

LOREDANY CONSULE CRESPO RODRIGUES

IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS DO USO DE AGROTÓXICOS NO BRASIL

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: José Gustavo Féres

Coorientador: Alexandre Bragança Coelho

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

R696i Rodrigues, Loredany Consule Crespo, 1986-
2022 Impactos socioeconômicos do uso de agrotóxicos no Brasil
/ Loredany Consule Crespo Rodrigues. – Viçosa, MG, 2022.
1 tese eletrônica (117 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: José Gustavo Féres.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Economia Rural, 2022.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.752>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Produtividade agrícola. 2. Agrotóxicos. 3. Intoxicação.
4. Desenvolvimento sustentável. I. Féres, José Gustavo.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Economia
Rural. Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada.
III. Título.

CDD 22. ed. 338.16

Bibliotecário(a) responsável: Euzébio Luiz Pinto CRB-6/3317

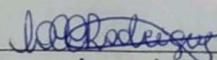
LOREDANY CONSULE CRESPO RODRIGUES

**IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS DO USO DE AGROTÓXICOS NO
BRASIL**

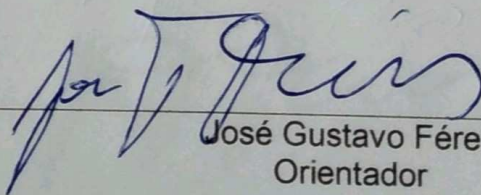
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 02 de dezembro de 2022.

Assentimento:



Loredany Consule Crespo Rodrigues
Autora



José Gustavo Féres
Orientador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, o responsável por todas as bênçãos, por me capacitar, por me dar a força e a coragem necessárias para prosseguir e por fazer por mim nos momentos que parecia impossível conseguir. A Ele toda a honra e glória, hoje e sempre.

Aos meus pais, Lucélio e Tereza, e ao meu irmão, Lucas, por todo o amor e carinho, pela compreensão e paciência, pela presença constante e por sempre me apoiarem nas decisões que precisaram ser tomadas para a realização deste sonho. Vocês são os maiores presentes que Deus me deu. Aos demais familiares, por todo auxílio e apoio, em especial à tia Maria, pelas orações durante todo este período.

A todos os meus amigos. Em especial, à Mirian e a sua família. Saber que sempre poderia contar com vocês tornou tudo mais leve. Aos amigos que fiz no doutorado que, mesmo no período de distanciamento, sempre estiveram disponíveis em ajudar.

A todos os professores do Departamento de Economia Rural, por compartilhar o conhecimento com excelência. Vocês contribuíram de maneira expressiva para minha formação. Em especial, agradeço ao prof. Leonardo Bornacki, que teve participação significativa nesta caminhada. Agradeço pela paciência e auxílio em diversos momentos.

Aos servidores do Departamento de Economia Rural, em especial à Margarida, pela disponibilidade em ajudar e, mais do que isso, pela atenção e cuidado.

Agradeço de maneira especial aos meus orientadores, professores José Gustavo Féres e Alexandre Bragança Coelho. Obrigada por compartilhar o conhecimento, pela disposição em ajudar e por toda a atenção dada durante a pesquisa. Vocês foram fundamentais para a realização deste sonho.

Também agradeço aos professores e pesquisadores que contribuíram com esta pesquisa por meio das sugestões apresentadas na etapa de qualificação e na banca de defesa da tese.

Por fim, minha gratidão à Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de aperfeiçoar o conhecimento de forma excelente e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

*“Porque dEle e por Ele e para Ele são todas as coisas.
Glória, pois, a Ele eternamente. Amém.”
(Romanos 11.36)*

RESUMO

RODRIGUES, Loredany Consule Crespo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2022. **Impactos socioeconômicos dos agrotóxicos no Brasil**. Orientador: José Gustavo Féres. Coorientador: Alexandre Bragança Coelho.

O Brasil está entre os países que mais utilizam agrotóxicos no mundo. Ainda que a adoção de pesticidas contribua para o aumento da produção e produtividade agrícolas, seu uso excessivo e inadequado está associado a externalidades negativas, como os danos à saúde e ao meio ambiente. Diante da intensificação do uso de agrotóxicos e do aumento no ritmo de liberação do comércio destes compostos químicos no país, este estudo buscou identificar os efeitos dos agrotóxicos na saúde dos brasileiros e mensurar a produtividade dos agroquímicos, verificando se sua aplicação está sendo feita de forma excessiva. Para atender a estes objetivos foram elaborados dois capítulos. No primeiro capítulo, analisou-se o efeito dos agrotóxicos sobre a incidência de intoxicações e a taxa de mortalidade por agrotóxicos no Brasil. Para lidar com a endogeneidade proveniente do viés de variáveis omitidas e obter a relação causal de interesse, utilizou-se o método de variáveis instrumentais, em que variáveis climáticas foram utilizadas como fonte de variação exógena na intensidade do uso de agrotóxicos. Os resultados revelam que o aumento de R\$10,00/ha nas despesas com pesticidas resulta no aumento de, aproximadamente, 13,09% nos casos de intoxicação. Esse percentual aumenta para 16,74% nos municípios rurais e para 22,76% nos municípios sem unidades de vigilância em saúde. O segundo capítulo analisou a produtividade e o uso excessivo dos agrotóxicos no setor agrícola brasileiro. Utilizando a abordagem de função de produção e o modelo de controle de danos, identificou-se que os agrotóxicos contribuem para aumentos na produção, mas sua produtividade marginal é decrescente. Na média, o aumento de R\$10,00/ha nas despesas com agrotóxicos aumenta R\$7,71/ha no valor bruto da produção agrícola brasileira. Este resultado revela o uso excessivo de pesticidas no país. Dos 5.171 municípios da amostra, 4.034 utilizaram agrotóxicos em excesso em 2006 e 4.432 em 2017. Adicionalmente, por meio de modelos de probabilidade e de regressão múltipla, constatou-se que o sistema de produção orgânico e a associação a cooperativas ou entidades da classe reduzem o uso excessivo de pesticidas. Já o crédito agrícola favorece a aplicação de pesticidas acima do nível ótimo. Os resultados trazem informações úteis para o direcionamento de políticas que visem ao desenvolvimento sustentável do setor agrícola brasileiro. Para atenuar os danos à saúde causados pelo uso inadequado dos agrotóxicos, os resultados apontam para o

desenvolvimento de políticas que incentivem a utilização de equipamentos de proteção individual, dada a vulnerabilidade dos municípios rurais, juntamente com programas de conscientização, e a expansão das unidades de vigilância em saúde. Adicionalmente, para reduzir a dependência dos produtores no uso de pesticidas, sugerem-se o desenvolvimento de alternativas sustentáveis para o controle fitossanitário e a formulação de linhas de crédito específicas que visem à transição agroecológica.

Palavras-chave: Agrotóxicos. Intoxicação. Produtividade. Desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

RODRIGUES, Loredany Consule Crespo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2022. **Socioeconomic impacts of pesticides in Brazil**. Adviser: José Gustavo Féres. Co-adviser: Alexandre Bragança Coelho.

Brazil is one of the largest pesticide consumers in the world. Although pesticide adoption contributes to the increase of agricultural production and productivity, inadequate use is associated with negative health- and environmental-related externalities. Given the intensification of pesticide use and the trend to relax pesticide regulation, this study sought to identify the effects of pesticides on the health of Brazilians and to measure the productivity of agrochemicals, checking if their application is being done excessively. The dissertation is divided in two chapters. In the first chapter, we analyzed the effect of pesticides on the incidence of poisoning and the mortality rate by pesticides in Brazil. To deal with endogeneity due to omitted variables bias, we used an instrumental variable method in which climate variables were used as a source of exogenous variation in the intensity of pesticide use. Results showed that an increase of R\$10.00/ha in pesticide expenditure results in an increase of approximately 13.09% in cases of poisoning. The percentage attains 16.74% in rural municipalities and 22.76% in municipalities without health surveillance units. The second chapter analyzed the productivity and excessive use of pesticides in the Brazilian agricultural sector. Using the production function approach coupled with a damage control model, we identified that pesticides contribute to increases in production, but their marginal productivity is decreasing. On average, the increase of R\$10.00/ha in pesticide expenditure increases R\$7.71/ha in the gross value of Brazilian agricultural production. This result reveals the excessive use of pesticides in the country. Out of the 5,171 municipalities in the sample, 4,034 registered excessive pesticide use in 2006 and 4,432 in 2017. Additionally, using probability and multiple regression models, we found that organic production systems and association with cooperatives or class entities reduce the excessive use of pesticides. On the other hand, agricultural credit favors the application of pesticides above the optimal level. Our results provide useful information to target policies aimed at the sustainable development of the Brazilian agricultural sector. To mitigate the damage to health caused by the inappropriate use of pesticides, our results point to the development of policies that encourage the use of personal protective equipment, given the vulnerability of rural municipalities, together with awareness programs, and the expansion of health surveillance units. In addition, to reduce the

dependence of producers on the use of pesticides, it is suggested the development of sustainable alternatives for plant health control and to redirect credit lines towards an agroecological transition.

Keywords: Pesticides. Poisoning. Productivity. Sustainable development.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	11
REFERÊNCIAS	13
2. EFEITOS DA INTENSIDADE DO USO DE AGROTÓXICOS SOBRE A INCIDÊNCIA DE INTOXICAÇÕES E A TAXA DE MORTALIDADE POR AGROTÓXICOS NO BRASIL	16
2.1. INTRODUÇÃO	16
2.2. AGROTÓXICOS E SAÚDE: QUAL A RELAÇÃO?	18
2.3. REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.4. MODELO EMPÍRICO	27
2.4.1. Identificação	28
2.4.2. Especificação	29
2.4.3. Fonte e tratamento dos dados	32
2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
2.5.1. Análise descritiva	34
2.5.2. Efeitos da intensidade no uso de agrotóxicos sobre a incidência de intoxicações	39
2.5.3. Efeitos da intensidade no uso de agrotóxicos sobre a taxa de mortalidade por intoxicações	44
2.5.4. Discussão dos resultados	48
2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
REFERÊNCIAS	55
APÊNDICES	64
3. USO DE AGROTÓXICOS NO BRASIL: CICLO VIRTUOSO OU CICLO VICIOSO?	70
3.1. INTRODUÇÃO	70
3.2. AGROTÓXICOS: PRODUTIVIDADE, USO EXCESSIVO E SEUS DETERMINANTES	73
3.3. MODELO TEÓRICO	76
3.4. MODELO EMPÍRICO	79
3.4.1 Produtividade marginal dos agrotóxicos	79
3.4.2 Determinantes do uso excessivo de agrotóxicos	82
3.4.3 Fonte e tratamento dos dados	84
3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	86
3.5.1 Análise descritiva	86
3.5.2 Estimativas da função de produção e a produtividade dos agrotóxicos	90

3.5.3 O uso excessivo de agrotóxicos e seus determinantes.....	94
3.5.4 Discussão dos resultados	99
3.6. CONCLUSÕES	104
REFERÊNCIAS	106
APÊNDICE	115
4. CONCLUSÃO GERAL	116

1. INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é um dos principais produtores e exportadores de grãos do mundo e as projeções apontam para continuidade do protagonismo do país no cenário agrícola mundial (MAPA, 2016). O progresso tecnológico, ao possibilitar o cultivo em diversas condições edafoclimáticas, teve papel fundamental na consolidação do Brasil como potência agrícola (EMBRAPA, 2018).

Este dinamismo da agricultura brasileira veio acompanhado de uma crescente demanda por insumos, dentre os quais se destaca a utilização de agrotóxicos. A extensa área de cultivo combinada com a adoção de tecnologias que incluem o uso intensivo de sementes transgênicas e agroquímicos colaboraram para que o país estivesse entre os maiores consumidores mundiais de agrotóxicos (PIGNATI *et al.*, 2017 e CARNEIRO *et al.*, 2015).

Cabe ainda destacar a regulação do setor no Brasil. Inicialmente dotado de uma legislação rigorosa em relação ao controle do uso de agrotóxicos, conforme estabelecida pela Lei 7.802/89 (conhecida como Lei dos Agrotóxicos), o país paulatinamente adotou leis e decretos que visaram tornar a regulação do setor menos restritiva (Decretos 991/93; 4.072/02; 5.981/06 e PLs nºs 6.299/2002; 1.687/2015; 3.200/2015). Este processo de liberalização parece estar por trás da tendência ascendente do registro de agrotóxicos, o que também pode ter contribuído para liderança do Brasil no consumo de pesticidas.

Se por um lado a adoção de agrotóxicos traz benefícios em termos de redução dos riscos de produção e ganhos de produtividade (JUST e POPE, 1978, 1979; SEXTON, ZHEN e ZILBERMAN, 2007; SHEAHAN, BARRETT e GOLDVALE, 2017), o uso inadequado desses compostos químicos está associado a diversas externalidades negativas. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), são registradas 20 mil mortes por ano devido ao uso de agrotóxicos (INCA, 2019). No Brasil, foram notificados 12.512 casos de intoxicações e 294 óbitos por agrotóxicos em 2017 (DATASUS, s.d.). Ressalta-se que os efeitos do uso de agrotóxicos sobre a saúde são diversos, podendo ser classificados como agudos (irritação na pele, ardência, alergias, dor no peito, tosse, dor de estômago, náuseas etc.) ou crônicos (dificuldade para dormir, esquecimento, problemas respiratórios, problemas de fertilidade, alteração do funcionamento do fígado e rins etc.) (INCA, 2019). Cabe ainda mencionar que, diante da dificuldade em mensurar os efeitos crônicos, fazendo com que muitos deles não sejam identificados, os registros apresentados podem ser subestimados. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), estima-se que, para cada caso de intoxicação por agrotóxicos notificado, há 50 casos que não foram registrados (CARNEIRO *et al.*, 2015).

