REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/09/2026 - **Accepted:** 26/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/ewykz482
Pages: 1-21

OCORRÊNCIA DE RESÍDUOS DE AGROTÓXICOS NO SOLO E NA BIOMASSA DE ALFAFA (*Medicago sativa* L.) APÓS HISTÓRICO DE SUCESSÃO SOJA–MILHO

OCCURRENCE OF PESTICIDE RESIDUES IN SOIL AND ALFALFA BIOMASS (*Medicago sativa* L.) AFTER A HISTORY OF SOYBEAN–CORN SUCCESSION

OCURRENCIA DE RESIDUOS DE PLAGUICIDAS EN EL SUELO Y EN LA BIOMASA DE ALFALFA (*Medicago sativa* L.) DESPUÉS DE UN HISTORIAL DE SUCESIÓN SOJA–MAÍZ

Erich dos Reis Duarte

Professor Doutor, Universidade do Norte do Paraná – BR

E-mail: Erich.duarte@bol.com.br

Adilson de Oliveira

Engenheiro Agrônomo, Orquidário Shekynah - BR

E-mail: Adilson_oliveira@yahoo.com.br

Aline Vanessa Sauer

Professora Doutora, Universidade Estadual de Ponta Grossa - BR

E-mail: Aline.sauer@uepg.br

Camila Ferreira Miyashiro

Professora Doutora,Universidade do Norte do Paraná – BR

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/09/2026 - **Accepted:** 26/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/ewykz482
Pages: 1-21

E-mail: Camila.miyashiro@uenp.edu.br

André Luiz Radunz

Professor Doutor, Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS - campus Chapecó), Brasil

E-mail: andre.radunz@uffs.edu.br

Marcelo José Ragazzi

Discente do curso de Agronomia Universidade do Norte do Paraná - PR

E-mail: mjragazzi3780@gmail.com

Bruno Rafael Vasconcelos

Ligier de Tecnologia de Aplicação – Bandeirantes – Pr.

E-mail: brunorafa.vasconcelos@gmail.com

Pamela Mayara Aparecida Pinheiro

Discente do curso de Agronomia Universidade do Norte do Paraná - PR

E-mail: pamelamayara673@gmail.com

Resumo
A presença de resíduos de agrotóxicos em solos agrícolas reflete o histórico de manejo e exige monitoramento contínuo em áreas de transição de culturas. Este estudo caracterizou a ocorrência pontual de multirresíduos no solo e na biomassa de alfafa (*Medicago sativa* L.) após a conversão de uma área submetida a cinco anos de sucessão soja–milho, em Bandeirantes, Paraná, Brasil. A amostragem compreendeu duas etapas no solo (profundidade de 0–20 cm): em abril de 2026 (pós-colheita de grãos) e em agosto de 2026 (seis meses após a implantação da alfafa). As análises foram conduzidas por cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas sequencial (LC-MS/MS), com limite de quantificação (LQM) de 0,01 mg kg^{-1}. No solo pós-grãos, quantificaram-se fluxapiroxade (0,04 mg kg^{-1}), epoxiconazol (0,03 mg kg^{-1}), clorantraniliprole (0,01 mg kg^{-1}) e clotianidina (0,01 mg kg^{-1}). Na amostragem associada ao solo com cultivo de alfafa, detectaram-se 2,4-D (0,01 mg kg^{-1}) e bifentrina (0,02 mg kg^{-1}), além de traços de tebuconazol (< LQM). Embora alguns compostos apresentem resíduos mensuráveis, os níveis observados situam-se em patamares reduzidos e, sob a abordagem metodológica empregada, não caracterizam concentrações tóxicas para o solo ou para o desenvolvimento das culturas. A divergência entre os analitos quantificados nas duas matrizes e o caráter exploratório da amostragem não permitem inferir

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/09/2026 - **Accepted:** 26/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/ewykz482
Pages: 1-21

translocação solo–planta, dinâmica de dissipação ou risco ecotoxicológico sistêmico. Conclui-se que os achados retratam um perfil residual pontual e atóxico, ressaltando a relevância de monitoramentos temporais ampliados em sistemas agrícolas em transição.

Palavras-chave: Resíduos de agrotóxicos; LC-MS/MS; Solo agrícola; Monitoramento ambiental.

Abstract
The presence of pesticide residues in agricultural soils reflects past management and requires continuous monitoring in crop rotation areas. This study looked at the spot occurrence of multiple residues in the soil and alfalfa (*Medicago sativa* L.) biomass after converting a field that had undergone five years of soybean–corn succession in Bandeirantes, Paraná, Brazil. Sampling was done in two stages in the soil (0–20 cm depth): in April 2026 (after grain harvest) and in August 2026 (six months after alfalfa planting). The analyses were done using liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry (LC-MS/MS), with a quantification limit (LOQ) of 0.01 mg kg^{-1}. In the post-harvest soil, fluxapyroxad (0.04 mg kg^{-1}), epoxiconazole (0.03 mg kg^{-1}), chlorantraniliprole (0.01 mg kg^{-1}), and clothianidin (0.01 mg kg^{-1}) were detected.
In the soil samples from the alfalfa field, they discovered 2,4-D (0.01 mg kg^{-1}) and bifenthrin (0.02 mg kg^{-1}), plus traces of tebuconazole (< LQM). Even though some compounds show measurable residues, the levels were *markedly low* and, given the method used, they are non-toxic for the soil or crop growth. The differences between the compounds measured in the two matrices and the exploratory nature of the sampling mean it cannot be determined if there's soil-to-plant transfer, how the chemicals break down, or any systemic ecotoxic risk. Overall, the results show a minor and non-toxic residue profile, highlighting the importance of broader, ongoing monitoring in transitioning agricultural systems.

Keywords: Pesticide residues; LC-MS/MS; Agricultural soil; Environmental monitoring.

