

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
CAMPUS DE DRACENA**

Liandra de Medeiros

**RESPIRAÇÃO MICROBIANA EM SOLO COM
TEBUTHIURON E THIAMETHOXAM ASSOCIADO A
BIOFERTILIZANTES**

Dracena

2026

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
CAMPUS DE DRACENA**

Liandra de Medeiros

**RESPIRAÇÃO MICROBIANA EM SOLO COM
TEBUTHIURON E THIAMETHOXAM ASSOCIADO A
BIOFERTILIZANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Ciências
Agrárias e Tecnológicas – Unesp, Câmpus de
Dracena como parte das exigências para
conclusão de curso em Engenharia
Agrônômica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Renato Matos Lopes

Co-orientadora: Yanca Araujo Frias

Dracena

2026



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Dracena



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
UNESP – CÂMPUS DE DRACENA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: Respiração microbiana em solo com tebuthiuron e thiamethoxam associado a biofertilizantes

Modalidade: Trabalho de **Atividades de pesquisa**

Autora: Liandra de Medeiros

Orientador: Paulo Renato Matos Lopes

Co-orientadora: Yanca Araujo Frias

Número de Créditos: 12

Data da aprovação e correção de acordo com as sugestões da Banca: 12/06/2026



Paulo Renato Matos
Lopes

Pâmela Gomes Nakada
Freitas

Lucas da Silva Alves

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, Maria Janete Serafim, e ao meu pai, José Belarmino de Medeiros, por todo o apoio ao longo dessa trajetória e por terem me transmitido os princípios e valores que me permitiram chegar até aqui. Dedico também à minha irmã, Kathleen Prisciele de Medeiros, que sempre acreditou que esse sonho seria possível e nunca deixou de me incentivar. Aos meus sobrinhos, Mariah Lacerda e Artur Franco Lacerda, cujo nascimento trouxe ainda mais motivação para que eu buscasse ser um exemplo e persistisse na realização deste objetivo.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio do apoio financeiro concedido pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC).

Primeiramente, agradeço a Deus, por me guiar e me preparar até o início da graduação e por me acompanhar diariamente durante toda essa jornada acadêmica.

Sou grata à Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas (FCAT/Unesp – Brasil) pelo apoio na minha formação acadêmica, tanto em sala de aula quanto nas atividades de campo, fundamentais para a construção do conhecimento prático. Agradeço também pela estrutura disponibilizada e pelo apoio dos técnicos de laboratório, em especial à técnica Andréia, que contribuiu diretamente para o andamento deste projeto.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela oportunidade de desenvolver um projeto de pesquisa voltado aos meus interesses acadêmicos e profissionais.

Expresso meu sincero agradecimento ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Renato Matos Lopes, por toda dedicação, atenção e orientação ao longo dos anos em que fui integrante do Grupo de Ação em Impactos Ambientais (GAIA). Sua orientação sempre foi conduzida de forma profissional, comprometida e atenciosa com todos os membros do grupo. Agradeço também ao GAIA por me acolher desde o início e por toda a colaboração e parceria, fundamentais para minha formação acadêmica e pessoal.

Agradeço à Yanca Araujo Frias pelo apoio desde a elaboração do projeto até sua execução, além de sempre se mostrar disponível para esclarecer dúvidas e contribuir durante toda minha trajetória no GAIA.

Quero agradecer também ao Victor Hugo Cruz pela ajuda na modelagem matemática do meu projeto, ajuda essencial para a rodagem dos meus resultados e, consequentemente, o sucesso do projeto.

Expresso também minha gratidão ao Grupo Núcleo de Estudos em Tecnologia de Aplicação (NETA) da FCAT/Unesp – Dracena, coordenado pelo Prof. Dr. Evandro Pereira Prado, por proporcionar o suporte necessário para a aplicação dos produtos fitossanitários utilizados no início do desenvolvimento deste projeto.

Sou grata também ao Grupo de Extensão Rural da Unesp Dracena (GERUD) pela oportunidade de fazer parte da equipe, experiência que contribuiu significativamente para meu crescimento profissional ainda durante a graduação.

Aos meus pais, José Belarmino de Medeiros e Maria Janete Serafim, deixo meu profundo agradecimento por todo apoio, incentivo, motivação e suporte emocional ao longo de todos esses anos, especialmente durante o período em que estive longe de casa para realizar um sonho que é nosso. Agradeço imensamente à minha irmã, Kathleen Princiele de Medeiros, por sempre acreditar em mim e por celebrar cada conquista como se fosse sua. Ao meu cunhado, Caique Lacerda dos Santos, agradeço por, junto com minha irmã, trazerem à nossa vida meus sobrinhos, Mariah Lacerda e Artur Franco Lacerda, que são fonte constante de alegria. Agradeço também à minha avó, Maria Lúcia Marques Nunes, por todas as orações e cuidados dedicados a mim ao longo desses anos, mesmo à distância.

Dedico também minha gratidão à minha segunda família, a República Pé Preto, por todo acolhimento, carinho, companheirismo e pelos momentos compartilhados, tanto os bons quanto os desafiadores. Vocês tornaram os anos de graduação mais leves e especiais, mesmo longe da família.

Por fim, agradeço aos amigos que conheci durante a graduação. A presença de vocês tornou essa caminhada muito mais leve e significativa. Cada momento de apoio, conversa e risadas, dentro e fora da universidade, contribuiu para que essa fase se tornasse ainda mais marcante em minha vida.

“Nunca é tarde demais para mudar a direção da sua vida, sempre haverá uma nova rota ou uma nova chance de recomeço”

(Santa Rita de Cássia)

RESUMO

O uso de pesticidas na agricultura é essencial para o controle de pragas e plantas daninhas, porém sua persistência no solo pode afetar processos biológicos importantes, como a atividade microbiana. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o metabolismo microbiano em solo tratado com o herbicida tebuthiuron e o inseticida thiamethoxam, associados ou não à vinhaça ou a um biofertilizante comercial. O experimento foi conduzido na FCAT/UNESP utilizando solo de textura arenosa. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 4×3 , composto por quatro condições de pesticidas (ausência, tebuthiuron, thiamethoxam e tebuthiuron+thiamethoxam) e três condições de fertilização (ausência, vinhaça ou biofertilizante), totalizando 12 tratamentos com cinco repetições. A atividade microbiana do solo foi avaliada por meio de ensaios respirométricos, com quantificação do CO_2 liberado durante o processo de degradação microbiana ao longo de 77 dias. Os resultados demonstraram que a vinhaça isolada promoveu o maior acúmulo de CO_2 e sustentou atividade microbiana contínua durante todo o período experimental, indicando elevado potencial de bioestimulação da microbiota do solo. Em contrapartida, os tratamentos contendo pesticidas associados à vinhaça apresentaram estabilização precoce das curvas de emissão de CO_2 , sugerindo limitação da atividade microbiana e possível efeito estressor dos pesticidas sobre os microrganismos do solo. O biofertilizante também favoreceu a atividade microbiana, porém com menor intensidade em relação à vinhaça. Assim, os resultados destacam o potencial da vinhaça como agente de bioestimulação e a importância do monitoramento da respiração microbiana para avaliação de estratégias de manejo e biorremediação em solos agrícolas impactados por pesticidas.

Palavras-chave: Biorremediação do solo. Cana-de-açúcar. Daninhas Pesticidas. Vinhaça.

ABSTRACT

The use of pesticides in agriculture is essential for controlling pests and weeds; however, their persistence in the soil can affect important biological processes, such as microbial activity. In this context, the present study aimed to evaluate microbial metabolism in soil treated with the herbicide tebuthiuron and the insecticide thiamethoxam, associated or not with vinasse or biofertilizer. The experiment was conducted at FCAT/UNESP using sandy textured soil. The experimental design was completely randomized in a 4 × 3 factorial scheme, composed of four pesticide conditions (absence, tebuthiuron, thiamethoxam, and tebuthiuron+thiamethoxam) and three fertilization conditions (absence, vinasse, or biofertilizer), totaling 12 treatments with five replications. Soil microbial activity was evaluated using respirometric assays, quantifying the CO₂ released during the microbial degradation process over 77 days. The results demonstrated that isolated vinasse promoted the greatest accumulation of CO₂ and sustained continuous microbial activity throughout the experimental period, indicating a high potential for biostimulating soil microbiota. In contrast, treatments containing pesticides associated with vinasse showed early stabilization of CO₂ emission curves, suggesting a limitation of microbial activity and a possible stress effect of pesticides on soil microorganisms. The biofertilizer also favored microbial activity, but with less intensity compared to vinasse. Thus, the results highlight the potential of vinasse as a biostimulating agent and the importance of monitoring microbial respiration for evaluating management and bioremediation strategies in agricultural soils impacted by pesticides.