Logo, os efeitos dos pesticidas sobre a saúde podem ser ainda maiores do que os aqui apresentados.

Além dos danos à saúde, o uso intensivo de agroquímicos afeta o meio ambiente. Segundo Mahmood *et al.* (2016), os agrotóxicos atingem os ecossistemas naturais por diferentes meios. Os agrotóxicos solúveis em água contaminam águas subterrâneas, córregos, rios e lagos, prejudicando diversas espécies. Por meio da lixiviação, micro-organismos benéficos para o solo e para o desenvolvimento das plantas são afetados. Os agrotóxicos ainda atingem os animais pelo processo de bioamplificação¹.

Diante disso, os benefícios advindos da aplicação de pesticidas podem ser atenuados pelos custos associados ao seu uso (SHEAHAN, BARRETT e GOLDVALE, 2017). Segundo Wilson e Tisdell (2001), no longo prazo, o uso de agrotóxicos pode trazer resultados econômicos contrários aos esperados, aumentando o custo e diminuindo o rendimento de produção. Em linha com estes argumentos, alguns estudos demonstram redução da produtividade dos agrotóxicos ao longo do tempo (CARLSON, 1977; TEAGUE e BRORSEN, 1995; RAHMAN, 2013; SUN, ZHANG e HU, 2020).

Mesmo diante das externalidades negativas associadas ao uso inadequado de pesticidas, observa-se aumento na liberação e no uso de agrotóxicos no Brasil. Entre 2006 e 2017, houve aumento de cerca de 270% nos registros concedidos, passando de 109 em 2006 para 404 em 2017 (MAPA, 2021). Com relação ao uso dos pesticidas, enquanto em 2006 o consumo foi de 204.124,24 toneladas, em 2017 foi de 539.944,95 toneladas (IBAMA, 2019). Simultaneamente, verifica-se o aumento nas intoxicações por agrotóxicos, que passaram de 3.319 em 2006 para 12.806 em 2017 (DATASUS, s.d.), e redução no retorno desses produtos em relação ao valor bruto de produção (MORAES, 2019). Em outras palavras, o aumento da intensidade do uso de pesticidas está sendo acompanhado pelo aumento dos danos à saúde e por uma possível redução dos retornos econômicos associados a sua aplicação.

Vale mencionar que o menor retorno pode ser consequência dos efeitos dos agrotóxicos sobre os predadores naturais e organismos do solo, favorecendo a manifestação de pragas e patógenos e reduzindo a fertilidade do solo (WILSON e TISDELL, 2001; MAHMOOD *et al.*, 2016; SHEAHAN, BARRETT e GOLDVALE, 2017). Ademais, o uso impróprio de pesticidas pode ser consequência da resistência das pragas que interfere na eficácia dos pesticidas, fazendo com que sejam necessárias maiores doses de aplicação para combatê-las (CHANDRASEKARA, WETTASINGHE e AMARASIRI, 1985; HAWKINS,

¹ A concentração de agrotóxicos aumenta à medida que se aproxima do topo da cadeia alimentar (MAHMOOD *et al.*, 2016).

2019). Ressalta-se que, ao mesmo tempo que o uso intensivo de pesticidas é consequência, pode ser a causa do desenvolvimento da resistência das pragas (SEXTON, ZHEN e ZILBERMAN, 2007). Isso posto, é possível que os produtores brasileiros estejam se tornando dependentes de um produto cuja produtividade está se reduzindo e, deste modo, estejam inseridos em um ciclo vicioso no longo prazo.

Diante do exposto e considerando a importância do setor agrícola para a economia brasileira, esta pesquisa busca identificar alguns impactos socioeconômicos do uso de agrotóxicos no Brasil. Para tal, realizaram-se dois ensaios. O primeiro ensaio visou mensurar os efeitos da intensidade do uso de agrotóxicos sobre a incidência de intoxicações e mortalidade por agrotóxicos no Brasil e analisar a regulação brasileira diante dos custos sociais relacionados ao uso de pesticidas. O segundo ensaio teve como objetivo avaliar a produtividade e o uso excessivo dos agrotóxicos no setor agrícola nacional, mensurando o impacto do aumento nas despesas com agrotóxicos e seu efeito marginal no valor bruto da produção (VBP) e identificando fatores que influenciam o uso excessivo de pesticidas no país.

Com estas análises, pretende-se contribuir para o aprimoramento da tomada de decisão de formuladores de políticas públicas, disponibilizando informações que auxiliem no direcionamento de políticas que visem potencializar os benefícios e reduzir os danos causados pelo uso de agrotóxicos no país, colaborando para o desenvolvimento sustentável do setor.

REFERÊNCIAS

CARLSON, G. A. Long-run productivity of insecticides. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 59, n. 3, p. 543-548, 1977.

CARNEIRO, F. F.; RIGOTTO, R. M.; AUGUSTO, L. G. S.; FRIEDRICH, K.; BÚRIGO, A. C., organizadores. **Dossiê Abrasco: um alerta sobre os impactos dos agrotóxicos na saúde**. Rio de Janeiro: EPSJV, São Paulo: Expressão Popular, 2015.

CHANDRASEKARA, A.I.; WETTASINGHE, A.; AMARASIRI, S.L. Pesticide usage by vegetable farmers. **Paper presented at Annual Research Conference ISTI**, Gannoruwa, Sri Lanka, 1985.

DATASUS – DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA DO SUS. **Intoxicação por agrotóxicos** - Notificações registradas no Sistema de Informação de Agravos de Notificação - SINAN - 2001 a 2006. Disponível em: <<http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/deftohtm.exe?sinanwin/cnv/agrobr.def>>. Acesso em: 28 de dezembro de 2020.

DATASUS – DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA DO SUS. **Intoxicação exógena** - Notificações registradas no Sistema de Informação de Agravos de Notificação - SINAN -

2007 a 2017. Disponível em: <<http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/defctohtm.exe?sinanet/cnv/Intoxbr.def>>. Acesso em: 28 de dezembro de 2020.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

HAWKINS, N. J.; BASS, C.; DIXON, A.; NEVE, P. The evolutionary origins of pesticide resistente. **Biological Reviews**, v. 94, p. 135-155, 2019.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Relatórios de comercialização de agrotóxicos**, 2019. Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos#historicodecomercializacao>>. Acesso em: 14 de dezembro de 2019.

INCA – INSTITUTO NACIONAL DO CÂNCER. **Agrotóxicos**, 2019 Disponível em: <<https://www.inca.gov.br/exposicao-no-trabalho-e-no-ambiente/agrotoxicos>>. Acesso em: 22 de dezembro de 2020.

JUST, R. E.; POPE, R. D. Stochastic specification of production functions and economic implications. **Journal of Econometrics**, v. 7, n. 1, p. 67-86, 1978.

JUST, R. E.; POPE, R. D. Production Function Estimation and Related Risk Considerations. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 61, n. 2, p. 276-284, 1979.

MAHMOOD I.; IMADI S. R.; SHAZADI K.; GUL A.; HAKEEM K. R. Effects of pesticides on environment. In: **Plant, Soil and Microbes**. Springer International Publishing, p.253-269, 2016.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Informações técnicas: registros concedidos 2005-2020, 2021**. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/agrotoxicos/informacoes-tecnicas>>. Acesso em: 16 de janeiro de 2021.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Projeções do agronegócio: Brasil 2015/2016 a 2025/2026: projeções de longo prazo**. Brasília, DF: Mapa/SPA, 2016. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/proj_agronegocio2016.pdf/view>. Acesso em: 04 de janeiro de 2021.

MORAES, F. R. **Agrotóxicos no Brasil: padrões de uso, política da regulação e prevenção da captura regulatória**. Texto para discussão. IPEA: Brasília, set. 2019.

PIGNATI, W. A.; LIMA, F. A.N. S.; LARA, S. S.; CORREA, M. L. M.; BARBOSA, J. R.; LEÃO, L. H. C.; PIGNATTI M. G. Distribuição espacial do uso de agrotóxicos no Brasil: uma ferramenta para a Vigilância em Saúde. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 22, n.10, p. 3281-3293, 2017.

RAHMAN, S. Pesticide consumption and productivity and the potential of IPM in Bangladesh. **Science of The Total Environment**, v. 445-446, p. 48-56, 2013.

SEXTON, S.; ZHEN, L.; ZILBERMAN, D. The economics of pesticides and pest control. **International Review of Environmental and Resource Economics**, v.1, n. 3, p. 271-326, 2007.

SHEAHAN, M.; BARRETT C, B.; GOLDVALE, C. Human health and pesticide use in Sub-Saharan Africa. **Agricultural Economics**, v. 48, n. S1, p. 27-41, 2017.

SUN, S.; ZHANG, C.; HU, R. Determinants and overuse of pesticides in grain production: A comparison of rice, maize and wheat in China. **China Agricultural Economic Review**, v. 12, n. 2, p. 367-379, 2020. <https://doi.org/10.1108/CAER-07-2018-0152>

TEAGUE, M. L.; BRORSEN, B. W. Pesticide productivity: what are the trends? **J. Agr. and Applied Econ.**, v. 27, n. 1, p. 276-282, 1995.

WILSON, C.; TISDELL, C. Why farmers continue to use pesticides despite environmental, health and sustainability costs. **Ecological Economics**, v. 39, p. 449-462, 2001.

2. EFEITOS DA INTENSIDADE DO USO DE AGROTÓXICOS SOBRE A INCIDÊNCIA DE INTOXICAÇÕES E A TAXA DE MORTALIDADE POR AGROTÓXICOS NO BRASIL

2.1. INTRODUÇÃO

O Brasil está entre os maiores consumidores mundiais de agrotóxicos². Embora a utilização desse tipo de insumo seja uma das formas de aumentar a produtividade agrícola, há diversas externalidades negativas associadas ao seu uso excessivo e inadequado, como os danos à saúde (KIM, KABIR e JAHAN, 2017; SANKOH, *et al.*, 2016; PIGNATI, PEREIRA e SILVA, 2014; PIGNATI *et al.*, 2017).

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), são registradas 20 mil mortes por ano devido ao consumo de agrotóxicos (INCA, 2019). No Brasil, entre 2006 e 2017, foram notificados 105.617 casos de intoxicação por agrotóxicos³, sendo que 3.491 vieram à óbito (DATASUS, 2020). Nesse período, as incidências de intoxicação e mortalidade aumentaram 254,7% e 75%, respectivamente (DATASUS, 2020).

Mesmo diante deste cenário, o Brasil tem liberado a comercialização de um número cada vez maior de agroquímicos, com o número de aprovações batendo recordes consecutivos desde 2016. Entre 2006 e 2020 foram registrados 3.551 novos agrotóxicos no país, dos quais a maioria (69,36%) é produto técnico equivalente ou produto formulado a base de produtos técnicos equivalentes⁴ (MAPA, 2021). Em 2020, mesmo diante da crise de saúde mundial decorrente da pandemia COVID-19, o Brasil bateu um novo recorde, com 493 novos agrotóxicos registrados (MAPA, 2021). Vale ressaltar, que a expansão desses registros tende a ser acompanhada pela redução dos preços dos pesticidas e, consequentemente, pelo aumento do seu consumo (VALADARES, ALVES e GALIZA, 2020).

Diante disso, é preciso considerar as externalidades negativas associadas ao uso intensivo e inadequado de pesticidas, como os danos à saúde. Além dos efeitos agudos como irritação na pele e nos olhos, dor de cabeça, náuseas e dificuldade de respirar (PIGNATI *et al.*, 2017; SOARES e PORTO, 2009; SANKOH *et al.*, 2016); o uso de pesticidas está

² Agrotóxicos são também conhecidos como pesticidas, agroquímicos, defensivos agrícolas ou defensivos fitossanitários. Embora ao longo do texto, estas nomenclaturas sejam utilizadas, optou-se por agrotóxicos como termo principal devido à toxicidade desses produtos, além de ser a nomenclatura oficial adotada no Brasil (BRASIL, 1989).

³ A partir de 2007, as intoxicações por agrotóxicos foram subdivididas em intoxicações por agrotóxicos agrícola, doméstico, de saúde pública e raticidas, possibilitando a análise apenas das intoxicações por agrotóxico agrícola. No entanto, para possibilitar a comparação com 2006, foram considerados todos os tipos de agrotóxicos.

⁴ São considerados produtos formulados a base de produto técnico equivalente, os produtos que contêm apenas produtos técnicos registrados por comparação a produtos já registrados (MAPA, 2021). Em outras palavras, são produtos genéricos dos já existentes no mercado.

associado a efeitos crônicos como alteração do funcionamento do fígado, malformação congênita, problemas respiratórios e de fertilidade (HU *et al.*, 2015; PIGNATI *et al.*, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2014; UEKER *et al.*, 2016).

Hu *et al.* (2015) revelam que a exposição prolongada aos agrotóxicos está associada a prejuízos do sistema nervoso periférico, das células sanguíneas e do fígado. Sankoh *et al.* (2016) identificaram que os casos de problemas de pele, náuseas, convulsão, distúrbios respiratórios, visão turva, perda de apetite, lacrimação e distúrbio nervoso são maiores entre os agricultores que utilizam agrotóxicos, quando comparados aos que não utilizam. A investigação realizada por Rani *et al.* (2021) aponta que a exposição aos pesticidas está associada ao maior risco de câncer, diabetes, doenças respiratórias, doenças neurológicas como Parkinson's e Alzheimer's e distúrbios hormonais.

No Brasil, o estudo de Pignati *et al.* (2017) revela correlação entre o uso de agrotóxicos e a incidência de intoxicação aguda, malformação fetal e mortalidade por câncer infanto-juvenil. Ueker *et al.* (2016) e Oliveira *et al.* (2014) encontram que a maior exposição aos pesticidas está associada ao aumento do risco de malformação congênita.