Resumen
La presencia de residuos de pesticidas en suelos agrícolas refleja el historial de manejo y requiere un monitoreo continuo en áreas de transición de cultivos. Este estudio caracterizó la ocurrencia puntual de múltiples residuos en el suelo y en la biomasa de alfalfa (*Medicago sativa* L.) después de la conversión de un área sometida a cinco años de rotación soja–maíz, en Bandeirantes, Paraná, Brasil. El muestreo comprendió dos etapas en el suelo (profundidad de 0–20 cm): en abril de 2026 (post-cosecha de granos) y en agosto de 2026 (seis meses después de la implantación de la alfalfa). Los análisis se realizaron mediante cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas en tándem (LC-MS/MS), con un límite de cuantificación (LQM) de 0,01 mg kg^{-1}. En el suelo post-cosecha de granos, se cuantificaron fluxapiroxade (0,04 mg kg^{-1}), epoxiconazol (0,03 mg kg^{-1}), clorantraniliprole (0,01 mg kg^{-1}) y clotianidina (0,01 mg kg^{-1}).
En el muestreo asociado al suelo con cultivo de alfalfa, se detectaron 2,4-D (0,01 mg kg^{-1}) y bifentrina (0,02 mg kg^{-1}), además de trazas de tebuconazol (< LQM). Aunque algunos compuestos presentan residuos medibles, los niveles observados se encuentran en rangos bajos y, bajo el enfoque metodológico empleado, no representan concentraciones tóxicas para el suelo ni para el desarrollo de los cultivos. La divergencia entre los analitos cuantificados en las dos matrices y el carácter exploratorio del muestreo no permiten inferir la translocación suelo–planta, la dinámica de disipación o el riesgo ecotoxicológico sistémico. Se concluye que los hallazgos reflejan un perfil residual puntual y no tóxico, destacando la relevancia de ampliaciones en el monitoreo temporal en sistemas agrícolas en transición.

Palabras clave: Residuos de plaguicidas; LC-MS/MS; Suelo agrícola; Monitoreo ambiental.

1. Introdução

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/09/2026 - **Accepted:** 26/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/ewykz482
Pages: 1-21

A expansão e a intensificação dos sistemas agrícolas têm sido acompanhadas pelo uso recorrente de produtos fitossanitários, empregados para proteção das culturas e manutenção da produtividade (PERGNER; LIPPERT, 2023; DEGUINE et al., 2021). No entanto, o destino ambiental desses compostos no solo, que envolve processos de dissipação, lixiviação, adsorção, transformação e degradação microbiológica, constitui uma importante área de investigação em sistemas agrícolas, devido às implicações para a persistência dos resíduos e sua mobilidade no ambiente (SARKER; KIM; JEONG, 2024; CHIA et al., 2024).

Em âmbito mundial, o Brasil destaca-se pelo elevado uso de defensivos agrícolas e, segundo dados da FAOSTAT referentes a 2024, apresentou o maior volume de pesticidas utilizados na agricultura entre os países avaliados (FAO, 2026). Esse cenário está associado à dimensão de sua área agrícola, às condições edafoclimáticas e à adoção de sistemas de cultivo intensivos, incluindo a sucessão de soja (*Glycine max* L.) no verão e milho (*Zea mays* L.) na segunda safra (FAO, 2026).Entre os sistemas produtivos predominantes no país, destaca-se a sucessão soja–milho safrinha, na qual o uso de herbicidas pode assumir particular importância devido à necessidade de manejo de plantas daninhas e ao intervalo relativamente curto entre os cultivos. A aplicação recorrente de herbicidas, fungicidas e inseticidas ao longo de safras sucessivas pode gerar um acúmulo temporário ou residual de moléculas complexas na camada arável do solo (GHINS, 2024).

O Paraná é um dos maiores produtores de grãos e forragens, com histórico de uso intensivo de agroquímicos. Pesquisas recentes demonstram que resíduos podem persistir no solo e ser absorvidos por culturas subsequentes.

A região do Norte Pioneiro do Paraná apresenta expressiva atividade agrícola, caracterizada pela adoção de sistemas de semeadura direta e pela sucessão de culturas, com predominância da soja na primeira safra e do milho e do trigo na segunda safra. O manejo dos solos inclui a utilização de corretivos e fertilizantes e, em determinadas áreas, a realização periódica de operações de escarificação, refletindo diferentes estratégias de manejo das áreas agrícolas (EMBRAPA, 2021). Nesse contexto, as características físico-

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/09/2026 - **Accepted:** 26/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/ewykz482
Pages: 1-21

químicas do solo e o histórico de manejo podem influenciar a retenção, a dissipação, a mobilidade e a persistência de resíduos de herbicidas, determinando seu comportamento no ambiente e seu potencial de exposição às culturas subsequentes (SARKER; KIM; JEONG, 2024). A introdução de culturas perenes de elevado valor proteico, como a alfafa (*Medicago sativa* L.), requer atenção especial às condições edáficas, uma vez que a cultura apresenta elevada exigência quanto à fertilidade, à acidez, à profundidade e à drenagem do solo (DUARTE et al., 2021).

A introdução da cultura em áreas com histórico agrícola anterior justifica a caracterização do perfil de resíduos presentes no sistema, sobretudo quando a biomassa poderá integrar a alimentação animal.

Métodos multirresíduos baseados em LC-MS/MS permitem avaliar simultaneamente grande número de ingredientes ativos e produtos de transformação em matrizes ambientais e vegetais. Essa abordagem é particularmente útil para programas de monitoramento, nos quais a ocorrência de compostos em concentrações próximas aos limites analíticos deve ser distinguida de evidências de transferência entre compartimentos (WU et al., 2022).

Apesar da relevância do conhecimento sobre o destino ambiental de agrotóxicos utilizados em sistemas de produção de soja e milho, a caracterização de resíduos remanescentes em áreas posteriormente destinadas a forrageiras perenes ainda requer avaliações específicas. Nesse contexto, o presente estudo foi estruturado para caracterizar a ocorrência de resíduos no solo e na alfafa após a conversão de uma área com histórico de cinco anos de sucessão soja–milho, sem pressupor previamente a ocorrência de absorção ou translocação entre as matrizes.

Estudos que integram, no mesmo local, a caracterização de resíduos em solo e em biomassa de forrageiras podem contribuir para a identificação de situações que justifiquem monitoramentos subsequentes mais abrangentes.

A questão orientadora foi: quais resíduos de agrotóxicos podem ser detectados no solo e na biomassa de alfafa após cinco anos de sucessão soja–milho, considerando uma avaliação pontual das duas matrizes?

