

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E
VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO E A SUSTENTABILIDADE
DO USO DE AGROTÓXICOS: UMA REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA**

LUISA MATIELLO VALIM

Orientador: Prof. Dr. Marcelo da Costa
Ferreira

Trabalho apresentado à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias –
Unesp, Câmpus de Jaboticabal, para
graduação em bacharelado em
ENGENHARIA AGRONÔMICA.

JABOTICABAL – SP
2024

V172t

Valim, Luisa Matiello

Tecnologia de aplicação e a sustentabilidade do uso de agrotóxicos: uma revisão bibliográfica / Luisa Matiello Valim. -- Jaboticabal, 2024

42 f. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Marcelo da Costa Ferreira

1. Agricultura de precisão. 2. Agricultura sustentável. 3. Pesticidas. I. Título.

LUISA MATIELLO VALIM

**TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO E A SUSTENTABILIDADE DO
USO DE AGROTÓXICOS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrônômica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo da Costa Ferreira

Área de Concentração: Fitossanidade

Data da defesa: 28/11/2024

(X) Aprovado
() Reprovado

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **MARCELO DA COSTA FERREIRA**
Data: 29/11/2024 13:59:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo da Costa Ferreira
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
 **MARIA THALIA LACERDA SIQUEIRA**
Data: 29/11/2024 12:38:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Agr. Me. Maria Thalia Lacerda Siqueira
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
 **REGINA APARECIDA LEITE DE CAMARGO**
Data: 30/11/2024 17:11:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Regina Aparecida L. de Camargo
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em: ____/____/____

Documento assinado digitalmente
 **LEONARDO BIANCO DE CARVALHO**
Data: 06/12/2024 08:54:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Daniel Júnior de Andrade
Chefe do Departamento

DEDICO

À memória do meu avô, José Luis Valim, produtor rural e um dos primeiros engenheiros agrônomos do país. Ele foi uma grande inspiração para muitos, e certamente para mim. Seu legado continua vivo em nossa família, guiando-nos com seus ensinamentos e valores.

AGRADECIMENTO

Começo expressando minha sincera gratidão aos meus pais, Luis Augusto Rosa Valim e Silvia Lucia Matiello Valim, que sempre foram meu maior apoio.

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora Aparecida, que são minha força e refúgio.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo da Costa Ferreira, sou grata pelo incentivo na realização deste projeto e por compartilhar seu vasto conhecimento. Aprendi muito, tanto no desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso quanto em sua disciplina, onde suas orientações foram fundamentais para meu crescimento acadêmico.

Agradeço à PIBIC-Reitoria pela Bolsa de Iniciação Científica, e à Prof.^a Dr.^a Ana Claudia Giannini Borges, que acreditaram na importância de um projeto que deu voz aos produtores rurais.

Agradeço também à CAPES, pela Bolsa de Estudos para a França através do programa BRAFAGRI, uma experiência decisiva em minha formação pessoal e profissional.

À República Americana, meu sincero agradecimento por se tornarem meu lar e minha família durante a graduação.

Por fim, a todos os meus colegas e amigos, que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo conselhos e incentivo nos momentos mais desafiadores, minha profunda gratidão.

Muito Obrigada

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. METODOLOGIA	11
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	12
3.1 Setor agrícola.....	12
3.2 Trajetória da Aplicação de Agrotóxicos	17
3.3 Impactos ambientais e socioeconômicos dos agrotóxicos	18
3.4 Tecnologia de aplicação.....	21
3.4.1 Objetivo e métodos de aplicação de agrotóxicos.....	21
3.4.2 Fatores que influenciam na qualidade da aplicação	22
3.4.3 Equipamentos para a aplicação	25
3.5 Avanços recentes.....	27
4. DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS NA IMPLEMENTAÇÃO DE TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS PARA APLICAÇÃO DE AGROTÓXICOS.....	29
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

Tecnologia de Aplicação e a Sustentabilidade do uso de Agrotóxicos: Uma Revisão Bibliográfica

RESUMO

A tecnologia de aplicação de agrotóxicos envolve o uso de métodos e equipamentos que visam à correta deposição do produto no alvo, aumentando a produtividade, reduzindo desperdícios e minimizando os impactos ambientais e à saúde humana. O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão abrangente das tendências nos padrões de uso dessa tecnologia e seu impacto nos ecossistemas. Destacam-se os principais desafios associados ao uso inadequado de agrotóxicos, como a deriva, a contaminação do solo e da água, além dos riscos à biodiversidade e à saúde humana. Para enfrentar esses problemas, é essencial investir em inovações tecnológicas e capacitação técnica, garantindo que os produtos fitossanitários sejam aplicados de forma segura e eficaz. Observa-se que é fundamental ter familiaridade com os produtos e equipamentos utilizados, identificar corretamente os alvos a serem atingidos e lidar com os fatores que influenciam a aplicação. A tecnologia de aplicação deve tornar-se cada vez mais eficaz para aumentar o rendimento econômico e reduzir os impactos ambientais.

Palavras-chave: Produto fitossanitário; Tecnologia de aplicação; Sustentabilidade.

Application Technology and the Sustainability of Pesticide Use: A Bibliographic Review

ABSTRACT

The technology for applying pesticides involves the use of methods and equipment aimed at the precise deposition of products on the target, increasing productivity, reducing waste, and minimizing environmental and human health impacts. This study aims to present a comprehensive review of the trends in the patterns of use of this technology and its impact on ecosystems. It highlights the main challenges associated with the improper use of pesticides, such as drift, soil and water contamination, and the risks to biodiversity and human health. To address these issues, it is essential to invest in technological innovations and technical training, ensuring that phytosanitary products are applied safely and effectively. It is observed that familiarity with the products and equipment used, correctly identifying the targets, and dealing with the factors that influence application are essential. Application technology must become increasingly effective to enhance economic yield and reduce environmental impact.

Keywords: phytosanitary products; technology of application; sustainability.

1. INTRODUÇÃO

A combinação das condições do solo, do clima, do relevo, da ciência, da tecnologia, das políticas públicas e do empreendedorismo dos produtores rurais fez do Brasil um dos líderes mundiais na produção e exportação agrícola (MASSRUHÀ et al., 2020). Apesar das dificuldades com a ocorrência dos organismos patógenos que ocorrem nas lavouras, a agropecuária brasileira é uma das maiores do mundo e tem grande influência na economia nacional, visto que o setor cresceu 15,1% em 2023 e refletiu diretamente no Produto Interno Bruto do Brasil, que aumentou 2,9% em relação ao ano anterior, com R\$ 10,9 trilhões (IBGE, 2024).

Para que a produção agrícola brasileira mantenha sua produtividade e continue sendo referência mundial, é essencial o uso eficiente de insumos agrícolas, incluindo fertilizantes e agrotóxicos. Esse modelo de produção, caracterizado por monocultivos em larga escala, exige a aplicação intensiva de produtos fitossanitários, tanto para atender à crescente demanda global por alimentos quanto para combater os desafios fitossanitários inerentes a essa prática (DAVIS, 2014). Embora o uso dos mesmos tenha possibilitado a rápida expansão da produção global de alimentos, esses produtos são associados a uma série de impactos negativos, tanto para o meio ambiente quanto para a saúde humana (HEDLUND; LONGO; YORK, 2020).

Um dos principais problemas relacionados ao uso inadequado dos agrotóxicos é a redução da biodiversidade (SÁNCHE-BAYO; WYCKHUYS, 2019). Além disso, a aplicação de agrotóxicos em quantidades ou situações inadequadas atinge áreas não-alvo, contaminando o solo e a água, contribuindo para degradação ambiental (PIETRZAK et al., 2019), enquanto seus resíduos podem contaminar alimentos, representando um risco para a saúde humana (PANSERI et al., 2019).

Em 2023, o marco legal mais importante, a Lei nº 7.802, de 11 de julho de 1989, que rege o processo do registro de um produto agrotóxico, foi atualizado pela Lei nº 14.785, de 27 de dezembro de 2023. No entanto, seu regulamento ainda está sendo elaborado, permanecendo vigente o Decreto nº 4074/02, regulamenta a Lei nº 7.802. Segundo a legislação nacional vigente, agrotóxicos são:

“Produtos e agentes de processos físicos, químicos ou biológicos destinados ao uso nos setores de produção, no armazenamento e no beneficiamento de produtos agrícolas, nas pastagens ou na proteção de florestas plantadas, cuja finalidade seja alterar a composição da flora ou da fauna, a fim de preservá-las da ação danosa de seres vivos considerados nocivos.”