Keywords: Pesticides. Soil bioremediation. Sugarcane. Vinasse. Weeds.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Aplicação manual da vinhaça nos vasos.....	22
Figura 2	- Aplicação manual do biofertilizante nos vasos.....	22
Figura 3	- Pulverização automática do tebuthiuron e thiamethoxam nos vasos em ambiente fechado.....	23
Figura 4	- Desenho esquemático do respirômetro.....	24
Figura 5	- (a) Pesagem do solo para preparo do ensaio respirométrico. (b) Adição da solução no monitoramento da biodegradação nos respirômetros.....	25
Figura 6	- Análise da condutividade elétrica do KOH residual para quantificação da evolução de CO ₂	25
Figura 7	- Infográfico da metodologia de pesquisa.....	28
Figura 8	- Curvas de crescimento sigmoide (modelo de Gompertz) do CO ₂ acumulado nos diferentes tratamentos de solo ao longo de 77 dias de incubação.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Caracterização do solo utilizado no experimento.....	19
Tabela 2	- Estimativa do resíduo de tebuthiuron no solo no quinto ano, considerando aplicações anuais consecutivas (1º ao 3º ano) e meia-vida de 12 meses.....	20
Tabela 3	- Caracterização da vinhaça utilizada no experimento.....	20
Tabela 4	- Parâmetros ajustados pelo modelo de Gompertz para a respiração microbiana nos diferentes tratamentos.....	32

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1. Objetivo geral	14
2.2. Objetivos específicos	14
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	15
3.1. Comportamento ambiental do herbicida tebuthiuron e do inseticida thiamethoxam no solo.....	15
3.2. Microbiota do solo e sua interação com pesticidas no solo.....	16
3.3. Biorremediação de solos agrícolas e bioestimulação	17
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
4.1. Solo, pesticidas, vinhaça e biofertilizante	19
4.2. Delineamento experimental.....	21
4.3. Ensaio respirométrico	23
4.4. Análise estatística dos dados.....	26
4.4.1. Modelagem de Gompertz.....	26
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
6. CONCLUSÃO	35
7. REFERÊNCIAS.....	36

1. INTRODUÇÃO

Defensivos agrícolas são substâncias de ação química, física ou biológica, capazes de controlar pragas agrícolas que prejudicam a produtividade e a qualidade de uma cultura de importância econômica, podendo atuar durante a produção, a colheita e o armazenamento. No entanto, mesmo apresentando benefícios à produção agrícola, esses produtos podem deixar resíduos no solo para uma seguinte cultura, além de poder apresentar potenciais riscos ambientais pela contaminação de agroecossistemas e corpos d'água (Santos *et al.*, 2023).

Alguns defensivos agrícolas apresentam um longo período residual no solo, o que pode aumentar o risco de contaminação ambiental. Segundo Ferreira *et al.* (2024), o tebuthiuron, e de acordo com Wu *et al.* (2025), o thiamethoxam, são produtos comumente utilizados na cultura da cana-de-açúcar que quando não bem manejos, pode trazer riscos ao meio ambiente por apresentar essa característica.

Além dos defensivos citados, a vinhaça é um produto largamente aplicado em lavouras canavieiras. Este subproduto da produção de etanol apresenta alta concentração de nutrientes (potássio, nitrogênio e fósforo), mas também possui potencial de impacto ambiental, caso não haja manejo adequado (Correia *et al.*, 2019). Em associação a esses produtos fitossanitários, a presença de vinhaça pode potencializar um quadro de contaminação, tanto no solo quanto nos corpos d'água. No entanto, quando aplicada em doses indicadas, essa associação torna-se benéfica para o meio, cujos microrganismos naturais utiliza este subproduto como uma fonte adicional de carbono (Frias *et al.*, 2024).

Dessa forma, surgem algumas alternativas de tratamento de solos agrícolas para evitar os prejuízos ambientais e em culturas de sucessão pelos prejuízos residuais dos defensivos. Como exemplo, tem-se a biorremediação por microrganismos com capacidade de degradar pesticidas a partir de processos enzimáticos, apresentando vantagens como o baixo custo e a compatibilidade ecológica (Lopes *et al.*, 2022). Essa biotecnologia consiste na metabolização total dos pesticidas ou na alteração na propriedade químicas das moléculas, resultando em um processo de biodegradação de forma mais rápida (Gomathi *et al.*, 2023).

Assim, devido ao uso frequente dos defensivos, é de extrema importância que haja técnicas que avaliem o impacto nos agroecossistemas e que permitam estabelecer estratégias de tratamento sustentáveis, estimulando o metabolismo

microbiano do solo. Entretanto, essa atividade fisiológica pode ser influenciada por diferentes fatores, o que justifica avaliar a respiração destes microrganismos frente condições variáveis do solo com estas substâncias com o intuito de propor métodos de biorremediação eficientes (Lopes *et al.*, 2022).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Monitorar a respiração microbiana em solo com o herbicida tebuthiuron e o inseticida thiamethoxam associados ou não à vinhaça ou ao biofertilizante.

2.2. Objetivos específicos

- Verificar o efeito da adição de vinhaça sobre o metabolismo microbiano em solos com tebuthiuron e thiamethoxam;
- Analisar a influência do biofertilizante na atividade microbiana destas amostras de solo; e
- Identificar possíveis efeitos dos pesticidas sobre a respiração microbiana do solo.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Comportamento ambiental do herbicida tebuthiuron e do inseticida thiamethoxam no solo

O herbicida tebuthiuron é um defensivo pré-emergente seletivo que atua inibindo a fotossíntese no fotossistema II, sendo recomendado para controle de daninhas monocotiledôneas e dicotiledôneas na cultura da cana-de-açúcar (Ferreira *et al.*, 2024). Entretanto, esse herbicida apresenta alta persistência no ambiente e, embora ocorra remoção natural ao longo do tempo, esse processo é lento e pode levar cerca de dois anos para que o composto seja significativamente degradado. Além disso, o tebuthiuron possui elevada mobilidade no solo, o que favorece sua lixiviação para camadas mais profundas, podendo atuar como agente contaminante de águas subterrâneas e lençóis freáticos (Guimarães *et al.*, 2022).

Outro aspecto preocupante é o potencial de causar fitotoxicidade em culturas sucessivas, especialmente em espécies para as quais o uso desse herbicida não é recomendado, como por exemplo na soja (Belo *et al.*, 2007). Esse comportamento pode variar de acordo com as características do solo. Em solos arenosos, por exemplo, o tebuthiuron tende a lixiviar com maior facilidade. Já em solos arenosos e argilosos, quando o herbicida é adsorvido às partículas do solo, sua degradação por microrganismos pode ser reduzida, o que prolonga sua permanência no ambiente (Guimarães *et al.*, 2022).

Já o thiamethoxam é um inseticida neonicotinoide, o qual se liga aos receptores nicotínicos de acetilcolina (nAChRs) no sistema nervoso dos insetos, interrompendo a transmissão neural e ocasionando a morte dos insetos pragas, como por exemplo a cigarrinha-das-raízes (*Mahanarva fimbriolata*), praga também comum na cultura da cana-de-açúcar. Esse defensivo agrícola é amplamente utilizado nas lavouras por sua alta eficácia, porém também possui uma longa atividade residual e em conjunto a alta solubilidade em água, pode-se ser um agente com potencial contaminante do solo e da água (Wu *et al.*, 2025).

A degradação desse inseticida pode variar em diversos cenários, desde semanas a anos, como por exemplo, em condições secas uma meia-vida de 200 a 301 dias. O fato da meia vida ser longa e variada, pode significar em um efeito negativo tanto nos microrganismos do solo quanto nas culturas subsequentes. Assim, já foi relatado que o thiamethoxam degrada de 49% a 98% após 15 e 25 dias em

condições ambientais pela ação de fungo *Phanerochaete chrysosporium*, agente da podridão branca (Shukla *et al.*, 2024).