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/09/2026 - **Accepted:** 26/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/ewykz482
Pages: 1-21

A justificativa da pesquisa fundamenta-se na necessidade de gerar informações analíticas sobre a ocorrência de resíduos em uma área agrícola convertida para o cultivo de alfafa. O estudo não foi delineado para estabelecer causalidade, transferência solo–planta ou avaliação de risco toxicológico, mas para caracterizar o perfil de ocorrência obtido nas condições e no momento amostrados.

2. Revisão da Literatura

2.1 Destino dos agrotóxicos no ecossistema.

A dinâmica e o destino dos agrotóxicos no sistema solo–planta são determinados pela interação entre as propriedades do ingrediente ativo, como solubilidade em água, coeficiente de adsorção ao carbono orgânico do solo (K_{oc}) e persistência, expressa pelo tempo de dissipação ou meia-vida (DT_{50}), e as condições edafoclimáticas locais, incluindo textura, teor de matéria orgânica, pH, umidade, temperatura e precipitação (SARKER et al., 2024). Inseticidas neonicotinoides, como clotianidina e imidacloprido, podem apresentar persistência prolongada no solo, embora sua dissipação seja variável em função das condições ambientais e das características edáficas. O clorantraniliprole, pertencente ao grupo das diamidas antranílicas, também pode apresentar elevada persistência em determinadas condições de solo. A permanência desses compostos no ambiente edáfico merece atenção em razão de seu potencial de exposição de organismos não-alvo e de alterações em componentes da biota do solo (FOUAD; ABDEL-RAHEEM, 2024; HE et al., 2015)

Estudos sobre o comportamento de fungicidas sistêmicos demonstram que a absorção e a distribuição de seus resíduos pelas plantas dependem das propriedades do ingrediente ativo e das características da espécie vegetal. Essa interação assume importância particular em culturas forrageiras, nas quais a ocorrência de resíduos pode apresentar implicações para a qualidade e a segurança do material destinado à alimentação animal (VENÂNCIO et al., 2025). A interação dos resíduos de pesticidas com a matéria orgânica do solo pode reduzir sua disponibilidade imediata para absorção pelas raízes; contudo, a

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/09/2026 - **Accepted:** 26/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/ewykz482
Pages: 1-21

transformação desses compostos pode originar metabólitos com diferentes propriedades de solubilidade e mobilidade, cuja movimentação na solução do solo pode ser favorecida pela disponibilidade hídrica. Dessa forma, condições de irrigação que promovam maior fluxo de água no perfil podem alterar a distribuição e a disponibilidade de determinados resíduos e seus produtos de transformação para as plantas (SARKER et al., 2024; ARAYA et al., 2024).

O desenvolvimento de métodos multirresíduos baseados em cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas sequencial (LC-MS/MS) e à espectrometria de massas de alta resolução ampliou significativamente a capacidade de detecção e quantificação simultânea de resíduos de pesticidas em matrizes vegetais e alimentos para animais. Em forragens, incluindo a alfafa (*Medicago sativa* L.), métodos recentes demonstraram a possibilidade de determinar simultaneamente centenas de ingredientes ativos em concentrações de μg kg^{-1}, favorecendo o monitoramento de resíduos em níveis de traço e contribuindo para a avaliação da segurança da alimentação animal (WU et al., 2022)

3. Metodologia

3.1 Local, histórico de uso e caracterização da Área

O estudo foi realizado em área agrícola comercial situada na Estância Terra Viva (Talhão Pivô), no município de Bandeirantes, Estado do Paraná, Brasil. Antes da implantação do sistema de produção de grãos, a área era utilizada como pastagem aberta. Posteriormente, foi submetida durante cinco anos à sucessão de soja (*Glycine max*) no verão e de milho (*Zea mays*) na segunda safra durante cinco anos consecutivos, seguindo as práticas fitossanitárias adotadas pelo produtor. No sexto ano, a área foi convertida para o cultivo de alfafa (*Medicago sativa* L.). A área dispõe de infraestrutura de pivô central, porém não houve utilização de irrigação durante o período de avaliação; portanto, a água de irrigação não constituiu fonte adicional de exposição considerada neste estudo.

Atributos Físico-Químicos do Solo (Camada 0–20 cm):

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/09/2026 - **Accepted:** 26/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/ewykz482
Pages: 1-21

- Classe Têxtil: Latossolo Vermelho Eutroférrico de textura argilosa.
- Composição Granulométrica: 620 g/kg de argila, 150 g/kg de silte e 230 g/kg de areia.
- Química do Solo: pH ($CaCl_2$) = 5,6; Matéria Orgânica (MO) = 28,5 g/dm^3; Capacidade de Troca Catiônica (CTC) = 12,4 $cmol_c$\dm^3; V% = 65%.

Como informação ambiental descritiva, a precipitação acumulada nos cinco anos anteriores à implantação da alfafa foi de aproximadamente 1.200, 1.000, 970, 930 e 880 mm por ano, respectivamente, totalizando 4.980 mm e média de 996 mm ano^{-1}. Esses valores são apresentados apenas como contexto climático do histórico da área e não foram utilizados para inferir taxas de dissipação, lixiviação ou degradação dos resíduos.

Entre os produtos fitossanitários especificamente documentados no histórico disponibilizado para esta avaliação, encontram-se bifentrina, inseticida do grupo 3A; tebuconazol, fungicida triazólico; clorantraniliprole, inseticida de amplo espectro; clotianidina, inseticida neonicotinoide sistêmico (CAS 210880-92-5); epoxiconazol, fungicida sistêmico do grupo químico dos triazóis; e fluxapiroxade, fungicida sistêmico do grupo SDHI (inibidor da succinato desidrogenase) . A atribuição dos demais resíduos detectados no solo a aplicações específicas não foi realizada, pois não foram disponibilizados registros completos de todas as aplicações ocorridas ao longo dos cinco anos.

3.2 Procedimento de amostragem

A amostragem foi realizada em duas matrizes. O solo foi coletado em abril de 2026, após a retirada das culturas anteriores e durante o período de estabelecimento da alfafa.