O consumo de agrotóxicos no Brasil acelerou no final da década de 1960, em função da isenção de impostos, mas foi somente em 1975, com a implantação do Programa Nacional de Defensivos Agrícolas (PNDA), uma política oficial de incentivo, na qual o governo federal investiu na implantação das indústrias e vinculou o crédito agrícola à compra de produtos fitossanitários, que o consumo dos agrotóxicos se estabeleceu como indispensáveis à produção de alimentos (ANDRADE, 1995).

A política de subsídios não garantiu o uso adequado destes, pois não só produtores capitalizados e capacitados tinham acesso ao produto, mas também produtores menores de forma passiva, e o pacote tecnológico passou a ser utilizado grande desrespeito às prescrições técnicas, e com práticas agrícolas que sobre expõem os trabalhadores rurais aos riscos do agrotóxico (SOARES; PORTO, 2009). O uso intensivo de agrotóxicos, aplicados de modo incorreto, tem gerado impactos ambientais significativos e visíveis no Brasil, colocando os agrotóxicos no centro da problemática do campo.

No entanto, proibir um produto ou ingrediente ativo pode ser uma simplificação exagerada que retira opções de manejo para os agricultores. A retirada de um

agrotóxico do mercado pode comprometer a produção, como foi o caso da proibição do inseticida endosulfan em 2013, que foi retirado do mercado sem a prévia aprovação de um substituto, sendo o único ingrediente ativo eficaz no controle à broca-do-café disponível no Brasil (VITAL, 2022). O autor explica em seu trabalho que, em menos de um ano após a proibição do inseticida, Minas Gerais declarou estado de emergência fitossanitária. Após a proibição, os cafeicultores se utilizam de outros inseticidas para controle deste inseto, porém são produtos registrados para outras culturas, com custos mais elevados e maior exigência de aplicações em quantidade.

O desenvolvimento de novas moléculas químicas com menor impacto ao ambiente é uma busca constante, porém, o alto custo e longo prazo envolvidos entre a descoberta e comercialização tem inviabilizado a oferta de novas opções ao mercado. Segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria de Produtos para Defesa Vegetal (Sindiveg), foram concedidos 457 registros de agrotóxicos em 2022, mas apenas 9% desses registros foram para produtos novos. O Sindicato afirma que o aumento de registros não significa o aumento do uso, mas sim o aumento de produtos disponíveis, mais modernos e com moléculas que se degradam mais rapidamente no ambiente, diminuindo as chances de que os resíduos persistam no solo e na água.

Diante desses desafios, é importante adotar estratégias que promovam o uso eficiente e racional dos produtos fitossanitários. A precisão na aplicação de agrotóxicos é essencial para otimizar o controle fitossanitário, reduzir o desperdício e minimizar os impactos adversos. Nesse sentido, a adoção de tecnologias de aplicação tem crescido substancialmente, proporcionando maior controle e eficiência no processo (VIRK; PROSTKO, 2022). As tecnologias de aplicação englobam uma série de técnicas e equipamentos destinados à deposição precisa dos produtos, sendo um fator crucial para garantir a eficácia dos tratamentos, aumentar a produtividade e

minimizar os impactos ambientais (LOWENBERG-DEBOER et al., 2020). Essas tecnologias englobam o uso de sensores, drones, aplicação por taxa variável, entre outras.

Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão abrangente sobre como o uso intencional da tecnologia de aplicação de agrotóxicos pode transformar o uso desses produtos em uma das ferramentas disponíveis na transição para uma agricultura mais sustentável, assegurando o rendimento econômico, e reduzindo o impacto na saúde pública e no meio ambiente.

2. METODOLOGIA

A metodologia deste estudo consistiu em uma revisão abrangente da literatura e na análise de dados, com o objetivo de entender como a tecnologia de aplicação de agrotóxicos está atrelada a aspectos relacionados à sustentabilidade. A pesquisa incluiu artigos científicos, dissertações e publicações técnicas selecionadas a partir de buscas realizadas nas bases de dados Scopus e Scielo priorizando estudos que abordassem diretamente o uso de tecnologias de aplicação, impactos ambientais e práticas sustentáveis associadas ao uso de agrotóxicos. As revistas mais utilizadas para fundamentar o estudo incluem: Agronomy, Crop Protection, European Journal of Agronomy, Science of The Total Environment, Weed Research, entre outras.

Além das bases acadêmicas, foram consultados relatórios e dados de organizações oficiais, como a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa), o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) e o Sindicato Nacional da Indústria de Produtos para Defesa Vegetal

(SINDIVEG).

Os dados coletados da Conab foram organizados e analisados sistematicamente no Microsoft Excel, permitindo a elaboração de tabelas e gráficos para fundamentar as análises quantitativas e qualitativas do estudo. Essa abordagem possibilitou o cruzamento de informações de diferentes fontes, facilitando a identificação de tendências, desafios e oportunidades relacionadas à aplicação de agrotóxicos de forma sustentável.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Setor agrícola

O modelo agrário adotado no Brasil é baseado em monocultivos para exportação, altamente mecanizados e dependentes de agrotóxicos, especialmente nas principais culturas, como soja, milho e cana-de-açúcar, que ocupam extensas áreas e refletem as tecnologias agrícolas amplamente utilizadas (SOARES; PORTO, 2009). Segundo dados da Conab (2024), a área destinada à soja alcançou cerca de 46 milhões de hectares, enquanto o milho ocupa aproximadamente 20 milhões de hectares, e a cana-de-açúcar, 8,63 milhões de hectares, evidenciando a relevância desses cultivos na matriz agrícola nacional.

A expansão significativa dessas culturas, no caso da soja com um aumento de área de 340% entre 1985 e 2023, e do milho com 90% de expansão, demonstra que a resposta da agricultura à crescente demanda global por commodities agrícolas foi o aumento da área cultivada, trazendo significativas preocupações quanto aos impactos ambientais, como o desmatamento da vegetação nativa e redução da biodiversidade local (Figura 1).

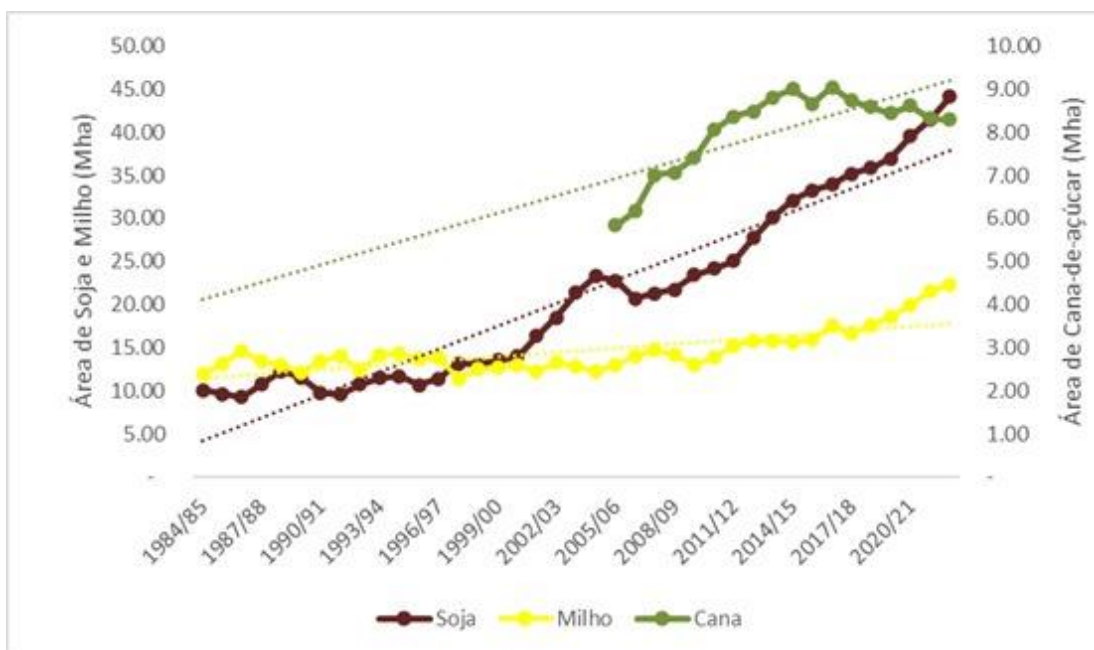


Figura 1. Área de Soja, Cana-de-açúcar e Milho no Brasil entre 1985 e 2023.

Apesar do significativo aumento de área cultivada, a produtividade das culturas não acompanhou esse crescimento de maneira uniforme, como mostram as tendências da Conab (2024): enquanto a produtividade do milho subiu 200% no mesmo período, a soja teve um aumento de apenas 95%, e a produtividade da cana-de-açúcar chegou a decrescer (Figura 2).