3.2. Microbiota do solo e sua interação com pesticidas no solo

A saúde do solo é essencial para manter a produção agrícola, tanto em relação à produtividade esperada quanto à qualidade das culturas. Em um solo saudável, estão presentes microrganismos fundamentais (bactérias, fungos e arqueias) para processos como a ciclagem de nutrientes, a decomposição da matéria orgânica e a supressão de doenças. Em contrapartida, quando esse ambiente não apresenta condições adequadas para o seu desenvolvimento, pode haver impacto direto na produtividade agrícola (Chen *et al.*, 2024).

Dessa forma, diversos fatores são responsáveis por melhorar ou prejudicar a saúde do solo. A disponibilidade de carbono, por exemplo, contribui para a quantidade da comunidade microbiana, enquanto o pH e a textura do solo influenciam sua diversidade. Além disso, solos agrícolas tendem a apresentar uma comunidade microbiana menor quando comparados a solos naturais. No entanto, práticas como o uso equilibrado de fertilizantes e a rotação de culturas podem contribuir positivamente para esse sistema. Ainda, práticas como o uso de defensivos agrícolas podem afetar negativamente tanto a abundância quanto a diversidade bacteriana (Christel *et al.*, 2024).

Neste contexto, os defensivos são amplamente utilizados com o objetivo de controlar insetos-praga, doenças e plantas daninhas, que prejudicam a produtividade e a qualidade dos produtos agrícolas. No entanto, como já mencionado, alguns desses defensivos possuem longo efeito residual, o que pode resultar na contaminação dos solos agrícolas (Walder *et al.*, 2022).

Além disso, a preocupação não se limita apenas à contaminação, pois a presença desses compostos pode influenciar, de forma positiva ou negativa, a microbiota do solo. Observa-se que comunidades de fungos podem ser favorecidas pela presença de resíduos de defensivos agrícolas. Em contrapartida, bactérias importantes, como as responsáveis pela fixação de nitrogênio, tendem a ser negativamente afetadas (Walder *et al.*, 2022).

3.3. Biorremediação de solos agrícolas e bioestimulação

O longo efeito residual de defensivos agrícolas, como o tebuthiuron e o thiamethoxam, pode não apenas afetar a produtividade de culturas sucessoras, mas também causar problemas ambientais, especialmente relacionados à saúde do solo. Nesse contexto, uma das alternativas para minimizar esses impactos é a biorremediação desses defensivos. Esse processo pode ser realizado de diferentes formas, sendo a degradação microbiana uma das principais estratégias, por se tratar de uma opção sustentável (Shahid, 2026).

O processo de degradação microbiana consiste na metabolização total das moléculas dos pesticidas pelos próprios microrganismos ou alteração na propriedade químicas dessas moléculas, permitindo que o processo de degradação ocorra de forma mais rápida e, conseqüentemente, diminui o risco de contaminação do solo (Gomathi *et al.*, 2023).

No entanto, não basta apenas a ação dos microrganismos sobre essas moléculas. As condições do ambiente podem influenciar positiva ou negativamente sua atividade. Fatores como teor de umidade do solo, disponibilidade de nutrientes, pH, temperatura e nível de oxigênio exercem papel importante nesse processo (Gomathi *et al.*, 2023). A vinhaça, por exemplo, é um produto rico em nutrientes, comumente utilizados em solos agrícolas, principalmente para suprir as necessidades das plantas. Assim, estudos indicam que insumos também podem beneficiar a microbiota do solo, favorecendo a atividade microbiana (Lourenço *et al.*, 2018).

Como exemplo, tem-se a bioestimulação que se trata da alteração das condições do meio pela adição de nutrientes, com o objetivo de melhorar e aumentar a atividade metabólica dos microrganismos presentes no solo. Essa prática é bem-vista por proporcionar resultados sustentáveis, além de ser de baixo custo e eficaz no contexto agrícola (Li *et al.*, 2025).

Dentre os compostos que podem se configurar como agente de bioestimulação na lavoura canavieira, está a vinhaça. Rica em nutrientes, ela melhora os atributos do solo e, conseqüentemente, aumenta a produtividade agrícola (Pinto *et al.*, 2022). Sua presença também favorece o aumento da atividade e da diversidade microbiana, além de impactar positivamente o crescimento vegetal (Alves *et al.*, 2025).

Outro produto que vem ganhando destaque na agricultura neste mesmo contexto é o biofertilizante. Entre os diferentes tipos disponíveis, como os inorgânicos

e os orgânicos, todos apresentam eficiência nutricional. No entanto, a biofertilização destaca-se como prática mais sustentável, além de proporcionar melhores resultados na melhoria das condições ideais para a atividade microbiana do solo (Sabir *et al.*, 2021).

Assim é evidenciado que o uso de defensivos agrícolas como o tebuthiuron e o thiamethoxam, embora essencial para o controle de plantas daninhas e insetos-praga na cultura da cana-de-açúcar, respectivamente, está associado a importantes implicações ambientais. Ambos apresentam elevada persistência e mobilidade no solo, tendo assim grande potencial de contaminação tanto em águas de águas subterrâneas quanto em solos agrícolas, podendo comprometer culturas sucessoras. Além disso, verificou-se que esses compostos podem impactar negativamente a microbiota do solo, reduzindo sua diversidade e atividade essenciais para a ciclagem de nutrientes e manutenção da qualidade do solo. Assim, a literatura reforça a necessidade de estratégias que minimizem esses efeitos.

Diante desse cenário, estudos apontam a biorremediação, com destaque para a bioestimulação, como uma alternativa promissora para acelerar a degradação desses compostos no solo. A adição de insumos ricos em nutrientes, como vinhaça e biofertilizantes, pode favorecer o desenvolvimento e a atividade metabólica dos microrganismos, potencializando a degradação de defensivos agrícolas e contribuindo para a recuperação da saúde do solo. Nesse contexto, este trabalho parte da hipótese de que a utilização desses produtos é capaz de aumentar a atividade microbiana e, consequentemente, promover a redução do efeito residual de herbicidas e inseticidas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em uma estufa na Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Universidade Estadual Paulista, do campus de Dracena - coordenadas 21°28'57" latitude sul e 51°31'58" longitude oeste com altitude média de 400 m.

4.1. Solo, pesticidas, vinhaça e biofertilizante

O solo do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico com textura arenosa (809 g/kg) foi coletado da própria fazenda experimental da FCAT/UNESP, campus de Dracena, em uma profundidade de 20 cm, peneirado e armazenado dentro da estufa, posteriormente foi realizada análise físico-química (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização do solo utilizado no experimento

P-resina Fósforo mg/dm ³	MO Mat. Org. g/dm ³	pH CaCl ₂	K Potássio mmolc/dm ³	Ca Cálcio mmolc/dm ³	Mg Magnésio mmolc/dm ³	H+Al Ac. Potencial mmolc/dm ³	Al Alumínio mmolc/dm ³	SB Soma Bases mmolc/dm ³	S-SO ₄ Enxofre mg/dm ³
1	7	4.4	2.2	4	15	15	17	21.2	28
CTC Cap. Troca Cat. mmolc/dm ³	V Sat. Bases %	Ca/CTC %	Mg/CTC %	m Sat. Alumínio %	B Boro mg/dm ³	Cu Cobre mg/dm ³	Fe Ferro mg/dm ³	Mn Manganês mg/dm ³	Zn Zinco mg/dm ³
36.2	59	11	41	45	0.10	0.2	2	2.1	0.2

Interpretações dos Teores

 Alto

 Médio

 Baixo

Fonte: Laboratório de Fertilidade do Solo – FEIS/UNESP (2024).

Para o herbicida tebuthiuron (Combine[®] 500 SC, 500 g i.a. L⁻¹, Dow AgroSciences Industrial Ltda.), considerou-se a meia-vida de 12 meses da molécula, assumindo-se uma dissipação anual de 50% (Ferreira *et al.*, 2024). Com base nesse pressuposto, estimou-se o acúmulo residual ao longo de aplicações consecutivas (Tabela 2). No quinto ano, na ausência de nova aplicação, a fração remanescente no solo corresponde a 0,4375x da dose inicial. Assim, para uma dose de 1000 g i.a. ha⁻¹, recomendado pela bula do produto, o resíduo estimado foi de 437,5 g ha⁻¹ ou 500 g ha⁻¹ aplicados realmente. O inseticida thiamethoxam (Actara[®] 250 WG, 250 g i.a. L⁻¹, Syngenta Proteção de Cultivos Ltda.) foi aplicado conforme recomendação de bula, na dose de 1,0 L ha⁻¹.