Para a primeira análise do solo - coleta em abril de 2026, foram coletadas subamostras em oito pontos distintos dentro do talhão, na profundidade de 0–20 cm, posteriormente homogeneizadas para formar uma única amostra composta de 500 g para análise

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/09/2026 - **Accepted:** 26/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/ewykz482
Pages: 1-21

laboratorial. Portanto, os oito pontos constituíram subamostras da mesma unidade composta e não correspondem a oito repetições independentes da amostra analítica correspondente ao relatório TECPAR nº 2643/26.

Para a segunda análise do solo - coleta em agosto de 2026, com a cultura da alfafa instalada, utilizamos a mesma metodologia descrita acima e, após os procedimentos, foi encaminhada uma amostra representativa da biomassa aérea ao laboratório, constituindo a amostra analítica correspondente ao relatório TECPAR nº 2641/26.

Assim, os oito pontos de solo representam subamostras destinadas à composição de uma única amostra, e não oito repetições experimentais independentes. Essa distinção é fundamental para a interpretação dos resultados e para a definição do alcance das conclusões.

Coleta efetuada pelo cliente.

A amostragem foi executada na instalação da cultura de alfafa e aos seis meses após o estabelecimento da cultura da alfafa.

3.3 Análise Laboratorial e Instrumentação

As análises multirresíduos foram realizadas nos laboratórios do Instituto de Tecnologia do Paraná (TECPAR), Curitiba-PR, conforme os Relatórios de Ensaios TECPAR nº 2641/26, referente à amostra de alfafa, e nº 2643/26, referente à amostra de solo. Os resultados laboratoriais foram utilizados conforme apresentados nos respectivos relatórios.

- Os relatórios consultados não apresentam, no documento utilizado para este manuscrito, detalhamento suficiente do procedimento de extração para que se possa especificar com segurança um método de preparo. Por essa razão, não se atribui ao laboratório uma metodologia de extração que não esteja explicitamente documentada nos laudos.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/09/2026 - **Accepted:** 26/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/ewykz482
Pages: 1-21

- A determinação qualitativa e quantitativa dos resíduos foi realizada por cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas sequencial (LC-MS/MS), conforme os relatórios laboratoriais.
- O painel analítico contemplou múltiplos princípios ativos e metabólitos de agrotóxicos. Para este manuscrito, foram considerados os compostos reportados pelo TECPAR como quantificados, detectados abaixo do LQM ou não detectados.
- O Limite de Quantificação do Método (LQM) informado nos relatórios foi de 0,01 mg kg^{-1}.

3.4 Tratamento e apresentação dos resultados

Em razão da utilização de uma única amostra composta de solo e de uma única amostra analítica de alfafa, não foi adotado delineamento estatístico inferencial nem foram calculadas as médias, erros-padrão, testes de hipótese ou comparações estatísticas entre matrizes.

Os resultados foram organizados por matriz e classificados em três situações:

(i) composto quantificado, quando o resultado foi apresentado como valor numérico igual ou superior ao LQM;

(ii) composto detectado abaixo do LQM, reportado pelo laboratório como <LQM;

(iii) e demais analitos não detectados. Como o estudo compreendeu uma única amostra composta de solo e uma única amostra analítica de alfafa, sem replicação espacial ou temporal independente, não foram aplicados testes estatísticos inferenciais. A comparação entre matrizes foi realizada exclusivamente de forma descritiva e não foi calculada como relação de transferência solo–planta.

3.5 Uso de ferramentas digitais e inteligência artificial

Segundo Duarte et al. (2026), ferramentas digitais e recursos de inteligência artificial como apoio à tradução, revisão linguística e organização das referências bibliográficas. O Google Tradutor foi utilizado como recurso auxiliar na tradução de trechos para os idiomas inglês e espanhol, enquanto o Bibcitation foi empregado para auxiliar na organização e

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/09/2026 - **Accepted:** 26/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/ewykz482
Pages: 1-21

formatação das citações e referências bibliográficas. Todo o conteúdo produzido ou processado por essas ferramentas foi revisado e validado pelos autores, que permanecem integralmente responsáveis pela precisão, interpretação, originalidade e integridade das informações apresentadas no manuscrito.

4. Resultados e Discussão

4.1 Perfil de resíduos determinado por LC-MS/MS

A análise laboratorial revelou perfis distintos entre a matriz edáfica e a biomassa do solo com plantio da alfafa. No solo após a retirada da cultura soja-milho, quatro ingredientes ativos foram quantificados e seis analitos adicionais foram reportados pelo TECPAR como detectados abaixo do LQM. O solo com a cultura de alfafa, dois ingredientes ativos foram quantificados e o tebuconazol foi reportado abaixo do LQM. Os demais analitos pesquisados no painel não foram detectados nas respectivas amostras.

Tabela 1. Resíduos de agrotóxicos detectados no solo (profundidade 0-20 cm), Bandeirantes-PR.

Princípio Ativo / Metabólito	Classe / Uso Agrícola	Resultado (mg kg^{-1})	Limite de Quantificação (mg kg^{-1})
Epoxiconazol	Fungicida (Triazol)	0,03	0,01
Fluxapiroxade	Fungicida (Carboxamida)	0,04	0,01
Clorantraniliprole	Inseticida (Diamida Antranílica)	0,01	0,01
Clotianidina	Inseticida (Neonicotinoide)	0,01	0,01
Atrazina 2-hidróxi	Metabólito de Herbicida	< LQM	0,01
Bifentrina	Inseticida (Piretroide)	< LQM	0,01
Difenoconazol	Fungicida (Triazol)	< LQM	0,01

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/09/2026 - **Accepted:** 26/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/ewykz482
Pages: 1-21

Fipronil sulfona	Metabólito de Inseticida	< LQM	0,01
Imidacloprido	Inseticida (Neonicotinoide)	< LQM	0,01
Piraclostrobina	Fungicida (Estrobilurina)	< LQM	0,01

Fonte: TECPAR (2026)

Nota*:* No solo, epoxiconazol (0,03 mg kg^{-1}) e fluxapiroxade (0,04 mg kg^{-1}) apresentaram as maiores concentrações numéricas entre os compostos quantificados. Clorantraniliprole e clotianidina foram quantificados no limite de 0,01 mg kg^{-1}. A presença desses ingredientes ativos é compatível com a ocorrência de resíduos em área agrícola previamente submetida a sucessivos ciclos de cultivo.