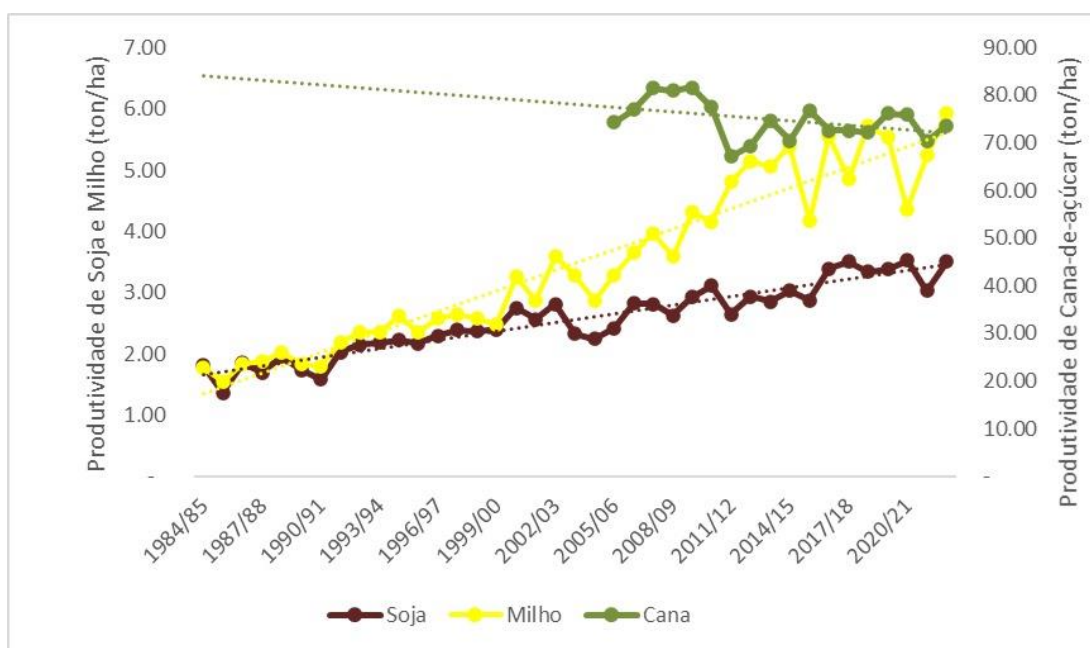


Figura 2. Produtividade de Soja, Cana-de-açúcar e Milho no Brasil entre 1985 e 2021.

A expansão da área cultivada contribuiu para consolidar o Brasil como um agente de destaque no mercado internacional de commodities. No entanto, essa estratégia de crescimento exerce uma pressão significativa sobre os biomas nacionais, tornando-se insustentável a longo prazo. Percebe-se que a adoção de novas tecnologias e boas práticas de manejo são essenciais para aumentar a produção sem a necessidade de abrir novas áreas. Dentre as tecnologias que são adotadas nos processos produtivos, os agrotóxicos desempenham um papel fundamental no controle fitossanitário, entretanto, esses produtos podem se tornar prejudiciais caso sejam aplicados incorretamente (TUDI et al., 2021).

Estes produtos são largamente utilizados, dado o fato de que monoculturas têm grandes prejuízos por organismos nocivos consecutivamente incidentes, chamados de pragas agrícolas. Porém, o uso intensivo de agrotóxicos leva ao desenvolvimento de resistência destes organismos, criando um ciclo vicioso que compromete a eficácia do manejo. A exposição contínua de substâncias químicas faz com que algumas populações de pragas se adaptem, tornando-se menos suscetíveis aos produtos utilizados, o que leva os agricultores a recorrerem a doses mais altas ou a diferentes agrotóxicos, frequentemente mais tóxicos. Essa resistência não só eleva os custos de produção, mas também aumenta os riscos ambientais.

Dentre os agrotóxicos amplamente utilizados, o glifosato se destaca como um dos ingredientes ativos mais controversos. Utilizado no controle de plantas daninhas, este herbicida está associado ao desenvolvimento de resistência em várias espécies de plantas. O glifosato começou a ser comercializado na década de 1970, quando foi lançado o herbicida Roundup pela Monsanto. Em 1990, a Monsanto lançou as sementes transgênicas “Roundup Ready”, que foram geneticamente modificadas para resistir ao glifosato. Porém, o cultivo da soja RR só foi aprovado no Brasil em 2005, e

o controle de plantas daninhas na cultura da soja passou a ser executado quase que exclusivamente com glifosato (Vargas et al., 2016). O uso repetido e continuado do glifosato gerou grande pressão de seleção das plantas daninhas, resultando na seleção de espécies tolerantes, que exigem doses maiores do produto para serem controladas. Nota-se que o glifosato é disparadamente o ingrediente ativo mais vendido no Brasil (Tabela 1).

A soja ocupa a maior área agrícola do Brasil e, de acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no Levantamento Sistemático da Produção Agrícola, o estado do Mato Grosso é o maior produtor de soja do país, seguido pelo estado de Goiás (IBGE, 2022). Não coincidentemente, o Atlas Escolar do IBGE, publicado em 2020, mostra que o Mato Grosso concentra o maior número de vendas de agrotóxicos (Figura 3), sendo possível notar a correlação das monoculturas com o uso em larga escala de agrotóxicos.

Tabela 1 – Relatório de comercialização de agrotóxicos: os dez ingredientes ativos mais vendidos no Brasil em 2022, em toneladas.

Ingrediente Ativo	Vendas (ton. IA)	Ranking
Glifosato e seu sais	266.088,12	1º
2,4-d	65.356,52	2º
Atrazina	47.663,24	3º
Mancozebe	41.747,84	4º
Clorotalonil	36.845,33	5º
Acefato	32.897,56	6º
dibrometo de diquate	23.822,62	7º
clorpirifós	17.679,34	8º
metomil	16.554,03	9º
malationa	13.682,61	10º

Fonte: IBAMA / Consolidação de dados fornecidos pelas empresas registrantes de produtos técnicos, agrotóxicos e afins, conforme art. 41 do Decreto nº 4.074/2002. Os IAs divulgados consideram apenas os Produtos Formulados.



Figura 3. Mapa de vendas de agrotóxicos químicos e bioquímicos por estado.
Fonte: Atlas IBGE, 2020.

Além disso, o Brasil ainda se encontra dependente de ingredientes ativos majoritariamente importados (Tabela 2), tornando as cadeias de produção de soja, milho e cana, culturas que consomem um volume considerável de agrotóxicos, vulneráveis às variações de preços internacionais.

Tabela 2 – Produção, Importação, Exportação e Vendas de Ingredientes Ativos no Brasil em 2022, em toneladas de ingrediente ativo.

Atividade	Produtos Técnicos (PT)	Produtos Formulados (PF)
Produção Nacional	124.164,10	664.434,76
Importação	405.266,80	283.307,36
Exportação	5.588,01	5.838,79
Vendas Internas	364.975,58	800.652,17

Fonte: IBAMA / Consolidação de dados fornecidos pelas empresas registrantes de produtos técnicos, agrotóxicos e afins, conforme art. 41 do Decreto nº 4.074/2002.

Em suma, os dados abordados refletem a necessidade de utilizar a tecnologia

de aplicação para reduzir o uso inadequado de agrotóxicos e adotar práticas de manejo integrado que busquem reduzir a pressão de seleção sobre as pragas e promover um modelo de agricultura mais sustentável, diminuindo a dependência atual de agrotóxicos. O modelo de produção agrícola implantado no Brasil, caracterizado pela utilização de grandes volumes de agrotóxico, não é a única alternativa viável para a agricultura do país. No entanto, enquanto práticas de manejo integrado não se consolidam amplamente no território, é fundamental utilizar a tecnologia de aplicação disponível para minimizar os riscos associados ao uso dos produtos fitossanitários.

3.2 Trajetória da Aplicação de Agrotóxicos

Pulverizadores existem há mais de cem anos. No início do século XX, o pulverizador de ar comprimido trouxe uma melhoria significativa, seguido pelo desenvolvimento de bombas de pó tipo fole e os primeiros dispositivos mecânicos de bomba de ar, que aprimoraram a velocidade e a uniformidade da aplicação, além de garantir melhor cobertura das plantas (BODE; BRETTHAUER, 2007).