Além disso, como apontado por Soares e Porto (2012), as externalidades negativas provenientes do uso de agrotóxicos não são internalizadas pelos agricultores e fabricantes, favorecendo seu consumo e onerando os sistemas de saúde e da previdência social, por exemplo. Considerando o estado do Paraná e o período de 1998-1999, os autores revelam que o custo agregado esperado com a intoxicação por agrotóxicos, resultante das despesas médico-hospitalares e dos dias de trabalho perdidos, pode chegar a US\$ 149 milhões.

Uma das principais limitações dos estudos que avaliam os efeitos dos agrotóxicos é não considerar as características endógenas associadas ao seu uso, o que pode resultar em estimativas tendenciosas. Isso porque há fatores socioeconômicos não observáveis que podem afetar tanto a intensidade do uso de pesticidas quanto a exposição da população a esses compostos químicos e, conseqüentemente, as intoxicações.

Assim, com o objetivo de preencher esta lacuna, utiliza-se uma estratégia empírica que combina o método de variáveis instrumentais com dados em painel, o que permite controlar a heterogeneidade não observada, para responder às seguintes questões: A maior intensidade no uso de agrotóxicos aumenta a incidência de intoxicações e a taxa de mortalidade por pesticidas no Brasil? A regulamentação brasileira tem considerado os custos sociais relacionados ao uso de agrotóxicos?

Ao responder essas questões, pretende-se estimular o debate relacionado ao tema, trazendo informações importantes para que os formuladores de políticas públicas direcionem

esforços para elaboração e efetiva implementação de políticas direcionadas à regulamentação do uso de agrotóxicos, aprimorando estratégias de fiscalização e conscientização a fim de promover o uso e manuseio corretos desses produtos, mitigando os danos causados à saúde dos brasileiros. Tendo em vista a influência da saúde na produtividade do trabalhador e na formação de capital humano, tais políticas podem contribuir para o desenvolvimento do país, trazendo impactos ainda mais significativos no longo prazo.

É importante dizer que, neste estudo, as intoxicações estão associadas aos efeitos agudos dos agrotóxicos, isto é, aqueles cujos sintomas aparecem em até 24 horas após a exposição ao composto químico. Isso porque os efeitos crônicos, decorrentes da exposição contínua, ainda que em baixas doses, ao produto, não são contabilizadas devido à dificuldade de identificar relação direta entre exposição aos pesticidas e doenças. Como apontado por Carneiro et al. (2015), não há meios disponíveis para realização de estudos que avaliem os efeitos da exposição aos agrotóxicos por meio de resíduos nos alimentos e na água. Deste modo, os resultados obtidos nesta pesquisa representam uma parte dos efeitos dos agrotóxicos sobre a saúde. Ainda assim, a pesquisa contribui com a literatura no que diz respeito a extensão dos dados, superior aos utilizados em pesquisas anteriores, e ao método econométrico aplicado.

Este capítulo está estruturado em cinco seções, além desta introdução. Na seção 2, apresenta-se a revisão de literatura sobre a relação entre o uso de agrotóxicos e danos à saúde. Na seção seguinte, o modelo teórico no qual esta pesquisa se fundamenta é apresentado. Na seção 4, são apresentados o procedimento metodológico e a base de dados utilizados na pesquisa; em seguida, na seção 5, os resultados são apresentados e discutidos e, por fim, na seção 6, o trabalho é concluído.

2.2. AGROTÓXICOS E SAÚDE: QUAL A RELAÇÃO?

A inserção dos agrotóxicos no setor agrícola ocorreu com a Revolução Verde, movimento iniciado nos EUA na década de 50 e nos países em desenvolvimento nos anos 60, que tinha como um de seus objetivos aumentar a produtividade agrícola por meio da utilização de agroquímicos (SILVA *et al.*, 2005). No Brasil, juntamente com esse movimento, houve incentivos do governo por meio de créditos agrícolas e isenção fiscal para utilização de agrotóxicos (PORTO e SOARES, 2012; CUNHA e SOARES, 2020).

Embora o uso de pesticidas contribua para o aumento da produtividade agrícola, seu uso excessivo e inadequado está associado a externalidades negativas como os danos à saúde

e ao meio ambiente. Essas externalidades são discutidas desde 1962, quando Rachel Carson, por meio de seu livro *Silent Spring*, generalizou a preocupação e a discussão sobre os perigos do uso inadequado de agrotóxicos (EPA, s.d.).

Rachel Carson (1962) salienta os danos ambientais associados ao uso indiscriminado do DDT (*dicloro-difenil-tricloroetano*), que foi o primeiro pesticida sintético amplamente utilizado no mundo. Ainda que seu uso tenha revolucionado a produção agrícola e auxiliado na erradicação da malária nos EUA e na Europa (BEARD, 2006), seus efeitos adversos no ambiente e os riscos potenciais à saúde humana foram determinantes para sua proibição em grande parte dos países⁵ (EPA, s.d.).

Ressalta-se que, mesmo após décadas de sua proibição, seus efeitos sobre a saúde persistem, como demonstra o estudo realizado por Cirillo *et al.* (2021), que revela efeitos do DDT sobre a saúde até a terceira geração após a exposição ao composto químico. O estudo fez uma análise com mulheres que foram expostas ao DDT durante ou após a gravidez e identificaram que essa exposição está associada ao câncer de mama nas mães; ao câncer de mama, à densidade mamográfica e à obesidade nas filhas adultas; e à obesidade nas netas. As autoras ressaltam que a exposição a produtos químicos proibidos há décadas pode influenciar o desenvolvimento de obesidade e no ciclo menstrual precoce, que são fatores de risco para o câncer de mama e doenças cardiometabólicas.

Assim como o DDT no pós 2ª Guerra, o glifosato é amplamente utilizado no setor agrícola, sendo o herbicida mais utilizado no mundo. No entanto, estudos têm demonstrado sua potencial relação com diversos problemas de saúde como casos de câncer e prejuízos no desenvolvimento fetal. Dias, Rocha e Soares (2020) analisaram os efeitos do uso de glifosato sobre a saúde infantil. Os autores utilizaram dados de regiões brasileiras produtoras de soja no período de 2000 a 2010 e analisaram como o ganho da produtividade no cultivo de soja proveniente da adoção da tecnologia de sementes geneticamente modificadas, que utilizam intensamente o glifosato, impactou a mortalidade infantil em áreas a jusante das bacias hidrográficas onde houve aplicação de glifosato. Os resultados revelam que as regiões a jusante daquelas que cultivaram a soja transgênica e, conseqüentemente, utilizaram o glifosato intensivamente apresentaram aumento na média da taxa de mortalidade infantil em

⁵ A Convenção de Estocolmo sobre poluentes orgânicos persistentes inclui uma isenção limitada para o uso de DDT no combate à malária. Como exemplo, pode-se citar os países africanos, onde a malária ainda é um grande problema de saúde e o DDT é utilizado para o controle da doença (EPA, s.d.).

torno de 0,88 por 1.000 nascimentos. Segundo os autores, a externalidade associada ao uso do glifosato na produção de soja seria em torno de US\$ 583 milhões por ano.

Além dos efeitos sobre a saúde infantil, Franke *et al.* (2021) revelam que o glifosato pode contribuir para o desenvolvimento de câncer de mama. Por meio de um estudo de caso-controle composto por 250 mulheres (124 com casos de câncer de mama e 126 saudáveis) que se encontravam, predominantemente, na pós-menopausa, os autores analisaram a relação entre a excreção urinária do ácido aminometilfosfônico (AMPA), metabólico primário do glifosato, e o risco de câncer de mama. Conforme análises, o AMPA foi detectado em 90% das mulheres com casos de câncer de mama e em 84% das mulheres saudáveis. Os autores concluem que há um risco 4,5 vezes maior de desenvolver câncer de mama no quintil mais alto, relativamente ao mais baixo, de excreção de AMPA, sugerindo que a exposição ao AMPA pode estar associada ao aumento no risco de câncer de mama.

É importante ressaltar que os efeitos sobre a saúde não são específicos de determinados ingredientes ativos. De maneira geral, o uso indevido de agrotóxicos está associado a inúmeros prejuízos à saúde e, à medida que novos agroquímicos vêm surgindo, a disponibilidade e diversidade desses produtos aumentam e, conseqüentemente, maior a exposição da população a esses compostos químicos. Nesse contexto, a relação entre agrotóxicos e saúde tem sido tema de diversos estudos.

Hu *et al.* (2015) avaliaram os efeitos da exposição aos agrotóxicos nos indicadores de saúde (hematológicos e neurológicos) de 246 agricultores selecionados aleatoriamente em três províncias chinesas com diferentes níveis de aplicação de pesticidas (alto, médio e baixo). Os agricultores foram divididos em dois grupos de acordo com o nível de exposição aos agrotóxicos (alto e baixo). Os resultados revelam relação positiva entre intensidade no uso de pesticidas e anormalidades nos exames, demonstrando que a exposição prolongada aos agrotóxicos está associada ao aumento de anormalidades no sistema nervoso periférico, nas células sanguíneas e no fígado.

Sankoh *et al.* (2016), em uma análise feita com 500 agricultores nos campos de arroz de Serra Leoa, verificaram que, além da falta de conhecimento dos produtores sobre o manuseio adequado e seguro dos agrotóxicos, casos de problemas de pele, náuseas, convulsão, distúrbios respiratórios, visão turva, perda de apetite, lacrimação e distúrbio nervoso foram significativamente maiores entre os agricultores que usam agrotóxicos relativamente aos que não usam, indicando o impacto negativo dos agrotóxicos na saúde dos agricultores.

O estudo realizado por Sheahan, Barret e Goldvale (2017), utilizando dados longitudinais de quatro países da África Subsaariana (Etiópia, Nigéria, Tanzânia e Uganda), encontrou evidências consistentes de que, embora o uso de agroquímicos esteja associado ao maior valor de produção agrícola, os efeitos sobre a saúde humana e, consequentemente, sobre a produtividade do trabalho são significativos. Os autores ressaltam que o uso de pesticidas está relacionado a maiores gastos com saúde e tempo perdido no trabalho por causa de doenças.

Nessa mesma perspectiva, Maumbe e Swinton (2003), em uma análise feita com 280 pequenos produtores de algodão em dois distritos do Zimbábue, demonstraram que os custos com as intoxicações provenientes do uso de agrotóxicos podem chegar de 45% a 83% dos gastos anuais com pesticidas. Esses custos são relacionados apenas aos efeitos agudos, diretos e indiretos, causados pelo uso de agrotóxicos, não considerando os efeitos crônicos dos agrotóxicos sobre a saúde e outros custos não monetários. Os resultados ainda revelam que a falta de uso de roupas de proteção é um dos principais fatores das intoxicações por agrotóxicos e que essa falta de proteção é resultante da não compreensão dos perigos relacionados ao uso de agrotóxicos pelos agricultores. Diante disso, os autores ressaltam a importância da educação voltada para estratégias de prevenção e de conhecimento sobre os riscos à saúde associados ao uso de pesticidas para auxiliar na decisão dos agricultores sobre o manejo de pragas.

Fantke, Friedrich e Joliet (2012) quantificaram os impactos na saúde e os custos de danos relacionados à exposição a 133 pesticidas aplicados em 24 países europeus em 2003. Os resultados demonstraram que os custos dos danos à saúde devido ao uso de pesticidas na Europa totalizaram 78,4 milhões de euros em 2003. Na média, os autores encontraram que a carga de vida perdida por pessoa foi de 2,6 horas, que equivale ao custo de 12 euros por pessoa durante a vida útil.

No Brasil, Soares e Porto (2009), utilizando dados do PREVS/IBGE (*Harvest Forecast Research*), estimaram que os custos com as intoxicações agudas causadas por agrotóxicos no estado do Paraná podem representar 64% dos benefícios provenientes do uso de herbicidas e inseticidas na cultura de milho. Esse valor pode atingir 8% na ausência de alguns fatores de risco. Os autores demonstraram que a adoção de medidas preventivas pode resultar em ganhos consideráveis, reduzindo esses custos. Além disso, revelaram que o aumento no uso de agrotóxicos eleva a probabilidade de intoxicação.

Em estudo posterior, Soares e Porto (2012) estimaram as externalidades associadas às intoxicações agudas por agrotóxicos nos produtores de milho do Paraná. Considerando como

custo de intoxicação a soma das despesas médico-hospitalares com o custo relacionado aos dias de ausência do trabalho devido à intoxicação por agrotóxicos, os autores criaram dois cenários: o conservador, cujos valores referentes aos custos são mais baixos, e o cenário em que esses custos são mais onerosos. Adicionalmente, dois perfis de estabelecimentos agropecuários, de acordo com a presença ou não de fatores de risco, foram considerados. Os resultados revelam que os custos associados à intoxicação aguda por agrotóxicos para cada dólar gasto na aquisição desse insumo pode variar de US\$ 0,30 a US\$ 1,28, conforme o cenário de análise. Já o custo agregado esperado com a intoxicação pode chegar a US\$ 149 milhões.

Ainda em análise para o Brasil, Pignati *et al.* (2017) apresentaram a distribuição espacial do uso de agrotóxicos no território nacional. Considerando os municípios do Mato Grosso, os autores identificaram correlação positiva entre o consumo de agrotóxicos e a incidência de intoxicações agudas, de malformação fetal e de mortalidade por câncer infanto-juvenil. Os estudos de Ueker *et al.* (2016) e Oliveira *et al.* (2014) também apontam que a exposição aos pesticidas aumenta os riscos de malformação congênita em municípios do Mato Grosso.

Moreira *et al.* (2002) avaliaram o impacto do uso de agrotóxicos em uma comunidade agrícola situada em Nova Friburgo, região serrana do Rio de Janeiro. Os resultados apontam como principais fatores responsáveis pela contaminação ambiental e humana, além da utilização e exposição continuada aos pesticidas, o baixo nível de escolaridade, a ausência de políticas de fiscalização, o desconhecimento de técnicas alternativas de cultivo e o descarte incorreto das embalagens.

