

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

**Dhônata Marcos Perfeito**  
Engenharia Agrônoma

**BIODEGRADAÇÃO DE TEBUTHIURON EM SOLO POR  
ISOLADOS MICROBIANOS DE INOCULANTE AGRÍCOLA**

Dracena

2024

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

**Dhônata Marcos Perfeito**  
Engenheiro Agrônomo

**BIODEGRADAÇÃO DE TEBUTHIURON EM SOLO POR  
ISOLADOS MICROBIANOS DE INOCULANTE AGRÍCOLA**

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  
Coorientador: Me. Victor Hugo Cruz

Dracena  
2024

## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO



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: Biodegradação de tebuthiuron em solo por isolados microbianos de inoculante agrícola**

**Modalidade: Trabalho de Atividades de pesquisa**

**Autor: Dhônata Marcos Perfeito**

**Orientador: Paulo Renato Matos Lopes**

**Co-orientador: Victor Hugo Cruz**

**Número de Créditos: 12**

**Data da aprovação e correção de acordo com as sugestões da Banca: 19/11/2024**

Paulo Renato Matos  
Lopes

Vitor Corrêa de Mattos  
Barretto

Yanca Araujo Frias

## DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Dhônata Marcos Perfeito nascido em 30 de maio de 1998 na cidade de Tupi Paulista/SP. Ingressou em 2019 na Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (FCAT/Unesp) – Câmpus de Dracena, no curso de graduação em Engenharia Agrônômica. Iniciou a participação no Grupo de Estudo e Manejo de Fitopatógenos em 2020 até o momento, contribuindo ao desenvolvimento de pesquisa na área de fitopatologia, com ênfase em controle biológico. Dentre os vários projetos que participou desenvolveu trabalhos intitulado “Efeito de *Trichoderma harzianum* sobre oídio em mudas de urucum” e “*Trichoderma* associado a fertilizante orgânico no controle da podridão de *Fusarium* em cana-de-açúcar”. Posteriormente em 2023 iniciou a participação no Grupo de Ação em Impactos ambientais (GAIA) até o momento na área de microbiologia agrícola, com ênfase em biorremediação. Foi ICSB (Iniciação Científica Sem Bolsa) de 2024-2025 com trabalho intitulado “Comportamento metabólico de microrganismos isolados de inoculante comercial na biodegradação do tebuthiuron”. Realizou treinamento técnico no Laboratório de Bioquímica de Microrganismos e Plantas, do Departamento de Biotecnologia Agropecuária e Ambiental, da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Câmpus de Jaboticabal em 2023. Recebeu menção honrosa pelo 1º melhor trabalho apresentado na 1ª Fase do XXXV Congresso de Iniciação Científica da Unesp, sendo classificado para a segunda onde recebeu Prêmio de Melhor Trabalho da área Ciências Agrárias na 2ª fase do XXXV Congresso de Iniciação Científica da Unesp pelo 3º lugar. Além disso, durante o período de graduação exerceu a função de professor bolsista na disciplina de Geografia do Brasil no projeto de extensão intitulado Cursinho Pré-Vestibular Alvo, e também atuou como monitor na disciplina de Doenças de Plantas. Participou como ouvinte e apresentador em eventos científicos e na área, publicou trabalhos em anais de eventos como primeiro autor e como colaborador e na organização de evento.

## DEDICATÓRIA

Dedico a meu pai Robel Marcos Ribeiro Perfeito e à minha mãe, Deise Lucimara Candido Perfeito, por terem me proporcionado toda educação e me ensinarem a correr atrás dos meus objetivos. Dedico a Luís Adolfo Pina de Oliveira e a Vera Lucia Lopes Oliveira por me adotarem durante o período da faculdade e na vida e à minha namorada Thais Lopes de Oliveira, pela paciência, amor e compreensão. Acredito que, na vida, devemos levar em conta esta frase de Confúcio “Transportai um punhado de terra todos os dias e fareis uma montanha”.

## **AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – Brasil, 313530/2021-1) e expresso minha gratidão à Fundação Agrisus – Brasil (PA 3740/24).

Agradeço à Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de Nível Superior (CAPES – Brasil, Código de financiamento n. 001) e a Pró-Reitoria de Pós – Graduação da Universidade Estadual Paulista (Unesp-Brasil). Agradeço à empresa AMTec Bioagrícola<sup>®</sup>, que nos prestigiou com a oportunidade de desenvolver este trabalho, colaborando no fornecimento de cepas microbianas e ao Grupo Núcleo de Estudo Tecnologia de Aplicação (NETA) da Unesp – Dracena, liderado pelo Prof. Dr. Evandro Pereira Prado, por nos permitir o acesso e fornecer os equipamentos necessários em seu laboratório para a aplicação do herbicida.

Valorizo a Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas (FCAT/Unesp-Brasil) pelo suporte e pelo conhecimento profissional altamente qualificado que me proporcionou, permitindo meu crescimento profissional e pessoal aos longos desses 5 anos. Reconheço o esforço dos técnicos de laboratório e de campo que me ajudaram durante a execução do experimento, tornando possível o seu desenvolvimento.

Sinto-me honrado em contar com o Prof. Dr. Paulo Renato Matos Lopes, que sempre teve paciência e compreensão ao me ensinar, mostrando os caminhos e desmistificando as dificuldades que enfrentei ao longo deste trabalho. Sou grato pelo respeito, companheirismo e amizade, e me sinto privilegiado por ter sido seu orientado nesta reta final do curso, sua confiança e credibilidade me inspiram, e admiro muito o seu trabalho. Estendo minha gratidão ao Grupo Ação em Impactos Ambientais (GAIA) por me acolher na reta final acadêmica e possibilitar a realização deste projeto.

Sou grato ao Victor Hugo Cruz por sempre ter me auxiliado nas avaliações e análises de dados, e por colaborar na redação deste trabalho. Sua orientação e seus “puxões de orelha” foram fundamentais para a conclusão deste projeto. Sou grato pela sua amizade ao longo do curso e por tudo que me ensinou, demonstrando um compromisso admirável com este trabalho, o que indica um futuro profissional promissor.

‘

Aprecio Yanca Frias, que me ajudou a compreender os elementos deste trabalho, oferecendo suporte nas análises e correções. Seu comprometimento e disposição para auxiliar foram essenciais para a realização deste projeto, e sou grato por fazer parte da banca que cumpriu um papel vital para a minha carreira.

Reconheço a importância de Bruno Rafael por sua amizade ao longo do curso e por ter sido meu professor no Cursinho Alvo, onde o conheci. Agradeço por me aconselhar e ajudar a me sentir mais confiante na escolha do curso certo. Sou grato por sua contribuição na análise de dados, que é fundamental para este projeto, e por tudo que me ensinou.

Sou grato à minha namorada, Thais Lopes de Oliveira, por todos esses anos de amor e paciência. Sua companhia foi essencial em todos os momentos difíceis deste curso. Acredito que o amor não está apenas na felicidade, mas na capacidade de vencer os obstáculos da vida com companheirismo e confiança. Durante este período, aprendi que os momentos desafiadores são, na verdade, as chaves para a felicidade e um futuro promissor, fortalecendo a base e a união entre nós.

Aprecio meu amigo Ângelo Geraldo Codonho Júnior por sempre estar presente em minha vida, tanto nos momentos difíceis quanto nos alegres. Pude perceber que a verdadeira amizade se constrói nas adversidades, onde a parceria e a lealdade se firmam. Após o acidente de trânsito, um dos momentos mais difíceis da minha graduação, seu apoio demonstrou que somos mais do que amigos; somos irmãos. Essa amizade, que começou no cursinho, quero que dure por toda a vida.

Agradeço sinceramente ao Prof. Dr. Vitor Corrêa de Mattos Barretto por compartilhar momentos importantes deste curso.

Sou muito grato aos meus pais, Robel Marcos e Deise Lucimara, por sempre me proporcionarem uma educação de qualidade e me ensinarem a buscar meus objetivos e sonhos. Sou grato por todo o amor e carinho que me ofereceram, por me ensinarem a ter responsabilidade e respeito com as pessoas, e por serem civilizados. Admiro muito a coragem e a determinação deles em seguir em frente. Sinto-me honrado e privilegiado por Deus me proporcionar uma linda família que me conforta com seu amor. Sempre soube que se orgulham de minhas conquistas e que estão me incentivando a crescer ainda mais.

Reconheço aos meus sogros/pais, Luís Adolfo e Vera Lúcia, que, durante este período de curso, me fizeram sentir amado e acolhido, aliviando os momentos mais difíceis da graduação. Sou grato por sempre estarem ao meu lado e por me ensinarem

valores fundamentais. Agradeço por serem meus padrinhos de batismo e por me considerarem seu filho. Fico feliz por ter sua presença em minha vida e por vibrarem com minhas conquistas. Sinto-me honrado por ser seu genro e por fazer parte desta família, especialmente quando cuidaram de mim após meu acidente. Agradeço a Deus por essa nova família.

Expresso minha gratidão aos meus tios, Arthur Iwata e Rose Laine, e aos meus primos, por sempre me incentivarem e me ajudarem nos momentos difíceis, permitindo que eu entrasse nesta universidade. Sou grato a Deus por sempre estarem presentes em minha vida.

Aprecio meus amigos Bruna Regina, Marcela Eloi, Izabela Ponzo, Lucas Alves, Jonas Reina, Gustavo Yukiwo e aos companheiros de turma por proporcionarem felicidade e por tornarem todos esses anos gloriosos, repletos de alegria e risadas.