A partir da década de 1940, com o desenvolvimento de herbicidas como o 2,4-D, começaram a ser utilizados pulverizadores de baixa pressão, adaptados para o uso em culturas de fileira, com volumes de aplicação variando entre 200 a 500 l/ha (GILES; AKESSON; YATES, 2008). Inicialmente, o design desses pulverizadores era limitado e pouco considerava os componentes, como bombas e reguladores de pressão, mas, com o tempo, houve uma evolução significativa, especialmente a partir da década de 1970, quando novas tecnologias começaram a surgir, como os atomizadores rotativos e os pulverizadores eletrostáticos. Essa evolução permitiu a aplicação de volumes de água muito menores (50 l/ha), contribuindo para uma maior eficiência no uso de agrotóxicos (GILES; AKESSON; YATES, 2008). Além disso, o uso de volumes

menores de calda exige um controle mais rigoroso da pressão e da uniformidade da aplicação, o que pode ser alcançado por tecnologias mais avançadas, resultando em menor impacto ambiental e maior eficácia no controle das pragas.

Posteriormente, com o desenvolvimento do glifosato no final da década de 1970, dispositivos como bicos direcionados, bicos protegidos e pulverizadores de recirculação foram introduzidos na década de 1980 (AMARANTE JUNIOR et al., 2002). Atualmente, com as práticas da agricultura 4.0, a tecnologia de aplicação usa de drones para identificar doenças e pragas e, imediatamente fazer a aplicação dos produtos necessários (CAVALCANTE et al., 2022). A implementação de técnicas como essa permite que os agricultores obtenham maior eficiência, mitigando os problemas da cultura de modo rápido e com mínimo impacto ambiental (SUBRAMANIAN et al., 2021).

Essa evolução demonstra a trajetória do uso de máquinas para aplicação de agrotóxicos na agricultura, marcada por inovações contínuas e ajustes para aprimorar a precisão, reduzir volumes e aumentar a segurança no uso de agrotóxicos.

3.3 Impactos ambientais e socioeconômicos dos agrotóxicos

Durante a aplicação, os agrotóxicos podem se dispersar no ambiente por meio processos como transferência, adsorção, lixiviação, volatilização, deriva e escoamento (ROBINSON; MANSINGH; DASGUPTA, 1999). A aplicação indesejada em plantas não-alvo e o movimento desses produtos no meio ambiente podem afetar os recursos hídricos (TUDI et al., 2021), comprometendo a qualidade da água, os ecossistemas aquáticos e à saúde humana, além de prejudicar a vida de pequenos animais que vivem no solo (CHIU; HUNT; RESH, 2017). Adicionalmente, a exposição prolongada aos agrotóxicos e a ingestão de alimentos cultivados em solos ou água contaminados podem impactar a saúde humana (KALYABINA et al., 2021). Os efeitos

de longo prazo incluem doenças crônicas, como asma, câncer, dermatites, desordem hormonal, entre outras (KIM; KABIR; JAHAN, 2017).

Entretanto, devido a necessidade dos cultivos e para garantir a produtividade necessária e atender à crescente demanda global, a aplicação de agrotóxicos se tornou necessária. O uso desse insumo é responsável por garantir, atualmente, cerca de um terço da produtividade agrícola mundial (LUCAS; NAVARRO; NAVARRO, 2024). Sem o uso de agrotóxicos a produção de frutas, vegetais e cereais seria reduzida em 78%, 54% e 32%, respectivamente (TUDI et al., 2021). Segundo dados da FAO (2023), o consumo global de agrotóxicos em 2021 foi de 3,54 milhões de toneladas, sendo o Brasil o maior consumidor desses insumos (Figura 4).

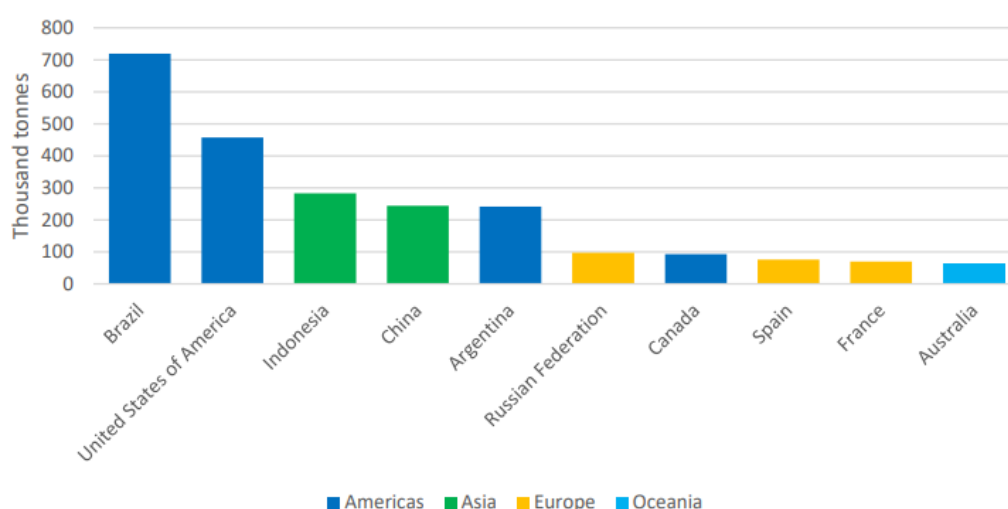


Figura 4. Ranking de países que mais usaram agrotóxicos em 2021. Fonte: FAO, 2023.

Diante deste cenário, diversas leis e decretos foram sendo criadas ou alteradas ao longo das décadas a fim de regulamentar o uso e produção de agrotóxicos, entre outras atividades relacionadas a estes produtos. A Lei nº 14.785, de 27 de dezembro de 2023, visa garantir a segurança no uso dos agrotóxicos, desde que utilizados conforme as recomendações dos fabricantes e as boas práticas de utilização a campo, acompanhadas e orientadas por profissionais das ciências agrárias. As leis envolvidas

para liberação destes produtos se fazem necessárias para estabelecer critérios de segurança e efetividade. No Brasil o responsável técnico pela recomendação dos produtos e da forma de aplicação dos produtos é o Engenheiro Agrônomo, que necessita realizar o preenchimento do receituário agrônomo, registrando a atividade. Entretanto, embora essa atividade seja regulada pelo Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (CREA), não existe uma exigência legal de atualização técnica nem de quem recomenda, nem de quem usa, o que implica em fragilidades do sistema.

Atualmente, a segurança dos novos produtos comercializados é, em geral, superior à dos produtos comercializados em décadas anteriores. A métrica de dose letal média (DL50), expressa em miligramas por quilograma de peso corporal, ilustra essa melhoria: enquanto em 1960 a DL50 média dos principais produtos vendidos no Brasil era de 939 mg/kg, os produtos modernos apresentam uma DL50 média de 2.448 mg/kg (VITAL, 2022), indicando menor toxicidade relativa. Contudo, essa métrica não deve ser o único critério de avaliação, pois a forma de manejo e aplicação dos agrotóxicos continua a ser um fator crítico que influencia a exposição dos trabalhadores.

Mesmo sendo mais seguros, os produtos modernos passam por rigorosos processos de reavaliação. Entre 2006 e 2022, vinte ingredientes ativos de agrotóxicos passaram por reavaliações pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa), dos quais seis mantiveram restrições de registro, treze foram proibidos e apenas um foi mantido sem alterações. Atualmente, quatro ingredientes ativos – epoxiconazol, tiofanato metílico, procimidona e clorpirifós – estão em processo de reavaliação (ANVISA, 2022). Esse processo busca otimizar a segurança dos produtos em uso, estabelecendo restrições, modificações nas recomendações de aplicação ou até a

retirada de produtos que apresentem riscos significativos.

Assim, percebe-se que a combinação de regulamentação e capacitação é essencial para enfrentar os desafios associados ao uso de agrotóxicos, minimizando seus impactos ambientais e promovendo a saúde pública. Essa perspectiva visa consolidar uma agricultura sustentável que equilibre produtividade e responsabilidade ambiental.

3.4 Tecnologia de aplicação

3.4.1 Objetivo e métodos de aplicação de agrotóxicos

A tecnologia de aplicação dos produtos fitossanitários é uma das partes mais cruciais do processo de produção agrícola, porque é responsável pela deposição adequada do produto no alvo, com segurança, quando e se necessário, preservando o meio ambiente e protegendo a saúde dos trabalhadores. A aplicação de produtos fitossanitários pode ocorrer de três formas principais: via sólida, via líquida e via gasosa, sendo a aplicação líquida a mais amplamente utilizada (DI OLIVEIRA; FERREIRA; FENÓLIO; 2008). Segundo esses autores, a aplicação líquida pode ser realizada através de contato direto do equipamento com o alvo, injeção direta no alvo, gotejamento, nebulização ou pulverização, sendo esta última a técnica mais comum.