Nessa mesma perspectiva, Soares, Freitas e Coutinho (2005), em estudo realizado no município de Teresópolis, no estado do Rio de Janeiro, revelaram a importância do grau de escolaridade e do uso de EPIs como forma de reduzir os casos de intoxicação por agrotóxicos. Os resultados demonstraram que indivíduos com, no mínimo, 2º grau completo têm redução nas chances de intoxicação em 68%, quando comparados com aqueles com menor grau de escolaridade. Analogamente, o não uso de EPIs aumenta as chances de intoxicação em 535%. Os autores ainda ressaltaram que o uso de pulverizador costal manual e lavar os equipamentos em tanques de uso doméstico são fatores de risco, isto é, aumentam a probabilidade de intoxicação.

Mello e Silva (2013) investigaram os fatores associados a sintomas de intoxicação subaguda por agrotóxicos entre 412 trabalhadores rurais da lavoura do café nos municípios de Silvianópolis e São Gonçalo do Sapucaí em Minas Gerais e identificaram que ser mulher,

residir na zona rural, ter contrato de trabalho temporário e internação prévia por intoxicação são fatores de risco.

Silva *et al.* (2019), por meio de um estudo transversal, em que foram entrevistados 753 indivíduos de seis municípios de Mato Grosso (Diamantino, Nova Mutum, Pedra Preta, Campo Verde, Sorriso e Primavera do Leste), encontraram que a baixa escolaridade e residir próximo às lavouras, com destaque para as lavouras de milho e algodão, estão associados à maior incidência de intoxicações agudas. Assim, os resultados indicaram que o uso intensivo de agrotóxicos na produção agrícola resulta em maior ocorrência de intoxicações agudas nos trabalhadores e nas populações mais próximas.

Em suma, os resultados desses estudos demonstram que o uso de agrotóxicos contribui para o desenvolvimento de doenças e que os custos relacionados ao seu uso reduzem seus benefícios. Além disso, os estudos apontam como fatores de risco a baixa escolaridade da população rural e a falta de orientação técnica e de uso de EPIs.

A diversidade de estudos que analisam os efeitos dos agrotóxicos sobre a saúde demonstra a importância do tema. Assim, em busca de contribuir com a literatura, este estudo visou mensurar os efeitos da intensidade no uso de agrotóxicos sobre o bem-estar da população brasileira. Ressalta-se que, diferentemente dos trabalhos apresentados, a análise é feita a nível nacional, o que torna possível a generalização dos resultados de pesquisas com amostras menores até então realizadas. Além disso, neste estudo, considera-se a endogeneidade dos agrotóxicos, que é uma das principais limitações encontrada nos estudos que analisam os impactos dos agrotóxicos na saúde.

2.3. REFERENCIAL TEÓRICO

Para avaliar os efeitos da intensidade do uso de agrotóxicos sobre a saúde, esta pesquisa baseia-se no modelo clássico de produção da saúde de Becker-Grossman⁶ e no modelo apresentado por Harrington e Portney (1987). Tendo esses trabalhos como referência e seguindo o procedimento de Deschênes e Greenstone (2011), deriva-se uma expressão para valorar as externalidades negativas dos agrotóxicos na saúde, conforme apresentado a seguir.

Assume-se que um indivíduo⁷ representativo possui a seguinte função utilidade:

⁶ Este modelo formaliza a teoria do capital humano aplicada economicamente a problemas de saúde. Para mais detalhes, ver Grossman (2000).

⁷ Esse indivíduo representa toda a população exposta aos agrotóxicos: o trabalhador rural, o indivíduo que faz parte da cadeia de suprimentos de agrotóxicos e todo cidadão que está exposto aos agrotóxicos por meio dos resíduos nos alimentos.

$$U = U(x_c, s) \quad (1)$$

em que x_c representa uma cesta de bens de consumo e s equivale às condições de saúde, representada pela função a seguir:

$$s = s(x_p, x_r, \delta_g, I) \quad (2)$$

em que, x_p representa um vetor de bens relacionados a medidas preventivas, ou seja, bens e serviços que reduzem a exposição aos agrotóxicos como equipamentos de proteção e aquisição de produtos orgânicos, por exemplo; x_r é um vetor composto por bens relacionados a medidas de remediação, ou seja, medidas que auxiliam na recuperação das condições de saúde do indivíduo, como os gastos com medicamentos ou gastos hospitalares; δ_g equivale a fatores intrínsecos, como fatores genéticos, que podem influenciar as condições de saúde do indivíduo; I refere-se à intensidade do uso de agrotóxicos, que afeta negativamente as condições de saúde. Desta forma, tem-se que $\partial s / \partial x_p > 0$, $\partial s / \partial x_r > 0$, e $\partial s / \partial I < 0$.

O indivíduo busca maximizar sua utilidade sujeita à seguinte restrição orçamentária:

$$R - x_c - p_1 x_p - p_2 x_r = 0 \quad (3)$$

em que a renda do indivíduo (R) equivale à quantidade dos bens x_p , x_r e x_c adquiridos multiplicada pelos seus respectivos preços: p_1 (preço dos bens relacionados a medidas preventivas), p_2 (preço dos bens relacionados a medidas de remediação) e o preço do bem composto considerado o numerário e normalizado para um ($p_c = 1$).

Nesse contexto, o trabalhador rural ou o consumidor final tem como objetivo solucionar o seguinte problema de maximização:

$$\begin{aligned} & \text{Max}_{x_c x_p x_r} U(x_c, s(x_p, x_r, \delta_g, I)) \\ & \text{s. a. } R - x_c - p_1 x_p - p_2 x_r = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

No equilíbrio, tem-se que a razão entre as utilidades marginais dos bens equivale à razão entre seus respectivos preços, conforme segue:

$$\frac{(\partial U/\partial s)(\partial s/\partial x_p)}{\partial U/\partial x_c} = p_1 \quad (5)$$

$$\frac{(\partial U/\partial s)(\partial s/\partial x_r)}{\partial U/\partial x_c} = p_2 \quad (6)$$

$$\frac{(\partial U/\partial s)(\partial s/\partial x_p)}{(\partial U/\partial s)(\partial s/\partial x_r)} = \frac{p_1}{p_2} \quad (7)$$

Observe que as demandas por x_c (cesta de bens de consumo) e por x_p e x_r (bens que aumentam a probabilidade de melhor condição de saúde) dependem de seus preços (p_1 e p_2), da renda (R) e da intensidade do uso de agrotóxicos (I). A partir da solução do problema de maximização, obtém-se a função de utilidade indireta, $V(p_1, p_2, R, I)$, ou seja, a utilidade máxima que o indivíduo pode obter dados os preços, a renda e os indicadores da intensidade do uso de agrotóxicos. É possível demonstrar o efeito dos agrotóxicos sobre o bem-estar associado à saúde, utilizando a função de utilidade indireta e mantendo a utilidade e a relação entre os preços constantes.

Diante disso, para variações na intensidade do uso de agrotóxicos e, conseqüentemente, nos riscos associados a essas mudanças, o indivíduo deve ser compensado com variações em sua renda. Como a renda ótima pode ser expressa em função da intensidade de uso, $R^*(I)$, para níveis de preço e utilidade fixos, há uma função utilidade indireta associada, $V(R^*(I), I)$. Sendo assim, diferenciando totalmente $V(.)$ em relação à intensidade de uso de agrotóxicos (I), tem-se que:

$$\begin{aligned} dV/dI &= (\partial V/\partial R^*)(dR^*(I)/dI) + \partial V/\partial I = 0 \\ dR^*(I)/dI &= -(\partial V/\partial I)/(\partial V/\partial R) \end{aligned} \quad (8)$$

O termo $dR^*(I)/dI$ indica alterações necessárias na renda para que a utilidade permaneça constante diante de variações na intensidade de uso de pesticidas. Ou seja, mede a disposição a pagar/aceitar para um decréscimo/acrécimo dos riscos associados à maior intensidade do uso de agrotóxicos. Em outras palavras, o termo representa os efeitos dos agroquímicos sobre o bem-estar relacionado à saúde.

Utilizando as derivadas da função utilidade indireta e as condições de primeira ordem (CPOs), a equação (8) pode ser expressa das seguintes formas:

$$dR^*(I)/dI = -p_1[(\partial s/\partial I)/(\partial s/\partial x_p)] \quad (9)$$

$$dR^*(I)/dI = -p_2[(\partial s/\partial I)/(\partial s/\partial x_r)] \quad (10)$$

De acordo com a equação (9), verifica-se que as medidas preventivas têm relação inversa com as perdas de bem-estar. Isso porque, a adoção dessas medidas reduz os riscos associados à maior intensidade no uso de pesticidas, tendo relação positiva com as boas condições de saúde ($\partial s/\partial x_p > 0$). Logo, quanto mais medidas preventivas são adotadas, menores os efeitos sobre a saúde da população, e, por conseguinte, menor a perda de bem-estar do indivíduo.

Analogamente, por meio da equação (10), verifica-se que as medidas de remediação reduzem os efeitos negativos dos agrotóxicos sobre o bem-estar. Isso porque tais medidas têm efeito positivo sobre as condições de saúde ($\partial s/\partial x_r > 0$). Ou seja, ainda que o uso intensivo de agrotóxicos prejudique a saúde da população, medidas para remediar esses problemas atenuam os efeitos sobre as condições de saúde. Consequentemente, a perda de bem-estar é menor.

Portanto, verifica-se que o aumento na intensidade do uso de agrotóxicos reduz o bem-estar dos indivíduos. Essa redução será menor ou maior de acordo com a adoção ou não de medidas mitigadoras. Em outras palavras, a aquisição de bens e serviços que melhoram as condições de saúde (x_p e x_r) reduz o impacto negativo dos agrotóxicos no bem-estar.

Considerando as condições de primeira ordem do problema de maximização e visto que $\partial s/\partial I = ds/dI - (\partial s/\partial x_p)(\partial x_p/\partial I) - (\partial s/\partial x_r)(\partial x_r/\partial I)$, obtém-se:

$$dR^*(I)/dI = -(ds/dI)(\partial U/\partial s)/\lambda + p_1(\partial x_p/\partial I) + p_2(\partial x_r/\partial I) \quad (11)$$

O termo λ refere-se ao multiplicador de Lagrange resultante do problema de maximização e equivale à utilidade marginal da renda.

De acordo com a equação (11), a perda de bem-estar resultante do aumento na intensidade do uso de agrotóxicos pode ser deduzida das variações em s , x_p e x_r . Assumindo que aumentos na intensidade do uso de pesticidas elevam o preço efetivo de melhores condições de saúde, tem-se que $ds/dI \leq 0$, $\partial x_p/\partial I \geq 0$ e $\partial x_r/\partial I \geq 0$. O efeito completo da variação exógena na intensidade do uso de agrotóxicos sobre o bem-estar da população

reflete-se em variações nas condições de saúde (s) e no consumo de x_p e x_r .

Todos os termos da equação (11) podem ser mensurados. A derivada total da função de condições de saúde em relação à intensidade do uso de agrotóxicos (ds/dI) é obtida por meio de equações epidemiológicas. O termo $(\partial U/\partial s)/\lambda$ refere-se ao valor da desutilidade de uma variação na taxa de condições de saúde, podendo ser mensurado como a remuneração perdida referente aos dias de ausência no trabalho devido a problemas de saúde, no caso de intoxicações, e como o valor de uma vida estatística, no caso de mortalidade. O termo $(\partial x_p/\partial I)$ equivale a medidas de adaptação ou de mitigação dos danos causados pelo uso de agrotóxicos, como gastos com equipamentos que reduzem a exposição aos pesticidas. Esse termo é obtido ao estimar a relação entre a adoção dessas medidas, como a aquisição de EPIs, e intensidade no uso de agrotóxicos. Nesse contexto, p_I equivale ao preço ou custo das medidas adotadas. O último termo, $(\partial x_r/\partial I)$, é obtido ao estimar a relação entre medidas de remediação decorrentes de intoxicações por agrotóxicos (atendimentos hospitalares, aquisição de medicamentos etc.) e intensidade no uso de agrotóxicos. Nesse contexto, p_2 representa o preço ou custo dessas medidas.

Diante do exposto, tendo como base a equação (11), é possível mensurar os efeitos do uso intensivo de agroquímicos sobre o bem-estar relacionado à saúde da população. Note que a valoração do custo do bem-estar associado ao uso de agrotóxicos equivale à soma dos custos vinculados à deterioração das condições de saúde, representado pelo termo $(\partial U/\partial s)/\lambda$, dos gastos com medidas preventivas (uso de EPIs etc.), representado pelo termo $(\partial x_p/\partial I)$, e dos gastos com medidas de remediação (atendimentos hospitalares, aquisição de medicamentos etc.), representado por $(\partial x_r/\partial I)$.

Nesta pesquisa, o objetivo é identificar o efeito de variações na intensidade do uso de agrotóxicos sobre às condições de saúde da população, ou seja, estimar o termo (ds/dI) da equação (11).

2.4. MODELO EMPÍRICO

Nesta seção, aborda-se a estratégia empírica utilizada nesta pesquisa. Inicialmente, a estratégia de identificação adotada para encontrar a relação causal entre intensidade do uso de agrotóxicos e intoxicações é descrita. Em seguida, o modelo e o método utilizados nas estimativas são apresentados. Por fim, apresentam-se a fonte e o tratamento dos dados utilizados para o desenvolvimento do estudo.

2.4.1. Identificação

Para identificar o efeito da intensidade do uso de agrotóxicos sobre a saúde é preciso levar em consideração que a intensidade do uso deste insumo agrícola não é exógena. As características dos municípios (agrícolas e socioeconômicas) e o contexto social, representado pelas normas sociais, podem interferir a intensidade do uso de agrotóxicos (FEDER, JUST e ZILBERMAN, 1985; DASGUPTA *et al.*, 2001; BAGHERI *et al.*, 2019; HOU *et al.* 2020). Além disso, fatores socioculturais podem estar relacionados também com a exposição ao risco, afetando a variável dependente (intoxicações por agrotóxicos).