A literatura descreve persistência variável para fungicidas triazólicos, fluxapiroxade e neonicotinoides, condicionada às propriedades dos compostos e às características do solo e do ambiente (LI et al., 2015; MÖRTL et al., 2016; LEE et al., 2024; JOHNSEN et al., 2025).

No entanto, esses estudos não permitem atribuir diretamente os resíduos observados nesta área a uma aplicação específica ou estimar sua idade, pois não foram realizadas amostragens anteriores ou séries temporais.

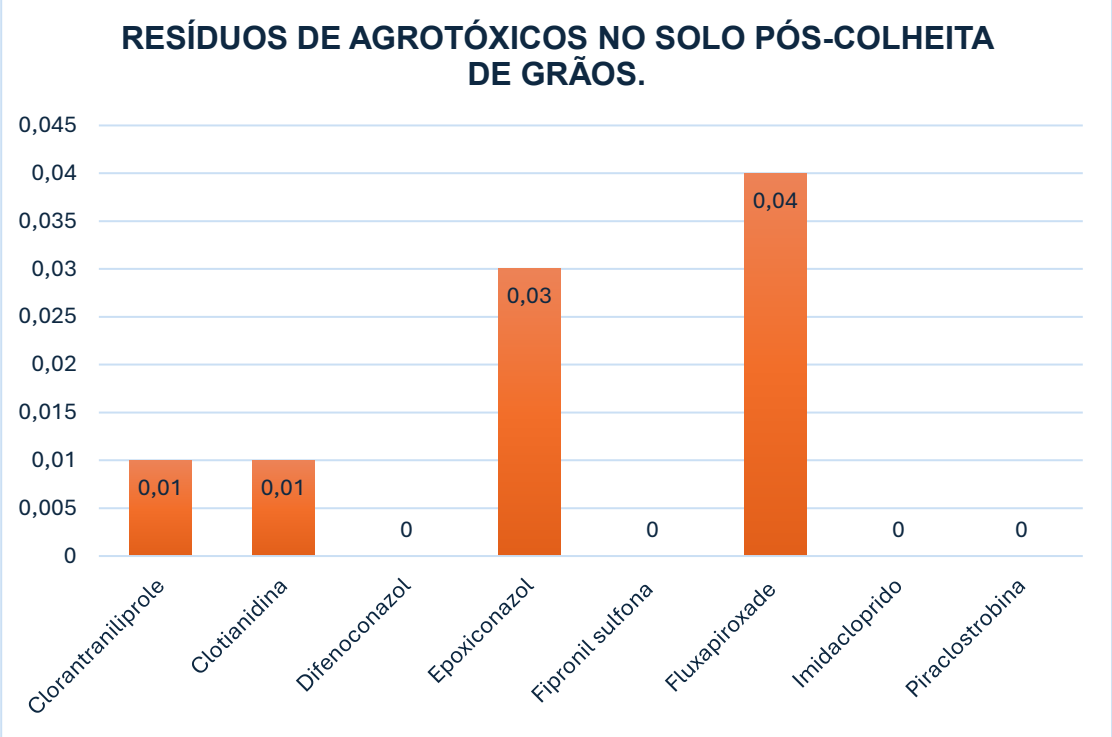
4.2 Análise Quantitativa e Comparativa dos Dados

- **Matriz Solo pós-colheita de grãos:** A caracterização analítica da matriz edáfica referente ao término do ciclo de transição — coleta do solo realizada em abril de 2026 e formalizada pelo **Relatório de Ensaios TECPAR Nº 2643/26** — teve como propósito mapear o perfil de resíduos remanescentes no solo após cinco anos consecutivos de cultivo intensivo sob a sucessão soja–milho, antes do estabelecimento da cultura da alfafa. As análises revelaram a presença quantificável de quatro princípios ativos principais, destacando-se os fungicidas fluxapiroxade (0,04 mg kg^{-1}) e epoxiconazol (0,03 mg kg^{-1}), ambos empregados no manejo fitossanitário das culturas de grãos precedentes (Figura 1).

  Figura 1. Resíduos de agrotóxicos detectados no solo (profundidade 0-20 cm da Estância Terra Viva (Talhão Pivô), Bandeirantes-PR.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/09/2026 - **Accepted:** 26/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/ewykz482
Pages: 1-21



Fonte: TECPAR (2026)

Nota: Concentração de resíduos de agrotóxicos no solo pós-colheita de grãos em Bandeirantes – PR.

- A detecção desses ingredientes ativos, ainda que em concentrações residuais baixas, é condizente com o histórico de aplicações continuadas e com os mecanismos de retenção em solos tropicais de textura argilosa. O epoxiconazol, pertencente ao grupo dos triazóis, exibe reconhecida estabilidade e degradação lenta no perfil do solo, associadas ao envelhecimento da molécula (*aging*) e à forte sorção aos coloides orgânicos e minerais. Estudos recentes em condições de campo evidenciam que o epoxiconazol pode persistir na camada superficial por prazos prolongados — com detecção reportada de 6 a 15 anos após a última aplicação —, apresentando reduzida biodisponibilidade e dissipação gradual em áreas com histórico de uso recorrente (JOHNSEN et al., 2025).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/09/2026 - **Accepted:** 26/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/ewykz482
Pages: 1-21

- De forma análoga, a carboxamida fluxapiroxade apresenta expressiva persistência no compartimento edáfico, cuja meia-vida e dinâmica de dissipação dependem diretamente dos teores de matéria orgânica, do pH e do regime hídrico local (LI et al., 2015; LEE et al., 2024). A redução pluviométrica observada no histórico da área (1.200 mm no 1º ano para 880 mm no 5º ano) atua como fator desacelerador da degradação microbiológica e da lixiviação, favorecendo o acúmulo superficial desses fungicidas.