“Meus irmãos, considerem motivo de grande alegria o fato de passarem por diversas provações, pois vocês sabem que a prova da sua fé produz perseverança. E a perseverança deve ter ação completa, a fim de que vocês sejam maduros e íntegros, sem que falte a vocês coisa alguma” Tiago 1:2 – 4

## RESUMO

O estudo visou avaliar os efeitos do tebuthiuron na respiração microbiana do solo, considerando a aplicação do herbicida tebuthiuron e a resposta dos microrganismos a essa exposição. O experimento foi conduzido no laboratório do GAIA (Grupo de Ação em Impactos Ambientais) da FCAT/Unesp-Dracena, utilizando um Latossolo vermelho-amarelo distrófico. O tebuthiuron foi aplicado de acordo com as recomendações do fabricante sendo de 2,0 L de produto comercial ha<sup>-1</sup> (1000 g de ingrediente ativo ha<sup>-1</sup>), que é a dosagem recomendada para solos arenosos. Cinco espécies microbianas, fornecidas por uma empresa comercial, incluindo bactérias e fungos filamentosos (M1, M2, M3, M4 e M5), foram utilizadas. Um solo com microbiota nativa também foi utilizado como tratamento controle (M0). A metodologia incluiu a análise da respiração microbiana por meio da quantificação da emissão de CO<sub>2</sub>. Os resultados do estudo revelaram que a aplicação de tebuthiuron no solo impactou a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida pela respiração microbiana ao longo do tempo. Os tratamentos bioaumentados apresentaram uma maior média acumulada de CO<sub>2</sub> em comparação com o tratamento controle. Em particular, o tratamento M3 obteve a maior média acumulada de CO<sub>2</sub> (1343 mg), seguido pelo M5 (1256 mg) e M1 (1193 mg). A pesquisa buscou contribuir para o conhecimento sobre os impactos dos pesticidas no solo e na sustentabilidade ambiental, destacando a importância de considerar não apenas os efeitos nas plantas-alvo, mas também nas comunidades microbianas do solo.

**Palavras-chave:** bactéria, bioaugmentação, fungo, herbicida, produção de CO<sub>2</sub>, respirometria.

## ABSTRACT

The study aimed to evaluate the effects of tebuthiuron on soil microbial respiration, considering the application of the herbicide tebuthiuron and the response of microorganisms to this exposure. The experiment was conducted in the GAIA (Environmental Impacts Action Group) laboratory of FCAT/Unesp-Dracena, using a dystrophic red-yellow Latosol. Tebuthiuron was applied according to the manufacturer's recommendations, at 2,0 L of commercial product ha<sup>-1</sup> (1000 g of active ingredient ha<sup>-1</sup>), which is the recommended dosage for sandy soils. Five microbial species, supplied by a commercial company, including bacteria and filamentous fungi (M1, M2, M3, M4 and M5), were used. A soil with native microbiota was also used as a control treatment (M0). The methodology included the analysis of microbial respiration by quantifying CO<sub>2</sub> emissions. The results of the study revealed that tebuthiuron application to soil impacted the amount of CO<sub>2</sub> emitted by microbial respiration over time. Bioaugmented treatments showed a higher cumulative mean CO<sub>2</sub> compared to the control treatment. In particular, treatment M3 had the highest cumulative mean CO<sub>2</sub> (1343 mg), followed by M5 (1256 mg) and M1 (1193 mg). The research sought to contribute to the knowledge on the impacts of pesticides on soil and environmental sustainability, highlighting the importance of considering not only the effects on target plants, but also on soil microbial communities.

**Keywords:** bacterium, bioaugmentation, fungal, herbicide, CO<sub>2</sub> production, respirometry.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1:</b> Desenho esquemático de um frasco respirométrico conforme o método de Bartha e Pramer (1965).....                                               | 22 |
| <b>Figura 2:</b> Correção da fertilidade do solo.....                                                                                                           | 25 |
| <b>Figura 3:</b> Pulverização automática do herbicida tebuthiuron. ....                                                                                         | 26 |
| <b>Figura 4:</b> Respirômetros montados. ....                                                                                                                   | 27 |
| <b>Figura 5:</b> Análise da respiração microbiana pelo método respirométrico. ....                                                                              | 28 |
| <b>Figura 6:</b> Produção semanal de CO <sub>2</sub> durante 60 dias de respiração microbiana em solo com tebuthiuron em ambiente controlado.....               | 30 |
| <b>Figura 7:</b> Teste de comparação de médias para a produção acumulada de CO <sub>2</sub> aos 60 dias de respiração microbiana em condições controladas. .... | 33 |
| <b>Figura 8:</b> Produção acumulada de CO <sub>2</sub> durante 60 dias de respiração microbiana no solo com tebuthiuron em condições controladas.....           | 33 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1.</b> Análise química do solo. ....                       | 23 |
| <b>Tabela 2.</b> Tratamentos para monitoramento respirométrico. .... | 24 |

## SUMÁRIO

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                | <b>14</b> |
| <b>2. OBJETIVOS.....</b>                                  | <b>16</b> |
| 2.1 Objetivo geral.....                                   | 16        |
| 2.1 Objetivos específicos .....                           | 16        |
| <b>3. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>                     | <b>17</b> |
| 3.1 Impactos ambientais de herbicidas.....                | 17        |
| 3.2 Biorremediação em agroecossistemas .....              | 18        |
| 3.3 Bioinsumos agrícolas e microrganismos.....            | 20        |
| 3.4 Monitoramento da atividade microbiana .....           | 21        |
| <b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>                        | <b>23</b> |
| 4.1 Desenho experimental .....                            | 24        |
| 4.2 Aplicação de fertilizantes e herbicidas no solo ..... | 24        |
| 4.3 Padronização do inóculo.....                          | 26        |
| 4.4 Testes respirométricos.....                           | 26        |
| 4.5 Análise de dados .....                                | 29        |
| <b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                    | <b>30</b> |
| <b>6. CONCLUSÃO .....</b>                                 | <b>36</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                   | <b>37</b> |
| <b>APÊNDICE 1.....</b>                                    | <b>45</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

O tebuthiuron é um herbicida que atua como um agente sistêmico de amplo espectro e que se destaca pela capacidade de inibir o fotossistema II, impedindo a realização da fotossíntese e, conseqüentemente, levando a morte das plantas (MENDES *et al.*, 2021). Em função desse mecanismo de ação, o tebuthiuron tem a capacidade de suprimir efetivamente a vegetação, incluindo em dicotiledôneas, como *Commelina benghalensis*, *Urochloa decumbens*, *Digitaria horizontalis* e *Panicum maximum*.

O tebuthiuron possui uma relação com o meio ambiente, dentre suas características, destaca-se a alta solubilidade em água  $2,50 \text{ g L}^{-1}$  a  $25^\circ\text{C}$  e possui meia-vida em média de 268,7 dias a depender do tipo de solo. Esse aspecto permite que o herbicida se disperse facilmente em corpos d'água e se transporte para diferentes áreas do ambiente, aumentando o risco de contaminação. Além disso, demonstra uma persistência no solo, permanecendo ativo por mais de 15 meses, como documentado por Rodrigues e Almeida (2011) e Moraes *et al.* (2016).

A persistência prolongada do herbicida pode continuar afetando o solo e a vegetação por longos períodos, aumentando o impacto ambiental e levantando questões importantes sobre os efeitos a longo prazo nos ecossistemas. Além disso, sua aplicação também pode provocar alterações significativas nas condições microbiológicas do meio ambiente.

Os microrganismos desempenham uma série de funções cruciais para a saúde e a funcionalidade dos ecossistemas terrestres. Essas funções incluem a reserva de matéria orgânica, que disponibiliza nutrientes para as plantas e melhoram a qualidade; ciclagem de nutrientes, essencial para a manutenção do solo e a agregação do solo, que influencia a porosidade e retenção de água (ZHAO *et al.*, 2024). Como os microrganismos desempenham um papel fundamental nesses processos, é crucial monitorar sua atividade para entender os impactos ambientais do uso de herbicidas, como o tebuthiuron no solo (MURINDANGABO *et al.*, 2023).

Nesse sentido, a biorremediação no solo surge como uma técnica promissora para reduzir a toxicidade dos herbicidas, que depende da capacidade dos microrganismos inoculados de se adaptarem e multiplicarem no ambiente contaminado, facilitando a degradação das substâncias (MUTER, 2023).

A adição de vinhaça pode nesse contexto, estimular a atividade microbiana na biodegradação de pesticidas por meio da bioestimulação, que consiste na introdução de nutrientes para promover o crescimento de microrganismos em solos contaminados (NANTES *et al.*, 2022). Além disso, a abordagem da bioaumentação contribui para o tratamento da área ao introduzir microrganismos especializados, com metabolismo específico, capazes de transformar substâncias nocivas em compostos menos tóxicos ou inertes (LOPES *et al.*, 2022).

Esses inoculantes são essenciais para melhorar as condições bioquímica do solo, promover o crescimento das plantas e acelerar a degradação de poluentes, como pesticidas, restaurando o equilíbrio ecológico, contribuindo para a sustentabilidade e eficiência na descontaminação ambiental. Porém, um dos principais desafios é manter a atividade dos microrganismos ao longo do tempo, especialmente em condições desfavoráveis, como a falta de nutrientes, pH inadequado e a presença de outros contaminantes (MUTER, 2023).

Para abordar essa questão, é essencial o monitoramento contínuo da respiração microbiana utilizando a técnica de respirometria, desenvolvida por Bartha e Pramer (BARTHA; PRAMER, 1965). Essa técnica mede a produção de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) pelos microrganismos, que é um indicador direto da atividade respiratória e, conseqüentemente, da capacidade de decompor os compostos no solo. A aplicação da respirometria para monitorar a biodegradação do herbicida tebuthiuron foi também destacada em diversas pesquisas, mostrando a importância do método para analisar as mudanças temporais na atividade microbiana e na degradação do pesticida (FARIA *et al.*, 2019; LIMA *et al.*, 2022; NANTES *et al.*, 2021; NEVES *et al.*, 2021).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar a biodegradação do herbicida tebuthiuron no solo com o uso de microrganismos isolados de inoculante agrícola.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Determinar o metabolismo microbiano na degradação do tebuthiuron pelo método respirométrico;
- Monitorar o efeito da liberação CO<sub>2</sub> dos isolados microbianos sob o tebuthiuron;

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Impactos ambientais de herbicidas

As plantas daninhas competem diretamente com as culturas agrícolas por recursos essenciais, como água, luz e nutrientes, o que dificulta tanto a implantação quanto o manejo das lavouras, comprometendo o crescimento das plantas cultivadas e diminuindo significativamente a produtividade; além disso, elas servem de abrigo para pragas e doenças, facilitando sua entrada e propagação no campo (SALOMÃO *et al.*, 2020). O manejo e controle dessas plantas é essencial para otimizar os recursos essenciais e maximizar o rendimento agrícola.