Como apontado por Angrist e Pischke (2008), uma das formas de solucionar esse problema é utilizar variáveis instrumentais. Assim, para lidar com a endogeneidade proveniente do viés de variáveis omitidas e obter a relação causal de interesse, são utilizadas variáveis climáticas, mais especificamente, a média e o desvio padrão de temperatura, como fonte de variação exógena na intensidade do uso de agrotóxicos.

As condições climáticas podem ser determinantes para a intensidade no uso de pesticidas. Isso porque tais condições podem alterar significativamente a ocorrência e severidade dos patógenos, haja vista sua influência potencial no crescimento e na resistência das plantas; na multiplicação, disseminação, sobrevivência e atividades do patógeno; além de interferir na relação patógeno-hospedeiro (GHINI, 2005).

Além disso, o clima interfere no uso de pesticidas ao modificar sua eficácia e persistência. Enquanto maior temperatura pode reduzir a persistência dos pesticidas, a quantidade e intensidade da chuva podem eliminá-los dos organismos, tornando necessário aumentar o número de aplicações de agroquímicos (RHODES e McCARL, 2020). Delcour, Spanoghe e Uyttendaele (2015) revelam que temperaturas mais elevadas estão associadas ao uso mais intensivo de agrotóxicos, seja por meio de maiores doses, de maior frequência na aplicação ou de maior diversidade de produtos aplicados. As condições climáticas ainda podem favorecer invasões regionais e aumentar a frequência e gravidade da infestação de pragas e doenças (JU *et al.*, 2013; DELCOUR, SPANOGHE e UYTTENDAELE, 2015 e ZHANG *et al.*, 2018).

É importante dizer que, ainda que algumas alterações climáticas tenham efeitos negativos sobre determinadas pragas e patógenos, em relação às culturas, essas mudanças os favorecem, resultando no surgimento de novas classes de agrotóxicos e na alteração das taxas de aplicações, que se tornam mais frequentes e em maiores doses (DELCOUR, SPANOGHE e UYTTENDAELE, 2015). De maneira geral, aumentos na precipitação e na temperatura

resultam na intensificação do uso de pesticidas (ZHANG *et al.*, 2018; SHAKHRAMANYAN, SCHNEIDER e McCARL, 2013; CHEN e McCARL, 2001).

Cabe ainda mencionar que a instabilidade climática, como temperaturas oscilantes, altera a fisiologia do hospedeiro afetando a atratividade para vetores (JONES, 2016). Ademais, flutuações de temperatura que excedem os limiares ideais para o desenvolvimento de pragas e patógenos podem interferir na difusão desses organismos (ROSENZWEIG *et al.*, 2001; SCHERM, 2004; ANGELOTTI, GHINI e BETTIOL, 2017; WELTI *et al.*, 2022). Consequentemente, a intensidade do uso de agrotóxicos é afetada. Segundo Rhodes e McCarl (2020), assim como as médias, os extremos climáticos impactam significativamente as despesas com pesticidas.

Diante do exposto, a média e o desvio padrão de temperatura são utilizados como fonte de variação exógena (instrumento) para encontrar o efeito da intensidade no uso de agrotóxicos sobre a saúde da população brasileira. A escolha da temperatura em detrimento da precipitação é devido ao possível efeito direto que a precipitação tem sobre o número de intoxicações. Segundo Lichtenberg, Zilberman e Bogen (1989), uma mesma quantidade de agrotóxicos pode ter impactos significativamente diferentes em períodos de seca e de chuva. Assim, optou-se por utilizar a média e o desvio padrão da temperatura, que não afeta a intoxicação do indivíduo de forma direta, mas apenas por meio do efeito causado sobre a intensidade do uso de agroquímicos, como instrumento. Deste modo, assume-se a ausência de variáveis não observáveis associadas às variações climáticas que também podem afetar o risco de exposição e, consequentemente, as intoxicações por agrotóxicos. Assim, a associação se dá unicamente por meio da correlação com a intensidade do uso de pesticidas.

2.4.2. Especificação

Para obter estimativas consistentes diante da possível correlação entre intensidade no uso de agrotóxicos e o termo de erro, utiliza-se o procedimento de dois estágios. No primeiro estágio, estima-se a seguinte equação:

$$I_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Temp_{it} + \alpha_2 X_{it} + \tilde{\lambda}_t + \delta_i + \varphi_1 Ano_t * Estado_i + \epsilon_{it} \quad (12)$$

em que I equivale à intensidade do uso de agrotóxicos; $Temp$ representa a média anual e os desvios interanuais em relação à média da temperatura; X é um vetor composto por variáveis controle, que estão detalhadas na subseção 4.3 ; $\tilde{\lambda}$ é o efeito fixo de ano; δ é o efeito fixo de

municípios. Para controlar a tendência observada nos estados brasileiros no período analisado, a variável $Ano*Estado$, referente à interação entre Estado e ano, foi inserida nas regressões. Ano é uma *dummy* com valor igual a um para o ano de 2017 e $Estado$ são *dummies* dos estados brasileiros; i representa o município, t o período de análise (2006 e 2017) e ϵ_{it} o termo aleatório.

No segundo estágio, são estimadas as equações (13) e (14) que identificam, respectivamente, os efeitos da intensidade no uso de agrotóxicos sobre a incidência de intoxicações e a taxa de mortalidade por agrotóxicos.

$$S_{it} = \beta_0 + \beta_1 \hat{I}_{it} + \beta_2 X_{it} + \lambda_t + \delta_i + \theta_1 Ano_t * Estado_i + \epsilon_{it} \quad (13)$$

$$M_{it} = \beta_0 + \beta_1 \hat{I}_{it} + \beta_2 X_{it} + \lambda_t + \delta_i + \theta_1 Ano_t * Estado_i + \epsilon_{it} \quad (14)$$

em que S e M são, nessa ordem, o número de pessoas intoxicadas por 100 mil habitantes e o número de óbitos por agrotóxicos por 100 mil habitantes, $\hat{I}$ corresponde à intensidade no uso de agrotóxicos estimada no primeiro estágio (equação 12) e ϵ_{it} representa os erros aleatórios. O termo δ_i representa os determinantes da incidência de intoxicações e da taxa de mortalidade específicos de cada município que são fixos no tempo. O termo λ_t representa efeitos fixos de ano e θ_1 os efeitos fixos de Estado-Ano. Como a disponibilidade de dados é escassa, ao incluir este termo, pretende-se controlar fatores que podem influenciar as intoxicações e a mortalidade por agrotóxicos que variam entre os estados brasileiros ao longo do tempo como a proporção de profissionais da saúde capacitados para identificar casos de intoxicação por agrotóxicos, a atuação da vigilância em saúde nos municípios, a existência de postos de saúde na área rural ou a distância média entre os estabelecimentos agropecuários e o atendimento hospitalar.

Considerando que as variáveis dependentes (S e M) apresentam um processo gerador de dados discretos e não negativos, a estimação de regressão por modelos tradicionais como Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) torna-se ineficiente, sendo mais apropriada a utilização de modelos de contagem, como Poisson (CAMERON e TRIVEDI, 2005).

Além disso, é preciso considerar que há um número expressivo de municípios cujo registro de intoxicação por agrotóxicos é zero. Segundo Wooldridge (2002), a regressão de Poisson com efeitos fixos permite qualquer relação entre média e variância e qualquer correlação serial e, utilizando o efeito fixo multiplicativo, o problema de excesso de zeros

pode ser solucionado. Ademais, o estimador de efeitos fixos de Poisson tem propriedades de robustez fortes para estimar os parâmetros na média condicional (WOOLDRIDGE, 2002; CAMERON e TRIVEDI, 2005).

Diante disso, neste trabalho, estima-se o modelo de Poisson com efeitos fixos e variáveis instrumentais, utilizando o procedimento proposto por Lin e Wooldridge (2019). Por meio desse método, assume-se um modelo exponencial de efeitos não observados em que as endogeneidades idiossincrática e de heterogeneidade são permitidas, conforme segue:

$$E(y_{it1}|y_{i2}, z_i, c_{i1}, r_{it1}) = E(y_{it1}|y_{it2}, z_{it1}, c_{i1}, r_{it1}) = c_{i1} \exp(x_{it1}\varphi_1 + r_{it1}) \quad (15)$$

em que $x_{iy1} = (y_{it2}, z_{it1})$, sendo y_{it2} a variável endógena (intensidade no uso de agrotóxicos) e z_{it1} o vetor de variáveis exógenas; c_{i1} representa a heterogeneidade não negativa e multiplicativa e; r_{it1} os fatores omitidos variáveis no tempo que, possivelmente, estão correlacionados com y_{it2} .

Sem o estimador r_{it1} , obtém-se o estimador de Poisson com efeitos fixos, o qual, como apresentado por Wooldridge (1999), não necessita de nenhuma das premissas para garantir sua consistência e normalidade assintótica. Sendo assim, o estimador é robusto, dado que requer apenas que $E(y_{it1}|x_{i1}, c_{i1}) = E(y_{it1}|x_{it1}, c_{i1}) = c_{i1} \exp(x_{it1}\varphi_1)$, em que a primeira igualdade impõe um requisito estrito de exogeneidade com respeito a choque idiossincráticos, que seria violado na presença de r_{it1} e sua correlação com y_{is2} , para qualquer período de tempo s (LIN e WOOLDRIDGE, 2019).

Como demonstrado por Lin e Wooldridge (2019), é possível verificar a existência de endogeneidade idiossincrática por meio de um teste de hipótese. Para tal, são necessários instrumentos estritamente exógenos e com variação no tempo que são excluídos de z_{it1} . A hipótese nula a ser testada é:

$$E(y_{it1}|y_{i2}, z_i, c_{i1}) = E(y_{it1}|y_{it2}, z_{it1}, c_{i1}) = c_{i1} \exp(x_{it1}\varphi_1) \quad (16)$$

Note que z_{it2} é excluído da função média e todas as variáveis são estritamente exógenas condicionais em c_{i1} . Para obtenção do teste, além da equação (15), especifica-se uma forma reduzida para y_{it2} , conforme segue:

$$y_{it2} = z_{it}\Pi_2 + c_{i2} + u_{it2}, t = 1, \dots, T \quad (17)$$

Como z_{it} é estritamente exógeno, a correlação entre r_{it1} e as funções de u_{it2} pode ser testada. O procedimento para o teste de hipóteses é realizado em duas etapas. Inicialmente, estima-se a forma reduzida para y_{it2} por efeitos fixos e obtêm-se os resíduos, ou seja, $\hat{u}_{it2} = \ddot{y}_{it2} - \ddot{z}_{it}\hat{\Pi}_2$. Posteriormente, utiliza-se o Poisson com efeitos fixos na função média. Formalmente, tem-se que $E(y_{it1}|z_{it1}, y_{it2}, \hat{u}_{it2}, c_{1i}) = c_{1i} \exp(x_{it1}\varphi_1 + \hat{u}_{it2}\rho_1)$. Utiliza-se, então, o teste de Wald, em que $H_0: \rho_1 = 0$. Ressalta-se que, além de permitir testar a endogeneidade do regressor, este procedimento estima φ_1 de forma consistente na presença de regressores endógenos.

Adicionalmente, Lin e Wooldridge (2019) demonstram como obter os efeitos parciais médios. Assumindo que x_{it1j} seja contínua, o efeito parcial médio (EPM) é:

$$EPM_{tj} = \varphi_{1j} E_{(x_{it1}, c_{i1}, r_{it1})} [c_{i1} \exp(x_{it1}\varphi_1 + r_{it1})] \quad (18)$$

Dado que a função média é exponencial, a estimativa torna-se simples. Utilizando expectativas iteradas, tem-se que $E_{(x_{it1}, c_{i1}, r_{it1})} [c_{i1} \exp(x_{it1}\varphi_1 + r_{it1})] = E(y_{it})$. Logo, para cada período de tempo, $EPM_{tj} = \varphi_{1j} E(y_{it})$, cujo estimador consistente é $\hat{\varphi}_{1j} (N^{-1} \sum_{i=1}^N y_{it})$.

2.4.3. Fonte e tratamento dos dados

As variáveis utilizadas para identificar o efeito da intensidade no uso de agrotóxicos sobre a saúde da população são descritas no Quadro 1. Como *proxy* para saúde, utiliza-se o número de registro de pessoas intoxicadas por agrotóxicos por 100 mil habitantes. Para construção desta *proxy*, o número de registros foi dividido pela população do município e, posteriormente, multiplicado por 100 mil. Para isso, foram utilizadas estimativas populacionais de 2006 e 2017 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O mesmo procedimento foi utilizado para calcular a taxa de mortalidade por agrotóxicos. Nesse caso, utiliza-se o número de registros de óbitos por agrotóxicos. Os dados de saúde, isto é, os registros de intoxicações e óbitos por agrotóxicos foram obtidos no Sistema de Informação de Agravos de Notificação (Sinan) do Datasus.

A variável intensidade do uso de agrotóxicos (I) corresponde à razão entre despesas com agrotóxicos e a área dos estabelecimentos destinada às lavouras, cujos dados estão

disponíveis nos Censos Agropecuários de 2006 e 2017 publicados pelo IBGE⁸. Desta forma, as despesas com agrotóxicos por área agrícola (R\$/ha) representam uma *proxy* para intensidade⁹. As demais variáveis utilizadas nesta pesquisa, assim como suas definições e suas fontes são apresentadas no Quadro 1¹⁰.

Para obtenção da variável *trabalhadores rurais*, utilizou-se o número de pessoas acima de 14 anos ocupadas nos estabelecimentos agropecuários, disponível nos Censos Agropecuários 2006 e 2017, dividido pela população acima de 14 anos em cada município, cujos dados são disponibilizados pelo Ministério da Saúde (MS).