- Adicionalmente, quantificou-se o inseticida neonicotinoide clotianidina (0,01 mg kg^{-1}), ativo amplamente utilizado no tratamento de sementes das culturas de grãos. A retenção e a mobilidade da clotianidina são fortemente reguladas pelas características edáficas: enquanto solos arenosos favorecem sua percolação, solos de textura argilosa e com elevado teor de matéria orgânica — como o Latossolo avaliado (620 g kg^{-1} de argila e 28,5 g dm^{-3} de MO) — promovem maior retenção na camada de 0–20 cm (MÖRTL et al., 2016). Tais achados ratificam levantamentos em áreas agrícolas comerciais submetidas ao uso continuado de tratamento de sementes por múltiplos anos (2 a 11 anos), nos quais se constataram resíduos médios de clotianidina de 7,0 ng g^{-1} (0,007 mg kg^{-1}) no solo (XU et al., 2015).

- Em síntese, os resultados expressos no Relatório TECPAR Nº 2643/26 confirmam que a matriz solo acumulou resíduos em níveis de traço resultantes do sistema soja–milho, consolidando a importância do monitoramento de resíduos edáficos como linha de base analítica para avaliar eventuais interações com culturas subsequentes.

Matriz durante o cultivo da alfafa (2ª coleta de solo - Ensaio Tecpar 2641/26): A amostragem de solo objetivou a verificação da evolução do perfil residual no solo sob a nova cultura; foram quantificados os resíduos de apenas dois compostos quantificáveis

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/09/2026 - **Accepted:** 26/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/ewykz482
Pages: 1-21

acima do LQM: o inseticida bifentrina (0,02 mg kg^{-1}) e o herbicida 2,4-D (0,01 mg kg^{-1}), além de traços de tebuconazol (< LQM).

- A presença de **bifentrina** (0,02 mg kg^{-1}) no solo decorre do depósito na superfície edáfica proveniente da aplicação foliar do inseticida Bifentrina Nortox 100 EC (0,40 L ha^{-1}) efetuada durante o manejo da alfafa, apresentando forte adsorção na fração orgânica do solo devido ao seu elevado coeficiente de partição (log K_{oc}).

Tabela 2. Resíduos de agrotóxicos determinados durante o cultivo da alfafa (*Medicago sativa* L.) aos 6 meses após o plantio, Bandeirantes-PR.

Princípio Ativo	Classe / Uso Agrícola	Resultado (mg kg^{-1})	Limite de Quantificação (mg kg^{-1})
2,4-D	Herbicida (Auxínico)	0,01	0,01
Bifentrina	Inseticida (Piretroide)	0,02	0,01
Tebuconazol	Fungicida (Triazol)	< LQM	0,01

Fonte: TECPAR (2026).

Nota*:* Os demais princípios ativos pesquisados no painel não foram detectados. < LQM: detectado abaixo do limite de quantificação do método.

- O aparecimento de **2,4-D** (0,01 mg kg^{-1}) no solo em nível pontual não permite estabelecer a origem desses resíduos, visto que o produto não foi aplicado na área da alfafa.
- O **tebuconazol** esteve presente no solo em níveis de traço (< LQM), entre 0,003 e 0,01 mg kg^{-1}, indicando acelerada degradação do fungicida Tebuconazol CCAB 200 EC aplicado na área.

4.3 Resíduos determinados no solo coletado na cultura de alfafa

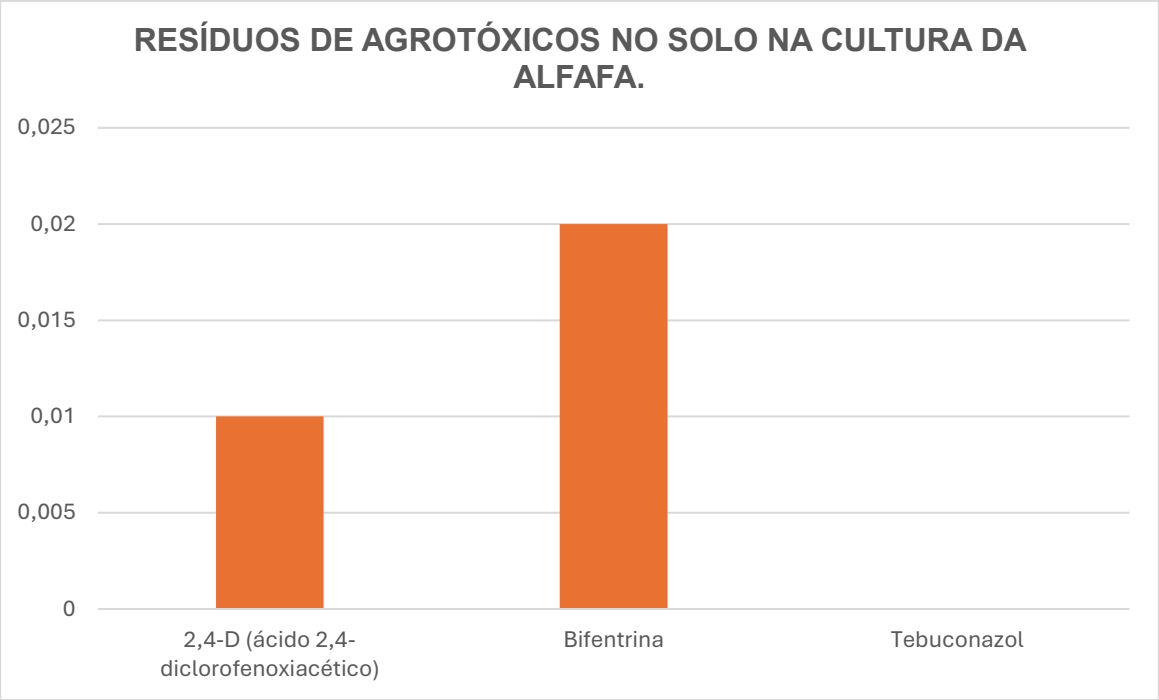
Coleta do solo na cultura de alfafa, foram quantificados 2,4-D (0,01 mg kg^{-1}) e bifentrina (0,02 mg kg^{-1}), enquanto o tebuconazol foi reportado abaixo do LQM. Como o laudo analítico não informa histórico detalhado de aplicações na própria alfafa ou nas áreas

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/09/2026 - **Accepted:** 26/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/ewykz482
Pages: 1-21

adjacentes, não é possível estabelecer a origem desses resíduos. A presença de 2,4-D não é possível estabelecer a origem desses resíduos.

