plantas

Durante a fotossíntese, o fósforo é essencial tanto nas reações de luz quanto nas reações escuras do ciclo de Calvin-Benson, nas quais ATP e NADPH são usados para converter CO_2 em carboidratos no estroma do cloroplasto. Deficiências de P re-

sultam em redução da produção de ATP e na diminuição da assimilação de CO₂, impactando negativamente o crescimento e a produção de biomassa (Bang *et al.*, 2020). A arquitetura das raízes também é influenciada pelo fósforo, que promove o alongamento e a proliferação radicular (Anand; Kumari; Mallick, 2016).

Apesar de ser necessário em menores quantidades do que outros macronutrientes, o fósforo é considerado o segundo macronutriente mais relevante para a saúde das plantas, atrás apenas do nitrogênio. Sua presença em tecidos de crescimento rápido, como meristemas, destaca sua função essencial na captura e transferência de energia química durante a fotossíntese. Ademais, ele é um constituinte vital do DNA, RNA e da membrana plasmática, que é composta majoritariamente por fosfolípidios e proteínas (Lambers, 2022).

Desse modo, a relevância do fósforo para o crescimento das plantas é inegável, impactando diretamente o desempenho agrícola. Portanto, estratégias alternativas são necessárias para que os sistemas agrícolas brasileiros sejam sustentáveis em P no futuro (Pavinato *et al.*, 2020). Sua gestão eficiente e o uso sustentável são indispensáveis para atender às demandas crescentes de produção de alimentos, garantindo a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, além de abrir caminho para abordagens inovadoras.

2.3. Tratamento de Efluentes e Reaproveitamento Sustentável de Lodo de Esgoto

2.3.1. Tratamento de Efluentes no Brasil

O tratamento de esgoto desempenha um papel essencial na preservação ambiental, saúde pública e na conservação dos recursos hídricos, especialmente em um cenário de crescente urbanização e desafios relacionados à gestão de resíduos. Em estações de tratamento de esgoto (ETEs), as águas residuais passam por diferentes etapas de tratamento, que podem ser classificadas como primária, secundária ou terciária, dependendo do nível de remoção dos poluentes (Sommaggio, 2021; Canjani, 2021). O processo se inicia no pré-tratamento, responsável por remover materiais grosseiros, areia e gordura presentes nos efluentes, no entanto, a matéria orgânica permanece em suspensão, sendo direcionada para etapas mais avançadas.

O tratamento primário utiliza processos físicos e físico-químicos, como correção do pH, decantação e flotação, onde partículas sólidas em suspensão, sedimentáveis e flutuantes são removidas, formando o chamado lodo primário. Já o tratamento secundário tem como objetivo remover a matéria orgânica dissolvida ou em suspensão através de processos biológicos, que utilizam microrganismos aeróbios ou anaeróbios para metabolizar a matéria orgânica, resultando no lodo secundário ou lodo biológico. Estudos recentes demonstram que, mesmo após o tratamento secundário, micropoluentes, compostos tóxicos e recalcitrantes podem permanecer nos efluentes (Sommaggio, 2021). Diante da limitação das etapas anteriores, o tratamento terciário é aplicado em situações específicas, especialmente quando os efluentes tratados serão lançados em corpos hídricos sensíveis ou reutilizados em atividades que demandam alta qualidade da água.

Neste processo de tratamento, podem ser utilizados sistemas como microfiltração, precipitação e coagulação, adsorção por carvão ativado, troca iônica, osmose reversa, eletrodialise, cloração e ozonização (Canjanini, 2021). Após o tratamento, o produto final pode ser direcionado ao corpo de água receptor e, como subprodutos resultantes da atividade microbiana, tem-se o lodo de esgoto bruto mais gases, que deve ainda perder água, ser compactado e estabilizado (Mazzeo, 2013), para que alternativamente, ao ser submetido a tratamentos de atenuação de toxicidade, possa ser utilizado para outros fins, como fertilizantes (Canjanini, 2021).

Apesar dos avanços nas tecnologias de tratamento de esgoto, o Brasil ainda enfrenta desafios relacionados à universalização do saneamento básico. Dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) revelam que, em 2022, apenas 52,2% da população brasileira tinha acesso ao tratamento de esgoto. Além disso, apenas 50,8% das águas residuais geradas recebem o tratamento adequado (Riveros, 2024). No Estado de São Paulo, considerado o estado com maior percentual de esgoto tratado do país, a porcentagem de tratamento não chega a 70%.

Diante desse cenário, o Senado Brasileiro aprovou recentemente o novo marco legal do Saneamento Básico (PL 4.162/2019), que estabelece que, até 2033, 90% da população deve ter acesso à coleta e tratamento de esgoto. Essa meta, além de promover a melhoria da qualidade de vida, aumentará o potencial de geração de LE, tornando imprescindível o descarte final sustentável (Prates, 2024).

Em média, cada estação de tratamento de esgoto produz lodo equivalente a cerca de 2 a 4% do volume total tratado, demonstrando a necessidade de soluções

eficazes e sustentáveis para o reaproveitamento desse subproduto (Mazzeo, 2013; Albarelo e Araujo, 2024). Um aspecto crucial do processo de tratamento de esgoto é a gestão do lodo gerado ao longo das etapas. O lodo, resíduo sólido ou semissólido, é frequentemente encaminhado para aterros sanitários, contudo, alternativas mais sustentáveis têm sido amplamente estudadas. Processos como compostagem ou sua aplicação como fertilizante agrícola após tratamentos que reduzam sua toxicidade são de extrema importância, considerando que é estimado que a produção anual de lodo seco gire em torno de 0,5 milhão de toneladas por ano (Mazzeo *et al.*, 2020). Souza *et al.* (2024) enfatizam que a transformação do lodo em um insumo agrícola representa uma solução economicamente viável e ambientalmente responsável, especialmente em países como o Brasil, onde há grande demanda por fertilizantes.

Em função da origem, do tipo e da eficiência do processo utilizado, o LE pode apresentar uma composição muito variada. Um LE típico contém 40% de matéria orgânica, 4% de nitrogênio, 2% de fósforo e 0,4% de potássio, além de alguns micronutrientes como ferro, cobre, zinco e manganês (Mazzeo, 2013). Este material possui uma característica distinta devido à sua abundância de nutrientes, particularmente nitrogênio e fósforo, que em certos casos podem substituir parcialmente os fertilizantes minerais (Prates, 2024).

As propriedades do LE podem ser aproveitadas de forma benéfica na agricultura. Do ponto de vista físico, o LE tem a capacidade de melhorar a estrutura do solo, promovendo a agregação das partículas, o que reduz a densidade do solo e aumenta a aeração e a retenção de água (Mazzeo, 2013; Souza *et al.*, 2024). Essas características são fundamentais para a recuperação de solos degradados e para o incremento da produtividade agrícola. Em termos químicos, a aplicação do LE ao solo contribui para o aumento dos teores de fósforo, carbono orgânico e da fração húmica da matéria orgânica. Além disso, o LE pode elevar o pH do solo, reduzindo a acidez potencial e melhorando a condutividade elétrica e a capacidade de troca catiônica (Mazzeo *et al.*, 2020; Riveros, 2024; Albarelo e Araujo, 2024).

No entanto, é importante considerar os desafios associados ao uso do LE na agricultura. Esse resíduo pode conter metais pesados, como zinco, cobre, níquel, chumbo, cádmio e mercúrio, além de microrganismos patogênicos e compostos orgânicos tóxicos, como fenóis e benzenos (Mazzeo, 2013; Souza *et al.*, 2024). A introdução desses elementos no solo pode causar impactos negativos à biota, à saúde hu-

mana e ao ambiente e, por esse motivo, o uso agrícola do LE requer rigorosos controles de qualidade, processos que diminuam a carga tóxica e cumpram regulamentações específicas para minimizar riscos (Prates, 2024).

2.3.2. Lodo de esgoto (LE) biotransformado

De acordo com o exposto, a utilização do lodo de esgoto como substituto aos fertilizantes minerais é uma alternativa vantajosa, uma vez que os custos de operação e tratamento são reduzidos, quando comparados com os procedimentos dos fertilizantes. Além disso, o seu uso na agricultura tem um forte apelo de sustentabilidade, já que a sua reutilização permite o aporte de nutrientes contidos em resíduos gerados em áreas urbanas para as culturas agrícolas.

O LE é um resíduo que apresenta alta porcentagem de matéria orgânica e nutrientes, portanto com potencial de ser aplicado no condicionamento de solos agrícolas, desde que passe por tratamentos eficientes de estabilização da matéria orgânica, para evitar que os solos e a biota sejam prejudicados. Desta forma, muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas na busca de novas tecnologias que diminuam, cada vez mais, a toxicidade desse material (Souza, 2021).

Com o objetivo de minimizar os efeitos nocivos e proporcionar a utilização do lodo de forma ambientalmente segura como insumo agrícola, faz-se necessário um processo que modifique os compostos químicos orgânicos e inorgânicos, de modo que o lodo seja biotransformado (Riveros, 2024), tendo em vista sua detoxificação e posterior produção de fertilizante orgânico. Métodos como compostagem, co-compostagem, vermicompostagem e atenuação natural monitorada (Souza, 2021) tem se mostrado eficiência na diminuição da carga tóxica do lodo, no entanto, aliando o baixo custo com tecnologia limpa, destaca-se a biorremediação.

A biorremediação é uma abordagem que utiliza a capacidade fisiológica de microrganismos para degradar ou transformar compostos tóxicos em substâncias menos nocivas (Deon *et al.*, 2012). Devido à presença de contaminantes, como metais pesados e compostos orgânicos persistentes, a biorremediação tem se mostrado uma alternativa eficaz para minimizar os riscos ambientais associados ao uso agrícola desses resíduos. Abrangendo uma ampla gama de biotecnologias ambientais, que requerem abordagens multidisciplinares por meio da implementação de ferramentas inovadoras para os processos biológicos naturais que ocorrem no solo, na água e no ar

(Muter, 2023), a biorremediação é amplamente estudada e aplicada na descontaminação de solos, envolvendo técnicas como a bioestimulação e a bioaumentação.

A bioestimulação é uma técnica que visa maximizar a atividade da microbiota nativa presente em ambientes contaminados por meio da introdução de nutrientes e compostos orgânicos, otimizando as condições ambientais para promover o crescimento e a atividade metabólica de microrganismos capazes de degradar poluentes. Materiais orgânicos como fibra de coco, casca de arroz e bagaço de cana-de-açúcar são amplamente utilizados nesse processo, pois não apenas fornecem nutrientes essenciais, mas também ajustam a relação carbono/nitrogênio (C/N) do substrato — um fator crucial para a biodegradação eficaz. Esses materiais melhoram a estrutura do lodo, aumentando sua porosidade e a disponibilidade de oxigênio, condições aeróbicas indispensáveis para a atividade microbiana (Riveros, 2024; Sommaggio *et al.*, 2018). A aplicação da bioestimulação em lodos provenientes de ETEs tem mostrado resultados significativos na redução de compostos tóxicos, como metais pesados e contaminantes orgânicos persistentes. Além disso, a adição de resíduos agrícolas descompacta o lodo, promovendo maior aeração e acelerando os processos de biodegradação. Dessa forma, a técnica não apenas aumenta a eficiência da biorremediação, mas também torna o lodo mais seguro e adequado para aplicações agrícolas, ao reduzir os riscos ambientais associados à sua toxicidade (Riveros, 2024; Souza, 2021).

A bioaumentação, por outro lado, consiste na introdução de microrganismos específicos e altamente especializados no ambiente contaminado, com função de reverter o contaminante em formas menos nocivas, minimizando sua concentração ao longo do tempo (Cardoso Filho, 2021). Microrganismos como fungos lignolíticos do gênero *Pleurotus* têm sido amplamente utilizados devido à sua capacidade de produzir enzimas extracelulares, como lacases e peroxidases. Essas enzimas desempenham um papel essencial na quebra de compostos complexos, como bifenilas e compostos fenólicos, contribuindo significativamente para a mineralização de moléculas tóxicas presentes no lodo (Riveros, 2024).

Além disso, a bioaumentação tem se mostrado particularmente eficiente quando combinada com a bioestimulação, criando condições sinérgicas para a degradação dos contaminantes. Estudos revelam que a utilização de resíduos vegetais em conjunto com microrganismos especializados potencializa a eficiência do processo de

biorremediação, garantindo uma redução significativa na toxicidade do lodo e promovendo sua adequação para uso agrícola. A combinação dessas estratégias é uma abordagem promissora para o tratamento sustentável de resíduos urbanos e industriais, especialmente em contextos onde a segurança ambiental e a viabilidade econômica são prioridades (Sommaggio *et al.*, 2018; Souza, 2021).

2.4. Mercado de plantas ornamentais no mundo e no Brasil

O mercado de flores e plantas ornamentais configura-se como um dos mais dinâmicos e promissores segmentos do agronegócio contemporâneo, exibindo indicadores de crescimento significativos, tanto em termos de número de produtores quanto de área de cultivo (Junqueira; Peetz, 2014). No contexto internacional, este mercado é um segmento econômico de grande relevância. Em 2018, as exportações globais de flores e plantas ornamentais atingiram US\$ 20,9 bilhões, envolvendo transações entre 102 países. A Holanda destaca-se como líder nesse setor, responsável por 51,2% das exportações e abrigando o maior hub mundial de flores. Curiosamente, o país é também o segundo maior importador, refletindo sua centralidade no mercado global. A Colômbia ocupa a segunda posição no ranking de exportações globais e é pioneira no transporte marítimo de flores de corte e, em conjunto ao Equador, Quênia e Etiópia, a Colômbia abastece grandes cadeias varejistas em nações desenvolvidas, destacando-se pela competitividade (Brainer, 2019).

No Brasil, o mercado de flores e plantas ornamentais é um segmento promissor do agronegócio, com potencial significativo para expansão. Com projeções de crescimento anual entre 8% e 10% e contando com mais de 8 mil produtores, o país cultiva cerca de 350 espécies e 3 mil cultivares em aproximadamente 15 mil hectares, empregando diretamente 78 mil pessoas (Reis *et al.*, 2020). A diversidade climática brasileira permite a produção de uma ampla variedade de flores e plantas ornamentais durante todo o ano, garantindo custos reduzidos e competitividade no mercado interno e externo (França; Maia, 2008).

A produção nacional, antes concentrada na região Sudeste, especialmente em São Paulo, expandiu-se para todas as regiões do país. No entanto, o mercado interno ainda é o principal destino da produção, refletindo o consumo per capita relativamente baixo, estimado em US\$ 4,70 por habitante. Em contraste, países como a Suíça registram um consumo per capita de US\$ 170, indicando o grande potencial de

crescimento no Brasil. O setor também apresenta um forte impacto social, com predominância de pequenos produtores rurais que contribuem para a distribuição de renda e a geração de empregos. Aproximadamente 80% da força de trabalho no setor é composta por mulheres, e 18,7% da produção tem origem familiar (França; Maia, 2008).

A elevada taxa de geração de empregos no setor é outro aspecto relevante. Enquanto outras culturas agrícolas empregam, em média, 5 trabalhadores por hectare, o cultivo de flores e plantas ornamentais emprega de 15 a 20 trabalhadores por hectare, gerando retornos econômicos expressivos. Essa alta densidade de emprego, aliada à rentabilidade, atrai pequenos produtores e fortalece o agronegócio nacional. Estimativas indicam que o setor gera rendas anuais entre R\$ 50 mil e R\$ 100 mil por hectare, significativamente superiores às médias de outros cultivos, como a fruticultura (França; Maia, 2008). Estas características consolidam a floricultura como um segmento estratégico para a economia brasileira, tanto pelo impacto social quanto pelo potencial de crescimento no mercado.

Além das vantagens econômicas, o uso de biossólidos como fertilizantes no cultivo de plantas ornamentais tem se mostrado uma alternativa promissora para a reciclagem desses resíduos. É de extrema importância que materiais, após o processo de biorremediação, e quando destinados a fins agrícolas, passem por avaliações que comprovem seu potencial agrônomo, a partir de plantas que apresentam facilidade de manejo, desenvolvimento rápido e elevada absorção de nutrientes (Souza, 2021).

Diversos estudos destacam o potencial do lodo de esgoto na produção de plantas ornamentais. Camilli (2007) avaliou o efeito de doses crescentes de lodo de esgoto na produção de massa seca e na eficiência de carboxilação da enzima rubisco em girassóis ornamentais (*Helianthus annuus* L.). Scheer *et al.* (2012) investigaram o crescimento do jasmim amarelo (*Jasminum mesnyi* Hance) em substratos de lodo de esgoto compostado, comparando-o com substratos comerciais. Outros pesquisadores, como Voltolini, Bizari e Stolf (2017), avaliaram diferentes concentrações de fertilizante Classe D e substrato convencional na produção de *Acalypha reptans*. Mais recentemente, Zabotto *et al.* (2022) quantificaram o crescimento e o desenvolvimento de mudas de *Cariniana estrellensis* fertilizadas com lodo de esgoto suplementado com potássio.

Esses trabalhos evidenciam que a utilização do lodo de esgoto como fertilizante no cultivo de plantas ornamentais pode oferecer vantagens econômicas e ambientais. Isso reforça a importância do setor na busca por práticas agrícolas mais sustentáveis e acessíveis aos pequenos produtores.

3. OBJETIVOS

3.2. Objetivo Geral

Avaliar o potencial de substituição, total ou parcial, e o desempenho do composto derivado de lodo de esgoto biotransformado, como fonte alternativa à fertilização mineral no cultivo de plantas de *Philodendron* "Pink Princess".

3.3. Objetivos específicos

- Determinar o potencial do composto de lodo de esgoto biotransformado como fonte de nutrientes em tratamentos com doses intercaladas de fertilizante mineral;
- Analisar o impacto da substituição total e parcial do fertilizante mineral pelo composto de lodo de esgoto biotransformado no desempenho fisiológico, nas análises bioquímicas e no desenvolvimento das plantas de *Philodendron* "Pink Princess".

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Material Vegetal

Os materiais vegetais utilizados no decorrer do experimento foram obtidos através de plantas matrizes de *Philodendron* “Pink Princess”, sob os cuidados do Programa de Melhoramento Genético desenvolvido pelo Prof. Dr. Jean Carlos Cardoso (LFVCT-CCA/UFSCar). Eles têm como origem a partir da clonagem de segmentos nodais onde passaram por subcultivos para novos meios de cultura a cada 90-120 dias, e quando as plântulas obtidas, mantidas *in vitro*, atingiram 4–5 cm de comprimento, 3-4 folhas e ao menos 2 raízes, as mesmas foram levadas para aclimatização.

Posteriormente, foram acondicionadas em casa de vegetação com resfriamento por sistema de Pad-Fan, com temperatura máxima de 28,5°C e alta umidade relativa (>70%), protegida na face superior com plástico agrícola difusor e sombreamento de 60% da intensidade luminosa natural, obtido pelo uso de tela de sombreamento cor alumínio, de forma que a adaptação das mudas *in vitro* às condições da casa de vegetação fosse feita de forma gradual.

4.2. Delineamento Experimental dos Tratamentos

O experimento foi conduzido nas instalações do Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, localizado no município de Araras – SP, em estufa agrícola, nos domínios do Laboratório de Fisiologia Vegetal e Cultura de Tecidos (LFVCT) e Grupo de Pesquisa em Fisiologia Aplicada a Agricultura.

Para o cultivo das mudas de *Philodendron* “Pink Princess”, foram utilizados vasos pote 10 (10 cm de diâmetro) e o substrato escolhido foi o Carolina Soil, composto de turfa, vermiculita e casca de arroz carbonizada, pH igual a 5,5, condutividade elétrica em 0,7 mS/cm, umidade máxima de 70%_{m/m}, densidade seca de 125 kg/m² e capacidade de retenção de água (CRA) em 300%_{m/n} (Carolina Soil).

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado e distribuído em seis tratamentos, contando com 12 repetições (vasos individuais contendo uma planta cada) para cada tratamento. O experimento teve início em outubro de 2023, com duração de 90 dias pensando no melhor aproveitamento dos nutrientes na fase inicial do desenvolvimento vegetativo.

Para a formulação dos tratamentos, tomou-se como base os resultados dos

pré-experimentos, realizados no Laboratório de Fisiologia Vegetal e Cultura de Tecidos (LFVCT-CCA/UFSCar), de dosagem máxima do fertilizante mineral de liberação lenta Basacote® 16-8-12 (Compo Expert.) para plantas ornamentais, sendo de 3 g L⁻¹. Deste modo, e de acordo com o volume do vaso utilizado para o plantio das mudas de *Philodendron* (pote 10, com capacidade de 360mL), foram delineados os seis tratamentos descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Delineamento experimental com base na dosagem de Basacote®.

Tratamentos	Dosagem de Basacote® (g L ⁻¹)	Dosagem de Basacote® (g / 360mL)	% do fertilizante mineral no tratamento
T1	0	0	0%
T2	0,6	0,216	20%
T3	1,2	0,432	40%
T4	1,8	0,648	60%
T5	2,4	0,864	80%
T6	3,0	1,08	100%

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

No entanto, com o objetivo de avaliar a substituição do fertilizante mineral pelo composto orgânico biotransformado proveniente de lodo de esgoto tratado, os tratamentos apresentaram quantidades intercaladas de ambas as fontes de nutrientes. Os cálculos foram realizados com base nas porcentagens de fósforo (P). A escolha do elemento fósforo é justificada pelo fato de que este está presente em maior porcentagem no lodo de acordo com a Tabela 4.

Assim, sabendo que o fertilizante mineral Basacote® apresenta 8% de P₂O₅, foi calculada a quantidade de P₂ em 1,08g de Basacote®, para que então pudesse ser calculada a quantidade do composto necessária para se obter a mesma quantidade de fósforo (P₂) fornecida pelo Basacote®, sabendo que há 20% de lodo de esgoto biotransformado no composto, e 5,9% de fósforo (P₂O₅) presente no lodo (Tabela 2).

Tabela 2 - Cálculos para aplicação do fertilizante mineral de liberação lenta Basacote® e composto de lodo de esgoto biotransformado.

Quantidade de fósforo (P ₂) presente no Basacote® (em g)	Quantidade de fósforo (P ₂) presente no lodo (em g)	Quantidade de lodo de esgoto (em g / 360 mL)	Quantidade de lodo de esgoto (em g L ⁻¹)	Quantidade do composto aplicada (em g)	% do composto no tratamento
0	0,038	0,64	1,8	3,20	100
0,008	0,030	0,51	1,4	2,56	80
0,015	0,023	0,39	1,08	1,92	60
0,023	0,015	0,26	0,72	1,28	40
0,030	0,008	0,13	0,36	0,7	20
0,038	0 g	0	0	0	0

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

As Tabelas 3, 4 e 5 apresentam as informações nutricionais do fertilizante mineral de liberação lenta Basacote®, do lodo de esgoto tratado, bem como os metais pesados presentes no lodo, respectivamente.

Tabela 3 - Informação nutricional do fertilizante mineral de liberação lenta Basacote®.