Tabela 2. Estimativa do resíduo de tebuthiuron no solo no quinto ano, considerando aplicações anuais consecutivas (1º ao 3º ano) e meia-vida de 12 meses

Ano de aplicação	Dose aplicada (g i.a. ha ⁻¹)	Resíduo (g i.a. ha ⁻¹)
1º ano	1,00	1,0000
2º ano	1,00	1,5000
3º ano	1,00	1,7500
4º ano	-	0,8750
5º ano	-	0,4375

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A vinhaça utilizada foi coletada da usina sucroalcooleira da região de Dracena-SP, também submetida a análise físico-química (Tabela 3), a qual o volume de vinhaça a ser aplicado foi calculado em função do teor de potássio após análise do solo (219 m³ ha), de acordo com Norma Técnica P4.231 (CETESB, 2015), a qual para cálculo se utilizou a Equação 1 a seguir, obtendo-se assim 50 mL de vinhaça por vaso de 4 L.

Tabela 3. Caracterização da vinhaça utilizada no experimento

Parâmetro	Resultado	Unidade
Nitrogênio Total	1077,4	
Nitrogênio amoniacal	431,2	
Fósforo total	169,8	
Potássio	6400,0	
Cálcio	653,2	mg/L
Sulfato	3188,2	
Sódio	36,7	
Cloretos	2200,0	
Nitrogênio nitrato	135,0	
Nitrogênio nitrito	3,7	
pH	4,9	

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

$$\text{Dose de vinhaça} \left(\frac{m^3}{ha} \right) = \{[(0,05 \times CTC) - Ks] \times 3744 + 185\} / Kvi \quad (1)$$

em que,

CTC: Capacidade de Troca Catiônica do solo (cmolc/dm^3);

Ks: teor de potássio do solo (cmolc/dm^3);

3744: Fator de conversão (cmolc/dm^3 para kg/ha e massa específica);

185: Exigência média de K_2O (em kg) extraída da cana por hectare/corte; e

Kvi: concentração de potássio na vinhaça (em $\text{kg de K}_2\text{O/m}^3$).

Por fim, o biofertilizante foi obtido a partir de um produto comercial pela empresa AMTec® Bioagrícola e a sua aplicação seguiu as instruções do fabricante, aplicando 50 mL por vaso, sendo utilizado vasos de 4 litros. No entanto, esse produto estava em processo de pesquisa, a qual ainda não foi registrado e portanto sem informação de composição.

4.2. Delineamento experimental

O delineamento experimental foi do tipo inteiramente casualizado em esquema fatorial 4x3 a partir dos seguintes fatores:

- Pesticidas: ausência; tebuthiuron (TB); thiamethoxam (TX); e TB+TX; e
- Fertilizantes: ausência; vinhaça (VN); biofertilizante (BF).

Dessa forma foram realizados 12 tratamentos com cinco repetições cada, avaliados por 77 dias.

Inicialmente, vasos de capacidade de 4 litros foram preenchidos com o solo corrigido através da aplicação de calcário dolomítico com PRNT 90% (400 g ha^{-1}) para aumentar a soma das bases até atingir 70% (Cantarella *et al.*, 2022). Em seguida, adicionada a vinhaça de forma manual, uniforme e superficial, simulando a fertirrigação realizada a campo (Figura 1). Da mesma forma, foi aplicado o biofertilizante conforme as instruções do fabricante (Figura 2).

No mesmo dia foi realizada a pulverização do Combine® 500 SC e do Actara® 250 WG em local fechado. Este procedimento utilizou um pulverizador laboratorial automático pressurizado por CO_2 e equipado com seis pontas de jato plano XR 8002 na pressão de 2 bar (vazão de $0,65 \text{ L min}^{-1}$), com espaçamento de 0,5 m, na velocidade de 5 km h^{-1} e uma altura de 0,75 m em relação ao topo dos vasos, resultando assim um volume de aplicação de 250 L ha^{-1} (Figura 3).

Figura 1: Aplicação manual da vinhaça nos vasos



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 2: Aplicação manual do biofertilizante nos vasos



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 3: Pulverização automática do tebuthiuron e thiamethoxam nos vasos em ambiente fechado



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Após a aplicação dos pesticidas e dos biofertilizantes, o solo foi coletado dos vasos e colocados em sacos plásticos para posteriormente serem levados ao laboratório.

4.3. Ensaio respirométrico

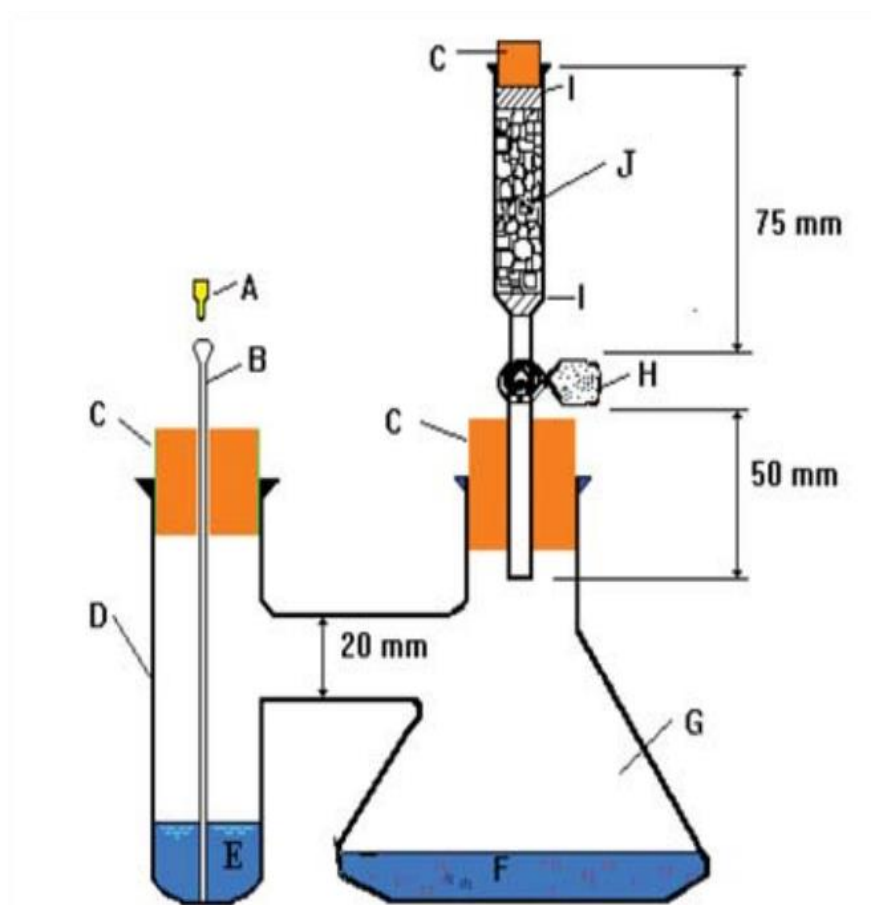
O monitoramento da biodegradação dos tratamentos contendo os pesticidas e/ou os biofertilizantes relativo à atividade microbiana do solo foi realizado pelo método respirométrico. Esta análise possibilita determinar o comportamento do metabolismo microbiano na degradação de uma determinada substância, pela produção de CO₂ no interior do respirômetro em diferentes ensaios (Bartha e Pramer, 1965). O procedimento foi baseado na Norma Técnica L6.350 da Cetesb (1990) e na NBR 14283 (ABNT, 1999).

O respirômetro de Bartha e Pramer (1965) consiste em um sistema fechado, apresentando duas câmaras conectadas (Figura 4). No frasco Erlenmeyer do sistema, ocorre a biodegradação do composto em análise e o CO₂, produzido

durante a respiração microbiana, é capturado pela solução de hidróxido de potássio localizada no braço lateral (Figuras 5). Sua quantificação pode ser determinada por titulação do KOH residual ou por condutividade, após a adição de cloreto de bário (Figura 6).