De acordo com Chaim (2009), o método da pulverização, que é a diluição do produto químico em água, utiliza os seguintes sistemas: hidráulico, pneumático, centrífugo, eletrostático e térmico. Os pulverizadores hidráulicos operam com o líquido pressurizado, que é pulverizado ao ar pela descompressão, podendo ser manual, tratorizado ou aéreo. Pulverizadores pneumáticos injetam uma pequena quantidade de líquido em uma corrente de ar gerada por um ventilador. Estes são comumente usados em culturas arbustivas, uma vez que o fluxo de ar aumenta a penetração nas folhas internas. Pulverizadores centrífugos fracionam o líquido em gotas através de

um disco rotativo, sendo utilizados em culturas anuais e perenes. Já os pulverizadores eletrostáticos utilizam uma descarga elétrica de alta voltagem para romper o líquido em gotas carregadas positivamente, que são atraídas pelas plantas ou objetos mais próximos. Por fim, os pulverizadores térmicos utilizam gás quente para gerar partículas, sendo comumente usados em ambientes fechados e florestas.

Atualmente, o método predominante de aplicação tem como objetivo estabelecer uma barreira tóxica na superfície de interesse, usualmente pela técnica de pulverização. Esta barreira tóxica tem por objetivo impedir a ocorrência de pragas e patógenos, na qual a eficiência de controle ainda é obtida graças ao efeito tóxico das moléculas, que compensa a pobre deposição obtida com as pulverizações, pois em alguns casos mais de 50% dos produtos aplicados não chegam no alvo intencionado (AZEVEDO, 2006).

A perda de eficiência observada em algumas práticas agrícolas pode ser atribuída, em parte, ao uso de abordagens simplificadas, como a aplicação de doses fixas e a falta de monitoramento dos cultivos. Essas estratégias não levam em consideração o momento ideal para a aplicação, o que pode resultar em intervenções inadequadas, como aplicações excessivas ou tardias. Quando a aplicação é feita tardiamente, os danos causados por pragas ou doenças podem já ser irreversíveis, gerando desperdício do produto fitossanitário ou até a necessidade de reaplicações em períodos curtos, possivelmente com doses mais altas.

3.4.2 Fatores que influenciam na qualidade da aplicação

Para assegurar a qualidade da aplicação de agrotóxicos, diversos fatores devem ser considerados, como a pressão de trabalho, as características físico-químicas da calda, a composição dos agrotóxicos e adjuvantes, a qualidade da água,

o tipo de pontas de pulverização, a calibração do equipamento, a estrutura vegetal, a densidade do plantio, além do estágio e nível de infestação das pragas e doenças que devem ser levados em consideração (NACKLEY et al., 2021; RINCÓN et al., 2020). Também é essencial considerar que as condições meteorológicas, como velocidade e direção do vento, temperatura e umidade, influenciam diretamente na deriva e na evaporação do produto (BAETENS et al., 2007).

Em condições ideais, a umidade relativa deve estar acima de 50% e a temperatura abaixo de 30 °C, para reduzir a evaporação do produto. A velocidade do vento é outro fator crítico: entre 3 e 10 km/h é considerada ideal, pois velocidades superiores favorecem a deriva (deslocamento horizontal das gotas), enquanto velocidades inferiores, ou ausência de vento, podem dificultar a deposição em razão de correntes ascendentes de ar aquecido, que reduzem a efetividade das gotas menores (ANTUNIASSI, 2009).

A deriva ocorre quando o as gotas do produto aplicado não atingem o alvo previsto. Quando se perde a velocidade do ar, as gotas liberadas pelas pontas tornam-se mais vulneráveis à ação do vento (HONG et al., 2021). Esse efeito é intensificado pela altura dos bicos: quanto maior a altura, mais expostas as gotas estão a ventos forte e, portanto, têm mais chance de evaporar antes de atingirem alvo (BAETENS et al., 2007).

Além disso, as características do dossel da cultura, como a densidade de plantio e superfície foliar, também afetam a qualidade da aplicação, influenciando diretamente na quantidade de produto que chega ao alvo (DORR et al., 2014). Gotas com diâmetros menores têm alta suscetibilidade à deriva, porém apresentam maior capacidade de penetração no interior do dossel das culturas. Por outro lado, diâmetros maiores geram maior resistência à deriva e têm uma trajetória vertical, depositando-

se em alvos horizontais (MATTHEWS, 2000). O autor também destaca a importância de ajustar o diâmetro das gotas conforme a temperatura e umidade relativa do ar (Tabela 3).

Tabela 3. Limites de temperatura e umidade relativa do ar para diferentes tamanhos de gotas.

Fatores	Classes de gotas de acordo com as condições climáticas		
	Muito finas ou finas	Finas ou médias	Médias ou grossas
Temperatura	Abaixo de 25° C	25 a 28° C	Acima de 28° C
Umidade relativa do ar	Acima de 70%	60 e 70%	Abaixo de 60%

Fonte: Matthews, 2000.

O tamanho das gotas em pulverizações agrícolas também pode ser significativamente alterado pela utilização de adjuvantes. Os adjuvantes são adicionados na mistura para melhorar a dinâmica da gota sobre o alvo e afetam o tamanho das gotas (LI et al., 2023). A água, que é utilizada no preparo das caldas fitossanitárias, apresenta alta tensão superficial e possui pouca superfície de contato. A adição de adjuvantes na mistura tanque contribui para minimizar as perdas por deriva e evaporação, pois fazem com que a gota se espalhe mais facilmente na superfície, favorecendo uma deposição mais homogênea do produto sobre o alvo (MENG et al., 2018).

A forma e a dispersão uniforme dos agrotóxicos dependem da pressão aplicada, do tamanho da barra de pulverização e da geometria dos orifícios do bico de pulverização. De acordo com Carreira e da Silva (2022), o sistema Modulação por Largura de Pulso (PWM) também influencia na taxa de aplicação, na deriva e, conseqüentemente, na uniformidade da cobertura. Para uma cobertura uniforme, é fundamental que as gotas geradas pela ponta de pulverização tenham um diâmetro específico, evitando perdas por deriva ou escorrimento, o que depende principalmente

do dispositivo de pulverização e dos parâmetros operacionais (PRIVITERA et al., 2023)

3.4.3 Equipamentos para a aplicação

Como mencionando anteriormente, existem diferentes métodos de aplicação de agrotóxicos, porém a aplicação por via líquida é a mais utilizada, podendo ser realizada por sistemas aéreos, costais, tratorizados e autopropelidos (CHAIM, 2009). Um sistema de pulverização é definido por uma sequência de componentes que transportam o produto de um reservatório até as pontas de pulverização, gerando gotas para atingir o alvo. Carreira, Liu e Leite (2022), descrevem o sistema de pulverização da seguinte maneira:

“Dois componentes importantes desse sistema são os agitadores e filtros. Os agitadores são imprescindíveis para muitas misturas, pois homogeneízam a calda evitando a decantação e distribuição irregular do produto na área. Podem ser divididos em mecânicos ou hidráulicos, em que o primeiro é geralmente constituído por uma hélice em rotação e o segundo faz uso do próprio sistema de retorno da bomba. Esse último utiliza o princípio de Venturi, que impulsiona o fluído contra a mistura realizando sua agitação. Já os filtros agem para impedir o entupimento das pontas de pulverização ao barrar impurezas presentes na calda. Eles estão presentes em quase todo o circuito hidráulico e possuem malhas de diferentes tamanhos. A ponta de pulverização de energia hidráulica é a última etapa desse circuito.”

Os bicos de pulverização são os principais componentes-chave, pois determinam a vazão, o perfil de distribuição e o tamanho-velocidade das gotas, fatores que influenciam diretamente na qualidade e segurança da aplicação (MATUO, 1990). Genericamente denomina-se bico ao conjunto de peças localizado no final do circuito hidráulico do pulverizador, através do qual a calda é fragmentada em gotas. Esse conjunto é composto pelo corpo (ou conector), o filtro, a ponta, a capa e, para capas e corpos de engate rápido, pelo anel de vedação.

O desgaste ou dano físico nos bicos de pulverização podem comprometer a uniformidade da aplicação da pulverização, afetando o tamanho da gota, a deposição do produto e, conseqüentemente, a eficácia do tratamento fitossanitário (CERRUTO et al., 2021; CHEN et al., 2020; KRAWCZUK et al., 2021). O uso de pontas de pulverização desgastados podem elevar o custo aos agricultores, uma vez que a aplicação inadequada dos produtos fitossanitários compromete o controle de pragas e doenças. Nesse contexto, o custo de substituir uma ponta desgastada tende a ser menor do que o custo associado à pulverização incorreta. Diversos fatores influenciam o desgaste das pontas de pulverização, incluindo o tipo de jato de calda (defletor, plano convencional, cônico), o material de fabricação (polímero, metal, cerâmica) e o formato do orifício. Os fatores operacionais, como a pressão de trabalho, o tempo de uso, a qualidade da água, o tipo de formulação e a concentração da calda, também impactam o desgaste.