Nutrientes	Conteúdo
N	16,0 %
P ₂ O ₅	8,0 %
K ₂ O	12,0 %
MgO	2,0 %
S	5,0 %
B	0,02 %
Cu	0,05 %
Fe	0,4 %
Mn	0,06 %
Mo	0,015 %
Zn	0,02 %

Fonte: Compo Expert, 2025.

Tabela 4 - Composição nutricional do LE.

Determinações	Resultados (Base Seca 65°C)
pH	7,0 *
Matéria Orgânica (MO)	51,64%
Nitrogênio (N) Total	3,87%
Fósforo (P ₂ O ₅) Total	5,9%
Potássio (K ₂ O) Total	0,91%
Cálcio (Ca) Total	1,80%
Magnésio (Mg) Total	0,87%
Enxofre (S) Total	0,24%
Cobre (Cu) Total	0,082%
Ferro (Fe) Total	1,107%
Manganês (Mn) Total	0,025%
Zinco (Zn) Total	0,053%
Boro (B) Total	0,001%
Sódio (Na) Total	0,159%

Fonte: Esalq USP, 2024. pH – CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ *base úmida; N – digestão sulfúrica/Kjeldahl; P₂O₅ – extração ácida e determinação por colorimetria; K₂O e Na extração ácida e determinação por fotometria de chama; S – extração ácida e determinação gravimétrica pelo método do sulfato de bário; Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn – extração ácida e determinação por absorção atômica; B – extração ácida e determinação por colorimetria pelo método da Azometina-H.

Tabela 5 - Metais pesados presentes no LE.

Determinações	Resultados (em mg.kg ⁻¹)
Arsênio (Ar)	<2,00
Cádmio (Cd)	<2,00
Chumbo (Pb)	29,26
Cromo Total (Cr)	431,05
Mercúrio (Hg)	0,55
Níquel (Ni)	41,67
Selênio (Se)	<4,00

Fonte: Esalq USP (2024). Métodos: USEPA – SW-846 3051 a – Digestão ácida de sedimentos, lodos

e solos. Determinação (As, Cd, Pb, Cr, Ni, Se): Espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES). DETERMINAÇÃO (Hg) espectroscopia de absorção atômica com geração de hidretos (HG-AAS). (<) menor do que o Limite de Quantificação.

4.3. Composto de lodo de esgoto biotransformado

O composto de lodo de esgoto biotransformado foi obtido através de experimentos realizados pelo grupo de estudos BIOMA (Biossoluções para o Meio Ambiente e Agricultura), coordenado pela Prof. Dr^a Dânia Elisa Christofolletti Mazzeo Morales. A biotransformação foi realizada a partir de técnicas da biorremediação, onde ao final pode-se obter um composto formado por lodo de esgoto tratado, solo, casca de arroz e inóculo de fungo lignolítico do gênero *Pleurotus*.

As técnicas utilizadas foram a bioestimulação e a bioaumentação. Para a bioestimulação, foi utilizada casca de arroz, devido às suas propriedades como agente descompactante e estruturante. Já para a bioaumentação, foi utilizado o fungo *Pleurotus ostreatus*, sendo escolhido mediante a capacidade efetiva de degradação de contaminantes (Riveros, 2024).

4.4. Avaliação do desenvolvimento vegetativo

As avaliações do desenvolvimento vegetativo das plantas de *Philodendron* “Pink Princess”, como altura da planta (da base até a ponta maior da folha, em cm), comprimento e diâmetro da maior folha (em cm) e número de folhas ocorreram no dia da instalação do experimento (dia 0) e a cada 45 dias. Os teores de clorofila *a*, *b* e *a+b* foram avaliados no dia 0, quinzenalmente e a cada 45 dias, sendo realizadas 2 medidas na 1^a folha mais desenvolvida com o auxílio do equipamento Clorofilômetro Falker (Falker, Brasil). No último dia de experimento, a parte aérea e o sistema radicular de triplicatas de cada um dos tratamentos foram colocadas em estufa à 60°C, de modo que a massa fresca e a massa seca pudesse ser aferidas, bem como o comprimento da maior raiz, em centímetros.

4.5. Análises bioquímicas

Análises bioquímicas contribuem para esclarecer as respostas adaptativas das células a diferentes tipos de estresses, especialmente no que diz respeito à atividade antioxidante. Esse processo inclui a habilidade de combater radicais livres por meio de antioxidantes endógenos, como compostos fenólicos, enzimas com função antioxidante e outras moléculas com propriedades redutoras. A avaliação desses

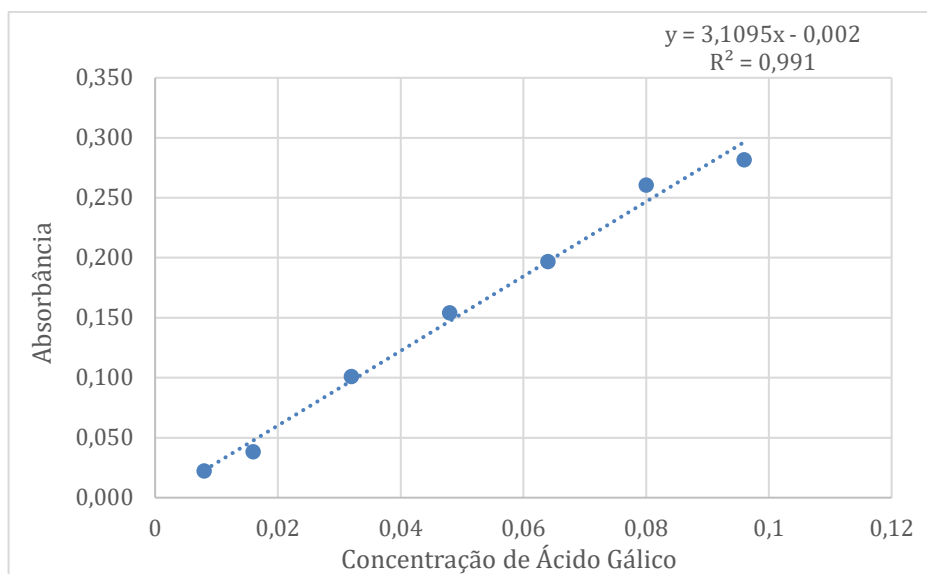
componentes orienta os estudos que buscam compreender de que maneira as células reagem ao estresse oxidativo (Broek, 2024), particularmente quando expostas a fontes alternativas de nutrientes, como o LE.

4.5.1. Análise de Fenóis Totais

Foi coletada a 1ª folha mais desenvolvida de três repetições escolhidas ao acaso de cada tratamento das plantas de “Pink Princess”, resultando em 18 amostras. Este material vegetal foi mantido em secagem em liofilizador por 72 horas, e em seguida, submetido a maceração em almofariz com auxílio de pistilo e nitrogênio líquido. O pó resultante foi pesado para obtenção do rendimento e uma alíquota de 100 mg foi retirada da amostra para preparação do extrato metanólico.

Na alíquota, foi adicionado 1 mL de Metanol (MeOH) 70% e a mesma foi levada para banho maria por 10 minutos. Após esse período, a solução foi centrifugada em centrífuga refrigerada (Eppendorf, 5810B) 4°C a 2.000 rpm por 2 minutos. O sobrenadante foi coletado e armazenado e esse processo foi repetido por três vezes até obter ao final um extrato metanólico de 3 mL.

De acordo com o método de quantificação para compostos fenólicos Folin-Ciocalteu, que mede a capacidade de transferência de elétrons de substâncias redutoras, como por exemplo os compostos fenólicos, em meio alcalino para o reagente ácido fosfotúngsticofosfomolibdico, resultando em complexos azuis que são detectados via espectrofotometro (Broek, 2024), em tubos de ensaio vedados por alumínio, para cada uma das repetições, foram acrescentados 200uL do extrato metanólico, 7,8mL de água deionizada, 500uL de Folin-Ciocalteu 1:10 (v/v) e 1500uL de solução saturada de carbonato de sódio. E, após um período de 2 horas, as amostras foram transferidas para cubetas de vidro com capacidade de 10 mL (Hanna Instruments) para a leitura. Como padrão, foi utilizado o metanol sem a amostra da planta. A leitura das amostras foi realizada via espectrofotometria (marca Íris, Hanna Instruments, Portugal) e, em seguida, o material foi quantificado de acordo com a equação de fenóis totais ($y = 3,10x + 0,002$) (Figura 1) e o resultado foi dado em ug de equivalente de ácido gálico (EAG)/g de extrato.

Figura 1 - Curva padrão ácido gálico.

Fonte: Laboratório de Fisiologia Vegetal e Cultura de Tecidos, 2025.

4.5.2. Análises Enzimáticas

As enzimas do sistema antioxidante desempenham um papel essencial na defesa celular contra o estresse oxidativo, atuando na neutralização de espécies reativas de oxigênio e na manutenção do equilíbrio redox. Entre essas, destacam-se a Peroxidase (POD), a Polifenol-oxidase (PPO) e a Fenilalanina Amônia-liase (PAL), que estão envolvidas em processos como a eliminação de peróxidos e a biossíntese de compostos fenólicos. Essas enzimas, juntamente com outras como a Glutathione-S-Transferase (GST), são amplamente utilizadas como indicadores bioquímicos para avaliar a resposta antioxidante em condições de estresse.

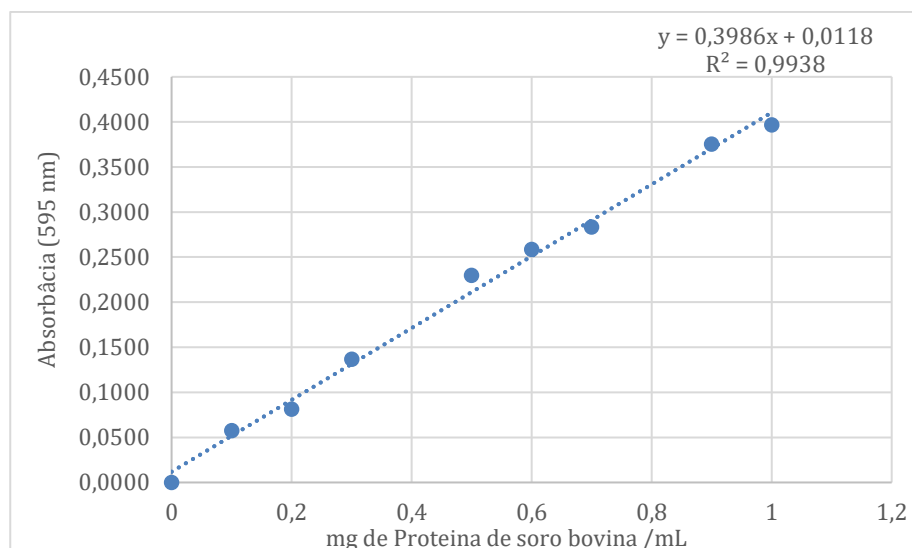
Para as enzimas POD, PPO e PAL foram testadas de acordo com método estabelecido por Colombini, Ceccato-Antonini e Rosa-Magri (2022), já para a GST, foi utilizado o método estabelecido por Hemingway (1998), conforme Brasil (2006), além da extração de proteínas totais pelo método de Bradford (1976). Todas as análises foram realizadas espectrofotometricamente em microplacas de 96 poços estéreis em leitor de placas Tecan Infinite M200 PRO, com volume final de trabalho de 200µl. As análises foram realizadas em triplicata (três poços) para cada amostra.

Amostras da parte aérea das plantas (1ª folha mais desenvolvida) de cada tratamento foram coletadas, em triplicatas biológicas, em aproximadamente 1 grama. Foram pesadas, armazenadas em sacos plásticos e mantidas em ultrafreezer (-80°C). Posteriormente, as amostras foram maceradas com nitrogênio líquido em almofariz

com auxílio de pistilo. Para as enzimas POD, PPO, PAL e proteínas totais, as amostras foram homogeneizadas com 10mL de tampão de extração 0,1M pH 5,0 composto por ácido acético e acetato de sódio gelado de acordo com o protocolo de extração descrito por Silva *et al.* (2007). Em seguida, os extratos foram armazenados em tubos de centrifugação Falcon® e submetidos à centrifugação refrigerada a 4°C, 15.000g, durante 20 minutos. O sobrenadante foi separado e considerado como extrato proteico para análises enzimáticas e quantificação do teor de proteínas totais.

Para a enzima GST, também foram coletadas amostras de 1 grama foliar (1ª folha mais desenvolvida), em triplicata biológica. Os tecidos foram macerados com nitrogênio líquido em almofariz e pistilo, e homogeneizados em 10 mL de tampão TRIS-HCl 50 mmol L⁻¹ pH 7,0 gelado, contendo 20% de glicerol (v/v), 1 mmol L⁻¹ de ácido ascórbico, 1 mmol L⁻¹ de ditioneitol (DTT), 1 mmol L⁻¹ de EDTA, 1 mmol L⁻¹ de glutatona reduzida e 5 mmol L⁻¹ de MgCl₂. Posteriormente, os extratos foram armazenados em tubos de centrifugação Falcon® e centrifugados a 4°C por 12 minutos a 12.000 g. Os sobrenadantes foram coletados, transferidos de tubo e centrifugados novamente por 15 minutos a 14.000 g. Os sobrenadantes obtidos após as centrifugações foram usados para a análise de atividade enzimática.

Para a determinação do teor de proteínas totais, foi utilizado o método de Bradford (1976), e para cada poço foi pipetado 6,6 µL do extrato proteico e 200µL de reagente Bradford (composto por 250 mg de corante Comassie Brilliant Blue G-250, 125mL de ácido fosfórico (H₃PO₄) e 125mL de água destilada). Após a adição do reagente de Bradford às amostras e incubação por 5 minutos, a leitura foi realizada a uma absorvância de 595nm. A absorvância foi plotada em curva padrão para proteínas ($y = 0,3986x + 0,0118$, onde “y” é a absorvância a 595 nm e “x” a concentração de mg de proteína de soro bovina/mL) (Figura 2).

Figura 2 - Curva padrão de Bradford.

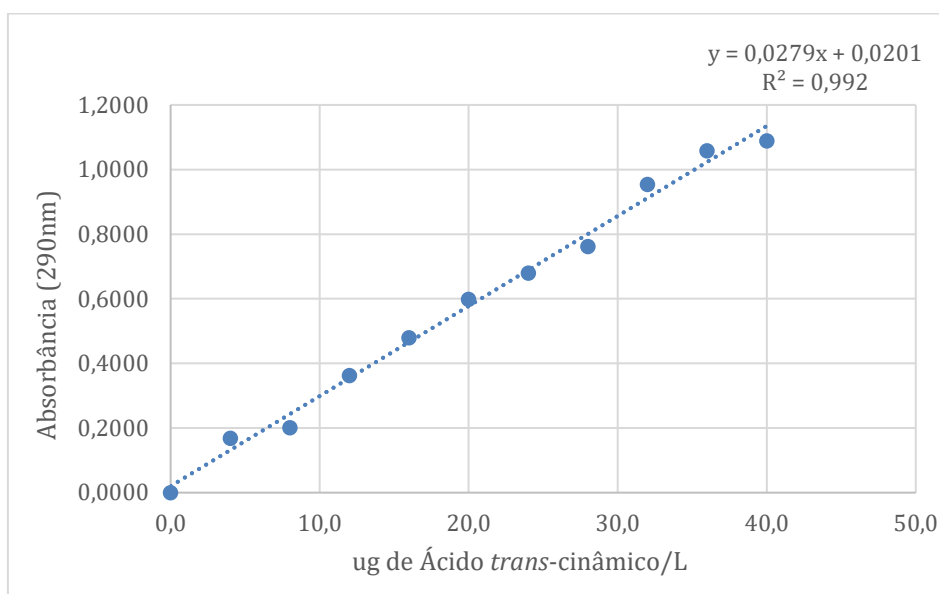
Fonte: elaborada pelo autor, 2025.

A atividade da enzima peroxidase (POD) foi determinada por espectrofotometria através da conversão do guaiacol em tetraguaiacol (Lusso e Pascholati 1999). A reação consistiu em 7 µL de extrato proteico enzimático e 193 µL de solução contendo 250 µL de guaiacol e 360 µL de peróxido de hidrogênio diluídos em 100mL de tampão fosfato de sódio 0,01 M (pH 6,0). A reação foi conduzida à 25°C por 10 minutos e a absorvância de 470 nm foi registrada nos tempos 0 e 10 minutos no leitor de microplacas. Os valores de absorvância foram plotados e descontados do valor de absorvância do branco (7 µL de tampão de extração + 193 µL da solução contendo guaiacol e peróxido de hidrogênio). A unidade de atividade de POD foi definida pela mudança de absorvância de 0,01 por minuto a 470 nm por mg de proteína total (U/min/mg prot).

A atividade da enzima polifenol-oxidase (PPO) foi mensurada através da conversão de catecol em quinona (Duangmal e Apenten 1999). A reação consistiu em 20 µl do extrato proteico enzimático e 180 µl de catecol 0.02M dissolvido em tampão fosfato de sódio 0.1 M pH 6,8, sendo conduzida à 30°C durante 2 minutos, sendo registradas leituras da unidade de absorvância em 420 nm a cada 10 segundos. Os valores de absorvância foram plotados e descontados do valor de absorvância do branco (20 µL de tampão de extração + 180 µL de catecol 0,02 M em tampão fosfato). O diferencial entre o tempo de 1 minuto e 2 minutos foi utilizado para a determinação da atividade, sendo a unidade de atividade de PPO definida pelo incremento de absorvância de 0,001 por minuto a 420nm por mg de proteína total (U/min/mg prot).

Já para a enzima fenilalanina amônia-liase (PAL), a análise consistiu na quantificação colorimétrica de ácido *trans*-cinâmico liberado do substrato fenilalanina (Umesha 2006). A reação consistiu em 20 μL extrato enzimático, 80 μL de tampão Tris-HCl 0,025 M (pH 8,8), e 100 μL de fenilalanina 0,05 M dissolvida em 0,025 M Tampão Tris-HCl (pH 8,8). A mistura de reação foi incubada à 40°C por 2 horas e após incubação, adicionou-se 20 μL de 6N HCl para interromper a reação, com unidade de absorbância à 290nm. O valor do controle (20 μL de extrato proteico enzimático e 180 μL de 0,025M solução tampão Tris-HCl em pH 8,8) foi subtraído de cada amostra. A atividade enzimática foi expressa em μg de ácido *trans*-cinâmico/ min^{-1} mg^{-1} de proteína. A concentração do ácido *trans*-cinâmico foi calculada com base em uma curva padrão ($y=0,0279x+0,0201$, onde “y” denota a absorbância em 290 nm e “x” denota a concentração de ácido *trans*-cinâmico) (Figura 3).

Figura 3 - Curva padrão ácido *trans*-cinâmico.



Fonte: elaborada pelo autor, 2025.

Por fim, a atividade da Glutathione-S-transferase (GST) foi determinada distribuindo 15 μL de amostra, seguido de 195 μL de uma solução de trabalho contendo 10 mM de glutathione reduzida (GSH) em tampão fosfato de potássio 100 mM pH 6,5 e 21 mM de CDNB (1-Cloro-2,4-dinitrobenzeno) em metanol. Esta solução de trabalho é composta de 20 mL da solução de glutathione adicionada de 1 mL de CDNB. A reação tem início imediatamente após a adição desta solução às amostras. As leituras foram feitas a 340 nm no tempo zero, e em intervalos de 1 minuto, por 28 minutos totais. Os valores de absorbância foram plotados e descontados do valor de absorbância do

branco (15 μL de tampão + 195 μL da solução trabalho). Na porção linear, dois pontos foram escolhidos (10 e 20 min) para o cálculo de variação da absorbância por minuto ($\Delta A_{340/\text{min}}$). O cálculo de atividade foi realizado de acordo com a seguinte fórmula:

$$\text{Atividade GST} = (\Delta A_{340/\text{min}} \times 0,21) / (0,0096 \times 1000 \times 0,6 \times 0,015)$$

Onde:

$\Delta A_{340/\text{min}}$ = variação da absorbância entre dois pontos distintos dividida pelo tempo (10 min);

0,21 = volume final da reação (mL);

0,0096 = coeficiente de extinção molar do produto da reação ($\mu\text{mol cm}^{-1}$);

0,6 = caminho óptico (altura do volume da reação no poço da microplaca, em cm);

0,015 = volume de amostra (mL).

Os resultados de atividade de GST foram expressos em $\mu\text{mol}/\text{min}/\text{mg}$ de proteína (ou $\text{nmol}/\text{min}/\text{mg}$ de proteína), dividindo-se o valor da atividade obtido pela concentração de proteínas totais.

4.6. Análise de condutância estomática (GSW), eficiência de fotossistema 2 (PhiPS2) e temperatura da folha (Delta T°C)

De modo que as plantas apresentassem condições fisiológicas homogêneas entre os tratamentos no momento da avaliação, após selecionar ao acaso três repetições de cada tratamento, os vasos com as plantas foram acondicionados 24 horas antes em potes plásticos com cerca de 200mL de água, com o objetivo de saturar o substrato e garantir que as plantas estivessem hidratadas, permitindo que a respiração, abertura e fechamento de estômatos ocorressem normalmente.

As avaliações de condutância estomática (expressa em $\text{mol}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$), de eficiência do fotossistema 2 (expressa em eficiência quântica de fotossistema) e diferença entre temperatura da folha e ambiente (Delta T°C) foram realizadas através do equipamento LI-pf600 da LI-COR e ocorreram em 2 períodos do dia: às 10:00 horas, em período nublado, e as 11:20 horas, com sol. Foram realizadas 3 medições na primeira folha bem desenvolvida. Essas análises ocorreram quando as plantas apresentaram 75 dias de experimento.

4.7. Condutividade elétrica (CE), pH e fosfato (mg/L) na solução do substrato

Com o auxílio do equipamento fotômetro de bancada HI83325 para análise de nutrientes (Hanna Instruments), foi possível analisar a quantidade de fosfato (em mg/L) presente na solução dos substratos de cada tratamento.

Foram selecionados ao acaso três repetições de cada tratamento, onde apenas o substrato permaneceu imerso em água destilada por 24 horas. Após este período, a solução substrato-água foi filtrada com o auxílio de papel filtro e acondicionada em frascos de vidro. Para a leitura no equipamento, foram utilizadas cubetas de vidro com capacidade de 10 mL (Hanna Instruments), onde as amostras foram diluídas em 5 vezes (2mL de amostra + 8mL de água destilada), uma vez que a faixa de leitura do equipamento vai de 0,0 a 30,0 mg/L de PO_4^{3-} , sendo acrescentadas 10 gotas do reagente A e 1 sachê do reagente B (HI93717-01 - reagentes para a determinação colorimétrica de fosfato, Hanna Instruments), para que, após 5 minutos, a leitura fosse realizada, sendo o resultado expresso em mg/L de fosfato (PO_4^{3-}).

Para a análise de pH, foi utilizado o phmetro de bancada SevenCompact da Mettler Toledo e para aferir a condutividade elétrica (em mS/cm), foi utilizado o condutivímetro GroLine HI 98318 da Hanna Instruments.