Quadro 1 – Descrição das variáveis utilizadas nas estimativas

Variáveis	Descrição das variáveis	Fonte dos dados
Intoxicações	Número de pessoas intoxicadas por agrotóxicos por 100.000 habitantes.	Sinan/DataSus
Óbitos	Número de pessoas intoxicadas por agrotóxicos que vieram à óbito por 100.000 habitantes.	Sinan/DataSus.
Agrotóxicos	Refere-se à intensidade do uso de agrotóxicos, isto é, as despesas com agrotóxicos por área destinada às lavouras (R\$/ha).	Censo Agropecuário/IBGE
Características Socioeconômicas		
Trabalhadores rurais	Percentual da população acima de 14 anos ocupada em atividades rurais.	Censo Agropecuário/IBGE; DataSus/MS
PIB <i>per capita</i>	Produto interno bruto por habitante no município, em mil reais.	IBGE
VA Agropecuário	Participação do valor adicionado bruto da agropecuária no valor adicionado bruto total.	IBGE
Escolaridade	Percentual da população com 25 anos ou mais sem instrução ou com ensino fundamental incompleto.	Censo Demográfico/IBGE
Vigilância Saúde	Variável binária com valor igual à unidade na presença de unidades de vigilância em saúde no município e, zero, caso contrário.	DataSus/MS
Hospital	Variável binária com valor igual à unidade na presença de hospitais no município e, zero, caso contrário.	DataSus/MS
Características agrícolas		
Lavoura	Percentual da área agrícola (lavouras e pastagens) dos estabelecimentos destinada às lavouras permanentes ou temporárias.	Censo Agropecuário/IBGE
Agricultura orgânica	Percentual dos estabelecimentos agropecuários que adotaram o sistema de produção orgânico no município.	Censo Agropecuário/IBGE
Características climáticas		
Temperatura média	Média anual da temperatura (°C)	THRG
Variabilidade temperatura	Desvios interanuais de temperatura em relação à média.	THRG

Fonte: Elaboração própria.

⁸ Para possibilitar a comparação de uma mesma área geográfica entre os diferentes anos censitários, os municípios emancipados e os que deram origem a eles foram excluídos da amostra. A exclusão desses municípios não gera viés de seleção, dado que não está relacionada com a intensidade no uso de agrotóxicos ou com os registros de intoxicação. Além disso, esses municípios representam cerca de 0,25% da amostra do total de municípios brasileiros.

⁹ Conforme a disponibilidade de dados, optou-se por utilizar despesas com agrotóxicos por área agrícola como *proxy* da intensidade do uso. Nesse sentido, pressupõe-se que há uma forte correlação entre despesas com agrotóxicos e quantidade utilizada. No Apêndice A, valida-se esse pressuposto por meio de dados agregados.

¹⁰ O período de referência do Censo Agropecuário de 2017 é de 1º de outubro de 2016 a 30 de setembro de 2017. Assim, os dados de intoxicações e óbitos por agrotóxicos são referentes a este mesmo período. Essa compatibilização não foi possível para os demais dados.

As informações referentes à escolaridade da população foram obtidas nos Censos Demográficos. Considerando que o período analisado nesta pesquisa refere-se aos anos 2006 e 2017 e que os últimos Censos Demográficos são de 2000 e 2010, optou-se por utilizar a escolaridade da população acima de 25 anos. Assume-se que, nesta faixa etária, o nível de escolaridade já está definido e, deste modo, a discrepância entre o período dos dados e o período de análise não é significativa.

As variáveis climáticas, utilizadas como instrumentos no modelo, foram obtidas no banco de dados disponibilizado pelo grupo *Terrestrial Hydrology Research Group* (THRG), cuja construção seguiu os procedimentos descritos em Sheffield, Goteti e Wood (2006)¹¹. Foram utilizados os dados georreferenciados diários de temperatura (°C) com resolução de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (~28 km x 28 km) de 2006 e 2016 para calcular as médias de temperatura (°C) dos respectivos anos. Como medida de variabilidade climática, foram calculados os desvios padrão mensais de temperatura em relação a sua média anual.

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.5.1. Análise descritiva

A Tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas das variáveis utilizadas na análise de acordo com a existência ou não de registro de pessoas intoxicadas por agrotóxicos no município. Ressalta-se que, para contornar problemas de erros de medida, foram excluídos os municípios onde a intensidade do uso de agrotóxicos é inferior à R\$1,00/ha e superior à R\$1.000,00/ha. Logo, a amostra é composta por 5.328 municípios brasileiros.

Note que, na média, a participação do valor adicionado bruto da agropecuária no valor adicionado bruto total do município e a proporção de estabelecimentos com produção orgânica não apresentaram diferença estatisticamente significativa entre os municípios com e sem registro de pessoas intoxicadas no período de análise. Ressalta-se a baixa proporção (inferior à 2%) de estabelecimentos agropecuários com sistema de produção orgânica no país.

Já a proporção de área de lavouras em relação à área agrícola é maior nos municípios com pessoas intoxicadas, revelando que as lavouras podem estar associadas com maior incidência de intoxicações. Nesse contexto, vale lembrar que as *commodities*, cujo cultivo tem

¹¹ Agradeço ao professor Marcelo José Braga pelo fornecimento desses dados.

expandido no Brasil¹², têm participação significativa no consumo de agrotóxicos. Em 2016, mais de 80% do consumo de agroquímicos no país foram destinados às lavouras de soja, milho, algodão e cana-de-açúcar (MORAES, 2019). Segundo Valadares, Alves e Galiza (2020), os pacotes tecnológicos utilizados na produção de *commodities* agrícolas incluem o uso intensivo de agroquímicos. Logo, municípios com maior proporção de lavouras tendem a ter um número maior de intoxicações por agrotóxicos.

Tabela 1 – Estatísticas descritivas das variáveis utilizadas no modelo por municípios com e sem registros de intoxicação (2006-2017)

Variáveis	Municípios com registro de pessoas intoxicadas ¹		Municípios sem registro de pessoas intoxicadas ²		Brasil	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
Agrotóxicos (R\$/ha)	284,72***	234,59	177,66	210,50	215,39	225,17
Características climáticas						
Media temperatura	23,01***	2,86	24,00	2,89	23,65	2,92
Desvio de temperatura	2,09***	0,95	1,83	0,91	1,92	0,93
Características agrícolas						
Agricultura orgânica	1,82	3,38	1,73	4,21	1,76	3,94
Lavoura (%)	0,44***	0,28	0,35	0,27	0,38	0,28
Características socioeconômicas						
Trabalhadores rurais (%)	25,23***	21,27	29,99	20,27	28,31	20,75
PIB <i>per capita</i>	22,36***	20,55	16,08	17,34	18,29	18,78
VA Agropecuário (%)	21,41	15,95	21,24	14,68	21,30	15,14
Escolaridade	69,28***	12,64	74,94	10,69	72,94	11,73
Vigilância saúde	0,38***	0,48	0,27	0,44	0,31	0,46
Hospital	0,68***	0,47	0,47	0,50	0,54	0,50
Nr. municípios	1.859		3.469		5.328	
Observações	3.527		6.479		10.006	

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: ¹ Houve registro de pessoas intoxicadas por agrotóxicos em ao menos um dos períodos analisados (2006 ou 2017); ² Não houve registro de pessoas intoxicadas por agrotóxicos em nenhum dos períodos analisados (2006 e 2017). *** indica que os valores médios entre municípios com e sem registro de pessoas intoxicadas são diferentes ao nível de 1% de significância estatística. Foram consideradas as intoxicações não intencionais, incluindo as que resultaram em óbito.

As variáveis PIB *per capita*, presença de hospitais e de unidade de vigilância em saúde também foram maiores nos municípios onde houve registro de pessoas intoxicadas. Isso sugere que municípios com registro de intoxicação possuem melhor infraestrutura relativamente aos municípios sem registro de pessoas intoxicadas. Assim, é possível que a procura por atendimento médico no caso de intoxicação, o diagnóstico correto e, por conseguinte, o registro do caso sejam maiores nesses municípios.

Já a proporção de trabalhadores rurais e a proporção da população acima de 25 anos sem instrução ou com ensino fundamental incompleto foram maiores nos municípios sem registro de pessoas intoxicadas. É importante dizer que, embora o conhecimento possa atenuar

¹² Em 2017, cerca de 78% da área de lavouras no território brasileiro foram destinadas aos cultivos de cana-de-açúcar (12,96%), milho (22,46%) e soja (43,05%) (PAM, 2017).

os riscos à saúde associados ao uso de agrotóxicos, as campanhas de promoção do uso de agroquímicos são mais ativas em áreas com maiores níveis de escolaridade, resultando na maior incidência no uso de pesticidas (DASGUPTA *et al.*, 2001). Consequentemente, as externalidades negativas, como as intoxicações, podem ser potencializadas.

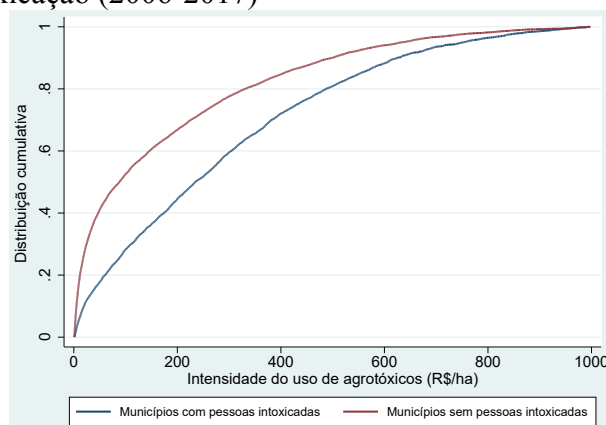
Cabe ainda ressaltar que, embora os agricultores estejam entre os grupos de maior risco/vulnerabilidade¹³ (LONDRES, 2012), é possível que, por razões de renda e acesso, nem todos os indivíduos que têm sintomas relacionados à exposição aos pesticidas procurem atendimento médico (BANJO, AINA e RIJE, 2010), o que pode justificar o maior percentual de trabalhadores rurais nos municípios sem registro de pessoas intoxicadas.

As variáveis climáticas também apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os municípios com e sem pessoas intoxicadas. Como relatado na seção anterior, as condições climáticas interferem na relação planta-pragas-patógenos e, consequentemente, podem afetar a intensidade do uso de pesticidas. Por conseguinte, os riscos à saúde associados ao uso de agrotóxicos também são influenciados.

Por fim, a intensidade no uso de agrotóxicos é significativamente superior nos municípios com registro de pessoas intoxicadas, superando em mais de 50% as despesas com agrotóxicos por hectare nos municípios onde não há registro de intoxicação. Na Figura 1, observa-se que a menor intensidade do uso de agrotóxicos nos municípios sem registro de pessoas intoxicadas não ocorre apenas na média, mas também ao longo da distribuição. Em outras palavras, há concentração dos municípios sem pessoas intoxicadas nos níveis mais baixos de intensidade no uso de pesticidas. Note que, enquanto cerca de 70% desses municípios gastam, na média, até R\$200,00/ha com agrotóxicos; pouco menos da metade dos municípios com pessoas intoxicadas despendem esse mesmo valor com agrotóxicos.

¹³ De acordo com o INCA, além dos agricultores e trabalhadores da indústria de agrotóxicos, gestantes, crianças e adolescentes são considerados grupos de risco devido às alterações metabólicas, imunológicas ou hormonais presentes nesse ciclo de vida (INCA, 2019).

Figura 1 – Distribuição cumulativa da intensidade no uso de agrotóxicos para municípios com e sem registros de intoxicação (2006-2017)



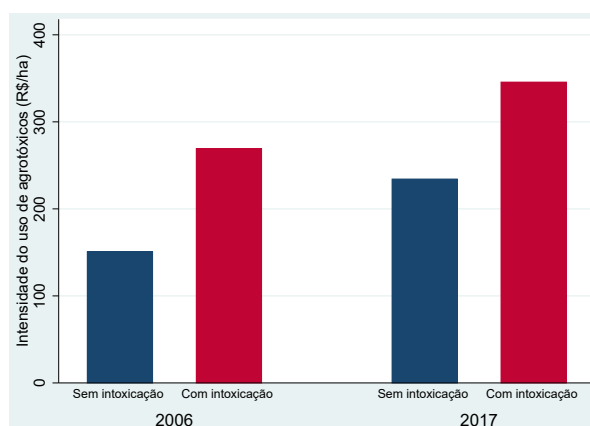
Fonte: Resultados da pesquisa.

Na Figura 2, pode-se observar a diferença na intensidade do uso de agrotóxicos entre os municípios com e sem registro de intoxicações em 2006 e 2017. Em ambos os períodos, a intensidade foi maior nos municípios com registro de intoxicações relativamente aos sem registro. Observa-se ainda que houve aumento na intensidade do uso de pesticidas tanto nos municípios com registro de intoxicações quanto naqueles onde não houve registros. Esse aumento “generalizado” pode ser parcialmente explicado pela evolução de patógenos, ervas daninhas e pragas resistentes, que ameaçam a eficácia dos agrotóxicos (HAWKINS *et al.*, 2019). Como resultado, os agricultores aumentam a quantidade, a concentração e a frequência das aplicações de pesticidas (CHANDRASEKARA, WETTASINGHE e AMARASIRI, 1985). Além disso, o clima tropical brasileiro permite o cultivo de múltiplas safras¹⁴, fazendo com que o período de “vazio sanitário” não ocorra. Consequentemente, cria-se o ambiente favorável para o desenvolvimento de pragas e patógenos, aumentando o uso de pesticidas (CUNHA *et al.*, 2019).