Nesse contexto, o uso de herbicidas para o controle de plantas daninhas é amplamente utilizado no Brasil. Esses produtos são os mais utilizados entre os agrotóxicos aplicados na agricultura nacional, evidenciando a forte dependência do setor agrícola em relação a soluções químicas (ALBUQUERQUE *et al.*, 2016).

Um exemplo de herbicida é o tebuthiuron [1-(5-terc-butil-1,3,4-tiadiazol-2-il)-1,3-dimetilureia]. Este herbicida pré-emergente que pertence ao grupo das ureias, é utilizado no controle de plantas daninhas de folhas largas e estreitas da cana-de-açúcar, apresentando ação sistêmica e seletivo (FEITOSA *et al.*, 2023).

Sua molécula atua inibindo o fotossistema II (FSII), interrompendo diretamente o transporte de elétrons entre as quinonas A e B. Esse bloqueio causa uma instabilidade energética no centro de reação do FSII, levando à peroxidação dos lipídeos nas membranas celulares. Como consequência, desencadeia-se uma série de processos celulares que resultam no rompimento das membranas e extravasamento do conteúdo citoplasmático, o que provoca a morte da planta por estresse oxidativo (OLIVEIRA *et al.*, 2011).

Entretanto, é importante considerar que a interação entre solo, planta, água e atmosfera busca um equilíbrio natural, no qual pode ser afetado pela introdução dos herbicidas (OLIVEIRA *et al.*, 2018). No ambiente, esses produtos podem seguir diferentes caminhos e passar por diversas transformações, dependendo das características específicas de cada molécula. Eles podem ser levados pelo vento para lugares distantes, permanecer adsorvidos nos colóides do solo, escoar superficialmente até lixiviar para o lençol freático (CORREIA, 2018).

Esses processos podem resultar na contaminação de fontes de água e impactar negativamente organismos não-alvo, como insetos benéficos, plantas

nativas e fauna aquática. Além disso, a persistência dos herbicidas no meio ambiente pode comprometer a saúde dos ecossistemas, levando a degradação que afeta tanto a biodiversidade quanto a qualidade de vida das comunidades locais (CHOWDHURY *et al.*, 2008).

Neste contexto, Bicalho *et al.* (2013) detectaram altas concentrações de resíduos de tebuthiuron até uma profundidade de 0,80 m no solo em áreas não-alvo, como florestas ribeirinhas, localizadas a 40 m do ponto de aplicação. Essas concentrações podem ser atribuídas às características físico-químicas do herbicida, que favorecem sua persistência e mobilidade no solo. Isso demonstra que sua molécula possui elevada ação residual, alta toxicidade e potencial de lixiviação, resultando em impactos ambientais de curto, médio e longo prazo (JOROSOSKI, 2023).

Um aspecto relevante a ser considerado em compostos com alta ação residual é seu impacto na degradação microbiana, pois a morte dos microrganismos leva a uma redução significativa da produtividade agrícola. As alterações ou perdas das propriedades biológicas só diminui a microbiota, o que está relacionado à degradação da matéria orgânica. Certos compostos podem inativar ou até eliminar os microrganismos do solo, agravando os impactos ambientais negativos (BORSOI *et al.*, 2014).

No entanto, sob uma perspectiva ambiental positiva, esses compostos podem ser degradados ou reduzidos por técnicas de biorremediação que ajudam na remoção sustentável de contaminantes do meio ambiente. Isso inclui a bioestimulação, que utiliza resíduos e a bioaugmentação, que envolve inoculantes. Assim, a biorremediação torna-se essencial para eliminar componentes tóxicos a longo prazo, sendo uma técnica ecologicamente correta, de forma natural e barata (JOROSOSKI, 2023).

### **3.2 Biorremediação em agroecossistemas**

Devido a essas preocupações, existe atualmente um forte impulso para o desenvolvimento de biotecnologias destinadas à descontaminação de ambientes afetados (GAYLARDE *et al.*, 2005), tornando indiscutível o investimento em métodos alternativos para o tratamento de resíduos e a recuperação de áreas contaminadas. Além do avanço biotecnológico, é fundamental promover a conscientização individual

e coletiva sobre a necessidade de desenvolver e implementar essas soluções em prol da preservação ambiental (CORRÊA *et al.*, 2005.)

Entre as técnicas de remediação de solos, a biorremediação se destaca como uma abordagem menos agressiva ao meio ambiente, sendo mais adequada e eficaz para a preservação do equilíbrio ecológico. Além disso, é reconhecida por ser de baixo custo e altamente promissora (MACHADO, 2018). De acordo com Yakubu (2007), a biorremediação é um dos métodos biotecnológicos que utiliza o metabolismo de microrganismos para eliminar poluentes de forma eficiente, reduzindo sua concentração e convertendo-os em compostos de menor estrutura química.

No processo, o substrato absorvido é decomposto em moléculas menores, que são metabolizadas em reações que geram energia, resultando no aumento da biomassa da população microbiana na medida em que o substrato é consumido, o que leva a uma redução significativa de sua concentração; durante esse processo, a molécula é completamente degradada em compostos inorgânicos (MELO; AZAVEDO, 2008). Portanto, os componentes finais de uma biorremediação eficiente se transformam em água e gás carbônico (etapa conhecida como mineralização) desta forma estes compostos possuem subprodutos de baixa toxicidade que são incorporados ao ambiente sem prejuízo a fauna e flora presente (MARIANO, 2006).

Uma estratégia importante nesse processo é a bioestimulação, que consiste na adição de nutrientes orgânicos e inorgânicos para estimular a degradação de contaminantes pela microbiota nativa, por meio de sua atividade metabólica (TONINI *et al.*, 2010). Esse processo também melhora as características físicas do solo contaminado, tornando-o mais adequado à biorremediação (PEREIRA *et al.*, 2012). A principal vantagem desse método é a ativação de microrganismos já adaptados às condições locais, o que pode aumentar a eficácia do tratamento.

Outra abordagem é a bioaugmentação, que envolve a inserção de microrganismos especializados, com metabolismo específico, capazes de transformar substâncias nocivas em compostos menos tóxicos ou inertes, otimizando a degradação de poluentes (MACHADO, 2018).

A degradação de compostos químicos demonstra que diversos microrganismos são altamente versáteis na quebra de moléculas recalcitrantes. Pesquisas recentes em biotecnologia destacam fungos e bactérias como os principais microrganismos eficazes na degradação de poluentes, mostrando um elevado potencial para a recuperação de ambientes contaminados (BALAN, 2002).

Segundo Lima *et al.* (2022), os microrganismos nativos da cana-de-açúcar podem ser eficazes na biorremediação do tebuthiuron no solo. A combinação da microbiota de sistemas convencionais e de plantio direto forma um conjunto bacteriano sinérgico que potencializa a transformação do pesticida em CO<sub>2</sub>. Além disso, essa estrutura bacteriana se destaca por mineralizar o tebuthiuron em meia dose de maneira mais eficiente do que as estruturas isoladas.

Assim, os microrganismos desempenham um papel ativo nos ciclos biogeoquímicos, sendo essenciais para a manutenção da vida e fundamentais na reciclagem da maioria das moléculas presentes na biosfera (GAYLARDE *et al.*, 2005).

### **3.3 Bioinsumos agrícolas e microrganismos**

A transformação e o crescimento do setor agropecuário brasileiro nas últimas décadas são nítidos. Com o objetivo de reduzir o uso de agrotóxicos e atender às demandas do mercado o Governo Federal publicou o Decreto nº 10.375, de 26 de maio de 2020, que instituiu o Programa Nacional de Bioinsumos (MAPA, 2024).

Os bioinsumos são produtos, processos ou tecnologias de origem vegetal, animal ou microbiana utilizados na produção, armazenamento e beneficiamento agropecuário, incluindo sistemas aquáticos e florestas plantadas (VIDAL, 2021).

A fração biológica composta pelos microrganismos são essenciais para o equilíbrio dos ecossistemas, pois ajudam na mineralização e na absorção de nutrientes pelas plantas, melhorando sua nutrição (MATOS, 2006).

Os microrganismos utilizam vias metabólicas para gerar energia (ATP) e biomassa, sendo essas vias específicas para cada grupo microbiano e influenciadas pela disponibilidade de oxigênio (O<sub>2</sub>) no ambiente. A respiração aeróbia, presente na maioria dos microrganismos do solo, desempenha um papel crucial na decomposição da matéria orgânica (BINI *et al.*, 2016).

Durante o processo de respiração, ocorre a formação de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e íons H<sup>+</sup>, que são transferidos para moléculas carreadoras. Esses elementos desempenham papéis fundamentais nos processos biológicos e químicos, contribuindo significativamente para a eficiência da biorremediação de pesticidas recalcitrantes devido à sua forte adsorção em materiais orgânicos (FERREIRA *et al.*, 2024).

Há uma ampla variedade de microrganismos viáveis que podem ser utilizados em processos de biorremediação, com ênfase nas bactérias por sua taxa de

crescimento mais rápida em comparação com fungos e leveduras, especialmente em condições favoráveis (COLLA *et al.*, 2008). Podem se destacar bactérias dos gêneros *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Enterobacter*, *Proteus*, *Klebsiella*, *Serratia*, *Bacillus*, *Arthrobacter*, *Streptomyces* e *Nocardia*, além de fungos como *Mucor* e *Fusarium* (TOMASSONI *et al.*, 2024).