Ao sair do bico, o líquido é transformado em ligamentos instáveis por forças aerodinâmicas que posteriormente se convertem em gotas (ASGARIAN et al., 2020). Os bicos hidráulicos, que utilizam a pressão como fonte energia para fragmentar o líquido, são amplamente utilizados para a aplicação de produtos fitossanitários. A energia necessária para a pulverização é fornecida por uma bomba hidráulica ou tanques pressurizados (MATUO, 1990). Esses bicos são divididos em grupos com base nas características do jato emitido (Figura 5), incluindo bicos de jato plano, conhecidos como leque, bicos de jato cônico-cheio e bicos de jato cônico-vazio (CONTIERO et al., 2018).

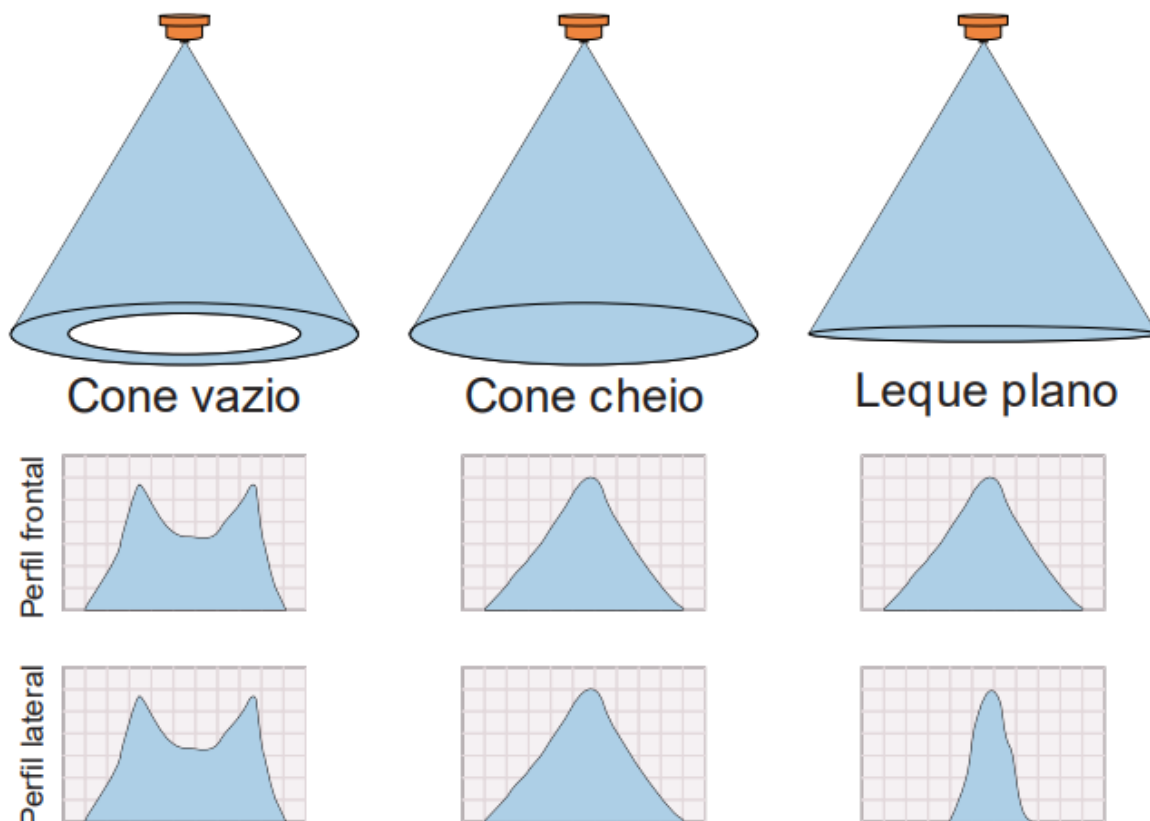


Figura 5. Exemplo de geometrias de jatos de cone vazio, cheio e leque plano com seus respectivos perfis frontal e lateral. Fonte: Carreira; Liu; Leite, 2022.

Além dos fatores climáticos e tecnológicos, a qualificação dos recursos humanos envolvidos na aplicação é determinante para uma operação segura e eficaz. O conhecimento sobre os equipamentos e produtos, clareza sobre os objetivos da aplicação e compreensão dos fatores que influenciam a eficiência são elementos fundamentais para uma gestão responsável e segura do uso de produtos químicos.

3.5 Avanços recentes

As plantas daninhas representam uma das maiores ameaças à produtividade agrícola, resultando em perdas significativas de rendimento em culturas-chave, como trigo, soja, arroz e algodão (OERKE, 2006). Historicamente, o controle tem sido amplamente baseado no uso de herbicidas, devido à sua eficácia e flexibilidade (SUN et al., 2018). No entanto, o surgimento de populações resistentes a herbicidas e a

necessidade de conduzir aplicações com menor impacto ao meio ambiente e à saúde humana destacam a necessidade de inovações tecnológicas.

Nos últimos anos, avanços significativos em sensoriamento, visão computacional e automação, abriram novas possibilidades para o manejo específico de plantas daninhas (COLEMAN et al., 2019). Essas tecnologias permitem detectar e mensurar a severidade das doenças e pragas, possibilitando o manejo preciso (KHAKIMOV et al., 2022). Além disso, esses avanços favorecem a integração de métodos de aplicação tradicionais e alternativos, possibilitando um uso mais sustentável de recursos (FERNÁNDEZ-QUINTANILLA et al., 2018).

Entre as tecnologias aplicadas à pulverização de agrotóxicos para garantir maior sustentabilidade dos ecossistemas, destacam-se a prevenção do desgaste dos bicos, sistemas de aplicação em taxa variável, sistemas de injeção direta e mistura em linha, controle da deriva de gotas e mecanismo de perfilagem (BELYAKOV; NIKOLINA, 2021).

Os bicos desempenham um papel essencial na pulverização de agrotóxicos. No entanto, o desgaste causado por partículas sólidas nos agrotóxicos pode alterar o desempenho de pulverização, sendo importante estudar a durabilidade dos bicos para prever seu tempo de vida útil (KIM et al., 2021). A tecnologia de taxa variável também se destaca, ajustando a quantidade de agrotóxico pulverizado com base em fatores como velocidade de deslocamento e volume necessário para a cultura (ZHENG; XU, 2023). Essa tecnologia, em conjunto com Sistemas de Posicionamento Global (GPS) e sensores, possibilita a aplicação de agrotóxicos no local necessário com alta precisão (PERES et al., 2020). Além disso, sistemas de controle como Modulação por Largura de Pulso (PWM), vem sendo testados com o auxílio inteligência artificial, permitindo o controle da taxa de aplicação em tempo real (SEOL; KIM; SON, 2022).

Os sistemas de injeção direta e mistura em linha surgem como alternativas mais eficientes à pré-mistura convencional de produtos fitossanitários e água (ZHENG; XU, 2023). Esses sistemas realizam a mistura dos componentes durante o processo de pulverização, assegurando maior precisão na dosagem e uniformidade na aplicação, resultando em operações mais seguras e eficientes (PETEINATOS et al., 2019). Para mitigar o problema da deriva, a utilização de bicos que minimizam a deriva reduz a dispersão das gotas, melhorando a eficiência e minimizando o impacto ambiental (POST, 2019).

Além das inovações tecnológicas, há uma multiplicidade de fatores externos que influenciam a aplicação correta de agrotóxicos, como supervisão governamental, apoio dos fornecedores e serviços de extensão rural. Para melhorar as práticas dos agricultores e, assim, minimizar a exposição dos resíduos de agrotóxicos nos ecossistemas, é interessante estudar uma abordagem gradual de intervenção direcionada aos diferentes atores envolvidos (PAN; REN; LUNING, 2021).

Esse conjunto de inovações tecnológicas e intervenções externas contribui para uma aplicação de agrotóxicos mais eficiente e sustentável, reduzindo os impactos ambientais e promovendo uma maior segurança no seu uso.

4. DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS NA IMPLEMENTAÇÃO DE TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS PARA APLICAÇÃO DE AGROTÓXICOS

Com o avanço das mudanças climáticas novos desafios surgem para a produção agrícola. O aumento das temperaturas globais, intensificação de eventos climáticos extremos e alterações nos padrões de precipitação tendem a criar condições mais propícias para o desenvolvimento de pragas e doenças, exigindo maior uso de produtos fitossanitários (ZHANG et al., 2018). Nesse contexto, a

aplicação eficiente de agrotóxicos torna-se ainda mais crucial, uma vez que o uso pouco criterioso pode amplificar os impactos ambientais e agravar os problemas de contaminação de recursos naturais (LARRAMENDY; SOLONESKI, 2019).

Com a intensificação do uso de agrotóxicos em resposta à maior pressão de pragas e doenças, as tecnologias de aplicação enfrentam o desafio de garantir maior precisão, minimizando o desperdício e a poluição do meio ambiente. O manejo inadequado pode resultar em contaminação do solo, água e aumento da resistência das pragas (TUDI et al., 2021). Além disso, o aumento das chuvas e a maior variabilidade climática podem acelerar a lixiviação dos agrotóxicos, potencializando a contaminação de lençóis freáticos e reduzindo a eficácia dos tratamentos, exigindo que os produtos sejam reaplicados, aumentando os custos e os riscos associados aos agrotóxicos.

Com relação ao desenvolvimento de tecnologias adaptadas à realidade da agricultura moderna, o desafio está no fato de que eventos climáticos propiciam a evaporação mais rápida, e a alteração nos ventos podem comprometer a aplicação uniforme dos produtos, exigindo ajustes contínuos nos equipamentos e métodos (NACKLEY et al., 2021).

Diante desse contexto, as perspectivas para o futuro da tecnologia de aplicação de agrotóxicos apontam para a inovação e maior adoção de ferramentas de agricultura de precisão. Essas novas tecnologias podem transformar a forma de utilização de agrotóxicos, permitindo a identificação precisa de áreas afetadas por pragas e a aplicação localizada e precisa de produtos, reduzindo o uso excessivo e inadequado (LOWENBERG-DEBOER et al., 2020).

Além disso, identificar padrões no uso de agrotóxicos para orientar decisões políticas melhoram sua eficiência e sustentabilidade. Algumas recomendações podem

ser incluídas para os próximos anos, entre elas: i) investimentos em pesquisa na área de tecnologia de aplicação, principalmente nos países em desenvolvimento; ii) estabelecimento de programas de monitoramento pelas agências reguladoras e da determinação de agrotóxicos em produtos colhidos (DAUFENBACK et al., 2022).

Finalmente, os agricultores precisam de mais recursos e capacitação para minimizar a exposição aos agrotóxicos. É necessária a implementação de programas de monitoramento de resíduos e a educação dos agricultores no manejo de agrotóxicos nas lavouras, em geral. O uso da tecnologia de aplicação é uma forma mais eficiente e segura de utilizar os agrotóxicos, garantindo uma alta produtividade das culturas, mantendo a segurança alimentar da crescente população mundial e reduzindo os impactos ambientais e à saúde humana.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo destacou os desafios e avanços relacionados à tecnologia de aplicação de agrotóxicos, evidenciando sua importância para a produtividade agrícola e a sustentabilidade ambiental. Contudo, diversas dificuldades persistem, como a falta de capacitação técnica entre agricultores, que resulta em aplicações inadequadas e desperdício de insumos, além dos impactos ambientais significativos, como deriva, lixiviação e contaminação dos recursos hídricos. A resistência de pragas e a dependência de insumos importados também foram identificadas como barreiras críticas para a implementação de práticas agrícolas mais eficazes e seguras.

Diante desses desafios, existem inúmeras possibilidades de pesquisas futuras. O desenvolvimento de novas tecnologias de aplicação, como sensores avançados, drones autônomos e sistemas de pulverização por taxa variável, pode contribuir para maior precisão e menor impacto ambiental. Além disso, é essencial investir em capacitação contínua de agricultores e profissionais do setor, promovendo a disseminação de boas práticas no uso de agrotóxicos. A integração de tecnologias de aplicação com práticas de manejo integrado de pragas também apresenta grande potencial para aumentar a sustentabilidade da agricultura brasileira.

Por fim, as políticas públicas desempenham um papel fundamental nesse cenário, sendo necessário o fortalecimento de programas de incentivo à adoção de tecnologias de baixo impacto ambiental e o aperfeiçoamento da legislação vigente. A combinação de avanços tecnológicos, capacitação técnica e estratégias políticas adequadas pode garantir uma agricultura mais sustentável, assegurando a segurança alimentar, a proteção ambiental e a saúde pública a longo prazo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTIERI, M. A. (2009). Agroecology, Small Farms, and Food Sovereignty. *Monthly Review*, 61(3), 102-113.

ANDRADE, M. J. Economia do meio ambiente e regulação: análise da legislação brasileira sobre agrotóxicos. Rio de Janeiro: FGV/EPGE, 1995.

ANVISA, Agência Nacional de Vigilância Sanitária - Reavaliação de agrotóxicos. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/ptbr/acessoainformacao/perguntasfrequentes/agrotoxicos/reavaliacao-de-agrotoxicos-2/reavaliacao-de-agrotoxicos>. Acesso em: 08 abr. 2024.

ANTUNIASSI, Ulisses Rocha. Pulverização com desempenho e menor impacto ambiental, *Visão agrícola*, v. 9, p. 89-92, 2009

AMARANTE JUNIOR, O. P. DE et al. Glifosato: propriedades, toxicidade, usos e legislação. **Química Nova**, v. 25, p. 589–593, jul. 2002.

ASGARIAN, A. et al. Experiments and modeling of the breakup mechanisms of an attenuating liquid sheet. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 130, p. 103347, 1 set. 2020.

ATLAS Geográfico Escolar, IBGE, 2020. Disponível em: <https://atlasescolar.ibge.gov.br/brasil/espaco-economico/agropecuaria/21837-venda-de-agrotoxico-2020>. Acesso em: 20 agosto 2024

AZEVEDO, F.; FREIRE, F. Tecnologia de Aplicação de Defensivos Agrícolas. Fortaleza, CE. Embrapa, 2006.

BAETENS, K. et al. Predicting drift from field spraying by means of a 3D computational fluid dynamics model. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 56, n. 2, p. 161–173, 1 abr. 2007.

BELYAKOV, N. V.; NIKOLINA, N. V. Plant protection technologies: from advanced to innovative. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1942, n. 1, p. 012072, jun. 2021.

BODE, L. E.; BRETTHAUER, S. M. Agricultural Chemical Application Technology: A Remarkable Past and an Amazing Future. 2007.

CARREIRA, V.; DA SILVA, R. Rate errors in sprayer turning and circular movements: PWM valve as compensation system and why spray boom size matters. **Crop Protection**, v. 151, p. 105835, 1 jan. 2022.

CARREIRA, V.; LIU, R.; LEITE, S. **Fundamentos em biologia e manejo de plantas daninhas**. [s.l.] EDUFMA, 2022.

CAVALCANTE, W. S. DA S. et al. Tecnologias e inovações no uso de drones na

agricultura / Technologies and innovations in the use of drones in agriculture. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 1, p. 7108–7117, 26 jan. 2022.

CERRUTO, E. et al. Modelling Spray Pressure Effects on Droplet Size Distribution from Agricultural Nozzles. **Applied Sciences**, v. 11, n. 19, p. 9283, jan. 2021.

CHAIM, A. **Manual de tecnologia de aplicação de agrotóxicos**. Brasília, 2009.

CHEN, P. et al. Droplet Deposition and Control of Planthoppers of Different Nozzles in Two-Stage Rice with a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle. **Agronomy**, v. 10, n. 2, p. 303, fev. 2020.

CHIU, M.; HUNT, L.; RESH, V. Climate-change influences on the response of macroinvertebrate communities to pesticide contamination in the Sacramento River, California watershed. **Science of The Total Environment**, v. 581–582, p. 741–749, 1 mar. 2017.

COLEMAN, G. R. Y. et al. Using energy requirements to compare the suitability of alternative methods for broadcast and site-specific weed control. **Weed Technology**, v. 33, n. 4, p. 633–650, ago. 2019.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos?limitstart=0>. Acesso em: 09 set. 2024

CUNHA, J. P. A. R. Simulação da deriva de agrotóxicos em diferentes condições de pulverização. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 32, n. 5, p. 1616-1621, 2008.

DAUFENBACK, V. et al. Agrotóxicos, desfechos em saúde e agroecologia no Brasil: uma revisão de escopo. **Saúde em Debate**, v. 46, p. 482–500, 4 jul. 2022.