4.8. Análise Nutricional

Ao final do experimento, foram realizadas análises de macronutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre, em g.kg^{-1}), micronutrientes (boro, cobre, ferro, manganês, zinco e sódio, em mg.kg^{-1}) e metais pesados (alumínio, cádmio, cromo, chumbo e níquel, em mg.kg^{-1}) nas folhas das plantas de *Philodendron* "Pink Princess". Foi preparado uma amostra composta para cada um dos tratamentos, de modo que, após a secagem em estufa a 60°C , fosse obtido 1g de tecido seco para as análises foliares. Essas análises foram realizadas no Laboratório de Análise da Fertilidade do Solo do IAC-Campinas.

4.9. Análise dos resultados

Os resultados das análises de desenvolvimento vegetativo, teores de clorofila *a*, *b* e *a+b*, análises bioquímicas, condutância estomática, eficiência de fotossistema, temperatura, bem como pH, CE e fosfato, foram analisados estatisticamente através

do software R Studio, onde os dados obtidos foram submetidos a análise de variância (ANOVA) a fim de verificar quais tratamentos apresentaram diferença significativa quanto as características avaliadas. Posteriormente para realizar comparações pareadas das médias dos tratamentos foi aplicado o Teste de Tukey a 5 % de significância ($p \leq 0,05$). Os gráficos foram gerados através do programa Microsoft Excel.

5. RESULTADOS

5.1. Desenvolvimento vegetativo a cada 45 dias

No dia da instalação do experimento, foi realizada uma avaliação inicial das plantas antes de serem submetidas aos tratamentos com fertilizante e composto. De acordo com a Tabela 6, pode-se afirmar que não houve diferença estatística entre as plantas para cada um dos tratamentos, ressaltando a homogeneidade de características que técnicas como a clonagem de plantas proporciona aos materiais.

Tabela 6 - Parâmetros avaliados no dia da instalação do experimento (dia 0).

Tratamentos	h (cm)	C.M.F (cm)	D.M.F (cm)	Nº.F	Cl.a	Cl.b	Cl.a+b
0% Basacote® e 100% composto	7,1 a	4,6 a	1,7 a	5,6 a	23,4 a	5,8 a	29,3 a
20% Basacote® e 80% composto	7,15 a	4,4 a	1,8 a	7,5 a	28,0 a	7,1 a	35,1 a
40% Basacote® e 60% composto	5,93 a	4,06 a	1,6 a	8,0 a	25,9 a	5,6 a	31,5 a
60% Basacote® e 40% composto	6,98 a	4,43 a	1,7 a	8,1 a	25,0 a	5,7 a	30,7 a
80% Basacote® e 20% composto	6,51 a	4,31 a	1,8 a	8,0 a	23,8 a	5,2 a	29,0 a
100% Basacote® e 0% composto	6,5 a	3,86 a	1,7 a	8,0 a	26,2 a	6,1 a	32,2 a
ANOVA							
p-valor (não significativo se > 0,05)*	0,330	0,390	0,544	0,354	0,352	0,434	0,398
CV (%)	15,65	15,82	11,03	28,76	14,93	27,45	16,94

*Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem entre si pelo Teste de *Tukey* à 5% de significância. **h** = altura da planta; **C.M.F** = comprimento da maior folha; **D.M.F** = diâmetro da maior folha; **Nº.F** = número de folhas; **Cl.a** = clorofila a; **Cl.b** = clorofila b; **Cl.a+b** = clorofila a+b.

Fonte: Dados do experimento.

Após 45 dias de experimento, os parâmetros avaliados inicialmente foram no-

vamente aferidos (Tabela 7), e dentre todas as características analisadas, apenas o número de folhas (Nº.F) apresentou diferença estatística entre os tratamentos, onde o tratamento com 60% Basacote® e 40% composto apresentou maior a maior média (12,8 folhas), e os tratamentos com 0% Basacote® e 100% composto e com 40% Basacote® e 60% composto apresentaram as menores médias (7,0 e 7,3 folhas, respectivamente).

Tabela 7 - Parâmetros avaliados ao 45º dia de experimento.

Tratamentos	h (cm)	C.M.F (cm)	D.M.F (cm)	Nº.F	Cl.a	Cl.b	Cl.a+b
0% Basacote® e 100% composto	12,8 a	8,5 a	3,5 a	7,0 b	31,4 a	9,8 a	41,3 a
20% Basacote® e 80% composto	13,1 a	8,5 a	3,6 a	8,3 ab	33,4 a	10,4 a	43,2 a
40% Basacote® e 60% composto	13,6 a	9,1 a	3,9 a	7,3 b	32,5 a	9,7 a	42,2 a
60% Basacote® e 40% composto	13,9 a	9,0 a	3,7 a	12,8 a	32,3 a	12,0 a	44,4 a
80% Basacote® e 20% composto	13,3 a	8,5 a	8,8 a	11,1 ab	31,6 a	10,4 a	42,0 a
100% Basacote® e 0% composto	13,5 a	8,7 a	3,9 a	7,6 ab	31,3 a	9,8 a	41,2 a
ANOVA							
p-valor (não significativo se > 0,05)*	0,890	0,844	0,655	0,009	0,770	0,468	0,857
CV (%)	12,32	11,95	13,92	33,35	8,41	21,41	11,33

*Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey à 5% de significância. **h** = altura da planta; **C.M.F** = comprimento da maior folha; **D.M.F** = diâmetro da maior folha; **Nº.F** = número de folhas; **Cl.a** = clorofila a; **Cl.b** = clorofila b; **Cl.a+b** = clorofila a+b.

Fonte: Dados do experimento.

No final do experimento (90 dias), foi realizada a última avaliação do desenvolvimento vegetativo das plantas. De acordo com a Tabela 8, para o parâmetro altura da planta (h) e comprimento da maior folha (C.M.F), o tratamento com 40% Basacote® e 60% composto apresentou a maior média, com valores iguais a 22,4 cm e 13,2 cm respectivamente, já os tratamentos que apresentaram as menores médias foram com 80% Basacote® e 20% composto e com 100% Basacote® e 0% composto, sendo que para altura de planta, as médias foram iguais a 18,9 cm e 18,4 cm, respectivamente, e para o comprimento da maior folha, 11,0 cm e 11,1 cm, respectivamente.

Para o diâmetro da maior folha (D.M.F) e número de folhas (Nº.F), não foi

observada diferença estatística entre os tratamentos. Quanto os teores de clorofila *a* (Cl.*a*), clorofila *b* (Cl.*b*) e clorofila *a+b* (Cl.*a+b*), os tratamentos com 40% Basacote® e 60% composto; 60% Basacote® e 40% composto; 100% Basacote® e 0% composto apresentaram as maiores médias para as 3 avaliações, com valores de Cl *a* iguais a 37,9, 36,9 e 36,7, de Cl.*b* iguais a 14,7, 13,3 e 14,9, e de Cl.*a+b* iguais a 52,6, 50,2 e 51,6, respectivamente.

Já os tratamentos com 0% Basacote® e 100% composto e com 20% Basacote® e 80% composto apresentaram as menores médias para os teores de clorofila *a*, *b* e *a+b*, com valores de Cl *a* iguais a 30,0 e 29,8, Cl.*b* em 8,2 e 8,3, e Cl.*a+b* iguais a 38,3 e 38,2, respectivamente. A Figura 4 representa uma repetição por tratamento ao final do experimento.

Tabela 8 - Parâmetros avaliados no 90° dia de experimento.

Tratamentos	h (cm)	C.M.F (cm)	D.M.F (cm)	Nº.F	Cl. <i>a</i>	Cl. <i>b</i>	Cl. <i>a+b</i>
0% Basacote® e 100% composto	19,9 ab	12,0 ab	5,0 a	9,5 a	30,0 b	8,2 b	38,3 b
20% Basacote® e 80% composto	19,4 ab	11,4 ab	4,7 a	9,6 a	29,8 b	8,3 b	38,2 b
40% Basacote® e 60% composto	22,4 a	13,2 a	5,8 a	10,5 a	37,9 a	14,7 a	52,6 a
60% Basacote® e 40% composto	20,2 ab	12,4 ab	5,3 a	9,3 a	36,9 a	13,3 a	50,2 a
80% Basacote® e 20% composto	18,9 b	11,0 b	5,5 a	10,0 a	33,0 ab	12,2 ab	45,2 ab
100% Basacote® e 0% composto	18,4 b	11,1 b	4,8 a	9,5 a	36,7 a	14,9 a	51,6 a
ANOVA							
p-valor (não significativo se > 0,05)*	0,013	0,014	0,127	0,462	3,15 ⁻⁵	0,0001	5,93 ⁻⁵
CV (%)	9,28	9,61	14,32	11,1	8,76	22,77	12,24

*Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem entre si pelo Teste de *Tukey* à 5% de significância. **h** = altura da planta; **C.M.F** = comprimento da maior folha; **D.M.F** = diâmetro da maior folha; **Nº.F** = número de folhas; **Cl.*a*** = clorofila *a*; **Cl.*b*** = clorofila *b*; **Cl.*a+b*** = clorofila *a+b*.

Fonte: Dados do experimento.

Figura 4 - Plantas de *Philodendron* “Pink Princess” ao final do experimento (90 dias). Da esquerda para direita: 0% Basacote® e 100% composto; 20% Basacote® e 80% composto; 40% Basacote® e 60% com-posto; 60% Basacote® e 40% composto; 80% Basacote® e 20% composto; 100% Basacote® e 0% composto.



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Quanto as avaliações de massa fresca (M.F) e massa seca (M.S) da parte aérea e raiz, bem como o comprimento da maior raiz (C.M.R) ao final do experimento, não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos com fertilizante e composto (Tabela 9).

Tabela 9 - Massa fresca e seca da parte aérea e raiz, comprimento da maior raiz avaliadas no 90º dia de experimento .

Tratamentos	Parte Aérea		Raiz		
	M.F (em g)	M.S (em g)	M.F (em g)	M.S (em g)	C.M.R (em cm)
0% Basacote® e 100% composto	15,8 a	1,6 a	4,7 a	0,586 a	24,0 a
20% Basacote® e 80% composto	15,4 a	1,1 a	4,3 a	0,536 a	26,3 a
40% Basacote® e 60% composto	25,7 a	2,4 a	7,1 a	0,890 a	32,3 a
60% Basacote® e 40% composto	23,8 a	2,0 a	5,1 a	0,620 a	25,2 a
80% Basacote® e 20% composto	27,8 a	2,3 a	7,9 a	0,886 a	28,3 a
100% Basacote® e 0% composto	20,7 a	1,6 a	2,8 a	0,353 a	30,0 a
ANOVA					
p-valor (não significativo se > 0,05)*	0,092	0,073	0,294	0,201	0,229

CV (%) 26,45 25,96 51,3 42,65 15,3

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de *Tukey* à 5% de significância.

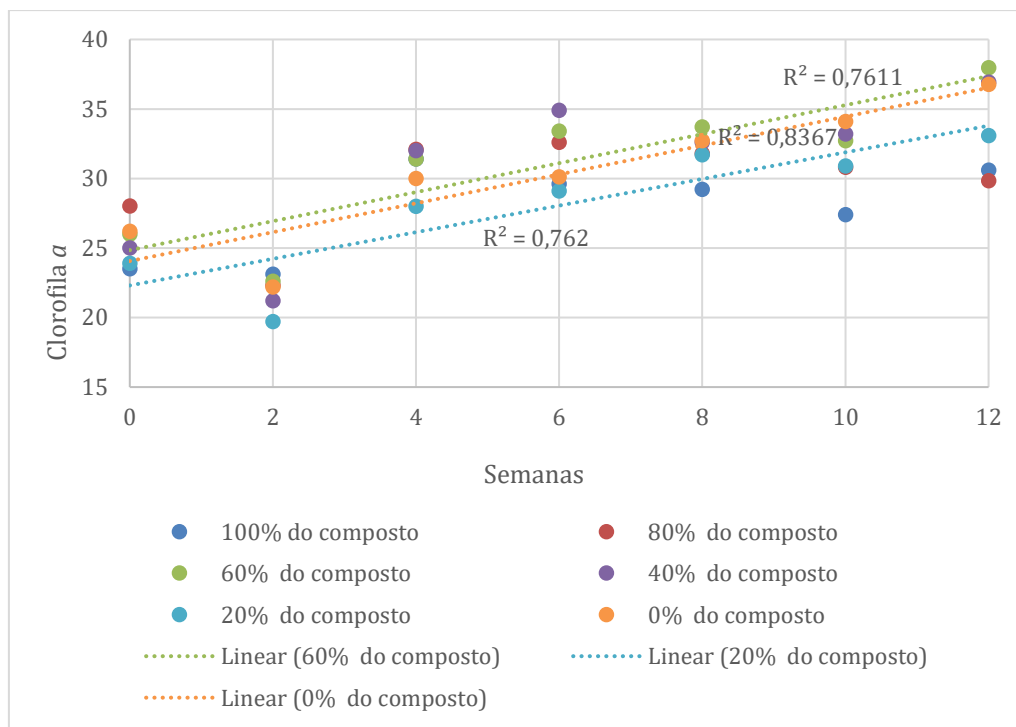
M.F = massa fresca, em g; **M.S** = massa seca, em g; **C.M.R** = comprimento de maior raiz, em cm.

Fonte: Dados do experimento.

5.2. Teores de clorofila a, b e a+b avaliados quinzenalmente

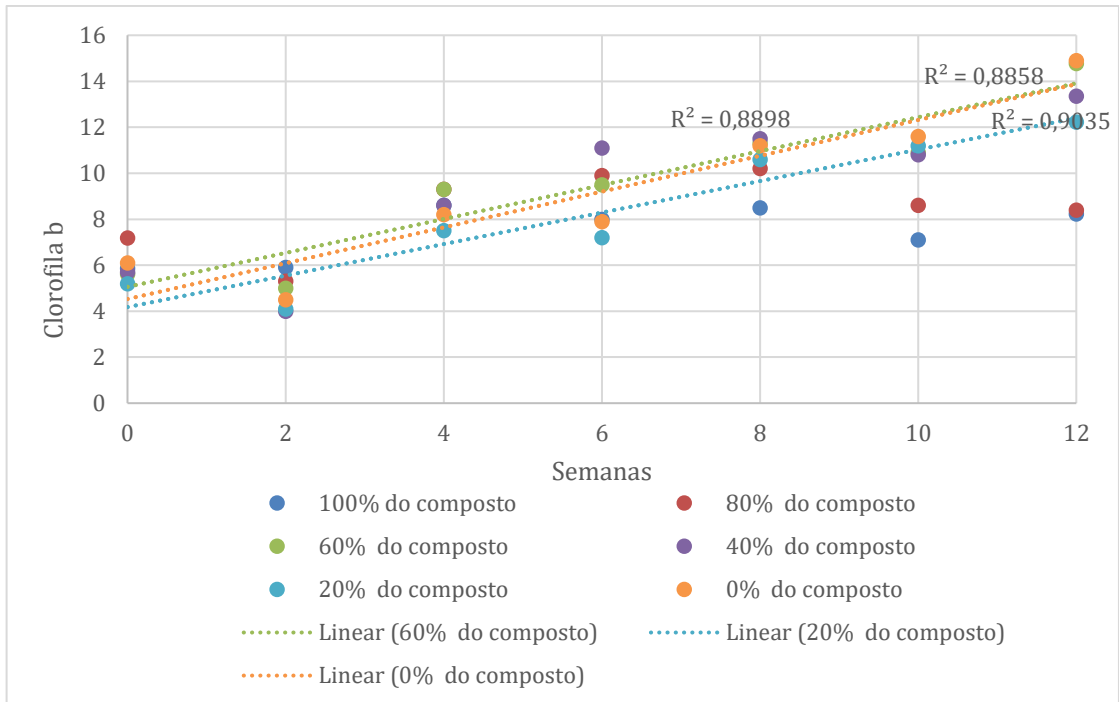
Para os teores de clorofila *a*, *b* e *a+b* (Figura 5, 6 e 7), pode-se afirmar que, apesar da queda nos valores entre o dia da instalação do experimento e 2 semanas após, o que é esperado devido ao transplântio das mudas e transferência de estufa, causando um estresse nas plantas, a partir da 2ª semana houve um aumento nos valores para os tratamentos com 60%, 40%, 20% e 0% do composto. No entanto, o tratamento com 100% do composto apresentou queda nos valores de clorofila *a* a partir da 4ª semana de experimento, bem como o tratamento com 80% do composto, a partir da 6ª semana. E, ao final do experimento, foram os tratamentos que apresentaram menores médias de clorofila *a*, *b* e *a+b*.

Figura 5 - Teor de clorofila *a* avaliado quinzenalmente em um período de 12 semanas (0 = dia da instalação do experimento) aferido com o auxílio do equipamento Clorofilômetro Falker.



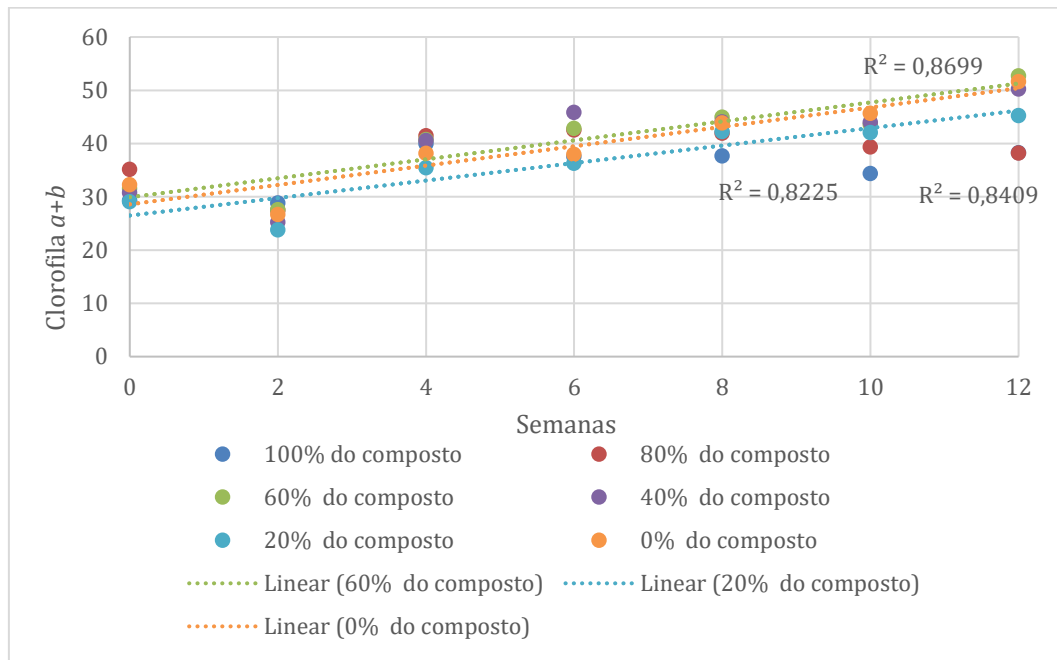
Fonte: dados do experimento, 2025.

Figura 6 - Teor de clorofila b avaliado quinzenalmente em um período de 12 semanas (0 = dia da instalação do experimento) aferido com o auxílio do equipamento Clorofilômetro Falker.



Fonte: dados do experimento, 2025.

Figura 7 - Teor de clorofila a+b avaliado quinzenalmente em um período de 12 semanas (0 = dia da instalação do experimento) aferido com o auxílio do equipamento Clorofilômetro Falker.



Fonte: dados do experimento, 2025.

5.3. Análise de Fenóis Totais

De acordo com a Tabela 10, pode-se afirmar que não houve diferença estatística entre os tratamentos quanto aos valores de fenóis totais. No entanto, é possível observar que valores ligeiramente maiores de fenóis totais foram obtidos nos tratamentos com 100% do composto (28,6 ug EAG/g de amostra), 80% do composto (28,9 ug EAG/g de amostra) e 100% de Basacote® (28,1 ug EAG/g de amostra). A Figura 8 mostra os extratos fenólicos após 2 horas de reação para leitura de fenóis totais, onde é possível observar tons de azul mais fortes nos tratamentos com 100% e 0% de composto.

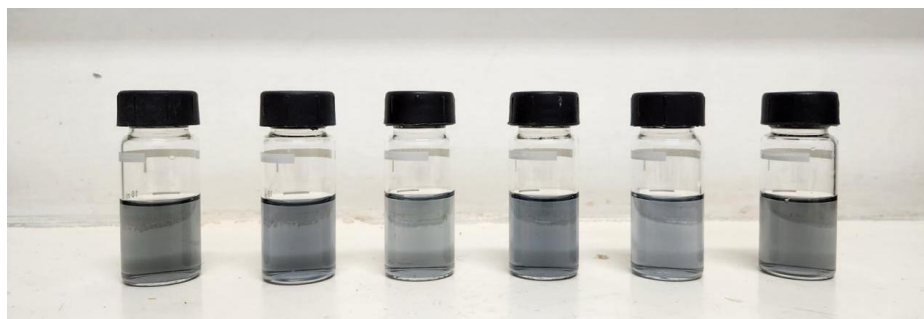
Tabela 10 - Fenóis totais (em ug equivalente ácido gálico (EAG)/g de amostra) dos tratamentos com diferentes doses de Basacote® e compostos de lodo de esgoto biotransformado.

Tratamentos	Fenóis Totais (μg EAG/ g de amostra)
0% Basacote® e 100% composto	28,6 a
20% Basacote® e 80% composto	28,9 a
40% Basacote® e 60% composto	20,3 a
60% Basacote® e 40% composto	24,4 a
80% Basacote® e 20% composto	17,5 a
100% Basacote® e 0% composto	28,1 a
ANOVA	
p-valor (não significativo se $> 0,05$)*	0,058
CV (%)	19,7

*Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem entre si pelo Teste de *Tukey* à 5% de significância.

Fonte: Dados do experimento, 2025.

Figura 8 - Extratos metanólicos obtidos após preparação para leitura de fenóis totais. Da esquerda para direita: 0% Basacote® e 100% composto; 20% Basacote® e 80% composto; 40% Basacote® e 60% composto; 60% Basacote® e 40% composto; 80% Basacote® e 20% composto; 100% Basacote® e 0% composto.