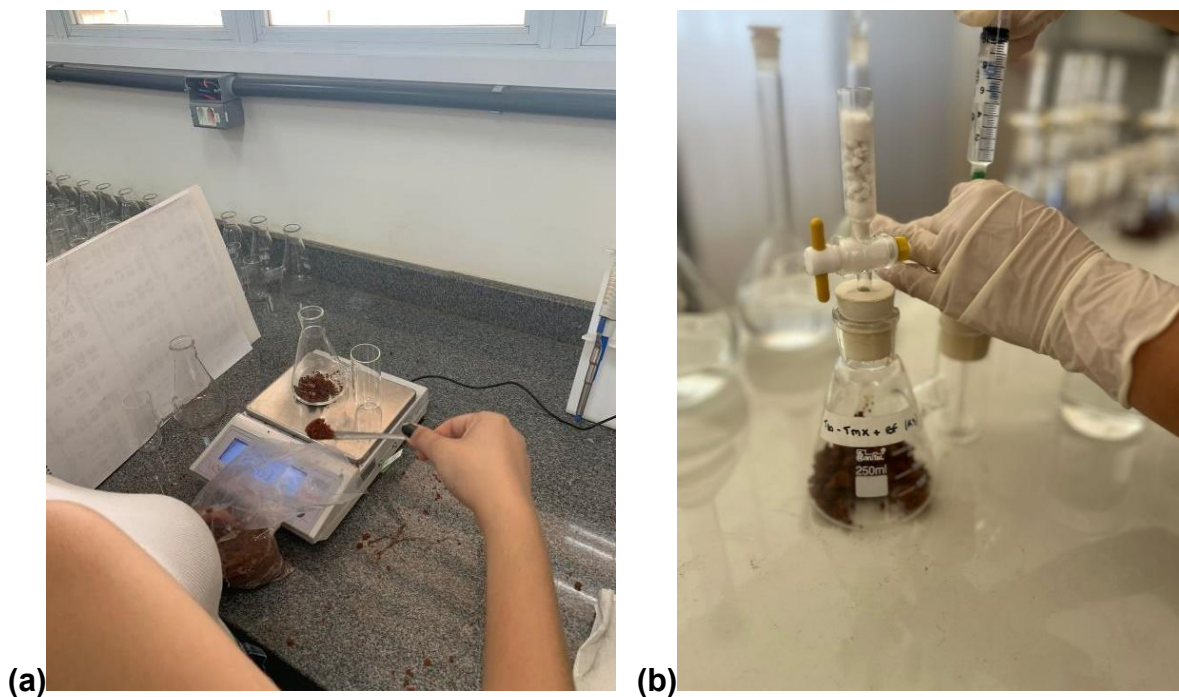
Já com o solo no laboratório e os filtros dos respirômetros já trocados, realizamos cinco amostras por tratamentos, totalizando 75 respirômetros. Nesse preparo inicialmente pesamos 50 g de solo e adicionado no frasco Erlenmeyer (Figura 5a), em seguida foi inserido a solução de KOH no braço lateral do respirômetros (Figura 5b), e após, no injetor de oxigênio por 2 minutos cada, para assim serem levados a BOD. Após 2 dias foi feito a primeira leitura, a qual durante a primeira semana essas leituras aconteceram a cada dois dias, e depois dessa semana, passaram a ser a cada 7 dias.

Figura 4. Desenho esquemático do respirômetro



Legenda: A = Tampa da cânula; B = Cânula; C = Vedação com rolha de borracha; D = Braço lateral; E = Solução de KOH; F = Solo; G = Frasco Erlenmeyer; H = Válvula; I = Camada suporte; J = Filtro de cal sodada. Fonte: ABNT (1999).

Figura 5. (a) Pesagem do solo para preparo do ensaio respirométrico. **(b)** Adição da solução no monitoramento da biodegradação nos respirômetros



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 6. Análise da condutividade elétrica do KOH residual para quantificação da evolução de CO_2



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Assim, o acompanhamento da atenuação natural foi monitorado pelo procedimento estabelecido por Faria *et al.* (2013). Logo, garante-se eficiência e menor risco de interferência dos resultados por variações nos protocolos experimentais. Com base na Equação 2 ($R^2 = 0,9997$), é possível transformar os valores de condutividade em mS para mg de CO₂.

$$G_{CO_2} = 1554,8 - 95,726 * C \quad (2)$$

em que:

G_{CO_2} = geração de gás carbônico em mg;

C = condutividade em mS.

4.4. Análise estatística dos dados

A análise estatística consistiu no ajuste dos dados experimentais ao modelo sigmoide de Gompertz, por meio de regressão não linear, para estimativa dos parâmetros cinéticos do metabolismo microbiano (assíntota, ponto de inflexão e taxa de crescimento) em cada tratamento.

A qualidade do ajuste foi avaliada pelos critérios de informação Akaike (AIC), Bayesiano (BIC) e pelo coeficiente de determinação ajustado (R^2). As comparações entre tratamentos foram realizadas de forma descritiva, com base nos parâmetros ajustados e nas tendências observadas nas curvas. Todas as análises foram realizadas utilizando rotinas desenvolvidas no software R (R Core Team, 2019).

4.4.1. Modelagem de Gompertz

No modelo de Gompertz, foram utilizados três parâmetros cinéticos (α , β e k) que permitiram a elaboração de curvas não lineares com diferentes formatos, inclinações e padrões temporais (Equação 3). Para avaliar a qualidade do ajuste do modelo, foram considerados o Critério de Informação de Akaike (AIC), o Critério de Informação Bayesiano (BIC) e o coeficiente de determinação ajustado (R^2).

$$f_{(x)} = \alpha * e^{-\beta e^{-kx}} \quad (3)$$

em que,

$f_{(x)}$ = respiração microbiana;

x = tempo, em dias;

α = assíntota superior ou máximo desenvolvimento da variável de interesse;

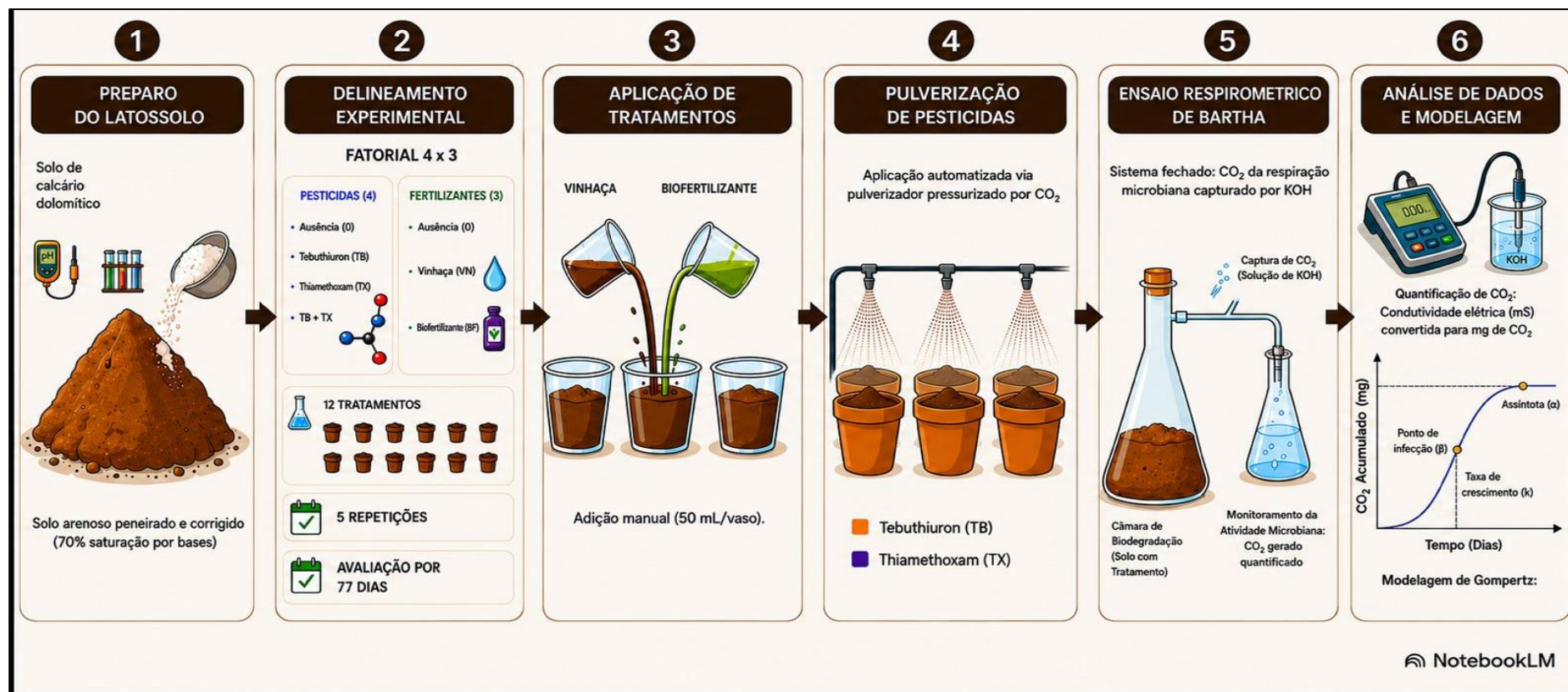
β = parâmetro relacionado ao ponto de inflexão da curva;

k = taxa de crescimento específico;

ake^{-1} = taxa de crescimento absoluto no ponto de inflexão; e
 e = número de Euler.