A diversidade de microrganismos de diferentes domínios reflete a complexidade e as possibilidades metabólicas para a degradação de compostos tóxicos e poluentes, o que torna sua participação essencial para o sucesso dessas estratégias (SANCHES *et al.*, 2003). O monitoramento pode ser feito por meio da atividade microbiana, utilizando o método respirométrico, que permite avaliar a produção de CO<sub>2</sub> ao longo de diferentes ensaios (NANTES, 2023).

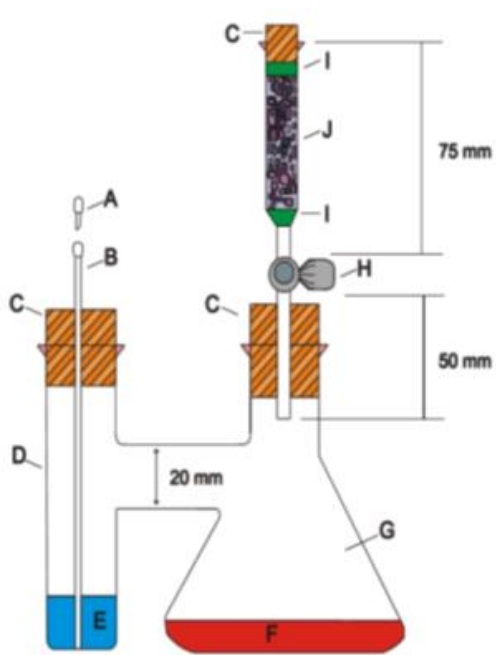
### 3.4 Monitoramento da atividade microbiana

A respiração do solo é conhecida como um comportamento da atividade microbiana, além de refletir os efeitos de toxicidade e processo da biodegradação de compostos orgânicos adicionados ao solo (CETESB, 2024). Durante a decomposição da matéria orgânica, os microrganismos utilizam O<sub>2</sub> disponível, resultando na formação CO<sub>2</sub> (BINI *et al.*, 2016).

Esse comportamento pode ser avaliado medindo o consumo de oxigênio ou através da produção de gás carbônico durante a biodegradação dos compostos orgânicos através do método respirométrico (CETESB, 2024). O método é baseado na Norma Técnica L6.350 da CETESB (1990) e na NBR 14283 (ABNT, 1999) pela utilização de frascos respirométricos para determinação da biodegradação de resíduos pelo método respirométrico de Bartha.

O respirômetro de Bartha e Pramer (1965) é um sistema fechado com duas câmaras interligadas (Figura 1). No frasco de Erlenmeyer, ocorre a biodegradação do composto em estudo, e o CO<sub>2</sub> gerado pela respiração microbiana é capturado por uma solução de hidróxido de potássio (KOH) no braço lateral do sistema. A quantificação do CO<sub>2</sub> pode ser feita por titulação do KOH residual ou pela medição da condutividade após a adição de cloreto de bário. Assim, os níveis de dióxido de carbono liberados podem ser calculados e expressos em função do tempo de incubação (BALBA *et al.*, 1998).

**Figura 1:** Desenho esquemático de um frasco respirométrico conforme o método de Bartha e Pramer (1965).



Fonte: Lopes e Bidoia (2009).

Os microrganismos desempenham um papel crucial na descontaminação de ambientes por meio da biorremediação, uma técnica de baixo custo e menos agressiva ao meio ambiente (MORAIS FILHO *et al.*, 2016). O conhecimento dos processos metabólicos microbianos e dos fatores que influenciam sua atividade pode fornecer informações valiosas para o desenvolvimento de novas estratégias (BINI *et al.*, 2016). O entendimento dos processos e das condições ambientais que a influência pode maximizar a eficiência da biorremediação, tornando-a uma solução mais sustentável e eficaz para a descontaminação de ambientes, contribuindo, assim, para a preservação do equilíbrio ecológico.

#### 4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – FCAT/Unesp, Campus de Dracena. O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de textura franco-arenoso (SANTOS *et al.*, 2018) sem histórico de aplicação de pesticida, coletado da Fazenda Experimental a uma profundidade de até 20 cm, sendo posteriormente peneirado e armazenado. Ressaltando que o solo coletado é de um experimento anexo. Subsequentemente, uma análise granulométrica descreveu o solo como contendo 79,40% de areia, 14,10% de argila e 6,50% de silte caracterizando a textura arenosa. A correção do solo, foi realizada com base na composição química antes da instalação do experimento, conforme a Tabela 1.

**Tabela 1.** Análise química do solo.

| Parâmetros            | Valor | Unidade                |
|-----------------------|-------|------------------------|
| pH                    | 4,3   |                        |
| Matéria Orgânica      | 7,0   | g.dm <sup>-3</sup>     |
| Potássio              | 1,1   |                        |
| Cálcio                | 2,0   |                        |
| Magnésio              | 9,0   | mmolc.dm <sup>-3</sup> |
| Hidrogênio + Alumínio | 22,0  |                        |
| Alumínio              | 9,0   |                        |
| Cobre                 | 0,1   |                        |
| Ferro                 | 1,0   |                        |
| Manganês              | 0,5   |                        |
| Zinco                 | 0,1   |                        |
| Fósforo               | 2,0   | mg.dm <sup>-3</sup>    |
| Boro                  | 0,08  |                        |
| Enxofre               | 5,0   |                        |
| Soma de bases         | 12,1  |                        |
| CTC                   | 34,1  |                        |
| Saturação de Bases    | 35    | %                      |
| Saturação de Alumínio | 43    |                        |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O herbicida analisado foi o tebuthiuron, adquirido em estabelecimento comercial na forma do produto Combine® 500SC (500 g i.a. L<sup>-1</sup>, Dow AgroSciences Industrial Ltda.). Além disso, foram obtidas cinco cepas microbianas fornecidas pela empresa AMTec Bioagrícola® Ltda. (Uberlândia-Brasil).

Estes microrganismos são componentes do inoculante agrícola comercial da empresa e têm origem em isolamentos ambientais do Brasil. Para os experimentos, eles foram codificados como CMA 468, CMA 474, CMA 473, S27 (bactérias) e CMA FB1 (fungo filamentoso), sendo que a identificação filogenética é de domínio privado da empresa (AMTec Bioagrícola®) e, por isso, não pode ser divulgada.

#### 4.1 Desenho experimental

O experimento teve um delineamento inteiramente casualizado (DIC), com 6 tratamentos e 4 repetições, totalizando 24 unidades experimentais. Esses tratamentos incluíram a presença de um microrganismo nativo já presente no próprio local de coleta do solo e cinco isolados com tebuthiuron propondo a bioaugmentação, conforme descrito na Tabela 2.

**Tabela 2.** Tratamentos para monitoramento respirométrico.

| Tratamentos | Código   | Grupo microbiano  |
|-------------|----------|-------------------|
| M0          | Controle | Nativo            |
| M1          | CMA 468  | Bactéria          |
| M2          | CMA 474  | Bactéria          |
| M3          | CMA 473  | Bactéria          |
| M4          | S27      | Bactéria          |
| M5          | CMA FB1  | Fungo filamentoso |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

#### 4.2 Aplicação de fertilizantes e herbicidas no solo

Com base nas análises realizadas conforme a Tabela 1, foram adotadas estratégias de correção da fertilidade do solo e acidez, a fim de otimizar os subsequentes processos (Figura 2). Para 144 kg de solo, foram aplicados 52,50 g (947,92 kg.ha<sup>-1</sup>) de calcário para regular o pH. Enquanto para a correção da fertilidade, foram aplicados adubos sintéticos, sendo que para 144 kg de solo, aplicou-se 25 g

(451,4 kg.ha<sup>-1</sup>) de superfosfato simples para suplementação de fósforo e 5,53 g de cloreto de potássio (99,85 kg.ha<sup>-1</sup>) para garantir teores adequados de fósforo e potássio respectivamente, ressaltando que os cálculos estão disponíveis no Apêndice 1.

Após a correção, foram preenchidos vasos plásticos de 4,0 L com solo para receber a aplicação do tebuthiuron na dose recomendada pela bula do produto. O herbicida foi pulverizado a uma taxa de 2,0 L de produto comercial ha<sup>-1</sup> (1000 g de ingrediente ativo ha<sup>-1</sup>), que é a dosagem recomendada para solos arenosos. A pulverização foi realizada usando equipamento de laboratório automatizado fornecido pelo Grupo de Pesquisa NETA (Núcleo de Estudos em Tecnologia de Aplicação), a uma velocidade de 5 km h<sup>-1</sup>, a 0,75 m acima do solo, com bicos XR 8002 a uma pressão de 2,0 bar e uma vazão de 0,65 L min<sup>-1</sup>, espaçados 0,5 m entre si e pressurizados com CO<sub>2</sub>, fornecendo um volume de aplicação da calda de 156 L ha<sup>-1</sup> (Figura 3).

**Figura 2:** Correção da fertilidade do solo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

**Figura 3:** Pulverização automática do herbicida tebuthiuron.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

#### **4.3 Padronização do inóculo**

Preliminarmente, os isolados microbianos foram obtidos pela empresa após reativação das cepas e crescimento em caldo nutritivo por 48 h a 25 °C. Assim, os inoculantes foram padronizados para uso no experimento, de acordo com o seguinte procedimento: Para o grupo bacteriano (CMA 468, CMA 474, CMA 473 e S27), foi adotada a determinação por densidade óptica com medições de absorbância a 620 nm por meio do espectrofotômetro UV-Vis. Com uma média de 0,744 a.u., o inóculo das cepas bacterianas foi padronizado para  $10^8$  CFU mL<sup>-1</sup>. A padronização do isolado fúngico (CMA FB1) contou o número de esporos por microscopia em câmara de Neubauer. Da mesma forma, o número total de esporos para esse inóculo foi determinado em  $10^8$  mL<sup>-1</sup>.