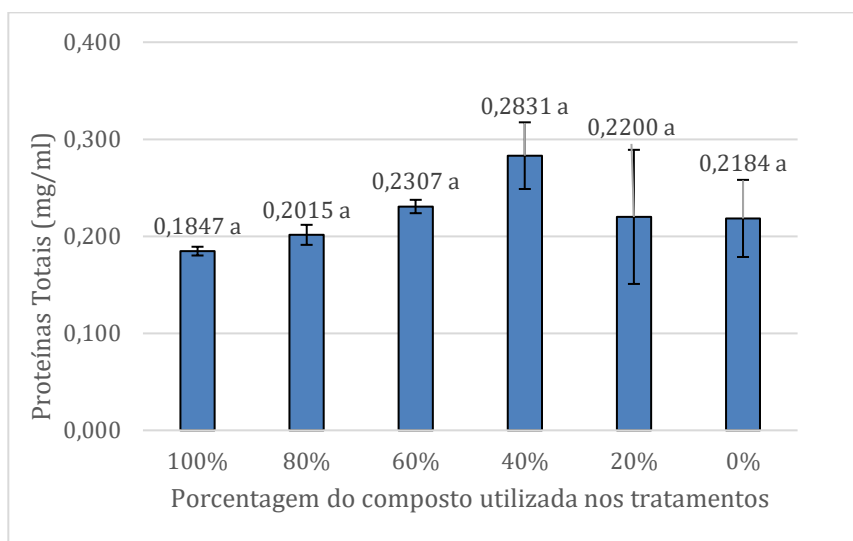


Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

5.4. Análises Enzimáticas

Após as análises de proteínas totais e a partir dos dados representados na Figura 9, pode-se afirmar que, apesar de não apresentar diferença estatística entre os tratamentos, pode-se observar uma tendência inversamente proporcional à quantidade de composto utilizada nos tratamentos: conforme a quantidade de composto diminui, a quantidade de proteínas totais aumenta. No entanto, nos tratamentos com 80% e 100% de Basacote® (20% e 0% do composto), houve uma diminuição na quantificação de proteínas totais.

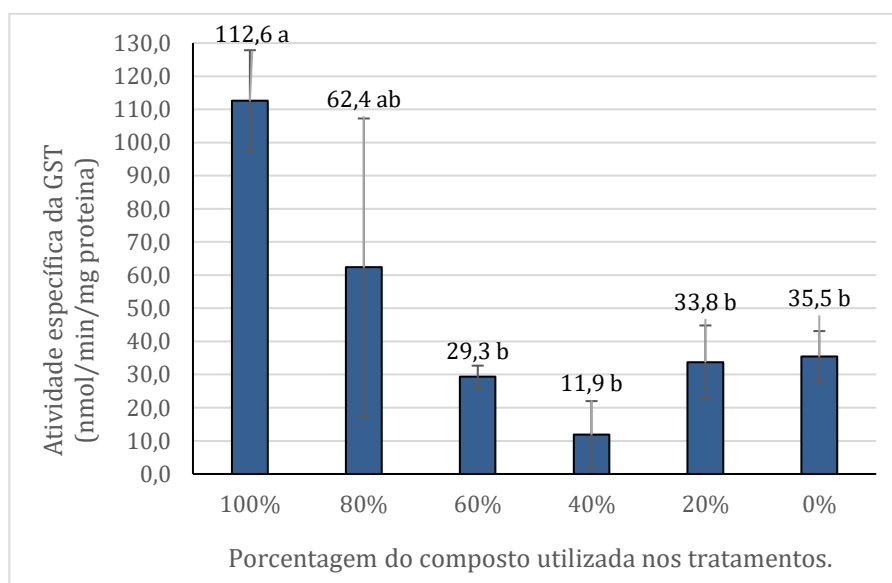
Figura 9 - Quantificação de Proteínas Totais pelo método de Bradford, adaptado por Colombini, Ceccato-Antonini e Rosa-Magri (2022), dos tratamentos com Basacote® e composto de lodo de esgoto bio-transformado. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey à 5% de significância (não significativo se $> 0,05$).



Fonte: dados do experimento, 2025.

A primeira enzima antioxidante analisada, Glutationa S-Transferase (GST) (Figura 10), apresentou diferenças estatísticas entre os tratamentos com diferentes doses de Basacote® e composto. O tratamento com 100% de composto apresentou a maior média (112,6 nmol/min/mg de proteína), em seguida, como segunda maior média, o tratamento com 80% de composto apresentou valor de atividade enzimática igual a 62,4 nmol/min/mg de proteína. Os demais tratamentos apresentaram médias menores, que diferiram estatisticamente do tratamento com 100% de composto, porém não diferiram do tratamento com 80%.

Figura 10 - Atividade da enzima Glutationa S-transferase (GST) pelo método de Hemingway (1998), conforme Brasil (2006), dos tratamentos com Basacote® e composto de lodo de esgoto biotransformado. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey à 5% de significância (não significativo se $> 0,05$).

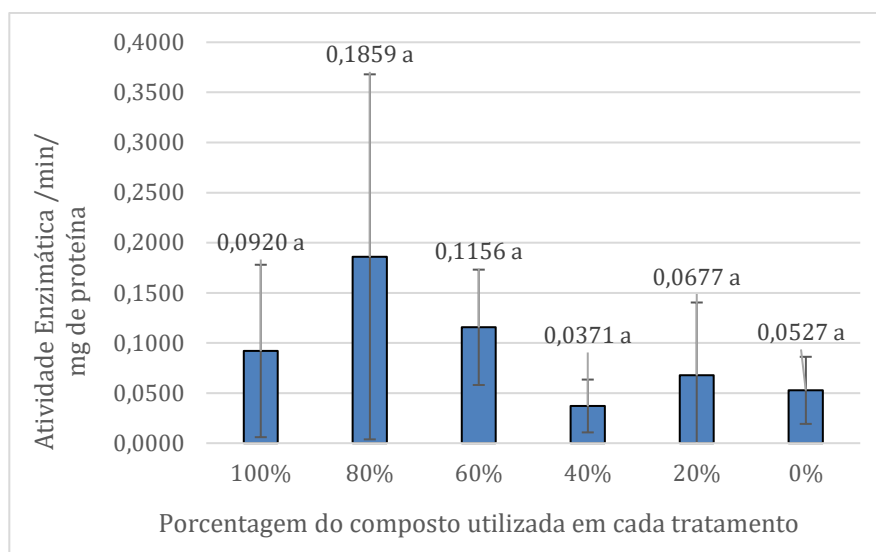


Fonte: Dados do experimento, 2025.

Para as enzimas Peroxidase (POD) (Figura 11) e a Polifenol-oxidase (PPO) (Figura 12), não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos com Basacote® e composto de lodo de esgoto biotransformado, sendo que, dentre todas as enzimas testadas, a POD foi a que apresentou menor número de atividade.

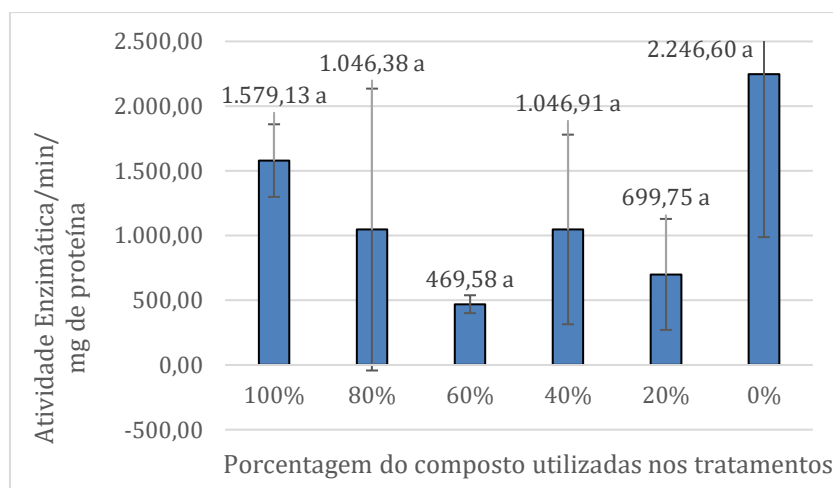
Figura 11 - Atividade da enzima Peroxidase (POD) pelo método de Lusso e Pascholati (1999), adaptado por Colombini, Ceccato-Antonini e Rosa-Magri (2022), dos tratamentos com Basacote® e composto de lodo de esgoto biotransformado. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey à 5% de significância (não significativo se $> 0,05$). Os dados foram submetidos a transformação $(x+1)$, uma vez que as variâncias dos tratamentos não foram homogêneas através do Teste

de Shapiro Wilk, que não atestou normalidade dos dados, e o coeficiente de variação (CV) mostrou-se elevado.



Fonte: Dados do experimento, 2025.

Figura 12 - Atividade da enzima Polifenol-oxidase (PPO) pelo método de Duangmal e Apen-ten (1999), adaptado por Colombini, Ceccato-Antonini e Rosa-Magri (2022), dos tratamentos com Basacote® e composto de lodo de esgoto biotransformado. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey à 5% de significância (não significância se $> 0,05$).

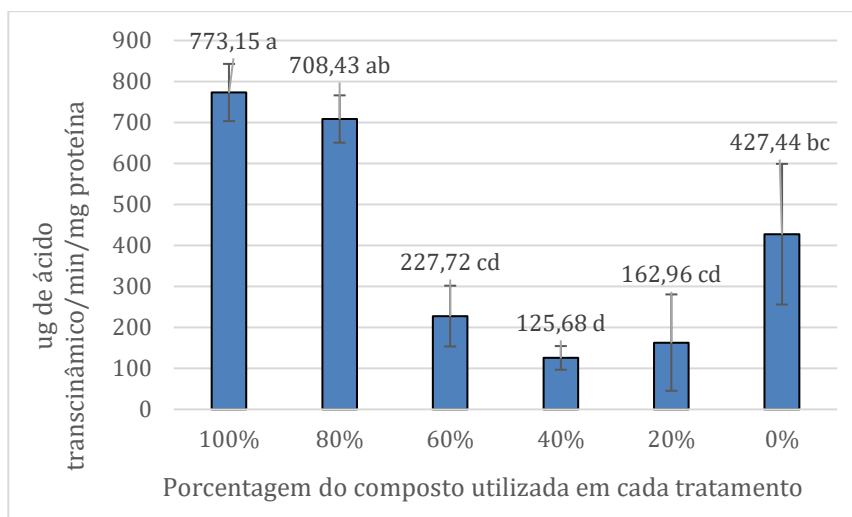


Fonte: Dados do experimento, 2025.

Já para a enzima Fenilalanina amonia-liase (PAL) (Figura 13), foi observada diferença estatística entre os tratamentos, sendo que a maior média de atividade enzimática foi apresentada pelo tratamento com 100% do composto (773,15 ug de ácido transcinâmico/min/mg proteína), seguido pelo tratamento com 80% de composto (708,43 ug de ácido transcinâmico/min/mg proteína). O tratamento que apresentou média significativamente menor foi com 40% de composto, com atividade enzimática

de 125,68 ug de ácido transcinâmico/min/mg proteína.

Figura 13 - Atividade da enzima Fenilalanina amônia-liase (PAL) pelo método de Umesh (2006), adaptado por Colombini, Ceccato-Antonini e Rosa-Magri (2022), dos tratamentos com Basacote® e composto de lodo de esgoto biotransformado. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey à 5% significância (não significativo se $> 0,05$).



Fonte: Dados do experimento, 2025.

5.5. Condutância estomática (GSW), eficiência de fotossistema 2 (PhiPS2) e diferença de temperatura entre folha e ambiente (Delta T°C)

A Tabela 11 apresenta os dados obtidos a partir das análises de eficiência de fotossistema 2 (PhiPS2), condutância estomática (GSW) e diferença entre temperatura da folha e ambiente (Delta T°C) em dois horários distintos, o primeiro em condições de nuvens (10 hrs) e o outro, com céu aberto (11:20).

Para a eficiência de fotossistema 2, no horário das 10hrs, pode-se afirmar que houve diferença estatística entre os tratamentos, sendo que os tratamentos com 60% Basacote® e 40% composto, 80% Basacote® e 20% composto e com 100% Basacote® e 0% composto apresentaram as maiores médias (0,717; 0,718; 0,723, respectivamente), e o tratamento com 0% Basacote® e 100% composto apresentou a menor média (0,672). Para o horário das 11:20, não foi observada diferença estatística entre os tratamentos.

Quanto à condutância estomática (GSW), que representa o número de estômatos abertos, este não apresentou diferença estatística entre os tratamentos para ambos os horários avaliados. Já para a diferença de temperatura da folha e do ambiente (Delta T°C), para o horário das 10 hrs, o tratamento com 100% do composto

apresentou maior média (0,972) e os demais diferiram significativamente deste, apresentando as menores médias. No entanto, às 11:20hrs, os tratamentos com 80% e 60% do composto apresentaram as médias estatisticamente maiores (2,40 e 2,65, respectivamente), e os tratamentos com 80% e 100% de Basacote® apresentaram as menores médias, diferindo estatisticamente dos melhores tratamentos, com valores iguais a 1,41 e 1,18.

A maior diferença entre a temperatura da planta e do ambiente (Delta T°C) foi observada nos tratamentos com 100% do composto às 10h e com 80% e 60% do composto às 11h20.

Tabela 11 - Parâmetros fisiológicos avaliados em plantas de *Philodendron* "Pink Princess" submetidas a diferentes doses de fertilizante mineral e composto de lodo de esgoto biotransformado.

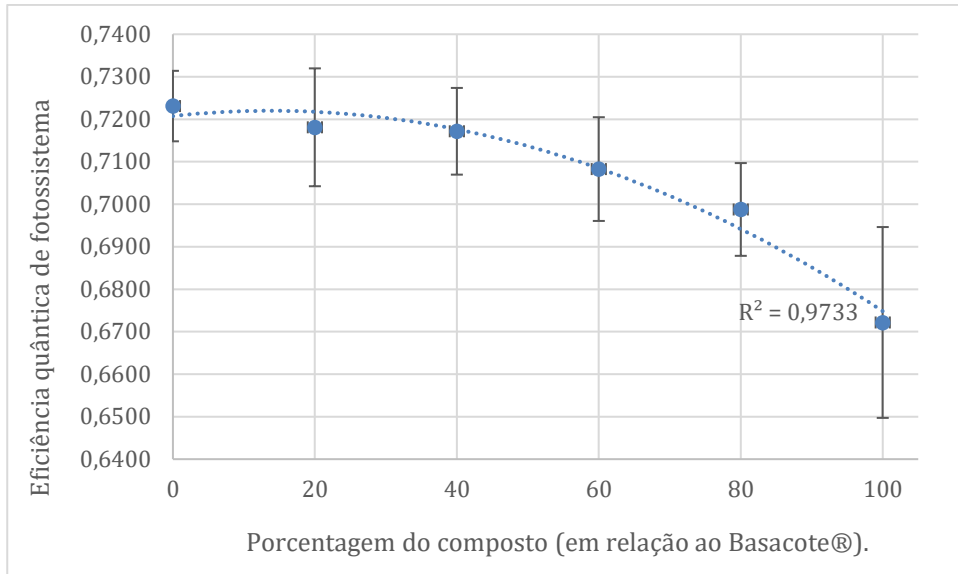
Tratamentos	PhPS2		GSW (em mol.m ⁻¹ .s ⁻¹)		Delta T°C	
	10:00hrs	11:20hrs	10:00hrs	11:20hrs	10:00hrs	11:20hrs
0% Basacote® e 100% composto	0,672 b	0,519 a	0,0420 a	0,017 a	0,972 a	1,99 ab
20% Basacote® e 80% composto	0,698 ab	0,595 a	0,0481 a	0,018 a	0,236 b	2,40 a
40% Basacote® e 60% composto	0,708 ab	0,596 a	0,0527 a	0,023 a	0,21 b	2,65 a
60% Basacote® e 40% composto	0,717 a	0,598 a	0,0288 a	0,026 a	-0,012 bc	1,97 ab
80% Basacote® e 20% composto	0,718 a	0,650 a	0,0268 a	0,043 a	-0,294 bc	1,41 b
100% Basacote® e 0% composto	0,723 a	0,630 a	0,0517 a	0,048 a	-0,421 c	1,18 b
ANOVA						
p-valor (não significativo se > 0,05)*	0,006	0,121	0,288	0,118	0,0004	0,0021
CV (%)	1,95	8,69	39,9	1,49	23,51	18,37

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de *Tukey* à 5% de significância.

Fonte: Dados do experimento.

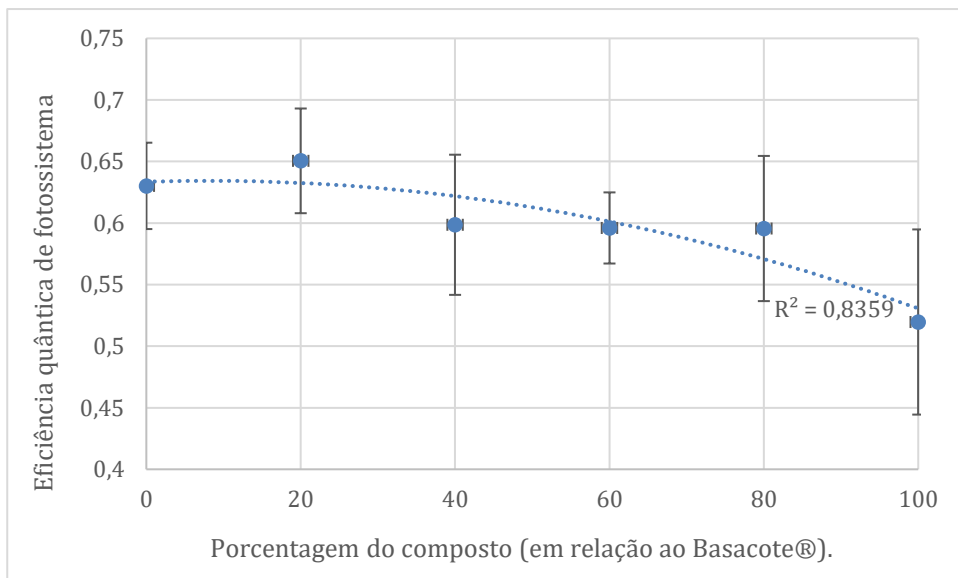
As Figuras 14 e 15 representam graficamente a eficiência de fotossistema 2 às 10hrs e as 11:20, respectivamente. Já as Figuras 16 e 17 representam a condutância estomática das plantas, as 10 horas e 11h20. E, as Figuras 18 e 19 retratam a diferença de temperatura (Delta T°C) entre a planta e o ambiente.

Figura 14 - Eficiência de fotossistema 2 (PhiPS2) às 10h.

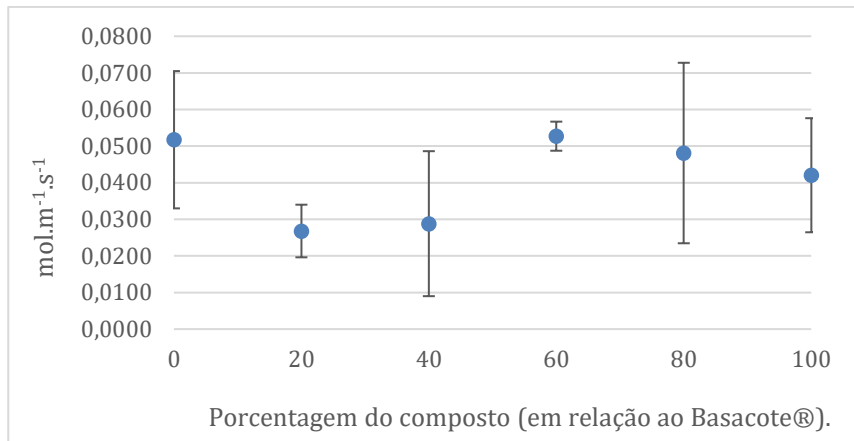


Fonte: Dados do experimento, 2025.

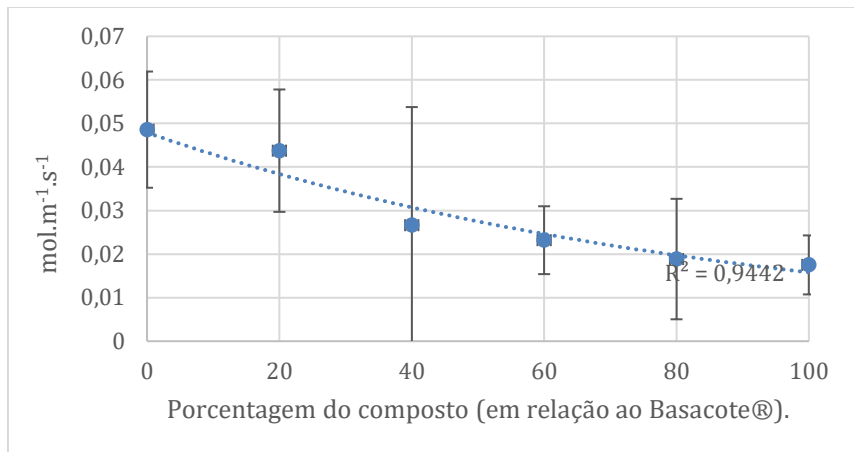
Figura 15 - Eficiência de fotossistema 2 (PhiPS2) às 11h20.



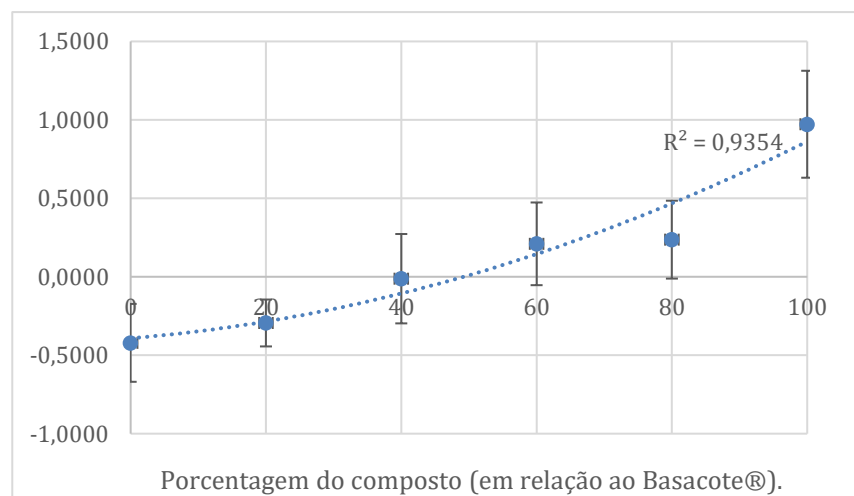
Fonte: Dados do experimento, 2025.

Figura 16 - Condutância estomática (GSW) às 10h.

Fonte: Dados do experimento, 2025.

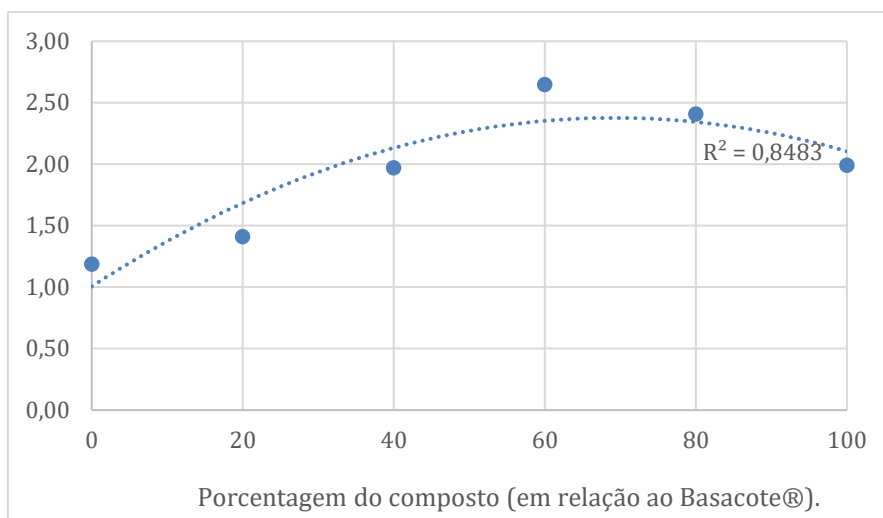
Figura 17 - Condutância estomática (GSW) às 11h20.