Para melhor compreensão das etapas experimentais desenvolvidas, a Figura 7 apresenta um infográfico resumindo a metodologia empregada neste estudo. O esquema contempla desde o delineamento experimental e aplicação dos tratamentos até as análises microbiológicas e estatísticas realizadas para avaliação da biodegradação e atividade microbiana do solo.

Figura 7. Infográfico da metodologia de pesquisa.



Fonte: Imagem elaborada pela autora com auxílio da ferramenta de inteligência artificial generativa NotebookLM (Google), a partir do prompt descritivo na metodologia experimental do estudo. Acesso em: 27 maio 2026

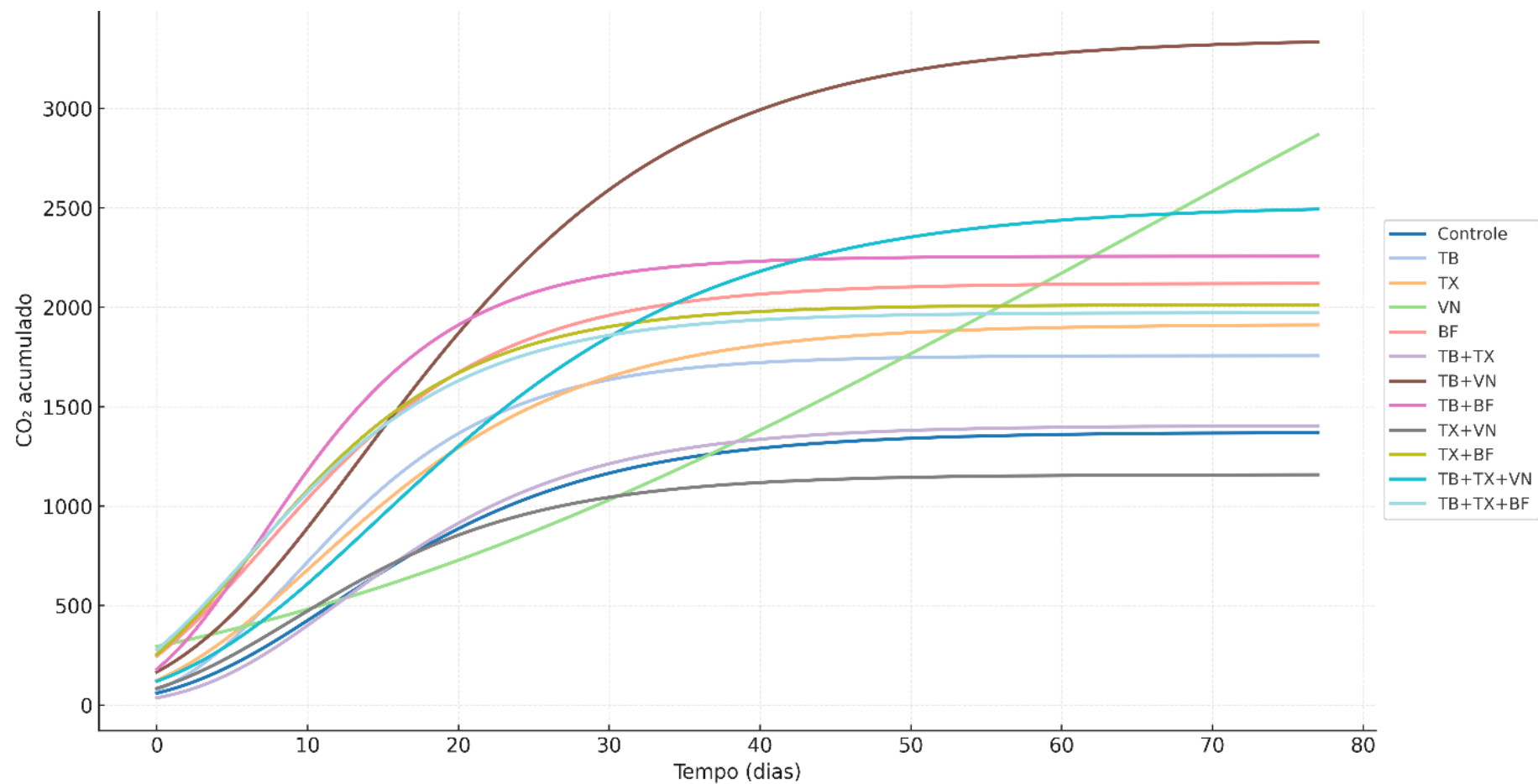
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 8 apresenta as curvas de crescimento sigmoide ajustadas pelo modelo de Gompertz para o CO₂ acumulado em cada tratamento, evidenciando as diferenças no padrão de resposta microbiana entre vinhaça isolada, misturas e demais grupos.

A curva de crescimento microbiano do solo tratada com vinhaça isolada (VN) destacou-se pela magnitude do CO₂ acumulado. Isso corrobora ao que foi observado onde os autores analisaram a germinação de sementes de *Lactuca sativa*, utilizadas como organismos-teste. O ensaio indicou que a presença de vinhaça provavelmente favoreceu a biodegradação de defensivos agrícolas, como o thiamethoxam e o tebutiuron, resultando em um maior índice de germinação, ou seja, devido ao melhor desenvolvimento das sementes, pode-se inferir que, nesse cenário, os microrganismos foram capazes de aumentar sua atividade e possivelmente sua comunidade (Frias *et al.*, 2024).

No entanto, todos os demais tratamentos apresentaram uma tendência clara de estabilização da atividade microbiana, evidenciada pelo alcance de um platô na curva de CO₂ acumulado, o tratamento VN manteve incremento contínuo durante todo o período experimental de 77 dias, sem sinal de esgotamento ou declínio. Foi o mesmo que o estudo que avaliou o impacto da aplicação combinada dos herbicidas glifosato e o MCPA (ácido metil-4-clorofenoxiacético) com o fungicida difenoconazole sobre a atividade e estrutura da comunidade microbiana do solo e a degradação do glifosato. As amostras de solo foram incubadas sob diferentes tratamentos com pesticidas, sendo monitoradas a mineralização do herbicida e as respostas microbiológicas por análises isotópicas e moleculares. Neste estudo, o uso do herbicida glifosato isoladamente, e em conjunto com herbicida MCPA e o fungicida difenoconazol, promoveu alteração na comunidade microbiana, podendo ter levado um efeito negativo na sua atividade, pois a presença desses produtos ocasionou um estresse no meio e, conseqüentemente, prejudicou a eficiência do metabolismo microbiano (Mäder *et al.*, 2024).

Figura 8. Curvas de crescimento sigmoide (modelo de Gompertz) do CO₂ acumulado nos diferentes tratamentos de solo ao longo de 77 dias de incubação.



TB = Tebuthiuron, TX = Thiamethoxam, VN = Vinhaça, BF = Biofertilizante comercial.

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Esse comportamento único do tratamento com vinhaça reflete a diversidade e recalcitrância dos compostos orgânicos presentes nesse subproduto, que libera carbono ao longo do tempo e sustenta diferentes sucessões de grupos microbianos no solo, apresentando uma relação C/N baixa (Correia, 2019; Lopes *et al.*, 2022). Os resultados indicaram que a vinhaça isolada, além de promover o maior acúmulo de CO₂, sustentou atividade microbiana por mais tempo devido à lenta degradação de compostos orgânicos complexos presentes em sua matriz. Essa característica é especialmente relevante em solos tropicais, frequentemente pobres em matéria orgânica, onde a adição de resíduos com variada complexidade de degradação pode favorecer a resiliência e diversidade dos microrganismos autóctones (Correia, 2019).

Os parâmetros ajustados pelo modelo de Gompertz para cada tratamento, incluindo assíntota (α), ponto de inflexão (β), taxa de crescimento específico (k), coeficiente de determinação (r^2) e critérios de informação (AIC e BIC), estão apresentados na Tabela 4.