Figura 2. Resíduos de agrotóxicos detectados no solo da cultura na alfafa (Estância Terra Viva (Talhão Pivô), Bandeirantes-PR).



Fonte: TECPAR (2026).

Nota: Concentração de resíduos durante o cultivo da alfafa em Bandeirantes – PR, após 6 meses do plantio da cultura da alfafa.

A ocorrência de 2,4-D e bifentrina na alfafa, na ausência de quantificação desses mesmos compostos no solo, reforça a necessidade de cautela ao interpretar a relação entre as duas matrizes. Esses resultados podem refletir fontes distintas, incluindo manejo fitossanitário da cultura, deriva, deposição atmosférica ou outras fontes locais. Sem registros de aplicação e amostragem espacial independente, não é possível identificar a fonte predominante.

O tebuconazol, reportado abaixo do LQM na alfafa, deve ser interpretado como presença abaixo do limite de quantificação e não como concentração equivalente a 0,01 mg kg^{-1}.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/09/2026 - **Accepted:** 26/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/ewykz482
Pages: 1-21

Da mesma forma, resultados <LQM no solo não devem ser utilizados em cálculos quantitativos de comparação com valores numéricos obtidos em outra matriz.

4.4 Comparação descritiva dos perfis residuais entre solo pós-colheita de grãos e solo na cultura de alfafa

A comparação entre os Relatórios TECPAR Nº 2643/26 (abril/2026) e Nº 2641/26 (agosto/2026) demonstra uma clara alteração no perfil químico do solo. Os quatro ingredientes ativos quantificados na fase pós-grãos (fluxapiroxade, epoxiconazol, clorantraniliprole e clotianidina) declinaram para níveis não detectados ou inferiores ao limite de quantificação na amostragem realizada na alfafa.

Os perfis residuais diferiram entre as matrizes, mas o delineamento não permite estabelecer dissipação temporal dos compostos no solo nem transferência solo–planta. Contudo, ressalta-se que a caracterização baseada em duas campanhas de amostragem composta fornece um retrato pontual da dinâmica edáfica; portanto, os dados não devem ser extrapolados para o cálculo de equações cinéticas de dissipação de ordem zero ou primeira ordem, nem para modelos definitivos de balanço de massa.

A detecção dos metabólitos atrazina-2-hidróxi e fipronil sulfona em níveis de traço (< LQM) nos laudos analíticos atesta a presença dessas moléculas em concentrações situadas entre o limite de detecção e o de quantificação do método analítico (0,003 a 0,01 mg kg^{-1}). Embora esses compostos correspondam a produtos de transformação conhecidos do herbicida atrazina e do inseticida fipronil, empregados no histórico de manejo da área, o delineamento exploratório não permite precisar a taxa de transformação nem a rota exata de degradação (química ou biótica) responsável por sua formação no perfil do solo.

A presença de 2,4-D e bifentrina na biomassa deve ser considerada em avaliações específicas de resíduos em forragens. A caracterização analítica não equivale, isoladamente, a uma avaliação de segurança para consumo animal.

A transição da sucessão soja–milho para alfafa demonstra a importância de monitoramentos em áreas de mudança de uso agrícola, especialmente quando há histórico de aplicação de múltiplos ingredientes ativos, evidenciando a necessidade de

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/09/2026 - **Accepted:** 26/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/ewykz482
Pages: 1-21

estudos temporais contínuos para a modelagem de risco e persistência de agrotóxicos no compartimento edáfico.

4.5 Limitações do estudo

O estudo apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A amostra de solo foi composta a partir de oito pontos, resultando em uma única unidade analítica; a alfafa também foi representada por uma única amostra laboratorial. Não houve série temporal, amostragem de raízes, replicação espacial independente ou registro quantitativo completo das aplicações fitossanitárias anteriores. Assim, os dados permitem caracterizar a ocorrência de resíduos no momento da coleta, mas não estabelecer sua dinâmica temporal, origem específica, absorção radicular, translocação ou risco toxicológico para animais.

5. Conclusão

A caracterização multirresíduos por LC-MS/MS no solo pós-colheita de grãos (abril/2026) identificou a presença quantificável de fluxapiroxade (0,04 mg kg^{-1}), epoxiconazol (0,03 mg kg^{-1}), clorantraniliprole (0,01 mg kg^{-1}) e clotianidina (0,01 mg kg^{-1}), além de seis analitos em níveis de traço (< LQM). Na amostragem conduzida durante o cultivo da alfafa (agosto/2026), detectaram-se 2,4-D (0,01 mg kg^{-1}) e bifentrina (0,02 mg kg^{-1}), observando-se ainda traços de tebuconazol (< LQM) no compartimento edáfico. Os compostos foram detectados em baixas concentrações nas condições analíticas avaliadas, não sendo possível, entretanto, estabelecer a segurança toxicológica da biomassa ou o risco à alimentação animal a partir deste estudo isolado.

O declínio dos compostos iniciais e a ausência de sobreposição de analitos quantificados entre o solo e a biomassa da alfafa refletem a dinâmica de dissipação no meio edáfico, mas não constituem evidência definitiva de ausência de absorção ou translocação vegetal. Diante da inexistência de moléculas quantificadas simultaneamente em ambas as matrizes, a transferência solo–planta não pode ser estabelecida a partir do delineamento experimental empregado.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/09/2026 - **Accepted:** 26/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/ewykz482
Pages: 1-21

Da mesma forma, a detecção pontual de 2,4-D e bifentrina na matriz vegetal não pode ser atribuída a uma fonte determinante, em virtude da ausência de histórico integral de aplicações e de amostragens em áreas adjacentes. Os achados caracterizam o perfil residual da área estritamente no momento da amostragem, ressaltando a necessidade de delineamentos temporais e espaciais ampliados, com repetições independentes e abordagens ecotoxicológicas específicas, para a modelagem do risco ambiental e da segurança da biomassa forrageira em sistemas em transição.

Referências

ARAYA, German; PERFETTI-BOLAÑO, Alessandra; SANDOVAL, Marco; *et al*. Groundwater Leaching Potential of Pesticides: A Historic Review and Critical Analysis. Environmental Toxicology and Chemistry, p. 2478–2491, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/etc.5869>.