Ainda na Figura 2, constata-se que a intensificação no uso de agrotóxicos foi maior nos municípios sem registro de intoxicações, onde despendia-se, na média, R\$150,89/ha com agrotóxicos em 2006 e, em 2017, essas despesas passaram para cerca de R\$234,24/ha (aumento de 55,24%). Já nos municípios com pessoas intoxicadas, este aumento foi em torno de 28,32%, passando de R\$269,36/ha em 2006 para R\$345,63/ha em 2017. Essa diferença pode ser decorrente do aumento no número de municípios com registro de intoxicação por agrotóxicos no período. Enquanto em 2006, 550 municípios (10,32% da amostra) relataram casos de intoxicações por agrotóxicos (não intencionais), em 2017, esse número passou para 1.485 (27,89% da amostra).

¹⁴ Um dos principais exemplos é o milho safrinha que ocorre, majoritariamente, após a colheita de soja.

Figura 2 – Média na intensidade no uso de agrotóxicos nos municípios sem e com intoxicação por agrotóxicos



Fonte: Resultados da pesquisa.

Na Figura 3, verifica-se que, simultaneamente à intensificação no uso de pesticidas, houve aumento significativo na incidência de intoxicações por agrotóxicos no território nacional. Note que, em ambos os períodos, os municípios mais intensivos no uso de pesticidas foram também os com maior incidência de intoxicações, indicando potencial relação entre intensidade do uso de agrotóxicos e intoxicações.

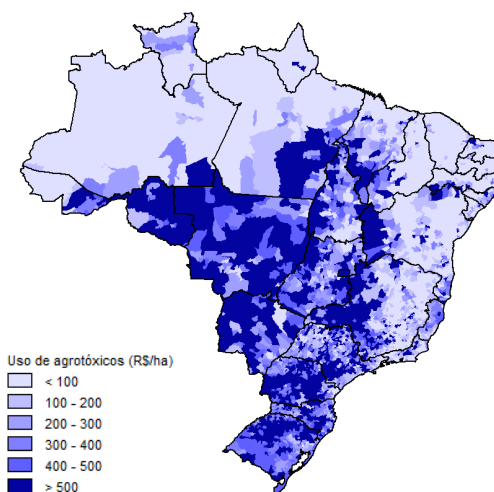
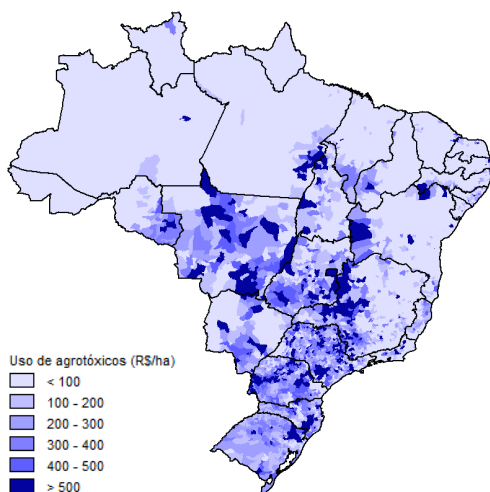
É importante mencionar que, além do aumento no número de municípios com registro de pessoas intoxicadas por agrotóxicos, a incidência de intoxicações aumentou significativamente no período, passando da média de 2,82 registros por 100 mil habitantes em 2006 para 6,10 em 2017. Esse aumento pode ser devido à maior utilização de agroquímicos, mas também pode estar relacionado à melhor atuação da vigilância e assistência à saúde para identificação, diagnóstico e notificação de casos (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2018).

Ainda assim, vale lembrar que a subnotificação é significativa no Brasil e no mundo. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), estima-se que, para cada caso de intoxicação por agrotóxicos notificado, há 50 casos que não foram notificados (CARNEIRO *et al.*, 2015). Logo, os efeitos dos agrotóxicos sobre a saúde podem ser ainda maiores do que os aqui apresentados.

Figura 3 – Intensidade no uso e incidência de intoxicações por agrotóxicos em 2006 e 2017

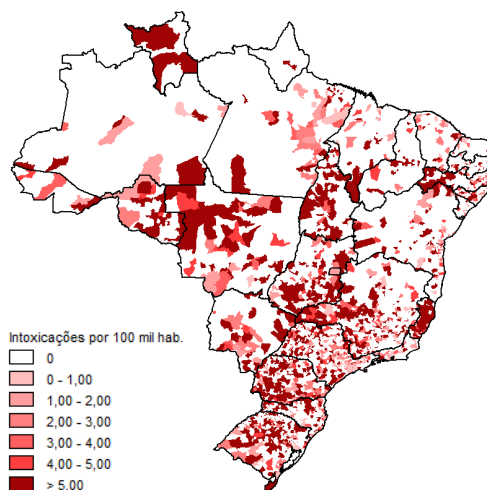
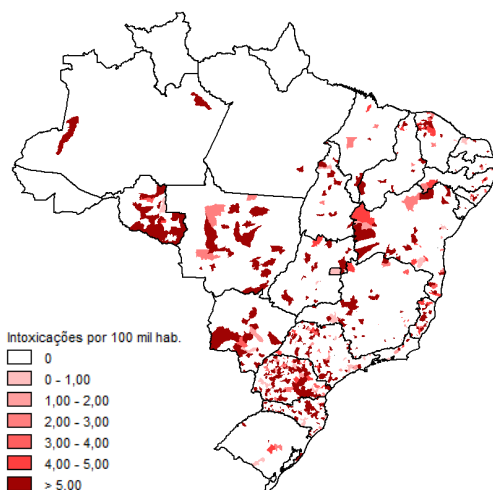
3a – Intensidade do uso de agrotóxicos em 2006

3b – Intensidade do uso de agrotóxicos em 2017



3c – Incidência de intoxicações em 2006

3d – Incidência de intoxicações em 2017



Fonte: Elaboração própria, conforme dados do Sinan e IBGE.

2.5.2. Efeitos da intensidade no uso de agrotóxicos sobre a incidência de intoxicações

Nesta seção, são apresentados os resultados estimados dos efeitos da intensidade do uso de agrotóxicos sobre o número de intoxicações por agrotóxicos nos municípios. É importante ressaltar que foram selecionados apenas os casos não intencionais de intoxicações, ou seja, os casos registrados como tentativas de suicídio foram excluídos da amostra para evitar qualquer viés causado por esse tipo de intoxicação.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos por meio dos modelos estimados. As duas primeiras colunas referem-se às especificações sem variáveis instrumentais (VI). Nos modelos (3) e (4), utilizam-se a média e o desvio padrão de temperatura como instrumentos nas estimativas. Todas as especificações foram estimadas com efeitos fixos de municípios,

efeitos fixos de ano e efeitos fixos de Estado-ano, o que permite controlar fatores não observáveis invariantes e variantes no tempo nos Estados analisados. Os resultados apresentados nas colunas (1) e (3) revelam o efeito da intensidade do uso de pesticidas sobre o número de intoxicações por agrotóxicos sem controlar por nenhum outro fator. Já nos resultados das colunas (2) e (4), são adicionadas características socioeconômicas e agrícolas dos municípios como controles.

As duas primeiras colunas, que apresentam os resultados sem variáveis instrumentais, indicam correlação positiva e estatisticamente significativa entre o uso intensivo de agrotóxicos e o registro de pessoas intoxicadas. Note que a inclusão de controles praticamente não interfere nas estatísticas pontuais.

As colunas (3) a (4) apresentam os resultados em que foram incluídas a média e o desvio padrão de temperatura como instrumentos. Como mencionado, ao utilizar a estratégia de variáveis instrumentais, é possível lidar com o problema de endogeneidade da intensidade do uso de agrotóxicos, permitindo se aproximar da relação causal de interesse. Assim, a coluna (4), que apresenta os resultados utilizando a estratégia VI e incluindo os controles, é a especificação de referência. Os resultados do primeiro estágio são apresentados na Tabela B.1 no Apêndice B e comprovam a relevância dos instrumentos utilizados.

As estimativas com VI também indicam efeito positivo da intensidade do uso de agrotóxicos no número de pessoas intoxicadas por 100 mil habitantes no município. No entanto, esse efeito foi estatisticamente significativo apenas na especificação com controles (coluna 4). Note ainda que, nessa especificação, a variável *Endog*¹⁵ apresentou significância estatística, confirmando a hipótese de que a intensidade do uso de agrotóxicos é endógena. Diante disso, as estimativas de modelos que não lidam com esse problema podem ser tendenciosas. Conforme apresentado na Tabela 2, os resultados dos modelos sem variáveis instrumentais são subestimados.

De maneira geral, a intensidade no uso de agrotóxicos apresentou efeito positivo sobre o número de intoxicações por 100 mil habitantes em todas as especificações e somente na especificação (3) não foi estatisticamente significativo. Note que a inclusão de controles aumentou o efeito da intensidade sobre as intoxicações, embora a diferença tenha sido pouco expressiva.

¹⁵ Esta variável representa o resultado do procedimento proposto por Lin e Wooldridge (2019), apresentado na seção 2.4.2, para verificar a existência de endogeneidade. A significância estatística da variável *Endog* confirma a presença de regressores endógenos.

Tabela 2 – Estimativas dos efeitos da intensidade no uso de agrotóxicos sobre o número de pessoas intoxicadas nos municípios brasileiros – Poisson

	Sem variáveis instrumentais		Com variáveis instrumentais	
	(1)	(2)	(3)	(4)
Agrotóxicos	0.00151*** (0.000533)	0.00141*** (0.000544)	0.00797 (0.00486)	0.0130*** (0.00487)
<i>Endog</i>	- -	- -	-0.00649 (0.00480)	-0.0117** (0.00496)
Controles	Não	Sim	Não	Sim
Efeitos fixos município	Sim	Sim	Sim	Sim
Efeitos fixos ano	Sim	Sim	Sim	Sim
Efeitos fixos Estado-ano	Sim	Sim	Sim	Sim
Observações	3,312	3,284	3,310	3,282
Nr. Municípios	1,656	1,642	1,655	1,641

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: Erros-padrão *bootstrap* com 50 repetições entre parênteses. Significância: *** $p < 0,01$; ** $p < 0,05$; * $p < 0,1$. Em todas as regressões, a variável dependente é o número de registros de pessoas intoxicadas (não intencionalmente) por 100 mil habitantes.

Os resultados da especificação de referência (coluna 4) revelam que o aumento de R\$10,00/ha nas despesas com agrotóxicos, que equivale ao aumento de 4,64% na intensidade média do uso de pesticidas¹⁶, corresponde à expansão de 13,09%¹⁷ nos casos de intoxicação por 100 mil habitantes. Esse resultado corrobora os encontrados por Pignati *et al.* (2014); Hu *et al.* (2015); Sankoh *et al.* (2016); Pignati *et al.* (2017), que revelam que o uso de agrotóxicos tem efeitos negativos sobre a saúde.

É importante destacar que, no Brasil, observa-se a intensificação no uso de agroquímicos, que passou de R\$ 419,02/ha em 2006 para R\$ 511,20/ha em 2017 (IBGE, 2006 e 2017). Em 2019, foram consumidos 620.537,98 toneladas de ingredientes ativos no país, superando as 549.280,44 toneladas comercializadas no ano anterior (IBAMA, 2020). Esse cenário, juntamente com os resultados apresentados, ressaltam a importância de medidas que visem à redução dos danos causados pelo uso excessivo e inadequado de agroquímicos no país.

Considerando a possibilidade de efeitos heterogêneos entre os municípios, a Tabela 3 apresenta os resultados por presença ou ausência de unidade de vigilância em saúde no município e por tipo de município (rural ou urbano)¹⁸. Os resultados das estimativas sem e com variáveis instrumentais encontram-se nos Painéis A e B, respectivamente.

¹⁶ Considerando que, na amostra analisada, a intensidade média do uso de agrotóxicos no período foi de R\$215,39 (Tabela 1), o aumento de R\$10,00/ha nas despesas com agrotóxicos equivale ao aumento de cerca de 4,64% nessas despesas.

¹⁷ A variação de R\$1,00/ha nas despesas com agrotóxicos equivale à variação percentual de $[\exp(0,0130) - 1] \times 100$ nas intoxicações.

¹⁸ Essa especificação foi baseada na “Classificação e caracterização dos espaços rurais e urbanos do Brasil: Uma primeira aproximação”, publicado pelo IBGE em 2017, em que os municípios são classificados em urbano,

Tabela 3 – Efeitos da intensidade do uso de agrotóxicos nas intoxicações por tipo de município (urbano e rural) e presença de unidades de vigilância de saúde

	Urbano		Rural		Sem Vigilância de Saúde		Com Vigilância de Saúde	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Painel A: Sem VI								
Agrotóxicos	0.000364 (0.000537)	0.000223 (0.000693)	0.00220*** (0.000631)	0.00214** (0.000885)	0.00276*** (0.000646)	0.00270** (0.00126)	-0.000407 (0.00270)	-0.00152 (0.00227)
Painel B: Com VI								
Agrotóxicos	-0.0193 (0.0119)	-0.0169 (0.0107)	0.0120** (0.00516)	0.0166** (0.00667)	0.0156** (0.00627)	0.0225*** (0.00835)	-0.00702 (0.0252)	-0.00993 (0.0257)
<i>Endog</i>	0.0196* (0.0117)	0.0171 (0.0108)	-0.00988* (0.00518)	-0.0147** (0.00663)	-0.0130* (0.00670)	-0.0201** (0.00806)	0.00648 (0.0240)	0.00832 (0.0244)
Controles	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim
Efeitos fixos de Município	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Efeitos fixos de ano	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Efeitos fixos de Estado-ano	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Observações	1,736	1,732	1,574	1,550	1,472	1,446	604	604
Nr. Municípios	868	866	787	775	736	723	302	302

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: Erros-padrão *bootstrap* com 50 repetições entre parênteses. Significância: *** $p < 0,01$; ** $p < 0,05$; * $p < 0,1$. Em todas as regressões, a variável dependente é o número de registros de pessoas intoxicadas (não intencionalmente) por 100 mil habitantes.