DAVIS, F. R. **Banned: A History of Pesticides and the Science of Toxicology**. [s.l.] Yale University Press, 2014.

DORR, G. et al. Towards a model of spray–canopy interactions: Interception, shatter, bounce and retention of droplets on horizontal leaves. **Ecological Modelling**, v. 290, p. 94–101, 24 out. 2014.

FAO. Pesticides use and trade, 1990–2021. 2023.

FERNÁNDEZ-QUINTANILLA, C. et al. Is the current state of the art of weed monitoring suitable for site-specific weed management in arable crops? **Weed Research**, v. 58, n. 4, p. 259–272, 2018.

GILES, D. K.; AKESSON, N. B.; YATES, W. E. Pesticide Application Technology: Research and Development and the Growth of the Industry. 2008.

HEDLUND, J.; LONGO, S. B.; YORK, R. Agriculture, Pesticide Use, and Economic Development: A Global Examination (1990–2014). **Rural Sociology**, v. 85, n. 2, p. 519–544, 2020.

HONG, S. et al. Fluid Dynamic Approaches for Prediction of Spray Drift from

Ground Pesticide Applications: A Review. **Agronomy**, v. 11, n. 6, p. 1182, jun. 2021.

HUANG, B. et al. Advances in Targeted Pesticides with Environmentally Responsive Controlled Release by Nanotechnology. **Nanomaterials**, v. 8, n. 2, p. 102, fev. 2018.

IBAMA, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Boletim 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos#:~:text=Boletim%202022&text=Para%20os%20produtos%20classificados%20como,vendas%20foram%20de%20720.870%20toneladas>. Acesso em: 09/09/2024

IBGE. Indicadores IBGE: Levantamento Sistemático da produção Agrícola, Estatística da Produção agrícola. p.15. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022.

IBGE. Indicadores IBGE: Estatística da produção agropecuária 2024. Instituto brasileiro de geografia e estatística.

KALYABINA, V. et al. Pesticides: formulants, distribution pathways and effects on human health – a review. **Toxicology Reports**, v. 8, p. 1179–1192, 1 jan. 2021.

KHAKIMOV, A. et al. Traditional and current-prospective methods of agricultural plant diseases detection: A review. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 951, n. 1, p. 012002, jan. 2022.

KIM, K.; KABIR, E.; JAHAN, S. Exposure to pesticides and the associated human health effects. **Science of The Total Environment**, v. 575, p. 525–535, 1 jan. 2017.

KIM, S. K. et al. Nozzle with a Feedback Channel for Agricultural Drones. **Applied Sciences**, v. 11, n. 5, p. 2138, jan. 2021.

KRAWCZUK, A. et al. Technical Parameters of Spraying with a Biostimulant as a Determinant of Biometrical Properties and Yield of Soybean Seeds. **Agricultural Engineering**, v. 25, n. 1, p. 171–179, 21 dez. 2021.

LARRAMENDY, M. L.; SOLONESKI, S. **Pesticides: Use and Misuse and Their Impact in the Environment**. [s.l.] BoD – Books on Demand, 2019.

LI, S. et al. Anti-Drift Technology Progress of Plant Protection Applied to Orchards: A Review. **Agronomy**, v. 13, n. 11, p. 2679, nov. 2023.

LOWENBERG-DEBOER, J. et al. Economics of robots and automation in field crop production. **Precision Agriculture**, v. 21, n. 2, p. 278–299, 1 abr. 2020.

LUCAS, G.; NAVARRO, G.; NAVARRO, S. Adapting agriculture and pesticide use in Mediterranean regions under climate change scenarios: A comprehensive review. **European Journal of Agronomy**, v. 161, p. 127337, 1 nov. 2024.

MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; OLIVEIRA, S. R. de M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; BOLFE, E. L. (Ed.). Agricultura digital: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas. Brasília, DF: Embrapa, 2020. cap. 16, p. 380-406.

MATTHEWS, G. A. **Pesticide Application Methods**. [s.l.] John Wiley & Sons, Ltd, 2000.

MATUO, T. **Técnicas de aplicação de defensivos agrícolas**. [s.l.: s.n.].

MENG, Y. et al. Effect of aerial spray adjuvant applying on the efficiency of small unmanned aerial vehicle for wheat aphids control. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 11, n. 5, p. 46–53, 29 set. 2018.

NACKLEY, L. L. et al. Variable-rate Spray Technology Optimizes Pesticide Application by Adjusting for Seasonal Shifts in Deciduous Perennial Crops. 1 ago. 2021.

OERKE, E.-C. Crop losses to pests. **The Journal of Agricultural Science**, v. 144, n. 1, p. 31–43, fev. 2006.

PAN, Y.; REN, Y.; LUNING. Factors influencing Chinese farmers' proper pesticide application in agricultural products – A review. **Food Control**, v. 122, p. 107788, 1 abr. 2021.

PANSERI, S. et al. Persistent organic pollutants in fish: biomonitoring and cocktail effect with implications for food safety. **Food Additives & Contaminants: Part A**, v. 36, n. 4, p. 601–611, 3 abr. 2019.

PERES, A. J. A. et al. PULVERIZAÇÃO EM TAXA VARIADA NA CULTURA DO ALGODÃO. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, v. 35, n. 1, p. 18–28, 20 mar. 2020.

PETEINATOS, G. et al. A new logarithmic sprayer for dose-response studies in the field. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 157, p. 166–172, 1 fev. 2019.

PIETRZAK, D. et al. Pesticides from the EU First and Second Watch Lists in the Water Environment. **CLEAN – Soil, Air, Water**, v. 47, n. 7, p. 1800376, 2019.

POST, S. L. Drift of Droplets from Air-Induction Nozzles. 2019.

PRIVITERA, S. et al. Drop Size Measurement Techniques for Agricultural Sprays: A State-of-The-Art Review. **Agronomy**, v. 13, n. 3, p. 678, mar. 2023.

RINCÓN, V. et al. Spray performance assessment of a remote-controlled vehicle prototype for pesticide application in greenhouse tomato crops. **Science of The Total Environment**, v. 726, p. 138509, 15 jul. 2020.

ROBINSON, D. E.; MANSINGH, A.; DASGUPTA, T. P. Fate and transport of ethoprophos in the Jamaican environment. **Science of The Total Environment**, v. 237–238, p. 373–378, 30 set. 1999.

SÁNCHE-BAYO, F.; WYCKHUYS, K. Worldwide decline of the entomofauna: A

review of its drivers. **Biological Conservation**, v. 232, p. 8–27, 1 abr. 2019.

SEOL, J.; KIM, J.; SON, H. I. Field evaluations of a deep learning-based intelligent spraying robot with flow control for pear orchards. **Precision Agriculture**, v. 23, n. 2, p. 712–732, 1 abr. 2022.

SINDIVEG, 2022. Disponível em: <https://sindiveg.org.br/registro-de-agroquimicos-no-brasil>. Acesso: 30/10/2024

Sistema Globalmente Harmonizado. Disponível em: <<https://ghs-sga.com/?lang=pt-br>>. Acesso em: 11 out. 2024.

VITAL, N. Agradeça aos agrotóxicos por estar vivo. 5. ed. São Paulo: Editora Record, 2022. 245 p.

SOARES, W.; PORTO, M. Estimating the social cost of pesticide use: An assessment from acute poisoning in Brazil. **Ecological Economics**, v. 68, n. 10, p. 2721–2728, 15 ago. 2009.

SUBRAMANIAN, K. S. et al. Drones in Insect Pest Management. **Frontiers in Agronomy**, v. 3, 9 dez. 2021.

SUN, S. et al. Pesticide Pollution in Agricultural Soils and Sustainable Remediation Methods: a Review. **Current Pollution Reports**, v. 4, n. 3, p. 240–250, 1 set. 2018.

TUDI, M. et al. Agriculture Development, Pesticide Application and Its Impact on the Environment. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 3, p. 1112, jan. 2021.

VIRK, S. S.; PROSTKO, E. P. Survey of pesticide application practices and technologies in Georgia agronomic crops. **Weed Technology**, v. 36, n. 5, p. 616–628, out. 2022.

XU, Z. et al. Environmental risks and the potential benefits of nanopesticides: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 20, n. 3, p. 2097–2108, 1 jun. 2022.

ZHANG, Y. W. et al. Climate change effects on pesticide usage reduction efforts: a case study in China. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 23, n. 5, p. 685–701, 1 jun. 2018.

ZHENG, J.; XU, Y. A Review: Development of Plant Protection Methods and Advances in Pesticide Application Technology in Agro-Forestry Production. **Agriculture**, v. 13, n. 11, p. 2165, nov. 2023.