Fonte: Dados do experimento, 2025.

Figura 18 - Diferença entre temperatura da planta e ambiente (Delta T°C) às 10h.

Fonte: Dados do experimento, 2025.

Figura 19 - Diferença entre temperatura da planta e ambiente (Delta T°C) às 11h20.

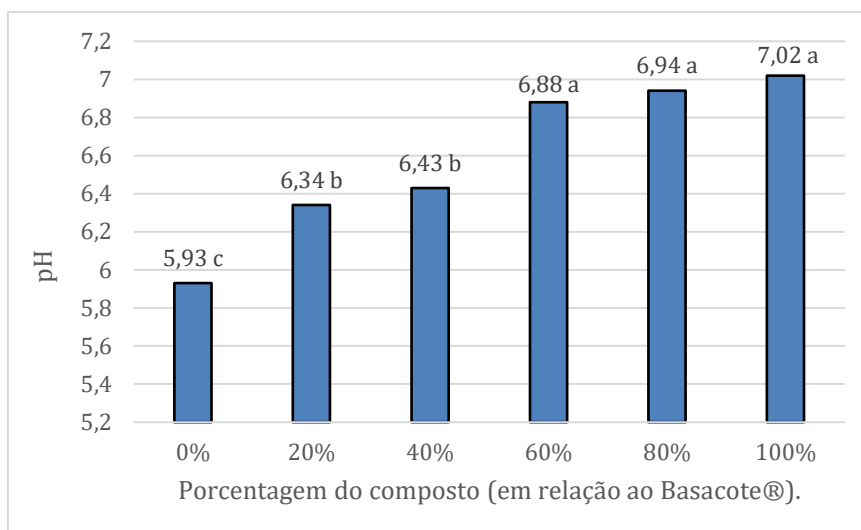


Fonte: Dados do experimento, 2025.

5.6. Condutividade elétrica (CE), pH e fosfato (mg/L) do substrato em solução

A análise do pH do substrato em solução (Figura 20) demonstrou uma tendência de elevação progressiva com o aumento das proporções do composto substituído em relação ao Basacote®. Inicialmente, no tratamento com 0% de composto, o pH foi de 5,93, classificando-se como mais ácido e significativamente diferente dos demais tratamentos. À medida que a porcentagem do composto aumenta, pode-se observar uma elevação consistente nos valores de pH. Os tratamentos com 20% e 40% de composto apresentaram valores intermediários, de 6,34 e 6,43, respectivamente, ambos estatisticamente semelhantes entre si. Já os tratamentos com 60%, 80% e 100% alcançaram os maiores médias de pH, sendo 6,88, 6,94 e 7,02, respectivamente, sem diferenças estatísticas entre si.

Figura 20 - pH do substrato em solução dos diferentes tratamentos com Basacote® e composto orgânico de lodo de esgoto tratado. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey à 5% de significância (não significativo se $> 0,05$).

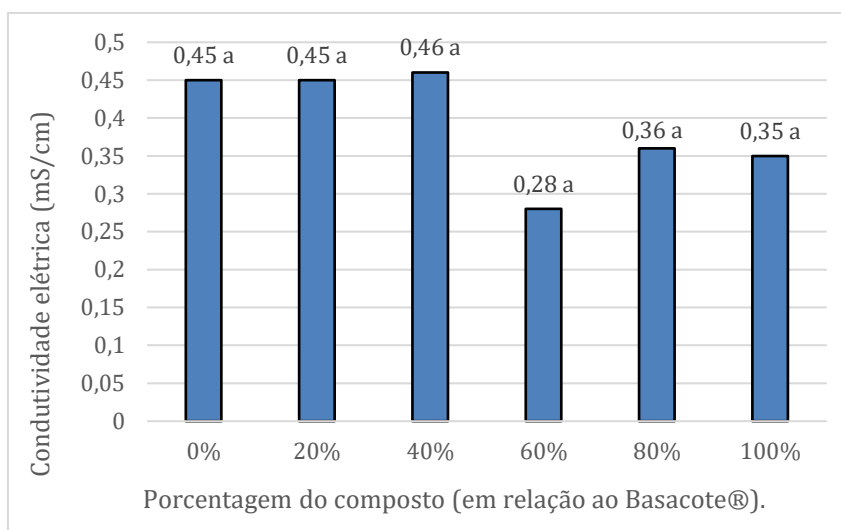


Fonte: Dados do experimento, 2025.

A Figura 21 representa os valores de condutividade elétrica (CE) do substrato em solução, medidos em função das diferentes porcentagens do composto utilizado em relação ao fertilizante Basacote®. Os tratamentos com 0%, 20% e 40% do composto apresentaram valores similares de CE, em torno de 0,45 mS/cm, indicando que o aumento na proporção do composto até esse nível não causou alterações significativas na condutividade elétrica do substrato.

A partir do tratamento com 60% do composto, houve uma redução acentuada no valor da CE, atingindo 0,28 mS/cm. Nos tratamentos com 80% e 100%, os valores de CE apresentaram uma leve recuperação, chegando a 0,36 mS/cm e 0,35 mS/cm, respectivamente.

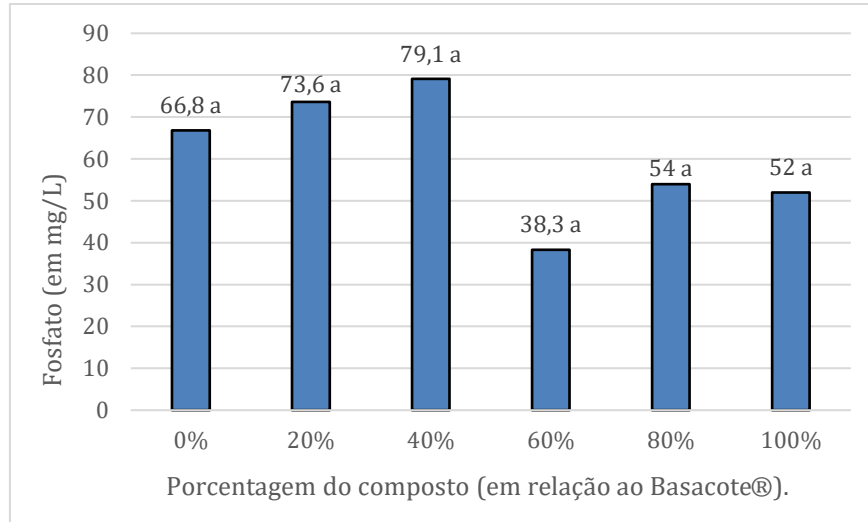
Figura 21 - Condutividade elétrica (CE) do substrato em solução dos diferentes tratamentos com Basacote® e composto de lodo de esgoto biotransformado. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey à 5% de significância (não significância se $> 0,05$).



Fonte: Dados do experimento, 2025.

A Figura 22 apresenta os valores de fósforo (mg/L) em função das diferentes proporções do composto em relação ao fertilizante Basacote®. Os tratamentos com 0%, 20% e 40% do composto apresentaram valores crescentes de fósforo, com 66,8 mg/L, 73,6 mg/L e 79,1 mg/L, respectivamente, indicando um aumento progressivo na concentração de fósforo. Contudo, a partir do tratamento com 60%, observa-se uma queda acentuada nos valores, atingindo 38,3 mg/L. Nos tratamentos com 80% e 100% do composto, os valores de fósforo voltaram a aumentar ligeiramente, para 54 mg/L e 52 mg/L, respectivamente. Apesar das diferenças nos valores observados entre os tratamentos, não foram observadas diferenças estatísticas significativas.

Figura 22 - Fosfato (em mg/L) do substrato em solução dos diferentes tratamentos com Basacote® e composto de lodo de esgoto biotransformado. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey à 5% de significância (não significativo se $> 0,05$).



Fonte: Dados do experimento, 2025.

A Figura 23 abaixo representa as soluções obtidas a partir da filtragem dos substratos imersos em água destilada. Pode-se observar a formação de um gradiente entre os tratamentos com composto e fertilizante mineral.

Figura 23 - Soluções dos substratos imersos em água submetidos a diferentes doses de fertilizante mineral e composto. Da esquerda para direita: 0% Basacote® e 100% composto; 20% Basacote® e 80% composto; 40% Basacote® e 60% composto; 60% Basacote® e 40% composto; 80% Basacote® e 20% composto; 100% Basacote® e 0% composto.



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

5.7. Macronutrientes, micronutrientes e metais pesados

A avaliação dos nutrientes das plantas de *Philodendron* submetidas à diferentes proporções de Basacote® e composto orgânico foi realizada apenas sob efeito comparativo, considerando que para cada tratamento houve apenas uma amostra composta analisada.

Quanto aos macronutrientes (Tabela 12), os valores de nitrogênio (N) aumentam progressivamente conforme a porcentagem de fertilizante mineral aumenta, alcançando um valor máximo de 20,5 g.kg⁻¹ para o tratamento com 100% de Basacote®. Nos tratamentos com maior proporção de composto (100% e 80%), a quantidade de nitrogênio é menor, com valor iguais a 9,3 g.kg⁻¹ e 13,2 g.kg⁻¹, respectivamente.

O fósforo (P) apresenta um cenário inversamente proporcional ao aumento das proporções de fertilizante mineral. À medida que as doses de fertilizante substituem as doses de composto, os valores de P diminuem. Em contrapartida, quanto maior a dose de composto, maiores são os valores de P. O tratamento com 100% do composto apresentou o maior valor de P, igual a 7,8 g.kg⁻¹. Já o tratamento com 100% de Basacote® apresentou o menor valor, igual a 3,0 g.kg⁻¹. Para o potássio (K), este apresenta variações ao longo dos tratamentos, com valor mais elevado no tratamento com 100% composto (31,4 g.kg⁻¹) e reduz nos tratamentos intermediários, como 80% (23,1 g.kg⁻¹) e 20% (23,8 g.kg⁻¹) do composto.

Os valores de cálcio (Ca) são maiores nos tratamentos com maior proporção de composto, atingindo 15,0 g.kg⁻¹ em 100% composto, e a substituição gradual pelo Basacote® reduz os teores de Ca, alcançando o menor valor de 11,3 g.kg⁻¹ em 80% Basacote®. O magnésio (Mg) se mantém relativamente estável ao longo dos tratamentos, variando entre 3,9 g.kg⁻¹ (80% Basacote®) e 4,5 g.kg⁻¹ (20% Basacote®). Quanto ao enxofre (S), este é mais elevado nos tratamentos com maior proporção de composto, atingindo 3,5 g.kg⁻¹ em 80% do composto Basacote® e reduzindo para 2,6 g.kg⁻¹ em 100% Basacote®.

Tabela 12 - Análise foliar de macronutrientes ao final do experimento das plantas de *Philodendron* “Pink Princess” submetidas aos tratamentos com Basacote® e composto de lodo de esgoto biotransformado. Valor de pH, CE e fosfato (PO_4^{3-}) a título de comparação.

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg	S	pH	CE	PO_4^{3-}
	em g.kg ⁻¹							mS/cm	mg.L ⁻¹
0% Basacote® e 100% composto	9,3	7,8	31,4	15,0	4,2	3,2	7,02	0,35	52
20% Basacote® e 80% composto	13,2	7,1	23,1	14,1	4,5	3,5	6,94	0,36	54
40% Basacote® e 60% composto	14,7	5,3	25,8	14,3	4,3	3,3	6,88	0,28	38,3
60% Basacote® e 40% composto	18,7	6,2	28,4	14,0	4,1	3,4	6,43	0,46	79,1
80% Basacote® e 20% composto	19,6	4,4	23,8	11,3	3,9	2,7	6,34	0,45	73,6
100% Basacote® e 0% composto	20,5	3,0	23,2	12,0	4,1	2,6	5,93	0,45	66,8

Fonte: Laboratório de Análise de Substrato (IAC – Campinas), 2024.

Para os micronutrientes (Tabela 13), os níveis de boro (B) reduziram com o aumento da proporção de Basacote®, variando de 38,6 mg.kg⁻¹ no tratamento com 100% composto para 30,6 mg.kg⁻¹ no tratamento com 80% Basacote®. No entanto, houve um leve aumento na quantidade de B no tratamento 100% Basacote® (33,9 mg.kg⁻¹). Para o cobre (Cu), os valores apresentaram pequena variação, mantendo-se entre 8,1 mg.kg⁻¹ (40% Basacote®) e 11,6 mg.kg⁻¹ (0% Basacote®).

Quanto ao ferro (Fe), este apresentou um padrão decrescente acentuado, com valores que caíram de 327,2 mg.kg⁻¹ (100% do composto) para 64,7 mg.kg⁻¹ (80% Basacote). Os valores de manganês (Mn) reduziram de forma menos acentuada, variando de 44,3 mg.kg⁻¹ (100% composto) para 37,9 mg.kg⁻¹ (100% Basacote®). E, para o zinco (Zn), com a diminuição das proporções de composto, houve diminuição contínua nos valores, variando de 16,9 mg.kg⁻¹ (80% composto) para 10,2 mg.kg⁻¹ (100% Basacote®). Já o sódio (Na), este demonstrou uma ligeira flutuação, sendo mais elevado no tratamento com 60% Basacote® (6,9 mg.kg⁻¹) e menor no tratamento 80% Basacote® (4,6 mg.kg⁻¹).

Tabela 13 - Análise foliar de micronutrientes ao final do experimento das plantas de *Philodendron* “Pink Princess” submetidas aos tratamentos com Basacote® e composto de lodo de esgoto biotransformado.

Tratamentos	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Na
	em mg.kg ⁻¹					
0% Basacote® e 100% composto	38,6	11,6	327,2	44,3	16,6	5,8
20% Basacote® e 80% composto	36,2	8,4	131,8	42,0	16,9	6,0
40% Basacote® e 60% composto	34,4	8,1	154,3	42,0	13,8	5,6
60% Basacote® e 40% composto	30,7	8,7	85,8	41,0	15,9	6,9
80% Basacote® e 20% composto	30,6	8,2	64,7	38,4	13,4	4,6
100% Basacote® e 0% composto	33,9	8,7	73,3	37,9	10,2	4,9

Fonte: Laboratório de Análise de Substrato (IAC – Campinas), 2024.

Por fim, quanto à análise de metais pesados (Tabela 14), ressalta-se o valor elevado de alumínio (709,3 mg.kg⁻¹) no tratamento com 100% do composto, com redução expressiva conforme a diminuição do mesmo ao longo dos tratamentos, com 57,8 mg.kg⁻¹ no tratamento com 100% do Basacote®. A concentração de cádmio (Cd) foi baixa em todos os tratamentos (<0,2 mg.kg⁻¹). O cromo (Cr) apresentou valores variáveis entre os tratamentos.

Não foram detectados teores mensuráveis de chumbo (Pb) (<0,01 mg.kg) em nenhum dos tratamentos. E, para o níquel (Ni), os valores também foram baixos, sendo que, até o tratamento com 60% do composto, houve um decréscimo na quantidade deste metal, e a partir do tratamento com 40% do composto, houve um aumento nas concentrações deste.

Tabela 14 - Análise foliar de metais pesados ao final do experimento das plantas de *Philodendron* “Pink Princess” submetidas aos tratamentos com Basacote® e composto de lodo de esgoto biotransformado.

Tratamentos	Al	Cd	Cr	Pb	Ni
	em mg.kg ⁻¹				
0% Basacote® e 100% composto	709,3	0,2	2,1	< 0,01	1,9
20% Basacote® e 80% composto	221,0	< 0,01	0,8	< 0,01	1,2
40% Basacote® e 60% composto	129,6	0,2	3,2	< 0,01	0,9
60% Basacote® e 40% composto	83,8	< 0,01	4,5	< 0,01	2,2
80% Basacote® e 20% composto	51,8	0,1	1,5	< 0,01	2,2
100% Basacote® e 0% composto	57,8	0,2	1,9	< 0,01	2,4

Fonte: Laboratório de Análise de Substrato (IAC – Campinas), 2024.

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1. Desenvolvimento vegetativo e teores de clorofila a, b e a+b

De acordo com os achados iniciais, onde todas as plantas apresentavam características homogêneas entre si, conforme dados apresentados da Tabela 6, pode-se observar que mesmo aos 45 dias de experimento (Tabela 7), ainda não foi possível observar diferenças substanciais entre as características avaliadas. No entanto, após 90 dias de experimento, pode-se notar que as plantas submetidas aos diferentes tratamentos com composto e fertilizante apresentaram diferenças significativas em seu desenvolvimento vegetativo.

Diante dos resultados da Tabela 8 (parâmetros avaliados no 90º dia de experimento), pode-se afirmar que há uma tendência inversamente proporcional no desenvolvimento das plantas de *Philodendron*, onde conforme as concentrações do composto de lodo de esgoto aumentam nos tratamentos, há diminuição na altura das plantas, bem como no comprimento da maior folha.

Lopes e colaboradores (2004) aferiram que no cultivo de crisântemo de vaso, variedade Range, submetido a diferentes doses de lodo de esgoto visando a nutrição de zinco (Zn), o tratamento com lodo na dose de 0,38 gL⁻¹ resultou em um incremento na produção. Além disso, doses de lodo menores que 1,5 gL⁻¹ proporcionaram bons resultados para o desenvolvimento vegetativo. Em concordância com o exposto, o

tratamento com 60% do composto (lodo na dose de $1,08 \text{ gL}^{-1}$) apresentou o melhor desempenho em termos de altura da planta e comprimento da maior folha, uma vez que as doses de $1,4 \text{ gL}^{-1}$ e $1,8 \text{ gL}^{-1}$ de lodo (80% e 100% do composto, respectivamente) apresentaram médias estatisticamente diferentes e menores.

Dessa forma, o uso do composto de lodo de esgoto biotransformado em substituições de 60% e em 40% do fertilizante mineral demonstrou ser uma alternativa promissora para a nutrição de plantas, proporcionando uma opção mais sustentável e economicamente viável. O composto de lodo de esgoto apresenta em sua composição alto teor de matéria orgânica (40%), favorecendo a retenção de umidade e a melhoria das propriedades físicas do substrato, fatores essenciais para o desenvolvimento radicular e a absorção de nutrientes.

Scheer *et al.* (2012), ao cultivar mudas de *Jasminum mesnyi* em diferentes doses de composto de lodo de esgoto intercaladas com doses de fertilizante mineral afirma que, para a altura da planta, a maior média foi obtida na proporção de 2:1 de composto e $2,7 \text{ gL}^{-1}$ de fertilizante. No presente estudo, no entanto, os tratamentos com dose de $2,4 \text{ gL}^{-1}$ de fertilizante (80% Basacote e 20% composto) e $3,0 \text{ gL}^{-1}$ (100% Basacote e 0% composto) apresentaram as menores médias quanto a altura da planta. Nesse sentido, as médias estatisticamente inferiores dos tratamentos com 80% e 100% de Basacote® nos parâmetros de altura das plantas e comprimento da maior folha podem estar relacionadas ao excesso de nutrientes, que por sua vez interferem diretamente no crescimento das plantas, causando sintomas como pouco vigor (Callegari *et al.*, 2012; Barros, 2020).

Quanto aos teores de clorofila a, b e total (a+b), os resultados obtidos no presente estudo contrastam com os de Martins e colaboradores (2018), que, em experimentos com milho cultivado em diferentes proporções de composto de lodo de esgoto e substrato comercial, observaram os maiores valores desses pigmentos no tratamento com maior proporção de composto de lodo (1:0), atingindo 22,86; 11,1 e 33,96 para clorofila a, b e total, respectivamente. Segundo os autores, esse resultado foi atribuído ao elevado teor de nitrogênio (N) disponível nesse tratamento ($23,96 \text{ g.kg}^{-1}$). No entanto, no presente trabalho, o tratamento com 100% do composto de lodo de esgoto apresentou menor média para todos os teores de clorofila (Cl.a = 30,0; Cl.b = 8,2 e Cl.a+b = 38,3). Esse resultado pode ser explicado pela menor concentração de

nitrogênio disponível no lodo de esgoto utilizado (3,87%) quando comparada a quantidade de nitrogênio presente no fertilizante mineral (16%) (Tabelas 3 e 4, respectivamente), evidenciado pela análise foliar do tratamento correspondente (Tabela 12, $N = 9,3 \text{ g.kg}^{-1}$), e por esse motivo, sabendo que este nutriente é considerado um componente estrutural da molécula de clorofila (Rangel *et al.*, 2022), os valores de clorofila para estes tratamentos são justificados.

Diferentemente de estudos que avaliam apenas o efeito do lodo de esgoto como fonte isolada de nutrientes, o presente experimento investigou sua substituição total e parcial por um fertilizante mineral. Essa abordagem permitiu uma análise mais condizente da realidade agrícola, em que fertilizantes minerais são amplamente utilizados, possibilitando avaliar o potencial do composto como alternativa viável. Assim, o estudo não se limitou a verificar os efeitos do lodo, mas buscou compreender sua aplicação prática como substituto parcial ou total de uma fonte convencional de nutrientes.

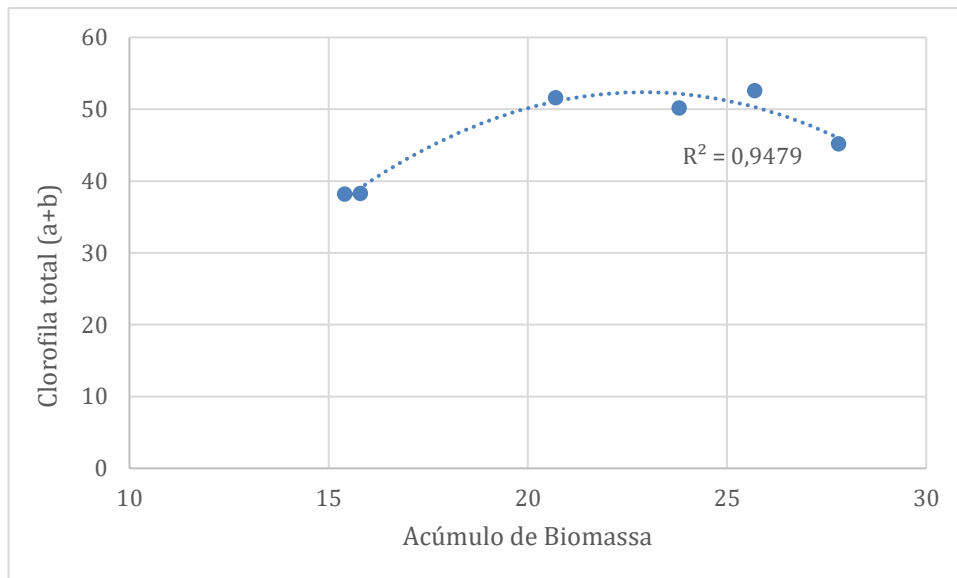
D'Avilla *et al.* (2016) também verificaram que, em cultivos de capim-limão, a adição crescente de composto de lodo de esgoto associado a resíduos vegetais resultou em maior produção de pigmentos como clorofila a, b e total, além de carotenoides, devido ao aumento da disponibilidade de nitrogênio. No entanto, no presente estudo, a menor disponibilidade desse macronutriente no lodo pode ter limitado a síntese de clorofila nos tratamentos com maior proporção do composto, reforçando a importância da comparação direta com a fertilização mineral na interpretação dos resultados.