#### **4.4 Testes respirométricos**

Com base na bula do inoculante microbiano comercial, a aplicação deve ser realizada em solo úmido. Portanto, o ponto de saturação líquida do solo foi determinado antes da adição da dose recomendada de cada isolado microbiano,

inserido em 20 mL kg<sup>-1</sup> de solo. Com base nessa medição, foram calculados o volume de inoculante e de água deionizada a serem adicionados a cada respirômetro.

A partir disso, os frascos respirométricos foram preparados, contendo uma câmara com 50 gramas de solo com tebuthiuron, acompanhados de 1 ml da cepa microbiana padronizada e 7,5 mL de água deionizada, a fim de manter o solo em estado de umidade adequado. A câmara lateral do dispositivo foi reservada para conter 10 mL de uma solução de hidróxido de potássio (KOH) a 0,2 mol, conforme a Figura 4. Este composto desempenha um papel importante na captura do CO<sub>2</sub> liberado durante o processo de degradação. Os bioensaios monitoraram a biodegradação por 60 dias com a incubação em condições controladas na BOD (Biochemical Oxygen Demand) a uma temperatura constante de 28 ± 2°C, com ausência de luz.

**Figura 4:** Respirômetros montados.



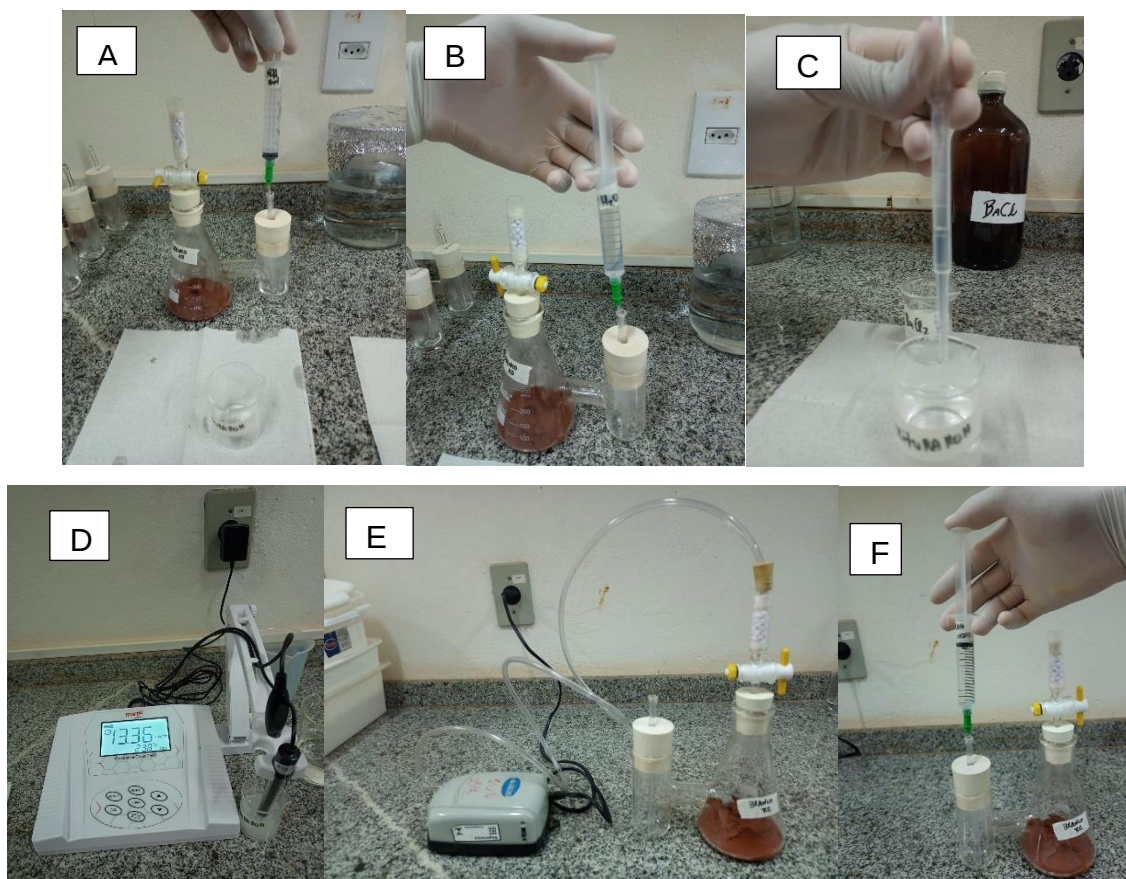
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O procedimento para medir a liberação de CO<sub>2</sub>, foi realizado por meio da leitura da condutividade elétrica (CE), utilizando um condutivímetro OneSense Cond 2500.

Esse método envolve várias etapas, começando pela inserção de uma seringa na solução de hidróxido de potássio (KOH) e retirando do braço lateral do respirador. Em seguida, o sensor foi lavado duas vezes com 10 mL de água deionizada fervida, livre de CO<sub>2</sub>. Após a lavagem, adicionou-se 1 mL da solução de cloreto de bário

(BaCl<sub>2</sub>) a 0,25 mol nas amostras retiradas e então é feita a leitura. Para garantir a renovação do ambiente interno, é efetuada a injeção de ar no respirômetro. Por fim, foi adicionada uma nova porção da solução de KOH no frasco para que possa continuar o processo de monitoramento (Figura 5).

**Figura 5:** Análise da respiração microbiana pelo método respirométrico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Legenda: A) retirada da solução KOH, B) adição de água deionizada isenta de CO<sub>2</sub> e C) adição da solução de BaCl<sub>2</sub>, D) medição da condutividade elétrica, E) renovação da atmosfera interna e F) adição de nova solução de KOH.

A produção de CO<sub>2</sub> microbiano foi quantificada indiretamente (Eq. 1; R<sup>2</sup> ~ 0,9999) utilizando medições de condutividade elétrica transformando os valores de em mS para mg de CO<sub>2</sub> (FARIA *et al.*, 2013).

$$GCO_2 = 1554,8 - 95,726 * CE \quad (Eq.1)$$

GCO<sub>2</sub> = geração de gás carbônico em mg;

CE = condutividade elétrica, em mS.

#### 4.5 Análise de dados

Os testes de Shapiro-Wilk e Bartlett para normalidade e homocedasticidade verificaram a distribuição e a variância dos dados, respectivamente. Uma análise de variância e o teste post-hoc de Tukey ( $p < 0,05$ ) avaliaram os dados experimentais para comparar a produção de CO<sub>2</sub> entre diferentes cepas microbianas. Além disso, um modelo logarítmico foi ajustado aos dados de respirometria para descrever o comportamento cinemático da produção de CO<sub>2</sub> (Eq. 2):

$$y = a * \ln(x) + b \quad (\text{Eq. 2})$$

onde,

y: CO<sub>2</sub> acumulado em mg (variável dependente);

x: tempo em dias (variável independente);

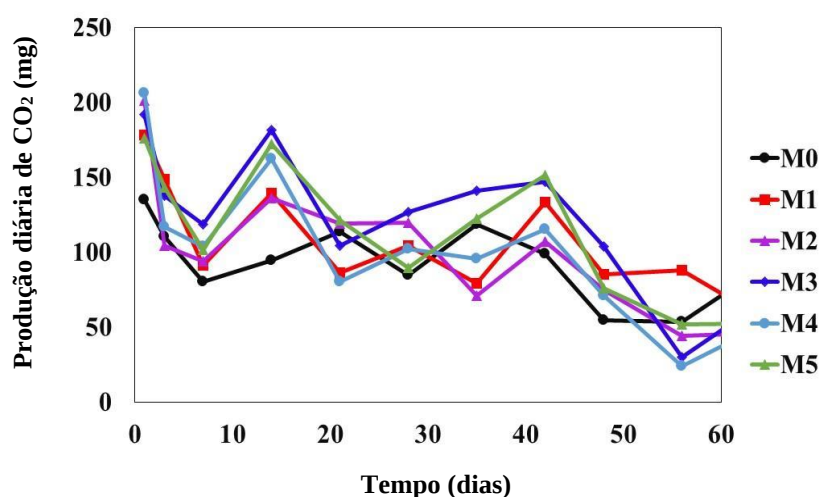
a: coeficiente da inclinação da curva logarítmica; e

b: coeficiente do intercepto da curva logarítmica.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 6 mostra a produção de CO<sub>2</sub> em cada avaliação semanal ao longo de 60 dias. De maneira geral, as amostras de solo com tebuthiuron mostraram uma taxa metabólica mais alta pelos microrganismos no início, mesmo no controle sem inoculo (M0). Subsequentemente, a evolução de CO<sub>2</sub> reduziu gradualmente devido à menor concentração de substrato para o metabolismo microbiano. No entanto, a cepa bacteriana CMA 473 (M3) se destacou com uma respiração mais alta do que os outros isolados, especialmente entre os dias 30 e 40.

**Figura 6:** Produção semanal de CO<sub>2</sub> durante 60 dias de respiração microbiana em solo com tebuthiuron em ambiente controlado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Enquanto na Figura 7, os resultados revelaram uma taxa de respiração mais alta aos 60 dias no M3 (1343 mg CO<sub>2</sub>), seguida pela cepa fúngica (M5 - 1256 mg CO<sub>2</sub>). As outras três espécies bacterianas mostraram um comportamento semelhante com metabolismo mais baixo. Desta forma, o solo controle sem inoculo (M0 - 943 mg CO<sub>2</sub>) teve a menor taxa de produção de CO<sub>2</sub>, evidenciando o impacto positivo da inoculação microbiana na biodegradação do tebuthiuron.

Esses resultados são importantes para perspectivas futuras na área, conforme a conclusão de uma revisão recente por Lopes *et al.* (2022). Os autores observaram que o grupo fúngico é pouco explorado como agente biodegradável para pesticidas no solo. Portanto, a segunda maior taxa de respiração encontrada no M5 revela o

potencial desses microrganismos que pode ser explorado no desenvolvimento de ferramentas biotecnológicas em solo agrícolas.