Os valores da assíntota para o tratamento com vinhaça isolada (VN, α = 6441) e do tempo de inflexão (63 dias) foram muito superiores aos dos demais tratamentos, sinalizando tanto um alto metabolismo microbiano quanto maior persistência do processo. Isso foi evidenciado pela correlação entre a presença de matéria orgânica (MO) na vinhaça e sua função como fonte de energia para os microrganismos. Segundo Carpanez *et al.* (2022), a matéria orgânica desempenha papel fundamental no solo agrícola, atuando como fonte de nutrientes para as plantas, além de melhorar a aeração, a permeabilidade, a capacidade de retenção de água; contribuir para o aumento do pH; e reduzir a toxicidade de metais pesados. Porém, essa matéria orgânica só se torna disponível após sua mineralização realizada pelos próprios microrganismos do solo, ou seja, a MO é essencial como fonte de energia para os microrganismos responsáveis pela ciclagem de nutrientes (Carpanez *et al.*, 2022).

Por outro lado, os tratamentos envolvendo a vinhaça e os pesticidas (Tebuthiuron,+ Vinhaça, Thiamethoxam + Vinhaça, Tebuthiuron,+ Thiamethoxam+ Vinhaça) apresentaram patamares intermediários de CO₂ acumulado e suas curvas ajustadas pelo modelo de Gompertz. Diante disso, Nantes *et al.* (2022), afirmaram que mesmo com a transformação em CO₂ menor, o processo biológico foi mais rápido e eficaz quando estudado isoladamente, tanto para o tebuthiuron quanto para o

thiamethoxam. No entanto, segundo a curva a estabilização da atividade microbiana ocorreu ainda no período de incubação, indicando esgotamento do substrato biodisponível ou limitação por ação dos pesticidas. Nesses casos, apesar do estímulo inicial promovido pela vinhaça, os pesticidas presentes limitaram a mineralização do carbono, levando à estabilização precoce das curvas de CO₂. Isso pode ocorrer por diferentes mecanismos: toxicidade direta dos pesticidas a grupos sensíveis de microrganismos, alteração da composição da comunidade microbiana, indução de estresse oxidativo ou, ainda, redução da eficiência enzimática para degradação de compostos mais recalcitrantes (Paula *et al.*, 2006; Lopes *et al.*, 2022).

Tabela 4. Parâmetros ajustados pelo modelo de Gompertz para a respiração microbiana nos diferentes tratamentos.

Tratamentos	Complexidade			Parâmetros		
	α	β	k	r^2	AIC	BIC
Controle	1371,91	3,14	0.10	1,00***	157,70	160,53
TB	1757,48	3,15	0.13	0,99***	180,31	183,14
TX	1913,98	2,73	0,10	0,99***	170,52	173,35
VN	6441,53	3,09	0,02	0,93***	215,60	218,43
BF	2121,34	2,15	0,11	0,97***	194,84	197,67
TB+TX	1405,00	3,67	0,11	0,99***	162,02	164,85
TB+VN	3353,07	3,00	0,08	0,96***	170,80	172,90
TB+BF	2257,14	2,53	0,14	0,97***	196,42	199,26
TX+VN	1158,95	2,63	0,11	0,98***	176,10	178,93
TX+BF	2012,64	2,07	0,12	0,96***	196,85	199,69
TB+TX+VN	2514,20	3,05	0,08	0,97***	202,63	205,46
TB+TX+BF	1973,38	1,96	0,12	0,96***	195,06	197,90

TB = Tebuthiuron, TX = Thiamethoxam, VN = Vinhaça, BF = Biofertilizante comercial, α = assíntota, β = ponto de inflexão, k= taxa de crescimento específico, r^2 = coeficiente de determinação, AIC= Critério de Informação de Akaike, BIC= Critério de Informação Bayesiano, ***= $p < 0,001$

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A ausência de platô na curva da vinhaça isolada aponta para uma potencialidade maior de remediação quando o solo não está contaminado por pesticidas, reforçando a tese de que a vinhaça pode ser empregada como ferramenta

de bioestimulação para acelerar processos naturais de mineralização e restauração da saúde do solo. Conforme Alves *et al.* (2025), a vinhaça apresenta rápida liberação de nutrientes e constitui uma via de acesso facilitada para os microrganismos. Além disso, quando o solo recebe esse produto, ocorre um estresse metabólico, evidenciado pelas altas atividades respiratórias logo após a aplicação. Esse efeito requer cautela, porém a vinhaça ainda é considerada benéfica para a microbiota do solo.

Por outro lado, em solos impactados por pesticidas, mesmo grandes aportes de carbono provenientes da aplicação de vinhaça podem apresentar implicações ambientais. Lourencetti, Marchi e Ribeiro (2012) avaliaram a influência da vinhaça no comportamento ambiental dos herbicidas diuron, hexazinona e tebuthiuron no solo, com ênfase nos processos de sorção, degradação e potencial de lixiviação. Seu estudo foi conduzido em condições controladas de laboratório, utilizando solos tropicais com e sem aplicação de vinhaça, e os resultados indicaram que a adição de vinhaça pode alterar a persistência e a sorção destes pesticidas, especialmente em solos arenosos, influenciando seu comportamento e potencial de mobilidade no ambiente.

No caso do tratamento com biofertilizante isolado promoveu elevada atividade microbiana do solo, apresentando, contudo, tendência de estabilização ao longo do período avaliado. Quando o biofertilizante foi associado com o tebuthiuron ou com o thiamethoxam, observou-se comportamento semelhante, porém verificou-se menor atividade microbiana nos tratamentos contendo apenas os pesticidas, evidenciando o potencial do biofertilizante em estimular a atividade biológica do solo.

Como já citado anteriormente por Mäder *et al.* (2024), a persistência dos pesticidas no solo afeta negativamente a microbiota do meio. Esse cenário agrava o risco ambiental, pois a supressão ou desequilíbrio das populações microbianas pode comprometer processos ecológicos essenciais, como a ciclagem de nutrientes, além de dificultar a recuperação da qualidade do solo após o impacto químico (Dar; Kaushik; Villareal Chiu, 2020). De acordo com Paula *et al.* (2025), os pesticidas podem induzir ao estresse microbiano, ocasionando um consumo acelerado e esgotamento mais rápido das fontes energéticas, já que a respiração microbiana aumenta e, consequentemente, utilizam substratos disponível mais rapidamente, reduzindo a eficiência de sua atividade metabólica.

Logo, os dados ressaltam a importância do monitoramento temporal da atividade microbiana, já que análises pontuais poderiam subestimar o potencial real de mineralização em tratamentos de liberação lenta, como é o caso da vinhaça. O uso do modelo de Gompertz permitiu caracterizar não apenas o potencial máximo de mineralização, mas também a dinâmica e persistência da resposta, parâmetros fundamentais para avaliação de estratégias de manejo sustentável e biorremediação em ambientes agrícolas.

6. CONCLUSÃO

A presença de vinhaça isolada apresentou o maior potencial de mineralização de carbono, promovendo aumento contínuo da atividade microbiana ao longo de todo o período experimental, sem evidências de estabilização.

Por outro lado, a associação da vinhaça com os pesticidas resultou em estabilização precoce das curvas de emissão de CO₂, sugerindo limitação da atividade microbiana.

Observou-se ainda que, em solos com pesticidas, a aplicação isolada de vinhaça não foi suficiente para restabelecer plenamente a atividade microbiana, indicando a necessidade da adoção de estratégias integradas de biorremediação.

7. REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14283: **Resíduos em solos - Determinação da biodegradação pelo método respirométrico**. Rio de Janeiro, p.8, 1999.

ALVES, P. R. L.; ESTRADA-BONILLA, G. A.; SILVA, A. M. M.; GUMIERE, T.; BIGATON, A.D.; BINI, D.; DOS SANTOS, C.A.; CARDOSO, E. J. B.N. Impacts of Sugarcane Vinasses on the Structure and Composition of Bacterial Communities in Brazilian Tropical Oxisols. **Soil Systems**, v. 9, n. 3, p. 102, 15 set. 2025.

BARTHA, R.; PRAMER, D. Features of a flask and method for measuring the persistence and biological effects of pesticides in soil. **Soil Science**, v.100, n.1, p.68-70, 1965.