Em relação aos teores de clorofila avaliados ao longo das 12 semanas de experimento, os tratamentos com 100% e 80% do composto apresentaram as maiores reduções nos teores ao longo do período experimental (Figuras 5, 6 e 7). De acordo com Oliveira (2020), a quantidade de clorofila está diretamente relacionada ao desempenho fotossintético das plantas. Assim, ainda que não tenha sido observada diferença significativa na massa fresca das plantas de *Philodendron* entre os tratamentos, a 5% de significância (Tabela 9), a análise de correlação entre os teores totais de clorofila (a+b) e o acúmulo de biomassa revelou uma relação não linear entre essas variáveis. O ajuste polinomial ($R^2 = 0,9479$) (Figura 24) indica que o acúmulo de biomassa foi maximizado dentro de uma faixa intermediária de teores de clorofila, sugerindo que teores muito altos ou muito baixos podem comprometer o crescimento da

planta.

Essa tendência pode ser observada nos tratamentos experimentais, em que os menores teores de clorofila total foram registrados nos tratamentos com 100% (38,3) e 80% de composto (38,2), que também apresentaram os menores valores de biomassa (15,8g e 15,4g, respectivamente). Já os maiores teores de clorofila foram observados nos tratamentos com 60% e 0% de composto (52,6 e 51,6), mas sem uma relação direta com o maior acúmulo de biomassa. O tratamento com 20% de composto registrou o maior acúmulo de biomassa (27,8 g). Esse resultado evidencia a importância do equilíbrio na disponibilidade de nutrientes para manter níveis adequados de clorofila e, conseqüentemente, favorecer a produção de biomassa.

Figura 24 - Correlação entre acúmulo de biomassa e teor de clorofila total (a+b).



Fonte: dados do experimento, 2025.

6.2. Análises Bioquímicas

A produção de radicais livres é um processo natural e contínuo nas plantas, desempenhando papéis fundamentais nas funções biológicas. Durante as atividades metabólicas, esses radicais atuam como intermediários na transferência de elétrons em diversas reações químicas, sendo cruciais para mecanismos celulares como sinalização e ativação de respostas adaptativas. Em quantidades equilibradas, sua geração não apenas sustenta a produção de ATP pela cadeia respiratória, mas também preserva o equilíbrio redox necessário para regular vias metabólicas e ativar genes associados ao metabolismo energético (Barbosa *et al.*, 2010; Barbosa *et al.*, 2014; Curvêlo *et al.*, 2013).

Contudo, esses radicais livres podem evoluir para espécies reativas de oxigênio (EROs) devido à redução do oxigênio molecular por adição de elétrons. Esse fenômeno ocorre em organelas como mitocôndrias, cloroplastos e peroxissomos, especialmente em situações de estresse. Nas mitocôndrias, por exemplo, cerca de 2% do oxigênio utilizado na cadeia transportadora de elétrons é desviado para formar o radical superóxido ($O_2^{\bullet-}$), que pode ser transformado em peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e, posteriormente, no radical hidroxila (OH^{\bullet}) pelas reações de Fenton e Haber-Weiss. Esses radicais e ROS participam de reações químicas que, em excesso, podem danificar lipídios, proteínas e DNA, desencadeando o estresse oxidativo e prejudicando funções celulares essenciais (Barbosa *et al.*, 2010; Barbosa *et al.*, 2014).

As enzimas associadas ao estresse oxidativo são indicadores importantes das respostas das plantas a condições adversas. Tais fatores podem induzir a produção exacerbada de EROs, como o superóxido ($O_2^{\bullet-}$), com baixa capacidade oxidativa; o peróxido de hidrogênio (H_2O_2), que pode atravessar membranas e causar danos ao DNA; e o radical hidroxila (OH^{\bullet}), altamente reativo, embora com curta difusão. Essas moléculas reativas são capazes de inibir a fixação de carbono no ciclo de Calvin e danificar o aparato fotossintético, comprometendo a fotossíntese (Rocha, 2014).

Diante desse cenário, os vegetais desenvolveram estratégias bioquímicas para minimizar os impactos causados pelo acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs). A atuação conjunta de enzimas antioxidantes é essencial nesse processo, pois elas fazem parte de um sistema diversificado de compostos que neutralizam os radicais livres, reduzindo os danos oxidativos. Esse mecanismo de defesa é crucial, visto que as plantas estão frequentemente sujeitas a estresses ambientais, como ataque de herbívoros, radiação excessiva, déficit hídrico, herbicidas e deficiências nutricionais, que intensificam a geração de EROs e podem comprometer seu crescimento, desenvolvimento e produtividade. Diante desse estresse, ocorre um aumento na síntese de antioxidantes e na atividade enzimática, permitindo que os níveis intracelulares de EROs sejam regulados e evitando danos celulares significativos (Silva *et al.*, 2016).

Para a quantificação de proteínas totais (Figura 9), é possível correlacionar os resultados obtidos com os tratamentos que apresentaram menores quantidades de nitrogênio (N). Dessa forma, conforme a dose do composto diminui, os valores de

nitrogênio e proteínas totais aumentam, confirmando uma relação inversamente proporcional entre doses de composto e quantificação de proteínas/nitrogênio. O nitrogênio (N) ocupa um lugar de extrema importância no metabolismo vegetal, onde todos os processos vitais nas plantas estão associados às proteínas, das quais o nitrogênio é um constituinte essencial (Leghari *et al.*, 2016). Lacerda e colaboradores (2020) descrevem o nitrogênio como um elemento essencial para os organismos vegetais, pois é indispensável na composição das moléculas de clorofila, bases nitrogenadas dos nucleotídeos, aminoácidos e, conseqüentemente, das proteínas, dentre as quais a Rubisco (ribulose 1,5-bifosfato carboxilase oxigenase) é considerada a proteína mais abundante e a principal enzima do processo de fotossíntese.

Nesse sentido, nos tratamentos que apresentaram menores valores de proteínas totais, é esperado que processos como a respiração, altamente dependente de proteínas, sejam impactados. A necessidade de complexos proteicos que transferem elétrons e geram ATP (Taiz *et al.*, 2017), bem como a fotossíntese, pode ser diretamente afetada. Por outro lado, a diminuição observada nos tratamentos com 80% e 100% de Basacote® pode sugerir que a alta concentração desse fertilizante tenha gerado um desequilíbrio metabólico, impactando negativamente a produção de proteínas.

Quanto às análises de atividade enzimática, apenas as enzimas GST (Glutathione S-Transferase) e Fenilalanina amônia-liase (PAL) apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos. Os resultados apresentados na Figura 10 sugerem que a maior atividade da GST nos tratamentos com 100% e 80% de composto pode estar associada a um possível estresse oxidativo causado pela presença do lodo bio-transformado nesses tratamentos, levando as plantas a ativarem mecanismos antioxidantes para mitigar os efeitos de compostos reativos ou metabólitos gerados pela aplicação do composto.

Além disso, outros fatores podem estar envolvidos nessa resposta, como a deficiência nutricional. Huang e outros autores (2004), observaram que, ao analisar plantas de arroz submetidas a deficiência de nitrogênio, a atividade das enzimas antioxidantes superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e peroxidase (POD) aumentou significativamente quando comparada as plantas controle. Chokshi e colaboradores (2016), com o objetivo de investigar o papel do estresse oxidativo devido à deficiência

de nitrogênio em microalgas, relatou o aumento nas atividades das enzimas antioxidantes SOD, CAT, POD e glutathione sob condições de deficiência de nitrogênio em microalgas, por exemplo. Desta forma, considerando que os tratamentos com 100% e 80% do composto apresentaram os menores teores de nitrogênio nas plantas, especialmente o primeiro, com $9,3 \text{ g.kg}^{-1}$ e $13,2 \text{ g.kg}^{-1}$ o segundo, os resultados do presente trabalho estão de acordo com as afirmações dos autores citados.

Por outro lado, a presença de metais pesados como o cobre (Cu) (Alves *et al.*, 2003), cádmio (Cd) e o alumínio (Al) (Manquián-Cerda *et al.*, 2018) podem também induzir a formação de espécies reativas de oxigênio, entre elas o radical superóxido (O_2^-), levando ao estresse oxidativo nas plantas e aumentando a atividade de enzimas antioxidantes. No caso do alumínio, foi relatado que concentrações na escala de micromolares na solução do solo podem inibir o alongamento das raízes, uma consequência que pode afetar a incorporação de água e nutrientes e aumentar a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs). Estima-se que o Al^{3+} induza estresse oxidativo devido à sua alta afinidade por ligantes com grupos fosfato e carboxílicos que possuem átomos de oxigênio doadores que se ligam à membrana fosfolipídica causando sua rigidez (Manquián-Cerda *et al.*, 2018). Nesse sentido, no tratamento com 100% do composto foi observado um elevado teor de alumínio ($709,3 \text{ mg.kg}^{-1}$) e o menor comparado aos demais tratamentos, corroborando as afirmações dos autores, uma vez que a atividade da enzima GST foi elevada especialmente neste tratamento.

Do mesmo modo, de acordo com a Figura 13, os tratamentos com 100% e 80% do composto apresentaram as maiores médias de atividade enzimática de Fenilalanina amônia-liase (PAL), possivelmente em resposta ao estresse oxidativo causado pela presença do lodo biotransformado. A atividade da PAL é altamente sensível ao estado fisiológico da planta, destacando sua relevância nos processos metabólicos (Dias *et al.*, 2015). O metabolismo dos fenilpropanoides tem na PAL uma enzima-chave, responsável por catalisar a conversão da fenilalanina em ácido transcinâmico, etapa inicial da biossíntese desses compostos. Além disso, a PAL desempenha um papel fundamental na oxidação de fenóis e está fortemente associada aos mecanismos de defesa vegetal (Coltro, 2012).

Adicionalmente, o nitrogênio (N) pode influenciar o crescimento e o desenvolvimento das plantas, regulando tanto o metabolismo primário quanto o secundário. Essa interação é mediada, em parte, pela PAL, que estabelece uma ligação entre as

vias metabólicas e explica a maior produção de fenóis observada em plantas expostas a condições que favorecem o aumento da atividade enzimática (Ahlawat *et al.*, 2024).

Ainda neste sentido, os fenóis são compostos bioativos amplamente reconhecidos por sua alta atividade antioxidante, desempenhando um papel crucial na proteção celular contra os efeitos prejudiciais das espécies reativas de oxigênio, frequentemente associadas ao estresse oxidativo e aos danos celulares subsequentes (Oliveira, 2020). Esses compostos, classificados como metabólitos secundários das plantas, possuem a capacidade de quelar íons metálicos e neutralizar radicais livres, contribuindo significativamente para a mitigação dos impactos do estresse oxidativo (Mendonça *et al.*, 2021). Dessa forma, pensando em possíveis estratégias de adaptação frente a diferentes fontes nutricionais dos quais as plantas foram submetidas, que poderiam causar desequilíbrio e gerando alta produção de compostos fenólicos, de acordo com a Tabela 10, não foi possível observar diferença estatística entre os tratamentos.

No entanto, é possível estabelecer uma correlação entre os tratamentos que apresentaram maiores níveis de fenóis totais e que, visualmente, manifestaram um desenvolvimento vegetativo inferior, como ilustrado na Figura 4. Os tratamentos com 100% composto (28,6 mg/g de fenóis totais) e 80% composto (28,9 mg/g de fenóis totais) apresentaram as maiores concentrações desse metabólito, o que pode estar associado à menor robustez das plantas nesses grupos. Essas concentrações elevadas de fenóis podem refletir um estado de estresse metabólico, possivelmente induzido por condições adversas proporcionadas pelo composto, como desequilíbrios na disponibilidade de nutrientes essenciais.

Nos tratamentos com maior proporção de Basacote® (60%, 80% e 100%), observou-se um desenvolvimento mais homogêneo e vigoroso das plantas, o que pode ser atribuído à liberação gradual e equilibrada de nutrientes essenciais pelo fertilizante. Essa condição nutricional mais estável pode ter reduzido o estresse metabólico das plantas, refletindo em menores concentrações de fenóis totais e em um aparato fotossintético mais eficiente. A menor produção de fenóis nesses tratamentos pode indicar que as plantas não precisaram ativar intensamente mecanismos de defesa antioxidante, uma vez que foram menos expostas a fatores estressantes.

Adicionalmente, o impacto dos fenóis no sistema radicular também é um aspecto relevante a ser considerado. Na Figura 4, é possível notar que os tratamentos

com maior proporção de composto apresentam raízes menos desenvolvidas e, aparentemente, com menor densidade. Esse fato pode ser atribuído à deficiência de nitrogênio, que é responsável pelo estímulo no desenvolvimento radicular (Hansel *et al.*, 2021).

Comparativamente, os valores de fenóis totais encontrados neste estudo permanecem dentro das faixas relatadas na literatura, como observado em diferentes culturas e condições experimentais (Nunes *et al.*, 2014; Oliveira, 2020). Essa variabilidade ressalta a importância de ajustar as fontes nutricionais de acordo com as necessidades específicas da planta e do sistema de cultivo, garantindo não apenas um desenvolvimento equilibrado, mas também a otimização dos mecanismos de defesa metabólica.

6.3. Condutância estomática (GSW), eficiência do fotossistema 2 (PhiPH2) e diferença entre temperatura da folha e ambiente (Delta T°C)

A fisiologia das plantas é fortemente influenciada por condições de estresse ambiental, visto que o aparelho fotossintético é altamente sensível a esses fatores (Moraes, 2011). Nesse contexto, pesquisas voltadas à fisiologia vegetal desempenham papel relevante no avanço científico e tecnológico, fornecendo subsídios para o entendimento das respostas das plantas às adversidades (Ferraz *et al.*, 2014). A eficiência do fotossistema II, elemento chave no processo de fotossíntese, é particularmente impactada pelo estresse ambiental, sendo que suas emissões de clorofila α estão diretamente relacionadas ao estado funcional desse sistema (Marques *et al.*, 2020).

Em situações de estresse ocorre uma diminuição na eficiência quântica potencial do fotossistema II, refletindo alterações fisiológicas significativas (Marques *et al.*, 2020). Além disso, também interfere na capacidade fotossintética das plantas, tanto de forma direta, ao comprometer as reações bioquímicas, quanto indiretamente, por meio do fechamento estomático, estratégia frequentemente observada para minimizar a perda de água, por exemplo (Campelo *et al.*, 2015). A diferença entre a temperatura da folha e o ambiente é, portanto, um indicador relevante, pois reflete o equilíbrio entre a abertura estomática, a transpiração e a capacidade de dissipação de calor, evidenciando as respostas das plantas aos fatores de estresse.

As Figuras 14 e 15 representam graficamente a eficiência de fotossistema 2

às 10hrs e as 11h20, respectivamente. As curvas ajustadas apresentam um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9733 (10hrs) e 0,8359 (11h20) indicando um ajuste do modelo aos dados experimentais. A curva apresenta uma tendência decrescente conforme aumenta a porcentagem do composto aplicado, com uma redução mais pronunciada na eficiência quântica a partir de 60% de composto. Este comportamento pode indicar que, em maiores proporções do composto, há impactos negativos sobre a eficiência do fotossistema II, provavelmente relacionados a fatores como desequilíbrios nutricionais ou efeitos adversos do composto sobre a fisiologia fotossintética.

Valores mais altos de PhiPS2 sugerem um sistema fotossintético mais eficiente e funcional. A redução observada na eficiência, especialmente nos tratamentos com maior proporção de composto, pode estar associada a fatores como estresse fisiológico ou presença de componentes que interferem na cadeia de transporte de elétrons, como metais pesados ou desequilíbrios na disponibilidade de macronutrientes essenciais. Em tratamentos com 100% de composto, a eficiência é significativamente menor. Isso pode estar relacionado à menor disponibilidade de nutrientes críticos como nitrogênio (N), essencial para manter a funcionalidade das proteínas associadas à fotossíntese. O estado nutricional da planta pode alterar sua capacidade fotossintética, uma vez que em especial o nitrogênio (N), que apresenta função estrutural na planta, encontra-se intimamente ligado à eficiência de carboxilação da enzima rubisco, por exemplo (Camilli, 2007).

A fotossíntese, por sua vez, é um processo central para a vida, responsável pela conversão da energia luminosa em energia química. Esse mecanismo ocorre nos fotossistemas I (PSI) e II (PSII), onde a energia luminosa absorvida pelos pigmentos é transformada em energia eletrônica e utilizada na síntese de NADPH e ATP, moléculas essenciais para a fixação de carbono. A regulação desse processo depende da ação coordenada de quatro principais complexos proteicos: PSI, PSII, complexo citocromo b6f e ATP sintase, que garantem a transferência e o armazenamento de energia durante a fotossíntese (Mu; Chen, 2021).

Nesse sentido, o nitrogênio (N) está diretamente relacionado ao funcionamento do aparato fotossintético, sendo um componente essencial da clorofila e de diversas enzimas envolvidas na assimilação de CO_2 . A disponibilidade de nitrogênio influencia diretamente o conteúdo de clorofila e a eficiência do uso da energia lumi-

nosa, sendo que em condições de deficiência de N, observa-se uma redução significativa na fotossíntese, comprometendo o rendimento quântico da fixação de CO₂ e afetando negativamente a fotoquímica do PSII. Esse efeito se reflete na diminuição da eficiência da captura de energia de excitação pelos centros de reação do PSII, reduzindo a capacidade de transporte de elétrons e, conseqüentemente, a produção de ATP e NADPH necessários para a assimilação de carbono, influenciando negativamente no metabolismo vegetal (Lu; Zhang, 2000).

Apesar de não haver diferença estatística entre os tratamentos para este parâmetro, as Figuras 16 e 17 representam graficamente a condutância estomática das plantas submetidas aos tratamentos com fertilizante mineral e composto. Com base nos gráficos das 10 horas e das 11h20, podemos observar que o comportamento da condutância em relação aos tratamentos apresenta algumas diferenças, possivelmente influenciadas pelas condições climáticas.

Às 10 horas (Figura 16), não houve um padrão claro de diminuição ou aumento da condutância estomática em função da proporção de Basacote® e composto, e isso pode ser explicado pela menor intensidade luminosa e temperatura mais amena, condições que reduzem a demanda de transpiração das plantas e, conseqüentemente, o controle estomático. Já às 11h20 (Figura 17), a curva ajustada mostra um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9442, e a tendência decrescente observada no gráfico sugere que, à medida que aumenta a proporção do composto no tratamento, ocorre uma redução na condutância estomática das plantas. Esse comportamento pode estar relacionado a um impacto fisiológico adverso causado por maiores proporções do composto, afetando a abertura estomática e, conseqüentemente, a troca gasosa. A condutância estomática é um parâmetro de extrema importância na regulação da fotossíntese e na transpiração, já que, baixas correlações entre condutância estomática e fotossíntese podem indicar ausência de uniformidade na abertura dos estômatos na superfície da folha (Costa; Marengo, 2007).

Quanto aos gráficos das avaliações de diferença entre temperatura da folha e ambiente ($\Delta T^{\circ}\text{C}$) (Figuras 18 e 19) em dois horários distintos evidenciam o impacto das diferentes proporções do composto orgânico em substituição ao Basacote® no microclima foliar. No horário das 10h (Figura 18) observa-se uma tendência linear de aumento no $\Delta T^{\circ}\text{C}$ à medida que se eleva a porcentagem do composto. Em

concentrações de 0% a 20% de composto, os valores de delta foram negativos, indicando que as folhas estavam mais frescas que o ambiente, possivelmente devido a uma maior eficiência de transpiração. Já em concentrações acima de 60% do composto, os valores de delta passam a ser positivos, indicando uma elevação da temperatura foliar em relação ao ambiente, o que pode estar relacionado a limitações na condutância estomática e menor capacidade de dissipação de calor pelas folhas, indicando maior transpiração das plantas nesses tratamentos.

No período das 11h20 (Figura 19), o comportamento do Delta T°C apresentou uma relação não linear, com um formato parabólico ($R^2 = 0,8483$). Inicialmente, os valores de delta aumentaram, atingindo um pico próximo a 60% de substituição, e posteriormente reduziu. O maior Delta T°C em torno de 60% do composto sugere que, nesse nível, a capacidade das plantas de dissipar calor foi mais impactada, possivelmente devido ao balanço desfavorável entre alta radiação solar e a resposta fisiológica das plantas. Em 100% de substituição, o $\Delta T^\circ C$ apresentou uma leve redução, o que pode indicar adaptações em condições de altas temperaturas, embora a diferença de temperatura ainda seja alta em relação à temperatura do ambiente, indicando um leve aumento de estresse térmico ou maior atividade metabólica.

Nesse sentido, a substituição parcial da fertilização mineral por 60% e 40% do composto de lodo de esgoto biotransformado demonstrou ser uma estratégia eficiente para manter o desempenho fisiológico das plantas. A eficiência do fotossistema II (PhPS2) foi preservada nesses tratamentos, o que indica que a capacidade das plantas de converter energia luminosa em energia química não foi comprometida. Esse aspecto é essencial para o crescimento e desenvolvimento vegetal, uma vez que a fotossíntese é o processo central responsável pela produção de biomassa.

Além disso, a manutenção da condutância estomática (GSW) sugere que as plantas não enfrentaram restrições severas nas trocas gasosas, permitindo um bom controle da absorção de CO_2 e da transpiração. Esse equilíbrio é crucial para evitar estresses hídricos e garantir a regulação térmica da folha, como evidenciado pela diferença de temperatura entre a planta e o ambiente. Com a substituição parcial, a planta conseguiu manter um estado fisiológico adequado, evitando perdas excessivas de água e garantindo um desenvolvimento saudável.

6.4. Condutividade elétrica, pH e fosfato

Os parâmetros de pH e condutividade elétrica (CE) do substrato são atributos químicos determinantes para o desenvolvimento vegetal, bem como para os processos fisiológicos das plantas (Ludwig *et al.*, 2020). O pH atua diretamente na disponibilidade de nutrientes essenciais, enquanto a CE permite estimar a concentração de sais solúveis presentes no meio de cultivo (Ludwig *et al.*, 2015).

A faixa de pH varia de acordo com os diferentes tipos de solo para o cultivo das plantas, em substratos constituídos por solos de base mineral, a maior disponibilidade de nutrientes está entre 6 e 7, já em substratos compostos de base orgânica, entre 5,2 e 5,5 (Schmitz; Souza; Kämpf, 2002). No entanto, especialmente para o cultivo de flores e plantas ornamentais, a faixa de pH deve estar entre 5 e 6,5 (Schafer; Souza; Fior, 2015).