Em relação às equações do modelo matemático na Figura 8, observa-se que a fase estacionária do solo controle (M0) está mais próxima de ocorrer em comparação com os outros tratamentos. A ausência de microbiota específica representou uma produção de CO<sub>2</sub> menor, que quase atingiu seu ponto máximo em 60 dias. Por outro lado, amostras de solo com tebuthiuron e bioaugmentação exigirão períodos mais longos para que as curvas desacelerem, uma vez que as cepas microbianas apresentaram uma alta taxa de respiração, especialmente M3 e M5.

Isso demonstra que os modelos logarítmicos se ajustaram bem aos dados de produção de CO<sub>2</sub> (Figura 8), mostrando uma tendência de aumento na respiração microbiana, seguida de desaceleração ao longo do tempo, conforme avaliações semanais. Esses resultados indicam que o modelo proposto, que relaciona o metabolismo dos microrganismos ao tempo de incubação, é uma ferramenta útil para avaliar a biodegradação do tebuthiuron no solo, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) acima de 0,88. Assim, a análise foi baseada nessa modelagem matemática que é uma ferramenta importante para tomadas de decisões sobre o tratamento de solos com herbicida (LIMA *et al.*, 2022; NANTES *et al.*, 2023)

O modelo logarítmico é uma ferramenta útil para descrever a atividade microbiana. No entanto, o modelo assume que o crescimento microbiano é exponencial contínuo, o que não é realista em ambientes onde os recursos estão esgotados ou onde há inibição pelos produtos do metabolismo. Esse é um fator limitante, pois o modelo só pode ser útil para modelar a fase inicial da atividade metabólica e da degradação de pesticidas, onde as populações microbianas estão se estabelecendo e começando a se multiplicar rapidamente.

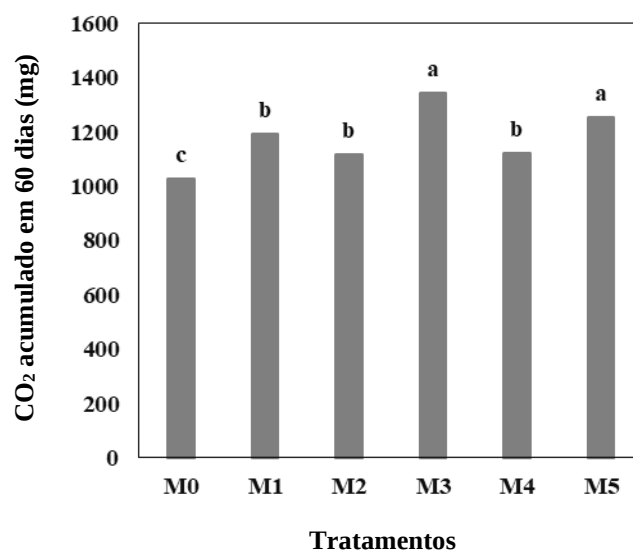
Portanto, usar este modelo como exemplo para prever o comportamento futuro dos valores é errôneo. Neste caso, é necessário recorrer a modelos capazes de capturar as dinâmicas não sigmóides do crescimento microbiano a longo prazo, como Monod e Haldane, quando o crescimento microbiano é influenciado pela concentração do pesticida (DOMÍNGUEZ-RODRÍGUEZ *et al.*, 2021) ou Michaelis-Menten, que descreve a cinética da degradação de pesticidas (WILSON e GERBER, 2021). Thieffry *et al.* (2024) destacaram que, para monitorar a relação entre pesticida e comunidade microbiana, é fundamental utilizar métodos de aprendizado de máquina e modelos estatísticos de previsão.

Apesar de todas as adversidades, o modelo matemático do presente estudo forneceu resultados preliminares muito satisfatórios e é apoiado por outras análises estatísticas para revelar o impacto do tebuthiuron na comunidade microbiana bioaumentada ou não bioaumentada. Além disso, fatores externos e condições ambientais, como temperatura, umidade, teor de matéria orgânica e pH, podem influenciar a diminuição da atividade enzimática do metabolismo microbiano e determinar o sucesso da biorremediação (WANG *et al.*, 2023; GIRI *et al.*, 2021).

Embora os microrganismos nativos estivesse adaptado ao solo desequilibrado e às condições ambientais, a inclusão de tebuthiuron no sistema reduziu a atividade microbiológica e, concomitantemente, a taxa de respiração, especialmente em M0. Em termos práticos, há opções para resolver esse impasse. Em primeira instância, é possível melhorar as condições químicas do solo (bioestimulação), adicionando matéria orgânica, nutrientes, entre outros, ao sistema. No entanto, pesticidas recalcitrantes, como o tebuthiuron, são fortemente adsorvidos em materiais orgânicos, o que dificulta sua dissipação (FERREIRA *et al.*, 2024). Portanto, a alta afinidade desses pesticidas com a matéria orgânica reduz sua biodisponibilidade, dificultando a degradação microbiana. Essa persistência no ambiente pode levar à contaminação prolongada e possíveis efeitos adversos na saúde do solo e nos ecossistemas.

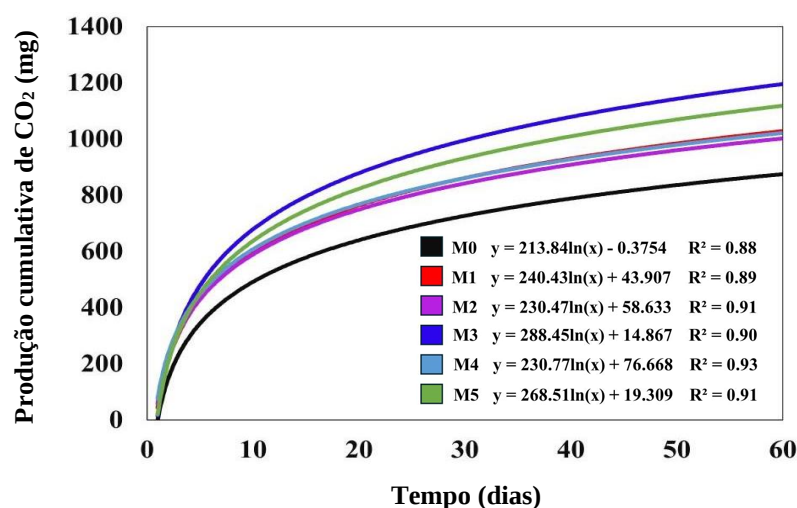
Ensaio bioquímico de respiração já demonstraram que a mineralização do tebuthiuron no solo é dependente do tempo, mesmo com a presença de vinhaça como bioestimulante microbiano (FARIA *et al.*, 2019; NANTES *et al.*, 2023; NEVES *et al.*, 2021). No entanto, doses elevadas do herbicida podem causar toxicidade aos microrganismos e comprometer a atividade no solo (SOUTO *et al.*, 2013).

**Figura 7:** Teste de comparação de médias para a produção acumulada de CO<sub>2</sub> aos 60 dias de respiração microbiana em condições controladas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

**Figura 8:** Produção acumulada de CO<sub>2</sub> durante 60 dias de respiração microbiana no solo com tebuthiuron em condições controladas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Em segunda instância, pode-se realizar a bioaumentação, técnica proposta neste estudo. A inoculação de cepas microbianas, sejam fúngicas ou bacterianas, pode promover a dissipação de pesticidas recalcitrantes (RAMÍREZ *et al.*, 2023). Cepas microbianas isoladas com potencial para biodegradar o composto poluente

maximiza o tratamento do solo com tebuthiuron por meio da bioaugmentação (LIMA *et al.*, 2022; LOPES *et al.*, 2022). De acordo com PAIDI *et al.* (2021), a bioaugmentação melhora o metabolismo microbiano, auxiliando na degradação de pesticidas e potencialmente aumentando as taxas de respiração dos microrganismos em solos contaminados com pesticidas.

Além disso, como os resultados mostraram que os inoculantes foram eficazes em tolerar e remover os resíduos de tebuthiuron em condições controladas, a bioaugmentação em campos agrícolas contaminados poderia ser uma sugestão para definir a verdadeira eficiência e eficácia dos inoculantes. Por exemplo, Fang *et al.* (2008) observaram que a taxa de degradação do clorpirifós no campo aberto foi mais rápida do que na estufa, o que pode ser atribuído às diferentes condições ambientais.

Portanto, os inoculantes utilizados nesta pesquisa mostraram evidências de que podem ser usados como biorremediadores do herbicida tebuthiuron. Esses microrganismos elevam a bioaugmentação a um nível superior no que diz respeito ao papel dos inoculantes comerciais em solos contaminados por pesticidas. Por isso, um entendimento mais preciso da ecologia e dos modos de ação das cepas de inoculantes é essencial para otimizar sua eficiência e eficácia, possibilitando a orientação de estudos sobre o uso de inoculantes na agricultura (HARIS *et al.*, 2023).

No entanto, a implementação deve ser cuidadosamente planejada e monitorada para evitar possíveis impactos na microbiota nativa e no ecossistema do solo. De fato, as cepas introduzidas competem com os microrganismos nativos por nutrientes e espaço. Em alguns casos, isso pode resultar na supressão de populações microbianas nativas benéficas, afetando negativamente a saúde do solo e a funções ecológicas em agroecossistemas (MUTER, 2023).

Além disso, para futuros experimentos, a bioaugmentação poderia ser integrada com outros métodos de remediação de pesticidas, como bioestimulação, fitorremediação ou o uso de biochar. Essas práticas já foram comprovadas na limpeza de solos contaminados com poluentes orgânicos persistentes (SILVA *et al.*, 2020), promovendo o desenvolvimento sustentável e a proteção ambiental (BONES *et al.*, 2023). Entretanto, incluir estudos ecotoxicológicos na biorremediação é essencial para avaliar os possíveis efeitos tóxicos dos microrganismos introduzidos em organismos não-alvo, como plantas, insetos e outros microrganismos.