BELO, A. F.; SANTOS, E. A.; SANTOS, J. B.; FERREIRA, R. L.; SILVA, A. A.; CECON, P. R.; SILVA, L. L.. Efeito da umidade do solo sobre a capacidade de *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum* em remediar solos contaminados com herbicidas. **Planta Daninha**, v. 25, n. 2, p. 239–249, 2007.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; MATTOS, D.J.; BOARETTO, R.M.; VAN RAIJ, B. Boletim 100: Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. IAC, Campinas, pp. 1–489.

CARPANEZ, T. G.; MOREIRA, V. R.; ASSIS, I. R.; AMARAL, M. C. S. Sugarcane vinasse as organo-mineral fertilizers feedstock: Opportunities and environmental risks. **Science of The Total Environment**, v. 832, p. 154998, ago. 2022.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Norma Técnica P4.231. Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. 3a edição. 15 p. 2015.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Solos: determinação da biodegradação de resíduos: método respirométrico de Bartha**. Norma Técnica L6.350. São Paulo: CETESB, 1990. p.15.

CHEN, Q.; SONG, Y.; AN, Y.; LU, Y.; ZHONG, G. Soil Microorganisms: Their Role in Enhancing Crop Nutrition and Health. **Diversity**, v. 16, n. 12, p. 734, 29 nov. 2024.

CHRISTEL, A.; CHEMIDLIN PREVOST-BOURÉ, N.; DEQUIEDT, S.; SABY, N.; MERCIER, F.; TRIPIED, J.; COMMENT, G.; VILLERD, J.; DJEMIEL, C.; HERMANT, A.; BLONDON, M.; BARGEOTF, L.; MATAGNE, E.; HERRIGUE, W.; MARON, P. A.; RANJARD, L. Differential responses of soil microbial biomass, diversity and interactions to land use intensity at a territorial scale. **Science of The Total Environment**, v. 906, p. 167454, jan. 2024.

CORREIA, J. E. **Histórico da aplicação de vinhaça em canaviais: bioensaios de toxicidade terrestre e aquática**. 2019. 141 f. Tese (Doutorado em Ciências biológicas) – Instituto de Biociências, UNESP – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2019.

DAR, M. A.; KAUSHIK, G.; VILLAREAL CHIU, J. F. Pollution status and biodegradation of organophosphate pesticides in the environment. *In: Abatement of Environmental Pollutants*. [S.l.]: Elsevier, 2020. p. 25–66.

FARIA, A. U.; MARIN-MORALES, E.; ANGELIS, D. F. **Manual de protocolos de laboratório**. Rio Claro: Departamento de Bioquímica e Microbiologia - UNESP - IB, 2013.

FERREIRA, J. H. D. S.; MELO, C. A. D.; MORAES, M. F. D.; SILVA, I. P. D. F. Residual activity and sorption of tebuthiuron in different soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 2, p. e275280, fev. 2024.

FRIAS, Y. A.; VALÉRIO, T. S.; MOREIRA, B. R. D. A.; CRUZ, V. H.; DOS SANTOS, A. L.; ANDRIOLLI, V.; PINCERATO, G. M. T.; LOPES, P. R. M. Pennisetum glaucum in reducing ecotoxicity in soil with tebuthiuron, thiamethoxam and vinasse. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 18, p. 101470, dez. 2024.

GOMATHI, S.; AMBIKAPATHY, V.; PANNEERSELVAM, A. Biodegradation and bioaugmentation of pesticides using potential fungal species. *In: Plant-Microbe Interaction - Recent Advances in Molecular and Biochemical Approaches*. [S.l.]: Elsevier, 2023. p. 79–94.

GUIMARÃES, A. C. D.; DE PAULA, D. F.; MENDES, K. F.; DE SOUSA, R. N.; ARAÚJO, G. D.; INOUE, M. H.; TORNISIELO, V. L. Can soil type interfere in sorption-desorption, mobility, leaching, degradation, and microbial activity of the ¹⁴C-tebuthiuron herbicide? **Journal of Hazardous Materials Advances**, v. 6, p. 100074, maio 2022.

LI, Y.; YANG, J.; SONG, Y.; WEI, M. Progress in biostimulation-based remediation of TPH-contaminated soils: a comprehensive review. **PeerJ**, v. 13, p. e19991, 8 set. 2025.

LOPES, P. R. M.; CRUZ, V. H.; DE MENEZES, A. B.; GADANHOTO, B. P.; MOREIRA, B. R. A.; MENDES, C. R.; MAZZEO, D. E. C.; DILARRI, G.; MONTAGNOLLI, R. N. Microbial bioremediation of pesticides in agricultural soils: an integrative review on natural attenuation, bioaugmentation and biostimulation. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 21, p. 851–876, 2022.

LOURENÇO, K. S.; SULEIMAN, A. K. A.; PIJL, A.; VAN VEEN, J. A.; CANTARELLA, H.; KURAMAE, E. E. Resilience of the resident soil microbiome to organic and inorganic amendment disturbances and to temporary bacterial invasion. **Microbiome**, v. 6, n. 1, p. 142, dez. 2018.

LOURENCETTI, C.; DE MARCHI, M. R. R.; RIBEIRO, M. L. Influence of sugar cane vinasse on the sorption and degradation of herbicides in soil under controlled conditions. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 47, n. 10, p. 949–958, nov. 2012.

MÄDER, P.; STACHE, F.; ENGELBART, L.; HUHN, Z. H.; HOFMAN, J.; POLL, C.; KANDELER, E. Effects of MCPA and difenoconazole on glyphosate degradation and soil microorganisms. **Environmental Pollution**, v. 362, p. 124926, dez. 2024.

NANTES, L. S., ARAGÃO, M. B., MOREIRA, B. R. DE A., FRIAS, Y. A., VALÉRIO, T. S., DE LIMA, E. W., SILVA VIANA, R. DA.; LOPES, P. R. M. Synergism and antagonism in environmental behavior of tebuthiuron and thiamethoxam in soil with vinasse by natural attenuation. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 20, n. 5, p. 4883–4892, jun 2022

PAULA, A. M; SOARES, C. R. F. S.; SIQUEIRA, J. O. Biomassa, atividade microbiana e fungos micorrízicos em solo de “landfarming” de resíduos petroquímicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 448–455, 2006.

PINTO, L. E. V.; CORDEIRO, C. F. D. S.; DE ARAUJO, A. S. F.; DE ARAUJO, F. F. Vinasse improves soil quality and increases the yields of soybean, maize, and pasture. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 5, p. 335–340, maio 2022.

PAULA, M. P. D. O.; ROESCH, L. F. W.; RAMOS, A. C.; TÓTOLA, M. R.; PYLRO, V. S. Bacterial consortia enhance glyphosate breakdown and drive soil microbial dynamics. **Chemosphere**, v. 387, p. 144677, out. 2025.

SABIR, M.S., SHAHZADI, F.; ALI, F.; SHAKEELA, Q., NIAZ, Z.; AHMED, S. Comparative Effect of Fertilization Practices on Soil Microbial Diversity and Activity: An Overview. **Current Microbiology**, v. 78, n. 10, p. 3644–3655, out. 2021.

SANTOS, M. C. T. **Avaliação qualitativa da capacidade de biodegradação do tolueno por bactérias isoladas**. 2023. 36 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Licenciatura em Ciências Biológicas) – Centro de ciências agrárias, UFSCAR - Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2023.

SHAHID, M. Molecular engineering and in-silico biotechnological innovations for microbial degradation of persistent pesticides. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 217, p. 106833, fev. 2026.

SHUKLA, P. K.; KUMAR, G.; LAL, S.; RATNA, S.; SONI, S. K.; BHATTACHERJEE, A. K.; SAXENA, R. K.. Impact assessment of thiamethoxam on microbial and enzymatic activity in mango rhizosphere. **Environmental Challenges**, v. 15, p. 100918, abr. 2024.

WALDER, F.; SCHMID, M. W.; RIEDO, J.; VALZANO-HELD, A. Y.; BANERJEE, S.; Büchi, L.; BUCHELI, T. D.; VAN DER HEIJDEN, M. G. A. Soil microbiome signatures are associated with pesticide residues in arable landscapes. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 174, p. 108830, nov. 2022.

WU, H.; LIU, L.; WU, D.; SHI, B.; XU, S.; CHEN, H.; XU, J. S. *et al.* First organic small molecule fluorescent probe for thiamethoxam based on bis-tetraphenylimidazole derivative. **Chemical Physics Letters**, v. 878, p. 142324, nov. 2025.