Os resultados obtidos pelo presente trabalho estão de acordo com os achados de Carmo e Lambais (2013), que ao testarem diferentes doses aplicadas de lodo de esgoto em solos argilosos e arenosos, os valores de pH mantiveram-se acima de 6,0, além disso, observaram um aumento crescente nos valores conforme a dose aplicada de lodo também aumentava, em ambos os tipos de solo. O mesmo foi observado por Ricci *et al.* (2010) onde os autores indicaram que a adição do composto de lodo de esgoto conferiu um aumento no pH do solo, em decorrência a reações alcalinas do nitrogênio, ou seja, referente aos processos associados a transformação do nitrogênio. Um exemplo é a mineralização do N presente no lodo de esgoto, que pode ocasionar a presença de altas quantidades de $N-NH_4^+$, inibindo o processo de nitrificação (Carmo e Lambais, 2013), que por sua vez não converterá o amônio em nitrito e nitrato, e isso pode acarretar um aumento do pH do solo, já que a conversão de amônio a nitrato diminui o pH (Kiehl, 1972).

Mediante a Instrução Normativa SDA/MAPA de 25/2009 (Brasil, 2009), que apresenta especificações técnicas para fertilizantes orgânicos, o valor mínimo de pH exigido pela legislação para comercialização é no mínimo 6. Dessa forma, pode-se afirmar que todos os tratamentos onde o composto de lodo de esgoto está presente apresentam-se dentro da normativa, e apenas o tratamento com ausência do composto (100% de Basacote®) apresentou pH inferior (5,93), no entanto, ainda está dentro da faixa de pH para o cultivo de plantas ornamentais.

Quanto à faixa adequada de condutividade elétrica, de acordo com Padovani

(2006), são valores entre 2,0 e 3,5 dS m⁻¹, não excedendo valores de 4,0 dS m⁻¹. A condutividade é um indicador da concentração de sais ionizados na solução, e permite estimar a salinidade do substrato. Nesse sentido, valores altos de salinidade podem causar danos às raízes, dificultando a absorção de água e nutrientes (Santos, 2014). Apesar dos trabalhos realizados por Carmo e Lambais (2013), que constatam um aumento significativo nos valores de CE mediante o aumento das doses de lodo no solo, os resultados do presente trabalho corroboram com os achados por Boeira *et al.* (2002), que não encontraram variação nos valores de condutividade elétrica diante do aumento nas doses de lodo.

Analisando a quantidade de fósforo sob efeito comparativo às demais variáveis avaliadas, os resultados evidenciam que a concentração de fósforo em solução apresenta uma relação direta com a condutividade elétrica (CE) do substrato. Observa-se que o pico de fósforo em 40% do composto coincide com os maiores valores de CE, enquanto a redução da concentração de fósforo em níveis mais elevados do composto (60–100%) é acompanhada por uma diminuição significativa na CE. Isso indica que a disponibilidade de fósforo está associada à presença de sais solúveis no meio, os quais contribuem diretamente para a condutividade elétrica.

Adicionalmente, a relação entre fósforo e pH sugere que o aumento da alcalinidade do substrato, promovido pela maior proporção do composto, e o lodo apresenta valor de pH na faixa de 7, influencia a disponibilidade de fósforo em solução. Em ambientes alcalinos, o fósforo tende a se precipitar como fosfatos insolúveis, particularmente de cálcio, magnésio ou ferro (Fonseca, 1977), o que explica a redução observada na concentração de fósforo em solução, apesar do aumento progressivo no pH. Esses resultados reforçam a interação entre os parâmetros químicos do substrato e o comportamento do fósforo, impactando diretamente sua disponibilidade no sistema.

6.5. Macronutrientes, micronutrientes e metais pesados

De acordo com a tabela disponibilizada pelo Boletim 100 (2022) (Tabela 15), que fornece as faixas de teores de nutrientes considerados adequados para espécies ornamentais, e tomando como base o Antúrio (família Araceae), mesma família da espécie *Philodendron*, pode-se afirmar que para o nitrogênio (N), os tratamentos com 60% Basacote® e 40% composto (18,7g.kg), 80% Basacote® e 20% composto (19,6kg) e 100% Basacote® e 0% composto (20,5g.kg) estão dentro da faixa colocada

como adequada (16-30 g.kg⁻¹) para o bom desenvolvimento das plantas de *Philodendron*. O fósforo (P), cuja faixa está entre 2,0-7,0g.kg, contempla os teores obtidos pela análise foliar de *Philodendron* (menor teor igual a 3,0g.kg e maior teor igual a 7,8). Para o potássio (K), os valores obtidos também estão dentro da faixa esperada.

O cálcio (Ca), apresenta valores um pouco acima do intervalo adequado, indo de 12,0 g.kg⁻¹ à 15,0 g.kg⁻¹. O magnésio (Mg) está abaixo do valor mínimo esperado (5-10g.kg⁻¹), e para o enxofre (S), os valores encontrados estão de acordo.

Tabela 15 - Faixa de teores de nutrientes considerados adequados para Antúrio.

N	P	K	Ca	Mg	S
g.kg ⁻¹					
16 -30	2,0 -7,0	10 -35	10 -12	5-10	1,6 -7,5
B	Cu	Fe	Mn	Zn	
mg.kg ⁻¹					
25 -75	6-30	5 -300	50 -200	25 -100	

Fonte: Boletim 100, 2022.

Um ponto importante a destacar é que, diferentemente dos achados por Gomes, Nascimento e Biondi (2007) e Nascimento *et al.* (2004), que constataram uma relação diretamente proporcional entre o aumento das doses de lodo com um aumento nos teores de N nas folhas de milho e feijão, no presente trabalho pode-se afirmar que o aumento das doses do composto de lodo causou o efeito contrário nas doses de N. O mesmo foi observado por Maia (2017), onde os teores de N nas folhas de abacaxizeiro diminuíram conforme as doses de lodo de esgoto aumentavam (maior dose de lodo = 1,23 dag.kg⁻¹).

Além disso, os dados apresentados destacam a importância das relações entre cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) no manejo nutricional. A relação ideal entre Ca e Mg, na proporção de três e cinco (Vieira-Junior, 2006), é crucial para o equilíbrio nutricional, pois influencia diretamente a absorção de potássio pelas plantas. O magnésio é fundamental para processos metabólicos e fotossintéticos, enquanto o cálcio desempenha papel estrutural e na sinalização celular (Lange *et al.*, 2021). Essa relação é importante devido a competição entre cálcio e magnésio pelos sítios de adsorção no solo, o que pode afetar o desenvolvimento das plantas. O cálcio apresenta

maior preferência em relação ao magnésio no complexo de troca do solo, fazendo com que haja competição pelos sítios de adsorção no solo e na absorção pelas raízes. Como consequência, a presença excessiva de um pode prejudicar os processos de adsorção e absorção do outro (Salvador *et al.*, 2011). Essa relação é importante porque concentrações desbalanceadas podem interferir na absorção de outros cátions, como o potássio.

Os resultados apresentados na Tabela 12 permitem avaliar os efeitos das diferentes proporções do composto e do fertilizante mineral na relação entre cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K). A relação Ca:Mg, que idealmente varia de 3 a 5, mostrou-se adequada nos 4 primeiros tratamentos. Essas amostras apresentaram relações entre 3,13 e 3,57, indicando um equilíbrio nutricional favorável. Por outro lado, os tratamentos com 20% composto e 80% fertilizante mineral e 100% fertilizante mineral exibiram relações Ca:Mg abaixo do recomendado (2,90 e 2,93), sugerindo um aumento relativo do magnésio em relação ao cálcio. Salvador e outros autores (2011) afirmam que, quanto maior a relação Ca:Mg, maior será o teor foliar de cálcio, por outro lado, quanto menor a relação entre Ca:Mg, maior será o teor foliar de magnésio.

As relações K:Ca e K:Mg também variaram de acordo com as proporções do composto e do fertilizante. No tratamento com 100% composto, o maior teor de potássio foi observado, resultando na relação K:Mg mais elevada (7,48), o que pode indicar um desbalanceamento potencial na absorção de cálcio e magnésio. Conforme a proporção de fertilizante mineral aumentou, os teores de potássio diminuíram, resultando em relações K:Ca e K:Mg mais equilibradas nas amostras com maior participação do fertilizante.

Quanto aos micronutrientes, de acordo com a Tabela 15, os teores de boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe) e manganês (Mn), estão dentro da faixa adequada para o desenvolvimento das plantas. Já o zinco (Zn), com valores entre 10,2 e 16,6 mg.kg⁻¹ estão abaixo da faixa de 25-100 mg.kg⁻¹. Chaves e colaboradores (2010) afirma que solos com teores de Zn abaixo de 10 a 20 mg.kg⁻¹ são considerados deficientes, já Silva e outros autores (2007) descreve que uma planta com teores de Zn abaixo de 17 mg.kg⁻¹ apresenta deficiência deste micronutriente. O zinco é componente de diversos sistemas enzimáticos que controlam diversas atividades do metabolismo das plantas, sendo parte específica do metabolismo de proteínas e necessário na formação de auxinas, que são hormônios de crescimento (Abranches *et al.*, 2009).

Por fim, quanto aos metais pesados, de acordo com Riveros (2024), do qual quantificou as concentrações de metais no lodo de esgoto in natura, do qual é fonte do presente trabalho experimental, e comparou com as concentrações máximas permitidas pela resolução CONAMA nº498, de 19 de agosto de 2020 (Tabela 16), pode-se afirmar que as concentrações de cádmio (Cd), que variam de <0,01 a 0,2 mg.kg⁻¹, de cromo (Cr), que variam de 0,8 a 4,5 mg.kg⁻¹, chumbo (Pb), com valores abaixo de 0,01 mg.kg⁻¹ e níquel (Ni), variando de 0,9 a 2,4 mg.kg⁻¹ presentes nas folhas de *Philodendron* estão abaixo das concentrações máximas, ainda considerando que o lodo estava presente em 20% de todo o composto, corroborando para que não houvesse altas quantidades de metais pesados.

Tabela 16 - Valores máximos permitidos de substâncias químicas no biossólido a ser destinado para uso, em solos.

Substâncias químicas	Valor Máximo permitido no biossólido (mg.kg ⁻¹)	
	Classe 1	Classe 2
Cádmio (Cd)	39	85
Cromo (Cr)	1.000	3.000
Chumbo (Pb)	300	840
Níquel (Ni)	420	420

Fonte: Brasil, 2020.

Por último, para o alumínio (Al), sabe-se que em solos com pH ácido (abaixo de 5,0), este elemento encontra-se em elevadas concentrações (Miguel *et al.*, 2010). No entanto, as plantas submetidas ao tratamento com 100% de Basacote®, que apresentou valor de pH do substrato igual a 5,93, sendo este mais próximo da faixa de pH ácido, apresentaram segundo menor valor de alumínio (57,8 mg.kg⁻¹). E, as plantas submetidas ao tratamento com 100% do Composto, que por sua vez apresentaram valores de pH do substrato na faixa de 7,0, foram aquelas que apresentaram aproximadamente 12x mais alumínio em seu tecido vegetal (709,3 mg.kg⁻¹).

Desta forma, diferentemente do esperado para solos neutros ou alcalinos, onde a tendência é de que em solos com pH na faixa citada anteriormente, a solubilidade do alumínio diminua significativamente, tornando-o menos disponível ou praticamente indisponível para as plantas (Cunha *et al.*, 2015), uma hipótese para este fato

é que a alta concentração de alumínio observada nas plantas do tratamento com 100% do composto possa estar associada à forma química predominante do elemento no substrato ou à presença de complexos solúveis que favoreceram sua absorção. Em sistemas com matéria orgânica elevada, como no composto de lodo de esgoto, o alumínio pode se complexar com ácidos orgânicos, aumentando sua mobilidade e disponibilidade para absorção radicular, mesmo em condições de pH neutro.

6.6. Economia de fertilizantes pelo uso do composto de lodo de esgoto e impactos na redução de descartes ambientais

A utilização do lodo de esgoto como fertilizante tem se mostrado uma alternativa viável e eficiente para suprir as necessidades nutricionais das plantas, podendo apresentar desempenho equivalente ou até superior ao da adubação mineral convencional. O emprego desse resíduo orgânico não apenas promove ganhos em produtividade e redução de custos com insumos químicos, mas também oferece uma destinação ambientalmente adequada para um resíduo urbano que, de outra forma, poderia representar danos ambientais significativos (Pinotti *et al.*, 2024).

Dentre as inovações voltadas para a sustentabilidade no agronegócio, a utilização do lodo de esgoto destaca-se pelo seu potencial de reduzir os custos de produção, já que, quando aplicado em taxas agronômicas adequadas, diminui a necessidade de fertilizantes minerais e corretivos de acidez do solo. Estudos indicam que essa prática pode resultar em uma economia média de R\$ 443,28 por hectare, tornando-se uma solução economicamente viável para os agricultores (Zavelinski; Nascimento; Mendonça, 2022). Além do aspecto econômico, o reaproveitamento desse resíduo também agrega valor social, promovendo a inclusão de novas tecnologias sustentáveis na produção agrícola.

No contexto da agricultura familiar, o uso do lodo de esgoto pode ser particularmente vantajoso, pois representa uma alternativa acessível aos fertilizantes químicos industrializados. A Resolução nº 375 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA, 2006) regulamenta o uso desse resíduo na agricultura, destacando tanto os benefícios econômicos quanto as implicações ambientais positivas dessa prática (Zavelinski; Nascimento; Mendonça, 2022). Além de reduzir os custos para os agricultores, a destinação do lodo de esgoto para uso agrícola contribui para a gestão eficiente de resíduos urbanos, minimizando a disposição inadequada em aterros sanitários

ou outras formas de descarte prejudiciais ao meio ambiente.

A destinação correta dos resíduos oriundos das estações de tratamento de esgoto (ETEs) é um desafio ambiental e logístico. Atualmente, grande parte desse material tem como destinação final a incineração ou o descarte em aterros sanitários, sendo esta a opção mais comum. No entanto, essas práticas apresentam custos elevados e riscos ambientais, como a emissão de poluentes e a disseminação de agentes patogênicos (Nobrega; Pontes; Santiago, 2017). Diante desse cenário, a reutilização do lodo na agricultura surge como uma alternativa mais sustentável, pois reduz significativamente os impactos ambientais e proporciona uma opção economicamente atrativa para os produtores.

A reciclagem de nutrientes é um dos princípios fundamentais da gestão agrícola sustentável. A incorporação do lodo de esgoto ao solo, além de mitigar os impactos ambientais do descarte inadequado, contribui para o fornecimento de nutrientes essenciais às plantas, como nitrogênio, fósforo e potássio. Estudos apontam que o uso desse material pode reduzir em até 60% a necessidade de fertilizantes minerais, destacando-se como uma estratégia promissora para a redução da dependência de insumos químicos (Rodrigues, 2023). No presente trabalho, a substituição parcial do fertilizante mineral utilizando até 60% do composto de lodo de esgoto biotransformado mostrou-se viável, considerando as características avaliadas ao longo do experimento.

Por outro lado, conforme observado no presente estudo, a substituição total do fertilizante mineral pelo tratamento com dose de 100% do composto de lodo de esgoto biotransformado não foi favorável ao desenvolvimento vegetativo das plantas de *Philodendron*. Dessa forma, os resultados reforçam que a combinação equilibrada entre fertilização mineral e orgânica pode otimizar o desempenho das plantas e contribuir para uma agricultura mais sustentável.

Portanto, a reutilização de composto de lodo de esgoto biotransformado na agricultura não apenas representa uma estratégia viável para a redução dos custos com fertilizantes, mas também desempenha um papel fundamental na destinação adequada de resíduos urbanos, reduzindo a pressão sobre aterros sanitários e contribuindo para a sustentabilidade ambiental e econômica do setor agrícola.

7. CONCLUSÕES

A substituição total do fertilizante mineral pelo composto de lodo de esgoto biotransformado não foi eficiente para o desenvolvimento vegetativo das plantas de *Philodendron "Pink Princess"*. Esse resultado está diretamente relacionado aos baixos teores de clorofila a, b e total (a+b), o que impactou negativamente o desempenho fotossintético das plantas, evidenciado pela redução na eficiência do fotossistema II. Esse efeito pode ser atribuído, principalmente, à baixa disponibilidade de nitrogênio no composto, um elemento essencial para a síntese de clorofila e a manutenção da atividade fotossintética.

Por outro lado, a substituição parcial do fertilizante mineral pelo composto demonstrou ser uma alternativa viável. Os tratamentos com 40% e 60% do composto resultaram em um bom desenvolvimento das plantas, sendo que a substituição de 60% do fertilizante mineral se mostrou a mais efetiva, promovendo melhor desempenho vegetativo sem comprometer a fisiologia da planta.

Além disso, observou-se que a dose máxima de 3,0 g L⁻¹ de fertilizante mineral Basacote® (100% Basacote®) interferiu negativamente no crescimento das plantas, o que pode ter levado a desequilíbrios nutricionais.

Dessa forma, a substituição parcial do fertilizante mineral pelo composto de lodo de esgoto biotransformado, especialmente na proporção de 60%, representa uma estratégia promissora para reduzir a dependência de fertilizantes minerais, favorecer o reaproveitamento de resíduos urbanos e promover uma produção agrícola mais sustentável.

8. REFERÊNCIAS

- ABRANCHES, J. L. *et al.* Resposta da aveia preta à aplicação de zinco em Latossolo Vermelho Distrófico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 4, n. 3, p. 278-282, 2009.
- AHLAWAT, Y. K. *et al.* Plant phenolics: neglected secondary metabolites in plant stress tolerance. **Brazilian Journal of Botany**, v. 47, n. 3, p. 703-721, 2024.
- ALAWAADH, A. A. *et al.* Micropropagation of lacy tree philodendron (*Philodendron bipinnatifidum* Schott ex Endl.). **HortScience**, v. 55, n. 3, p. 294-299, 2020.
- ALBARELO, L. A.; ARAUJO, J.A. Uso de lodo de ETE como reuso em adubagem para cultivos agrícolas. **Cadernos UniFOA**, v. 19, n. 54, p. 1-10, 2024.
- ALMEIDA, G. C. A.; FANHANI, J. C.; D'OLIVEIRA, P. S. Utilização de lodo de esgoto como componente de substrato para o cultivo de vinca (*Catharanthus roseus* (L.) G. Don). **Iniciação Científica Cesumar**, v. 7, n. 1, p. 41-48, 2005.
- ALOVISI, A. M. T. *et al.* Rochagem como alternativa sustentável para a fertilização de solos. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, p. 918-932, 2020.
- ALVES, E. *et al.* Avaliações fisiológicas e bioquímicas de plantas de aguapé (*Eichhornia crassipes*) cultivadas com níveis excessivos de nutrientes. **Planta daninha**, v. 21, p. 27-35, 2003.
- ALVES, T. R. **Esgoto doméstico tratado como fonte de água e nutrientes no cultivo suspenso do antúrio (*Anthurium Andraeanum*)**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agrônoma) – Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Agrárias, campus Araras, 2023.
- ANAND, K.; KUMARI, B.; MALLICK, M. A. Phosphate solubilizing microbes: an effective and alternative approach as biofertilizers. **Pharm. Sci**, v. 8, n. 2, p. 37-40, 2016.
- BANG, T. C. *et al.* The molecular–physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. **New Phytologist**, v. 229, n. 5, p. 2446-2469, 2020.
- BARBOSA, K. B. F. *et al.* Estresse oxidativo: conceito, implicações e fatores modulatórios. **Revista de nutrição**, v. 23, p. 629-643, 2010.
- BARBOSA, M. R. *et al.* Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. **Ciência Rural**, v. 44, p. 453-460, 2014.
- BARROS, J. **Fertilidade do solo e Nutrição das plantas**. 2020. Disponível em: <<https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/28120/1/P.%20Pedagógica%20-%20Fertilização%20das%20culturas.pdf>>. Acesso em: 31 de jan. 2025.
- BARROS, J. **Fertilidade do solo e Nutrição das plantas**. 2020. Disponível em: <<https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/28120/1/P.%20Pedagógica%20-%20Fertilização%20das%20culturas.pdf1>>. Acesso em: 03 de fev. 2025.
- BETTIOL, W. *et al.* Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. **EMBRAPA** - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2023.
- BOEIRA, R.C.; LIGO, M.A.V.; DYNIA, J.F. Mineralização de nitrogênio em solo tropical tratado com lodos de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p.1639-1647, 2002.
- BOLETIM 100. **Recomendação de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Editores: Heitor Cantarella, José Antônio Quaggio, Dirceu Mattos Jr., *et al.* Campinas: Instituto Agrônomo, p. 489, 2022.
- BONONI, L. *et al.* Phosphorus-solubilizing *Trichoderma* spp. from Amazon soils improve soybean plant growth. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 2858, 2020.
- BRADFORD, M. M.. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, v. 72, n. 1-2,

p. 248-254, 1976.

BRAINER, M. S. C. P. **Flores e plantas ornamentais**. 2019. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/205/1/2019_CDS_95.pdf>. Acesso em: 03 de fev. 2025.

BRASIL. **INSTRUÇÃO NORMATIVA SDA No 25, DE 23 DE JULHO DE 2009**. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-25-de-23-7-2009-fertilizantes-organicos.pdf/view>>. Acesso em: 03 de fev. 2025.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE, FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ. **Metodologia para qualificação de atividades de enzimas relacionadas com a resistência a inseticidas em *Aedes aegypti***. Brasília: Ministério da Saúde, 2006. 12 p. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/manual_novo_protocolo_dengue.pdf. Acesso em: 7 nov. 2023.

BRASIL. Portaria n.º 518, de 25 de março de 2004. **Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde, Coordenação Geral de Vigilância em Saúde Ambiental** – Brasília: Editora do Ministério da Saúde, 2005. Disponível em: <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/portaria_518_2004.pdf>. Acesso em: 03 de fev. 2025.

BRASIL. RESOLUÇÃO Nº 498, DE 19 DE AGOSTO DE 2020. **Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=797>. Acesso em: 03 de fev. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **RESOLUÇÃO No 375, DE 29 DE AGOSTO DE 2006**. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=documento.download&id=22347>. Acesso em: 03 de fev. 2025.

BRASIL. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. **Plano Nacional de Fertilizantes 2050: uma estratégia para os fertilizantes no Brasil**. Brasília: SAE, 2021.

BRITO, L. R. *et al.* Uso de resíduos sólidos urbanos na produção de flores e plantas ornamentais. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 3, n. 2, p. 237-247, 2010.

BROEK, A. V. C. V. d. **Embriogênese somática em segmentos de tépalas de amarílis (*Hippeastrum sp. Herb.*)**. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal e Bioprocessos Associados) - Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Agrárias, 2024.

CAIONE, G.; LANGE, A.; SCHONINGER, E. L. Crescimento de mudas de *Schizolobium amazonicum* (Huber ex Ducke) em substrato fertilizado com nitrogênio, fósforo e potássio. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, p. 213-221, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/de9bdc78-58c2-4c8e-b673-7382b17889aa/content>>.

CALLEGARI, R. A. *et al.* Produtividade de frutos e teores de nutrientes no solo durante um cultivo de meloeiro. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 7, n. 1, p. 24-36, 2012.