Este estudo preliminar fornece informações importantes sobre a influência do tebutiuron na respiração microbiana do solo, destacando a bioaugmentação como uma estratégia promissora para mitigar os efeitos negativos dos pesticidas no ambiente. Os resultados obtidos dos inóculos apontam para o desenvolvimento de soluções inovadoras e eficazes na degradação de compostos químicos no solo, quando comparado ao solo controle sem inóculo que apresentou a menor taxa de produção de CO<sub>2</sub>. Isso contribui para a sustentabilidade ambiental e para melhorias práticas de remediação de ecossistemas terrestres contaminados por resíduos de tebutiuron, representando um avanço significativo na busca por soluções biotecnológicas para a descontaminação ambiental e a restauração da qualidade dos solos e ecossistemas afetados.

## 6. CONCLUSÃO

A bioaugmentação com inoculantes microbianos comerciais, tanto do grupo bacteriano quanto do fúngico, mostrou-se promissora para a remediação de solos contaminados com tebuthiuron. O uso de inoculantes comerciais resultou em maior produção de CO<sub>2</sub>, indicando alta atividade microbiana e potencial degradação do herbicida, na qual o tratamento com a cepa bacteriana CMA 473 (M3) destacou-se com a maior taxa de respiração (1343 mg CO<sub>2</sub>), seguido pelo tratamento com fungos filamentosos (M5 - 1256 mg CO<sub>2</sub>), sugerindo que ambos os grupos de microrganismos podem ser eficazes na biorremediação do tebuthiuron.

Os fungos, são importantes não apenas pela contribuição à biorremediação, que ajuda na restauração do solo, mas também porque a pesquisa sobre eles ainda é escassa e merece ser aprofundada.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A. F.; RIBEIRO, J. S.; KUMMROW, F.; NOGUEIRA, A. J. A.; MONTAGNER, C. C.; UMBUZEIRO, G. A. Pesticides in Brazilian freshwaters: a critical review. **Environmental Science: Processes & Impacts**, v. 18, n. 7, p. 779-787, 2016.

BALAN, D. S. L. A indústria têxtil e o meio ambiente. Tecnologia limpa e controle ambiental. **Química Têxtil**, Barueri, v. 66, p. 26-31, 2002.

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

BALBA, M. T.; AL-AWADHI, N.; AL-DAHER, R. Bioremediation of oil-contaminated soil: microbiological methods for feasibility assessment and field evaluation. **Journal of Microbiological Methods**, v.32, p.155-164, 1998.

BICALHO, S. T. T.; LANGENBACH, T. The fate of tebuthiuron in microcosm with riparian forest seedlings. **Geoderma**, Holanda, v. 207 – 208, p. 66 – 70, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001670611300150X>. Acesso em: 30 ago. 2024.

BINI, D.; LOPEZ, M. V.; CARDOSO, E. J. B. N. Capítulo 5 - Metabolismo microbiano. In: CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do solo**. Piracicaba: ESALQ, ed. 2, p. 225, 2016.

BONES, U. A.; FLACH, K. A.; DA ROSA, G. M. **The trend of bioremediation as an effective technology in soil decontamination**. Seven Editora, 2023. Disponível em: <https://sevenpublicacoes.com.br/editora/article/view/1692>. Acesso em: 30 ago. 2024.

BORSOI, A.; RIBEIRO DOS SANTOS, P. R.; TAFFAREL, L. E.; GONÇALVES JÚNIOR, A. C. Agrotóxicos: histórico, atualidades e meio ambiente. **Acta Iguazu**, v. 3, n. 1, p. 86–100, 2014. Disponível em:

<https://saber.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/view/9650>. Acesso em: 30 ago. 2024.

COLLA, L. M.; PRIMAZ, A. L.; LIMA, M.; BERTOLIN, T. E.; COSTA, J. A. V. Isolamento e seleção de fungos para biorremediação a partir de solo contaminado com herbicida triazínicos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 3, p. 809 – 813, 2008.

CORRÊA, L. B.; LUNARDI, V. L.; CONTO, S. M.; GALIAZZI, M. C. O saber sólido de serviços de saúde na formação acadêmica: uma contribuição da educação ambiental. **Interface: comunicação, saúde, educação**, Rio Grande do Sul, v. 9, n. 18, p. 571 – 84, 2005.

CORREIA, N. M. **Comportamento dos herbicidas no ambiente**. Documentos 160, Embrapa Hortaliças, 30 p. Brasília – DF, 2018.

CHOWDHURY, A.; PRADHAN, S.; SAHA, M.; SANYAL, N. Impact of pesticides on soil microbiological parameters and possible bioremediation strategies. **Indian Journal of Microbiology**, v. 48, n. 1, p. 114 – 127, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12088-008-0011-8>. Acesso em: 30 ago. 2024.

FANG, H.; XIANG, Y. Q.; HAO, Y. J.; CHU, X. Q.; PAN, X. D.; YU, J. Q.; YU, Y. L. Fungal degradation of chlorpyrifos by *Verticillium* sp. DSP in pure cultures and its use in bioremediation of contaminated soil and pakchoi. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 61, p. 294 – 303, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2007.10.001>. Acesso em: 30 ago. 2024.

FARIA, M. A.; LOPES, P. R. M.; BIDOIA, E. D.; FERREIRA, L. C.; VIANA, R. S.; PRADO, E. P.; BONINI, C. S. B.; TOMAZ, R. S. Vinasse and tebuthiuron application to sugarcane soil and its effects on bacterial community and ecotoxicity after natural attenuation. **International Journal of Development Research**, v. 9, p. 28898 – 28904, 2019. Disponível em: <https://www.journalijdr.com/vinasse-and-tebuthiuron-application-sugarcane-soil-and-its-effects-bacterial-community-and>. Acesso em: 30 ago. 2024.

FEITOSA, I. R. DOS S.; MUNINA, N. C. G.; GOULARTA, B. V.; MONTAGNER, C. C. Ocorrência de pesticidas em solos argilosos e arenosos após aplicação em pastagens e cana-de-açúcar. **Scielo Brasil**. v. 46, n°. 5, p. 414-424, 2023

FERREIRA, J. H.; MELO, C. A. D.; MORAES, M. F.; SILVA, I. P. F.; CHIODEROLI, C. A. Residual activity and sorption of tebuthiuron in different soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 28, n. 2, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n2e275280>. Acesso em: 30 ago. 2024

GIRI, B. S.; GEED, S. VIKRANT, K.; LEE, S. S.; KIM, K. H.; KAILASA, S. K.; VITHANAGE, M.; CHATURVEDI, P.; RAI, B. N.; SINGH, R. S. Progress in bioremediation of pesticide residues in the environment. **Environmental Engineering Research**, v. 26, n. 6, p. 20446, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4491/eer.2020.446>. Acesso em: 30 ago. 2024.

GAYLARDE, C. C.; BELLINASO, M. L.; MANFIO, G. P. Aspectos biológicos e técnicos da biorremediação de xenobióticos. **Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento**, v. 34, p. 36 – 43, 2005. Disponível em: <http://www.biotecnologia.com.br/edicoes/ed34.php>. Acesso em: 10 set. 2024.

HARIS, M.; HUSSAIN, T.; TOUSEEF, A.; KHAN, A.; KHAN, A. A.; YASHESHWAR. Chapter 2 - Application of microbial inoculants as an alternative to chemical products for decomposition of organic wastes. In: SHARMA, V. K.; KUMAR, A.; PASSARINI, M. R. Z.; PARMAR, S.; SINGH, V. K. **Microbial Inoculants: Recent Progress and Applications**, Londres, Academic Press: Elsevier, p. 29 – 52, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99043-1.00006-2>. Acesso em: 30 ago. 2024.

JOROSOSKI, L. B. Bioprospecção de microrganismos autóctones em solo cultivado com cana-de-açúcar e avaliação de seu potencial de biodegradação de tebuthiuron. 2023. 53 p. **Trabalho de Conclusão de Curso** – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Dracena, São Paulo, 2023.

LIMA, E. W.; BRUNALDI, B. P.; FRIAS, Y. A.; MOREIRA, B. R. A.; ALVES, L. S.; LOPES, P. R. M. A synergistic bacterial pool decomposes tebuthiuron in soil. **Scientific Reports**, v. 12, p. 9225, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13147-8>. Acesso em: 30 ago. 2024.

LOPES, P. R. M.; CRUZ, V. H.; 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11157-022-09637-w>. Acesso em: 30 ago. 2024.

MAPA - Ministério da Agricultura e Pecuária. Programa Nacional de Bioinsumos, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/bioinsumos>. Acesso em: 22 nove. 2024.

MACHADO, T. S. Produção de biossurfactantes bacterianos em solos utilizando bioaumentação e bioestimulação. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2018.

MARIANO, A. P. Avaliação do potencial de biorremediação de solos e de águas subterrâneas contaminados com óleo diesel. **Tese** (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.

MATOS, M. A. Atributos químicos e microbiológicos do solo após aplicações de resíduos suínos em sistema de plantio direto. **Dissertação** (Mestrado em Química dos Recursos Naturais) - Universidade Estadual de Londrina. Londrina, p. 30 – 35, 2006.

MENDES, K. F.; WEI, M. C. F.; FURTADO, I. F.; TAKESHITA, V.; PISSOLITO, J. P.; MOLIN, J. P.; TORNISIELO, V. L. Spatial distribution of sorption and desorption process of <sup>14</sup>C-radiolabelled hexazinone and tebuthiuron in tropical soil. **Chemosphere**, v. 264, n. 1, p. 128494, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128494>. Acesso em: 30 ago. 2024.

MELO, I. S.; AZEVEDO, J. L. **Microbiologia ambiental**. 2. ed. rev. e ampl. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2008.