CHIA, Xing Kai; HADIBARATA, Tony; KRISTANTI, Risky Ayu; *et al*. The function of microbial enzymes in breaking down soil contaminated with pesticides: a review. Bioprocess and Biosystems Engineering, p. 597–620, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00449-024-02978-6>.

DEGUINE, Jean-Philippe; AUBERTOT, Jean-Noël; FLOR, Rica Joy; *et al*. Integrated pest management: good intentions, hard realities. A review. Agronomy for Sustainable Development, p. 2–35, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00689-w>.

DOS REIS DUARTE, Erich; SAUER, Aline Vanessa; LOPES CANCELLIER, Eduardo; *et al*. Índice Tecnológico na Cultura de Alfafa Baseado na Aplicação de Fertilizantes em Cobertura. Ensaios e Ciência C Biológicas Agrárias e da Saúde, v. 25, n. 4, p. 410–416, 2021.

DUARTE, Erich dos Reis et al. Distribuição regional e frequência relativa do complexo etiológico associado às podridões de espiga de milho no Brasil, com ênfase em *Waitea zeae*. REMUNOM, v. 13, n. 22, p. 23, 23 set. 2026. DOI: https://doi.org/10.66104/df97fv65.

EMBRAPA. Caracterização e diagnóstico dos sistemas de produção agropecuários do Paraná: Norte Pioneiro Paranaense. Londrina: Embrapa Soja, 2021. Documento 435.

FOUAD, Mohamed R.; ABDEL-RAHEEM, Shaban A. A. An overview on the fate and behavior of imidacloprid in agricultural environments. Environmental Science and

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/09/2026 - **Accepted:** 26/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/ewykz482
Pages: 1-21

Pollution Research, p. 61345–61355, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35178-6>.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). *Pesticides use and trade: 1990–2024*. Rome: FAO, 2026. Disponível em: FAOSTAT – Pesticides use and trade

GHINS, Michel. Destino da atrazina na sucessão de soja (*Glycine max* L.) e milho (*Zea mays* L.) em condições subtropicais brasileiras. Soil & Tillage Research, p. 10–32, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.29327/2194248.5.2-12>.

HE, Zeying; WANG, Lu; PENG, Yi; *et al*. Multiresidue analysis of over 200 pesticides in cereals using a QuEChERS and gas chromatography–tandem mass spectrometry-based method. Food Chemistry, p. 372–380, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.102>.

INSTITUTO DE TECNOLOGIA DO PARANÁ (TECPAR). Relatório de Ensaios Tecpar N° 2641/26: Ensaio de multirresíduos de agrotóxicos em amostra de Alfafa. Curitiba: TECPAR, 2026.

INSTITUTO DE TECNOLOGIA DO PARANÁ (TECPAR). Relatório de Ensaios Tecpar N° 2643/26: Ensaio de multirresíduos de agrotóxicos em amostra de solo. Curitiba: TECPAR, 2026

JOHNSEN, Anders R.; ALBERS, Christian N.; BADAWI, Nora; *et al*. Persistence of triazole fungicides in agricultural topsoil is driven by reduced bioaccessibility with aging. Journal of Environmental Quality, 2025. 55, e70129. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jeq2.70129>.

LEE, Ji Won; KIM, Jin-Seong; PARK, Ji Hyun; *et al*. Investigation of Residue Dissipation of Fluxapyroxad and Its Metabolites in Chinese Cabbage and Spring Scallion Using Different Application Methods. Plants, p. 2448, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants13172448>.

LI, Shasha; LIU, Xingang; CHEN, Chao; *et al*. Degradation of Fluxapyroxad in Soils and Water/Sediment Systems Under Aerobic or Anaerobic Conditions. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, p. 45–50, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00128-015-1556-y>.

NAKAGAWA, Lia Emi; ANDRÉA, Mara Mercedes de. Degradação e formação de resíduos não extraíveis ou ligados do herbicida atrazina em solo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, p. 1509–1515, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2000000800002>.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/09/2026 - **Accepted:** 26/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/ewykz482
Pages: 1-21

PERGNER, Isabell; LIPPERT, Christian. On the effects that motivate pesticide use in perspective of designing a cropping system without pesticides but with mineral fertilizer—a review. Agronomy for Sustainable Development, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00877-w>.

MÖRTL, Mária; KEREKI, Orsolya; DARVAS, Béla; *et al*. Study on Soil Mobility of Two Neonicotinoid Insecticides. Journal of Chemistry, p. 1–9, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2016/4546584>.

SARKER, Aniruddha; KIM, Do; JEONG, Won-Tae. Environmental Fate and Sustainable Management of Pesticides in Soils: A Critical Review Focusing on Sustainable Agriculture. Sustainability, p. 10741, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su162310741>.

SOUSA, P. A. de. Residual de herbicidas aplicados na cultura de soja sobre cultivos subsequentes. 2022. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022. DOI: 10.11606/D.11.2022.tde-15092022-165157.

VENANCIO, B. J. et al. Effect of pyraclostrobin on disease control and ruminal degradation of winter cereal forage harvested at different developmental stages. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 46, n. 6, p. 1807–1822, 2025. DOI: 10.5433/1679-0359.2025v46n6p1807.

XU, Tianbo; DYER, Dan G.; MCCONNELL, Laura L.; *et al*. Clothianidin in agricultural soils and uptake into corn pollen and canola nectar after multiyear seed treatment applications. Environmental Toxicology and Chemistry, p. 311–321, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/etc.3281>.

WU, Xingqiang; LI, Tiemei; FENG, Hailing; *et al*. Multi-residue analysis of 206 pesticides in grass forage by the one-step quick, easy, cheap, effective, rugged, and safe method combined with ultrahigh-performance liquid chromatography quadrupole orbitrap mass spectrometry. Journal of Separation Science, p. 2520–2528, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jssc.202200066>.

ZHANG, Lanlan; LIU, Yao; XU, Ying; *et al*. Fluxapyroxad induced toxicity of earthworms: Insights from multi-level experiments and molecular simulation studies. Journal of Hazardous Materials, p. 135911, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135911>.