CAMILLI, L. *et al.* Produtividade e estimativa da eficiência de carboxilação in vivo da enzima rubisco em girassol ornamental cultivado em lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, n. S2, p. 858-860, 2007.

CAMPELO, D. H. *et al.* Trocas gasosas e eficiência do fotossistema II em plantas adultas de seis espécies florestais em função do suprimento de água no solo. **Revista Árvore**, v. 39, n. 5, p. 973-983, 2015. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rarv/a/zL79x3CXXp3R5trnscz4SRr/?format=pdf&lang=pt>>.

CANJANI, R. B. **Efeitos ecotoxicogenéticos dos resíduos derivados da Estação de Tratamento de Esgoto Conduta-Rio Claro/SP**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Biológicas), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Rio Claro, 2021.

- CARDOSO-FILHO, M. S. **Biorremediação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos-HPAs em sedimento de manguezal assistida em biorretores através do fungo *Aspergillus* sp. e de extrato vegetal**. Dissertação (Mestrado em Geoquímica do Petróleo e Ambiental) - Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, 2021.
- CARMO, J. B.; LAMBAIS, M. R. Transformações do nitrogênio em solos tratados com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 8, n. 3, p. 152-162, 2013.
- CEPEA. **PIB do Agronegócio Brasileiro**. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>>. Acesso em: 03 de fev. 2025.
- CHAE, H-S. *et al.* Efficiency and effectiveness of vitamin C-substrate organo-mineral straight fertilizer in lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 5, p. 1-8, 2018.
- CHAVES, L. H. G. *et al.* Crescimento, distribuição e acúmulo de cobre e zinco em plantas de pinhão-manso. **Revista Ciência Agrônoma**, v. 41, p. 167-176, 2010.
- Chen, F.C.; Wang, C.Y.; Fang, J.Y. Micropropagation of self-heading Philodendron via direct shoot regeneration. **Sci. HorticAmsterdam**. 2012, 141, 23–29.
- CHOKSHI, K. *et al.* Nitrogen starvation-induced cellular crosstalk of ROS-scavenging antioxidants and phytohormone enhanced the biofuel potential of green microalga *Acutodesmus dimorphus*. **Biotechnology for biofuels**, v. 10, p. 1-12, 2017.
- CLARA, J. M. P. *et al.* Parâmetros morfológicos do girassol ornamental em resposta a diferentes doses de biochar de lodo de esgoto e pó de rocha. **CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES**, v. 17, n. 5, p. e6225-e6225, 2024.
- COLOMBINI, F. S.; CECCATO-ANTONINI, S. R.; ROSA-MAGRI, M. M. Maize treatment with yeast cells induces resistance against Fusarium rot. **Letters in Applied Microbiology**, v. 76, n. 2, p. ovac072, 2023.
- COLTRO, S. **Efeito do tratamento térmico e do ácido salicílico na atividade de polifenoloxidase, peroxidase e fenilalanina amônia-liase, nas características físico-químicas e na incidência de patógenos em morangos durante o armazenamento**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, campus de Marechal Cândido Rondon, 2012.
- CORREA, D. *et al.* **Avencão e asplênio: metodologia para obtenção de mudas a partir da germinação de esporos in vitro**. EMBRAPA. 2009. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/580692/1/cot145.pdf>>. Acesso em: 03 de fev. 2025.
- COSTA, G. F. ; MARENCO, R. A. Fotossíntese, condutância estomática e potencial hídrico foliar em árvores jovens de andiroba (*Carapa guianensis*). **Acta amazônica**, v. 37, p. 229-234, 2007.
- COSTA, L. M.; SILVA, M. F. O. **A indústria química e o setor de fertilizantes**. 2012. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2025/1/A%20indústria%20química%20e%20o%20setor%20de%20fertilizantes_P_A.pdf>. Acesso em: 03 de fev. 2025.
- CUNHA, G. O. M. *et al.* Formas de Alumínio em Solos Ácidos Brasileiros com Teores Excepcionalmente Altos de Al³⁺ Extraível com KCl. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 5, p. 1362-1377, 2015.
- CURVÊLO, C. R. S. *et al.* Trocas gasosas e estresse oxidativo em plantas de algodoeiro supridas com silício e infectadas por *Ramularia areola*. **Bragantia**, v. 72, p. 346-359, 2013.
- D'ÁVILA, J. V. *et al.* Essential oil production of lemongrass (*Cymbopogon citratus*) under organic compost containing sewage sludge. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 9, p. 811-816, 2016.
- DEON, M. C. *et al.* Biorremediação de solos contaminados com resíduos oleosos através de

- bioaugmentação e atenuação natural. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 33, n. 1, p. 73-82, 2012.
- DIAS, T. *et al.* Compostos fenólicos e capacidade antioxidante em frutos de tomateiros mutantes fotomorfo genéticos. **Ciência Rural**, v. 45, n. 05, p. 782-787, 2015.
- DUANGMAL, K; APENTEN, R. K. O. A comparative study of polyphenoloxi dases from taro (*Colocasia esculenta*) and potato (*Solanum tuberosum* var. Romano). **Food Chem.** 1999.
- ESPINOZA, A. L. F. **Potencial agrônômico de fertilizantes organominerais a partir da compostagem de lodo de esgoto**. 2023. Dissertação (Mestre em Solos Nutrição de Plantas) Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- FERRAZ, R. L. S. *et al.* Trocas gasosas e eficiência fotoquímica de cultivares de algodoeiro herbáceo sob aplicação de silício foliar. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 2, p. 735-748, 2014. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/pdf/4457/445744140015.pdf>>.
- FONSÊCA, J. W. **Fixação de fosfato em três solos do Município de Mossoró-RN**. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade de São Paulo (ESALQ), Piracicaba, 1977.
- FRANÇA, C. A. M.; MAIA, M. B. R. **Panorama do agronegócio de flores e plantas ornamentais no Brasil**. 2008.
- GOMES, S. B. V; NASCIMENTO, C. W. A; BIONDI, C. M. Produtividade e composição mineral de plantas de milho em solo adubado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, p. 459-465, 2007.
- HANSEL, F. B. *et al.* Nutrição mineral como aliada das plantas na tolerância a estresses ambientais. **Informações Agrônômicas NPCT**, v. 1, p. 10-24, 2021.
- HEMINGWAY, J.; BROGDON, W. **Techniques to detect insecticide resistance mechanisms (field and laboratory manual)**. WHO/CDC/CPC/MAL/986. 1998. Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- HORTA, C. ; DUARTE, A. C. **Sustentabilidade da fertilização fosfatada: fontes alternativas de fósforo como fertilizantes agrícolas**. *Agrárias: pesquisa e inovação nas ciências que alimentam o mundo VII*, v. 7, p. 1-14, 2021.
- HUANG, Z.-A. *et al.* Effects of nitrogen deficiency on gas exchange, chlorophyll fluorescence, and antioxidant enzymes in leaves of rice plants. **Photosynthetica**, v. 42, p. 357-364, 2004.
- IBENDAHL, G. The Russia-Ukraine conflict and the effect on fertilizer. **Department of Agricultural Economics, Kansas State University: Manhattan, KS, USA**, 2022.
- IBRAFLO. **Boletim Informativo**. 2023. Disponível em: https://www.ibraflor.com.br/_files/ugd/b3d028_f7b929f6d91c4370a0c9fff418bfa45a.pdf. Acesso em: 03 de fev. 2025.
- JUNQUEIRA, A. H.; PEETZ, M. S. O setor produtivo de flores e plantas ornamentais do Brasil, no período de 2008 a 2013: atualizações, balanços e perspectivas. **Ornamental Horticulture**, v. 20, n. 2, p. 115-120, 2014.
- KIEHL, J. C. **Retenção e nitrificação da amônia em solos do município de Piracicaba**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de São Paulo (ESALQ), 1972.
- KLANRIT, P. *et al.* In Vitro Propagation of *Philodendron erubescens* 'Pink Princess' and Ex Vitro Acclimatization of the Plantlets. **Horticulturae**, v. 9, n. 6, p. 688, 2023.
- LACERDA, E. G. *et al.* Adubação nitrogenada no vigor das mudas, concentração de aminoácidos e proteínas totais e no teor de clorofila no feijão-de-corda (*Vigna unguiculata*). **Agri-Environmental Sciences**, v. 6, p. 11-11, 2020.
- LAMBERS, H. Phosphorus acquisition and utilization in plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 73, n. 1, p. 17-42, 2022.

- LANGE, A. *et al.* Relações cálcio: magnésio e características químicas do solo sob cultivo de soja e milho. **Nativa**, v. 9, n. 3, p. 294-301, 2021.
- LEGHARI, S. J. *et al.* Role of nitrogen for plant growth and development: A review. **Advances in Environmental Biology**, v. 10, n. 9, p. 209-219, 2016.
- LINS, T. C.; LIMA, A. S. T. Lodo de Esgoto como alternativa de fertilização agrícola para o município de Igaci-AL. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 8, p. e13511830461-e13511830461, 2022.
- LOPES, L. F.; COSTA, C. S.; D'OLIVEIRA, P. S.; GIL, L. G. Utilização agrícola de lodo industrial como fonte de zinco na cultura do crisântemo. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.22, n.3, p.620-623, 2004.
- LU, C.-M.; ZHANG, J.-H. Photosystem II photochemistry and its sensitivity to heat stress in maize plants as affected by nitrogen deficiency. **Journal of plant physiology**, v. 157, n. 1, p. 124-130, 2000.
- LUDWIG, F. *et al.* Neutralização da acidez em substrato de casca de pinus com diferentes granulometrias. **Revista Eletrônica Científica da UERGS**, v. 6, n. 1, p. 1-8, 2020.
- LUDWIG, F. *et al.* Substratos no desenvolvimento de cultivares de gérbera envasada. **Ornamental horticulture**, v. 21, n. 2, p. 177-184, 2015.
- LUSSO, M. F. G.; PASCHOLATI, S. F. Activity and isoenzymatic pattern of soluble peroxidases in maize tissues after mechanical injury or fungal inoculation. **Summa Phytopathol.** 1999.
- MACEDO, C. M. **Desempenho da cultura da soja com o uso de fertilizante orgânico e mineral**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agrônômica), Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Agrárias, campus Araras, 2022.
- MAIA, F. G. **Efeito da adubação com lodo de esgoto nas características químicas do solo, desenvolvimento vegetativo, produtividade e qualidade de frutos de abacaxizeiro cv. Vitória**. Dissertação (Mestrado em Mestre em Biologia Vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Humanas e Naturais, 2017.
- MANINHO, N. M. C. **Análise do comportamento do comércio nacional de mudas de orquídeas e de outras plantas ornamentais do Brasil no período de 2018 a 2022**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Fortaleza, 2023.
- MANQUIÁN-CERDA, K. *et al.* Interactive effects of aluminum and cadmium on phenolic compounds, antioxidant enzyme activity and oxidative stress in blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) plantlets cultivated in vitro. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 150, p. 320-326, 2018.
- MAPA. **Mapa divulga lista de flores e plantas ornamentais introduzidas no Brasil**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/mapa-divulga-lista-de-flores-e-plantasornamentais-existentis-no-brasil>. Acesso em: 03 de fev. 2025.
- MARQUES, R. F. *et al.* Efeito de subdoses de 2, 4-D sal colina na eficiência quântica do fotossistema II do algodoeiro. In: **Colloquium Agrariae. ISSN: 1809-8215**. p. 60-71. 2020. Disponível em: <<https://journal.unoeste.br/index.php/ca/article/view/3079/2969>>.
- MARTINS, C. A. C. *et al.* Desenvolvimento inicial do milho (*Zea mays* L.) em substrato contendo lodo de esgoto compostado. **Brazilian Journal of Environmental Sciences (RBCI-AMB)**, n. 48, p. 69-79, 2018.
- MARTINS, L. D. *et al.* Alterações morfológicas em clones de cafeeiro conilon submetidos a níveis de fósforo. **Scientia Plena**, v. 9, n. 4, 2013. Disponível em:< <https://www.scientia-plena.org.br/sp/article/view/1229/666>>.

MARTINS, L. R. G. **A escolha do modelo de canal de vendas diante da estratégia de acesso ao mercado da agroindústria brasileira de fertilizantes**. 2022. Dissertação (Mestrado em Gestão de Supply Chain Managment) - Escola de Administração de Empresas de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo.

MARTINS, M. L. M. *et al.* Mais uma vez, o Brasil se faz colônia: a dependência brasileira de fertilizantes no contexto da guerra entre Rússia e Ucrânia. **RURIS (Campinas, Online)**, v. 15, n. 2, p. 242-272, 2023.

MAZZEO, D. E. C. *et al.* Effects of biostimulation by sugarcane bagasse and coffee grounds on sewage sludges, focusing agricultural use: Microbial characterization, respirometric assessment and toxicity reduction. **Waste Management**, v. 118, p. 110-121, 2020.

MAZZEO, D. E. C. *et al.* Endocrine disrupting activity in sewage sludge: Screening method, microbial succession and cost-effective strategy for detoxification. **Journal of Environmental Management**, v. 330, p. 117207, 2023.

MAZZEO, D; E; C. **Avaliação da viabilidade do lodo de esgoto como recondicionante de solos agrícolas, após processo de atenuação natural, por meio de diferentes bioensaios**. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Rio Claro, 2013.

MENDONÇA, F. J. *et al.* Determinação do teor de compostos fenólicos totais e capacidade antioxidante de cúrcuma orgânica comercial. **Farmacologia aplicada à enfermagem: aspectos teóricos e práticos**, 2021.

MIGUEL, P. S. B. *et al.* Efeitos tóxicos do alumínio no crescimento das plantas: mecanismos de tolerância, sintomas, efeitos fisiológicos, bioquímicos e controles genéticos. **CES revista**, v. 24, n. 1, p. 13-29, 2010.

MORAES, C. L. **Alterações bioquímicas, fisiológicas e ultraestruturais em sementes e plantas de tomate expostas ao chumbo**. 2011. Tese (Doutorado em Fisiologia Vegetal) - Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

MU, X.; CHEN, Y. The physiological response of photosynthesis to nitrogen deficiency. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 158, p. 76-82, 2021.

MUTER, O. Current trends in bioaugmentation tools for bioremediation: A critical review of advances and knowledge gaps. **Microorganisms**, v. 11, n. 3, p. 710, 2023.

NASCIMENTO, C. W. A. *et al.* Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.2, p.385-392, 2004.

NOBREGA, M. A. S.; PONTES, M. S.; SANTIAGO, E. F. Incorporação do lodo de esgoto na composição de substrato para produção de mudas nativas. **Acta Biomedica Brasiliensia**, v. 8, n. 1, p. 43-55, 2017.

NUNES, A. L. *et al.* **Plantas daninhas e herbicidas alteram os níveis de compostos fenólicos em frutos de *Physalis***. 2014. Disponível: <<https://www.sbcpcd.org/uploads/trabalhos/plantas-daninhas-e-herbicidas-alteram-os-niveis-de-compostos-fenolicos-em-frutos-de-physalis-668.pdf>>. Acesso em: 03 de fev. 2025.

OGINO, C. M.; GASQUES, J. G. Agropecuária Brasileira: evolução, resiliência e oportunidades. **Capítulo 5: Fertilizantes: dependência externa e impacto produtivo**. Rio de Janeiro. IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada). 2023. p. 97-124.

OLIVEIRA, D. P. F. **Aplicação de água residuária e lodo e seu impacto sobre o desenvolvimento inicial de *Eucalyptus urophylla***. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus Botucatu, 2020.

- OLIVEIRA, D. S. F.; COUTINHO, A. R. **Análise do mercado atual de fertilizantes fosfatados no Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2023.
- PADOVANI, V. C. R. **Composto de lodo de esgoto como substrato para produção de mudas de árvores nativas e exóticas**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, 2006.
- PAVINATO, P. S. *et al.* Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 15615, 2020.
- PINOTTI, C. R. *et al.* Produtividades de arroz e feijão relacionadas com atributos físicos de um Latossolo tratado com composto orgânico no cerrado. **REVISTA DELOS**, v. 17, n. 60, p. e2464-e2464, 2024.
- PRATES, A. R. **Composto de lodo de esgoto e bioestimulante na produção de tapetes de grama Esmeralda**. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Botucatu, 2024.
- RANGEL, B. *et al.* **Formulações de adubos nitrogenado e potássico aplicados em diferentes épocas de cobertura em cultivo de milho**. Dissertação (Mestrado em Irrigação no Cerrado) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - campus Ceres, 2022.
- REIS, M. V. *et al.* Profile of producer and retailer of flower and ornamental plant. **Ornamental Horticulture**, v. 26, p. 367-380, 2020.
- RICCI, A. B. *et al.* Uso de lodo de esgoto estabilizado em um solo decapitado: II-Atributos químicos e revegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 543-551, 2010.
- RIVEROS, I. C. A. T. **Potencial fertilizante do lodo de esgoto para o cultivo de trigo, antes e após sua biotransformação**. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal e Bioprocessos Associados), Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Agrárias, campus Araras, 2024.
- ROCHA, L. D. **Ácido húmico extraído do lodo de esgoto sanitário e seus efeitos em plantas**. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Humanas e Naturais, 2014.
- RODRIGUES, J. D. **Compostagem de lodo de ETE e sua utilização na substituição parcial de fertilizantes minerais no cultivo do milho**. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 2023.
- RODRIGUES, M. *et al.* Long-term land use and tillage influence on phosphorus species in Brazilian Oxisols: A multi-technique assessment by chemical P fractionation, ³¹P NMR and P K-edge XANES spectroscopies. **Soil and Tillage Research**, v. 229, p. 105683, 2023.
- SALVADOR, J. T. *et al.* Corrêa. Relações cálcio e magnésio presentes no solo e teores foliares de macronutrientes. **Revista Acadêmica Ciência Animal**, v. 9, n. 1, p. 27-32, 2011.
- SANTOS, F. E. V. *et al.* Características químicas de substratos formulados com lodo de esgoto para produção de mudas florestais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 971-979, 2014.
- SASABUCHI, I. T. M *et al.* Sustentabilidade no uso de fósforo: Uma revisão bibliográfica com foco na situação atual do estado de São Paulo, Brasil. **Química Nova**, v. 46, n. 02, p. 185-198, 2023.
- SCHAFFER, G.; SOUZA, P. V. D.; FIOR, C. S. Um panorama das propriedades físicas e químicas de substratos utilizados em horticultura no sul do Brasil. **Ornamental Horticulture**, v. 21, n. 3, p. 299-306, 2015.
- SCHEER, M. B. *et al.* Mudas de *Jasminum mesnyi* Hance produzidas com substratos à base de lodo de esgoto compostado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.

16, p. 931-937, 2012.

SCHMITZ, J. A. K.; SOUZA, P. V. D.; KÄMPF, A. N. Propriedades químicas e físicas de substratos de origem mineral e orgânica para o cultivo de mudas em recipientes. **Ciência Rural**, v. 32, p. 937-944, 2002.

SILVA, E. B. *et al.* Nível de suficiência de zinco para bananeira 'Prata Anã' por meio do DRIS. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 29, n. 1, p. 69-74, 2007.

SILVA, G. R. N. *et al.* Diferentes concentrações de fósforo nas trocas gasosas do colmo de *Eleocharis acutangula* (Roxb.) Schult. In: **Anais do Congresso Nacional de Botânica**. 2013.

SILVA, L. V. B. *et al.* **Atividade Antioxidante da casca do fruto do (*Caryocar brasiliense* Camb.) em duas fitofisionomias diferentes do Norte de Minas**. ISSN: 1806-549 X. 2016.

SILVA, R. F. S; PASCHOLATI, S. F; BEDENDO, I. P. Indução de Resistência em tomateiro por extratos aquosos de *Lentinula edodes* e *Agaricus blazei* contra *Ralstonia solanacearum*. **Fitopatol Bras**; p.189–96, 2007

SNIS- SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **TrataBrasil**. Disponível em: <<https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2024/04/Release-Ranking-do-Saneamento-de-2024-TRATA-BRASIL-GO-ASSOCIADOS-V2.pdf>>. Acesso em: 28 de fev. 2025.

SOMMAGGIO, L. R. D. *et al.* Evaluation of the potential agricultural use of biostimulated sewage sludge using mammalian cell culture assays. **Chemosphere**, v. 199, p. 10–15, 2018.

SOMMAGGIO, L. R. D. **Toxicidade de efluentes de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) antes e após desinfecção por processos oxidativos avançados**. Tese (Doutorado em Biologia Celular e Molecular) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", campus Rio Claro, 2021.

SOUZA, A. C. Z. *et al.* Ecotoxicological aspects and environmental implications of the use of water and sewage treatment sludges. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 21, n. 3, p. 3527-3552, 2024.

SOUZA, A. C. Z. **Uso sustentável do lodo de tratamento de água e esgoto: efeitos fitotóxicos, genotóxicos e possibilidade de uso antes e depois da biorremediação**. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas), Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Rio Claro, 2021.

SOUZA, L. F. *et al.* Disponibilidade de P em latossolo argiloso após incubação de doses de superfosfato triplo revestido com polímeros. **Cerrado Agrociências**, v. 4, p. 58-70, 2013.

TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto alegre: Artmed, 2017.

TAMARINDO, U. G. F.; PIRES, M. C. **A guerra entre Rússia e Ucrânia e a crise dos fertilizantes ao agronegócio brasileiro**. Disponível em: <<https://www.maria.unesp.br/Home/Eventos/2022/ubirajara-garcia-ferreira-tamarindo.pdf>>. Acesso em: 31 de jan. 2025.

UMESHA, S. Phenylalanine ammonia lyase activity in tomato seedlings and its relationship to bacterial canker disease resistance. **Phytoparasitica**. 2006.

VIEIRA-JUNIOR, P. A. V. *et al.* População de plantas e alguns atributos do solo relacionados ao rendimento de grãos de milho. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 28, n. 4, p. 483-492, 2006.

VOLTOLINI; L. C.; BIZARI, D. R.; STOLF, R. Fertilizante orgânico composto classe D na produção de *Acalypha reptans* em casa de vegetação. **Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente**, v. 5, n. 1, p. 23-29, 2017.

WANG, Y.; CHEN, Y-F.; WU, W-H. Potassium and phosphorus transport and signaling in plants. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 63, n. 1, p. 34-52, 2021.

YAMASHITA, V. P. et al. O Uso do Lodo de Esgoto Compostado como Adubo no Desenvolvimento Inicial de *Anadenanthera peregrina* em Plantios de Restauração Florestal. **Fronteira: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v. 13, n. 1, p. 187-199, 2024.

ZABOTTO, A. R. et al. o Lodo de esgoto como fertilizante na produção de mudas de *Cariniana estrellensis* para restauração florestal. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, v. 37, n. 3, p. 12-22, 2022.

ZAVELINSKI, J. E. B.; NASCIMENTO, T. C.; MENDONÇA, A. T. B. B. ECOINOVAÇÃO PARA AGRICULTURA FAMILIAR: UMA INVESTIGAÇÃO DA TRANSFORMAÇÃO DO LODO DE ESGOTO EM FERTILIZANTE AGRÍCOLA. **Organizações e Sustentabilidade**, v. 10, n. 1, p. 78-98, 2022.