MORAES, D. A. C.; SPADOTTO, C. A.; SARTORI, A. A. C.; ZIMBACK, C. R. L. Variabilidade espacial do risco de contaminação de águas subterrâneas por tebuthiuron em área de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 51, n. 12, p. 1992-1999, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016001200010>. Acesso em: 30 ago. 2024.

MORAIS FILHO, M. C.; CORIOLANO, A. C. F. Biorremediação, uma alternativa na utilização em áreas degradadas pela indústria petrolífera. **Holos**, Natal. vol. 7, 2016, pp. 133 – 150. Disponível em: 10.15628/holos.2016.4278. Acesso em: 30 ago. 2024.

MURINDANGABO, Y. T.; KOPECKÝ, M.; KONVALINA, P.; GHORBANI, M.; PERNÁ, K.; NGUYEN, T. G.; BERNAS, J.; BALOCH, S. B.; HOANG, T. N.; EZE, F. O.; ALI, S. Quantitative Approaches in Assessing Soil Organic Matter Dynamics for Sustainable Management. **Agronomy**, v. 13, n. 7, p. 1776, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy13071776>. Acesso em: 30 ago. 2024.

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. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11030710>. Acesso em: 30 ago. 2024.

NANTES, L. S.; ARAGÃO, M. B.; MOREIRA, B. R. A.; FRIAS, Y. A.; VALÉRIO, T. S.; LIMA, E. W.; VIANA, R. S.; 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, p. 4883 – 4892, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04276-8>. Acesso em: 30 ago. 2024.

NEVES, A. B. R.; CRUZ, V. H.; MOREIRA, B. R. A.; VIANA, R. S.; LOPES, P. R. M. viabilidade da atenuação natural em solo de manejo orgânico contaminado com tebuthiuron. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 36, n. 2, p. 261 – 272, 2021.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17224/EnergAgric.2021v36n2p261-272>. Acesso em: 30 ago. 2024.

OLIVEIRA, J. L. S.; LIMA, A. C. B.; MININI, D.; SILVA, E. Usos, efeitos e potencial tóxico dos agrotóxicos na qualidade do solo. **Agrarian Academy**, Centro Científico Conhecer- Goiânia, v.5, n. 9, p. 454, 2018. Disponível em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/agrarian/article/view/5073>. Acesso em: 30 ago. 2024.

OLIVEIRA JR, R. S. Mecanismo de ação de herbicidas. In: OLIVEIRA JR, R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. F. (ed.). **Biologia e manejo de plantas daninhas**, Curitiba: Omnipax, p. 141-192, 2011. Disponível em: <http://omnipax.com.br/livros/2011/BMPD/BMPD-livro.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2024.

PAIDI, M. K.; SATAPUTE, P.; ADHONI, S. A.; PATIL, L.; KAMBLE, M. V. Physiological and Metabolic Aspects of Pesticides Bioremediation by Microorganisms. **Biodegradation, Pollutants and Bioremediation Principles**, 1. ed., Boca Raton: CRC Press, p. 16, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9780429293931>. Acesso em: 30 ago. 2024.

PEREIRA, D. S.; GOMES, R. C.; SEMÊDO, L. T. A. S. Potencial das actinobactérias na biodegradação de hidrocarbonetos. **Revista Eletrônica TECCEN**, v. 5, n. 2, p. 71-96, 2012.

RODRÍGUEZ, V. D.; TREJO, E. B.; CRUZ, R. G.; ADAMS, R. H. Microbial growth in biobeds for treatment of residual pesticide in banana plantations. **PeerJ**, v. 9. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34616634/> . Acesso em: 30 ago. 2024.

RAMÍREZ, J. R. G.; MUÑOZ, L. A. I.; BALAGURUSAMY, N.; RAMÍREZ, J. E. F.; HERNAÁNDEZ, L. A.; CAMPOS, J. C. Microbiology and Biochemistry of Pesticides Biodegradation. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, p. 15969, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms242115969>. Acesso em: 30 ago. 2024.

RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas**. 6. ed. Londrina: IAPAR, v. 1, 2011.

SALOMÃO, P. E. A.; FERRO, A. M. S.; RUAS, W. F. Herbicides in Brazil: a brief review. **Research Society and Development**, v. 9, n. 2, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/1990>. Acesso em: 30 ago. 2024.

SANCHES, S. M.; SILVA, C. H. T. P.; CAMPOS, S. X.; VIEIRA, E. M. Pesticidas e seus respectivos riscos associados à contaminação da água. **Pesticidas: Revista ecotoxicologia e meio ambiente**, Curitiba, v. 13, p. 53 – 58, 2003.

SILVA, I. G. S.; ALMEIDA, F. C. G.; SILVA, N. M. P. R.; CASAZZA, A. A.; CONVERTI, A.; SARUBBO, L. A. Soil Bioremediation: Overview of Technologies and Trends. **Energies**, v. 13, n. 18, p. 4664, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13184664>. Acesso em: 30 ago. 2024.

SOUTO, K. M.; JACQUES, R. J. S.; AVILA, L. A.; MACHADO, S. L. O.; ZANELLA, R.; REFATTI, J. P. Biodegradação dos herbicidas imazetapir e imazapique em solo rizosférico de seis espécies vegetais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n.10, p.1790 – 1796, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013001000010>. Acesso em: 30 ago. 2024.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solo. **Revista e Ampliada**. Brasília: Embrapa, ed. 5, p. 356, 2018.

TOMASSONI, F.; FERREIRA SANTOS, R.; SAMWAYS SANTOS, F.; CARPINSKI, M.; DA SILVEIRA, L. TÉCNICA DE BIORREMEDIAÇÃO DO SOLO. **Acta Iguazu**, v. 3, n. 3, p. 46 – 56, 2024. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/view/10796>. Acesso em: 30 set. 2024.

TONINI, R. M. C. W.; REZENDE, C. E.; GRATIVOL, A. D. Degradação e biorremediação de compostos do petróleo por bactérias: revisão. **Oecologia Australis**, v. 14, n. 4, p. 1025 - 1035, 2010.

THIEFFRY, S.; AUBERT, J.; LAMRANI, M. D; LAURENT, F. M.; ROMDHANE, S.; ROUARD, N.; SIOL, M.; SPOR, A. Engineering multi-degrading bacterial communities to bioremediate soils contaminated with pesticides residues. **Journal of Hazardous Materials**, v. 471, p. 134454, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134454>. Acesso em: 30 ago. 2024.

VIDAL, M. C.; AMARAL, D. F. S.; NOGUEIRA, J. D.; MAZZARO, M. A. T.; LIRA, V. M. C. Bioinsumos: a Construção de um Programa Nacional pela Sustentabilidade do Agro Brasileiro. *Economic Analysis of Law Review*, v. 12, n. 3, p 557 – 574, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.31501/ealr.v12i3.12811>. Acesso em: 22 nove. 2024.

WANG, L.; WANG, X.; WU, H.; WANG, H.; WANG, Y.; LU, Z. Metabolic modeling of synthetic microbial communities for bioremediation. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 53, n. 24, p. 2092 – 2111, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10643389.2023.2212569>. Acesso em: 30 ago. 2024.

WILSON, C. H.; GERBER, S. Theoretical insights from upscaling Michaelis–Menten microbial dynamics in biogeochemical models: a dimensionless approach. **Biogeosciences**, v. 18, n. 20, p. 5669 – 5679, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/bg-18-5669-2021>. Acesso em: 30 ago. 2024.

YAKUBU, M. B. Biological approach to oil spills remediation in the soil. **African Journal of Biotechnology**, Nigeria, v. 6, n. 24, p. 2735 – 2739, 2007. Disponível em: <https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/58189>. Acesso em: 30 ago. 2024.

ZHAO D.; ZHANG, W.; CUI, J. Microbial community structure and carbon transformation characteristics of different aggregates in black soil. **PeerJ**, v. 12, p. 18, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.7717/peerj.17269>. Acesso em: 30 ago. 2024.

## APÊNDICE 1

### CÁLCULO DA CORREÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO

#### A. Dados

- Profundidade de coleta do solo de 20 cm;
- 144 kg de solo no total;
- 52,50 g de calcário;
- 25 g de superfosfato simples; e
- 5,53 g de cloreto de potássio.

#### B. Adotar a densidade do argissolo

- $1,3 \text{ g/cm}^3 = 1.300 \text{ kg/m}^3$ .

#### C. Volume do solo de 1 ha na camada arável

- $10.000 \text{ m}^2 \text{ de solo (área)} \times 0,20 \text{ m (profundidade)} = 2.000 \text{ m}^3$ .

#### D. Calcular a quantidade de solo em 1 ha (através da densidade)

$$d = \frac{m}{V}$$

$$1.300 = \frac{m}{2.000}$$

$$m = 2.600.000 \text{ kg de solo em 1 ha.}$$

#### E. Calcular a quantidade de fertilizantes em 1 há

##### F.

- Calcário

$$\begin{array}{rcl} 144 \text{ kg de solo} & \text{-----} & 52,50 \text{ g calcário} \\ 2.600.000 \text{ kg de solo} & \text{-----} & x \\ x & = & 947.916,67 \text{ g/ha ou } 947,92 \text{ kg/ha de calcário.} \end{array}$$

- Superfosfato simples

$$\begin{array}{rcl} 144 \text{ kg de solo} & \text{-----} & 25 \text{ g superfosfato simples} \\ 2.600.000 \text{ kg de solo} & \text{-----} & x \\ x & = & 451.388,89 \text{ g/ha ou } 451,4 \text{ kg/ha de superfosfato simples.} \end{array}$$

- Cloreto de potássio

$$\begin{array}{rcl} 144 \text{ kg de solo} & \text{-----} & 5,53 \text{ g cloreto de potássio} \\ 2.600.000 \text{ kg de solo} & \text{-----} & x \\ x & = & 99.847,22 \text{ g/ha ou } 99,85 \text{ kg/ha de cloreto de potássio.} \end{array}$$