Observe que o município ser classificado como predominantemente rural ou urbano interfere nos efeitos da intensidade do uso de pesticidas nos registros de pessoas intoxicadas. Os coeficientes estimados mostram que o efeito da intensidade dos agrotóxicos nas intoxicações deixa de ser significativo nos municípios classificados como urbanos. É importante lembrar que, embora toda a população esteja exposta aos agrotóxicos por meio dos resíduos na água e no alimento, moradores da zona rural, possivelmente, estão mais expostos aos agroquímicos devido ao tempo de permanência no local e à dispersão da substância aplicada, aumentando as chances de intoxicação (MELLO e SILVA, 2013).

Ademais, a não significância dos efeitos em municípios predominantemente urbanos pode ser devido à *proxy* utilizada para saúde: intoxicações por agrotóxicos. Essa variável está relacionada aos sintomas agudos, isto é, aqueles que aparecem em até 24 horas após a exposição ao agroquímico. Já o risco para a população que habita em municípios predominantemente urbanos é, em sua maioria, proveniente da exposição contínua a pequenas

intermediário adjacente, intermediário remoto, rural adjacente e rural remoto (IBGE, 2017a). Nesta pesquisa, foram considerados municípios rurais aqueles classificados como rural adjacente ou rural remoto.

doses de agroquímicos, por meio dos resíduos nos alimentos¹⁹ e na água, que podem culminar em doenças crônicas (INCA, 2019).

Ao estratificar a amostra por presença de unidades de vigilância em saúde no município, encontra-se que a presença dessas unidades no município contribui para que os efeitos da intensidade do uso de pesticidas nas intoxicações sejam não significativas. Esse resultado sugere que os serviços prestados por essas unidades podem contribuir para atenuar os riscos associados ao uso de agroquímicos.

Em suma, os resultados apresentados na Tabela 3 demonstram a importância de políticas nos municípios predominantemente rurais, haja vista o maior efeito nesses municípios e apontam para expansão das unidades de vigilância em saúde como estratégia de mitigação de riscos. Em outras palavras, diante da escassez de recursos públicos, políticas que priorizem os municípios rurais podem ser mais eficientes para reduzir as intoxicações por agrotóxicos. Ressalta-se que, à medida que a população rural se conscientiza dos riscos associados ao uso de pesticidas e da importância de seu uso e manuseio de forma adequada, toda a população pode ser beneficiada por meio da redução de resíduos nos alimentos, por exemplo. Diante disso, programas de conscientização e treinamento para os produtores podem contribuir para o uso adequado de agrotóxicos e para redução dos riscos à saúde.

A fim de verificar a existência de algum outro mecanismo que afetou o número de intoxicações por agrotóxicos, a Tabela 4 apresenta um exercício, em que foram utilizados os casos de intoxicações registrados como tentativas de suicídio. A seleção dessa variável para o exercício leva em consideração que a intoxicação foi intencional, ou seja, voluntária e, desta forma, não está associada à intensidade do uso de pesticidas, ao menos no curto prazo.

É importante destacar que alguns estudos revelam potencial relação entre exposição aos pesticidas e tentativas de suicídio (PIRES, CALDAS e RECENA, 2005; FREIRE e KOIFMAN, 2013; MEYER *et al.*, 2010; ARAÚJO *et al.*, 2007). No entanto, esses estudos apontam que essa relação se dá devido à exposição contínua aos agrotóxicos, que podem interferir no sistema neurológico, podendo levar à depressão, culminando, inclusive, na tentativa de suicídio. Como, nesta pesquisa, analisa-se a relação entre a intensidade do uso de pesticidas em determinado ano e as intoxicações registradas neste mesmo ano, ou seja,

¹⁹ Os últimos resultados apresentados pelo PARA (Programa de Análise de Resíduos de Agrotóxicos nos Alimentos) revelam que em 51,89% das 4.616 amostras analisadas foram detectados resíduos de agrotóxicos (ANVISA, 2019).

analisam-se os efeitos de curto prazo (sintomas agudos)²⁰, espera-se que o efeito sobre as tentativas de suicídio sejam não significativas.

Os resultados são apresentados na Tabela 4, que replica as estimativas apresentadas na Tabela 2 alterando a variável dependente para intoxicações por agrotóxicos intencionais (tentativas de suicídio). As estimativas sem VI indicam correlação positiva significativa entre intensidade do uso de pesticidas e tentativas de suicídio no município mas, além dos coeficientes estimados serem menores em relação aos apresentados na Tabela 2, a significância estatística é mais fraca. Além disso, essa correlação deixa de ser significativa na especificação de referência (coluna 4), cujos resultados revelam que a intensidade do uso de agrotóxicos em determinado ano não tem influência estatisticamente significativa nas intoxicações por agrotóxicos resultantes das tentativas de suicídios do respectivo ano. Deste modo, sugere-se que não há outro mecanismo que interfira nos efeitos encontrados anteriormente, aumentando a robustez dos resultados encontrados.

Tabela 4 – Efeitos da intensidade do uso de agrotóxicos sobre as intoxicações por agrotóxicos resultantes de tentativas de suicídio

	Sem variáveis instrumentais		Com variáveis instrumentais	
	(1)	(2)	(3)	(4)
Agrotóxicos	0.00125*** (0.000364)	0.000988** (0.000473)	-0.00856** (0.00413)	-0.0109 (0.00878)
<i>Endog</i>	- -	- -	0.00975** (0.00411)	0.0118 (0.00874)
Controles	Não	Sim	Não	Sim
Efeitos fixos municípios	Sim	Sim	Sim	Sim
Efeitos fixos ano	Sim	Sim	Sim	Sim
Efeitos fixos Estado-ano	Sim	Sim	Sim	Sim
Observações	2,958	2,948	2,958	2,948
Nr. Municípios	1,479	1,474	1,479	1,474

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: Erros-padrão *bootstrap* com 50 repetições entre parênteses. Significância: *** p<0,01; ** p<0,05; * p<0,1. Em todas as regressões, a variável dependente e o número de registros de pessoas intoxicadas intencionalmente por 100 mil habitantes.

2.5.3. Efeitos da intensidade no uso de agrotóxicos sobre a taxa de mortalidade por intoxicações

Esta seção apresenta os resultados do efeito da intensidade do uso de agrotóxicos sobre a taxa de mortalidade decorrente da intoxicação por esses compostos químicos no Brasil. É importante dizer que, assim como nos casos das intoxicações, grande parte dos óbitos por agrotóxicos é resultante de tentativas de suicídio. Das 3.491 mortes por

²⁰ Como mencionado, os sintomas agudos aparecem até 24 horas após a exposição ao agroquímico.

intoxicações por agrotóxicos entre 2006 e 2017, 3.039 são suicídios (SINAN, s.d.). Considerando o objetivo desta pesquisa e os inúmeros fatores que podem influenciar o comportamento individual e, conseqüentemente, o suicídio, analisam-se apenas os óbitos por intoxicações por agrotóxicos não intencionais²¹.

É importante salientar que, diante do número restrito de registros de óbitos por intoxicações não intencionais, utilizou-se o método de mínimos quadrados ordinários (MQO) e de mínimos quadrados de dois estágios (MQ2E) para avaliar o efeito da intensidade do uso de agrotóxicos sobre a mortalidade por intoxicações. Isso porque o modelo de Poisson com efeitos fixos, que considera apenas os municípios onde houve registro em ao menos um dos anos analisados nas estimativas, não converge. Ressalta-se, em relação ao modelo de Poisson, que os métodos MQO e MQ2E são menos eficientes, mas permanecem consistentes (CAMERON e TRIVEDI, 2005).

A Tabela 5, então, apresenta os resultados obtidos por meio do MQO e MQ2E. Analogamente ao apresentado na seção anterior, nas três primeiras especificações (colunas 1, 2 e 3), a estratégia de variáveis instrumentais não foi utilizada e, nas especificações (4), (5) e (6), a média e o desvio padrão da temperatura foram utilizadas como instrumentos. Para cada especificação, os resultados foram apresentados sem controles (colunas 1 e 4) e incluindo um conjunto de características socioeconômicas e agrícolas dos municípios como controles (colunas 2, 3, 5 e 6). Todas as especificações incluem efeitos fixos de municípios, de ano e de Estado-ano.

Considerando que uma das causas do óbito por intoxicações pode ser o atendimento médico inadequado, nesta análise foi incluída uma variável binária referente à presença de hospitais no município como controle (colunas 3 e 6). Como os resultados foram muito similares, a especificação (5) foi mantida como referência.

Diferentemente do caso das intoxicações por agrotóxicos, no caso dos óbitos os coeficientes estimados dos modelos sem VI apresentaram sinal negativo, sugerindo que a correlação entre intensidade no uso de agrotóxicos e óbitos por intoxicações é inversa. No entanto, nos modelos com VI a correlação é positiva. Ressalta-se que, além da pequena magnitude, o coeficiente de nenhuma das especificações apresentou significância estatística. Isso pode ser consequência do número restrito de municípios que tiveram registro de óbitos não intencionais por agrotóxicos no período analisado. Apenas 78 municípios tiveram registros em 2006 e/ou 2017.

²¹ Assume-se como não intencionais os casos que não foram resultantes de tentativa de suicídio.

Tabela 5 – Estimativas dos efeitos da intensidade no uso de agrotóxicos sobre a taxa de mortalidade por agrotóxicos no Brasil (2006 e 2017)

	Sem variáveis instrumentais (MQO)			Com variáveis instrumentais (MQ2E)		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Agrotóxicos	-1.43e-05 (7.18e-05)	-7.76e-06 (7.97e-05)	-7.84e-06 (7.97e-05)	0.000471 (0.000794)	0.000652 (0.000857)	0.000647 (0.000848)
Controles	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Variável hospital	Não	Não	Sim	Não	Não	Sim
Efeitos fixos município	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Efeitos fixos ano	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Efeitos fixos Estado-ano	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Observações	10,006	9,955	9,955	10,001	9,950	9,950
R ²	0.003	0.004	0.004	-	-	-
Nr. Municípios	5,328	5,325	5,325	5,325	5,322	5,322

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: Erros-padrão robustos entre parênteses. Significância: *** p<0,01; ** p<0,05; * p<0,1. Em todas as regressões, a variável dependente e o número de óbitos por intoxicações não intencionais por 100 mil habitantes.

Para verificar possíveis efeitos heterogêneos da intensidade do uso de pesticidas sobre o número de óbitos por 100 mil habitantes, na Tabela 6, é possível observar os resultados obtidos ao discriminar os municípios segundo a presença ou não de unidades de vigilância em saúde e o tipo de município (urbano ou rural)²².

Tabela 6 – Efeitos da intensidade do uso de agrotóxicos sobre os óbitos por intoxicações por tipo de município (urbano e rural) e presença de unidades de vigilância de saúde

	Urbano		Rural		Sem Vigilância de Saúde		Com Vigilância de Saúde	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Painel A: Sem VI								
Agrotóxicos	-2.77e-05 (4.19e-05)	-2.93e-05 (4.24e-05)	-8.63e-06 (0.000143)	3.24e-06 (0.000158)	-4.27e-05 (0.000135)	-1.70e-05 (0.000148)	0.000176 (0.000144)	0.000200 (0.000161)
Painel B: Com VI								
Agrotóxicos	6.94e-05 (0.000239)	9.57e-05 (0.000226)	0.000460 (0.00111)	0.000709 (0.00118)	0.00109 (0.00128)	0.00159 (0.00154)	0.000250 (0.000186)	0.000546 (0.000379)
Controles	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim
Efeitos fixos de Município	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Efeitos fixos de ano	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Efeitos fixos de Estado-ano	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Observações	3,932	3,928	6,074	6,027	6,921	6,873	3,085	3,082
R ²	0.005	0.009	0.005	0.005	0.005	0.006	0.069	0.079
Nr. Municípios	2,092	2,092	3,236	3,233	4,450	4,446	2,457	2,454

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: Erros-padrão robustos entre parênteses. Significância: *** p<0,01; ** p<0,05; * p<0,1. Em todas as regressões, a variável dependente é o número de óbitos por intoxicações não intencionais por 100 mil habitantes. O valor do R² referem-se aos modelos sem variáveis instrumentais.

²² Essa especificação foi baseada na “Classificação e caracterização dos espaços rurais e urbanos do Brasil: Uma primeira aproximação”, publicado pelo IBGE em 2017, em que os municípios são classificados em urbano, intermediário adjacente, intermediário remoto, rural adjacente e rural remoto (IBGE, 2017a). Nesta pesquisa, foram considerados municípios rurais aqueles classificados como rural adjacente ou rural remoto.

Note que o município ser predominantemente rural ou urbano ou a presença de unidades de vigilância em saúde no município não interferem nos efeitos dos agrotóxicos sobre os óbitos por intoxicações não intencionais apresentados na Tabela 5. Todos os coeficientes estimados permanecem sem significância estatística.

Como mencionado, o número de óbitos por intoxicações registrados no Brasil é pouco expressivo. Em 2006 e 2017, foram notificados, respectivamente, 24 e 54 óbitos por intoxicação por agrotóxicos não intencional no país. Quando se considera os suicídios, os registros aumentam, passando para 174 (0,10 mortes/100mil hab.) em 2006 e 342 (0,16 mortes/100mil hab.) em 2017 (SINAN, s.d.).

Assim como foi feito com os casos de intoxicações, foram estimados modelos em que a variável dependente passa a ser o número de óbitos por intoxicações intencionais (suicídios) por 100 mil habitantes. Como apresentado na Tabela 7, a não significância estatística permanece, indicando que não há outros mecanismos que poderiam estar interferindo na relação de interesse.

Tabela 7 – Estimativas dos efeitos da intensidade no uso de agrotóxicos sobre a taxa de mortalidade intencional (suicídio) por agrotóxicos no Brasil

	Sem variáveis instrumentais (MQO)			Com variáveis instrumentais (MQ2E)		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Agrotóxicos	0.000223 (0.000266)	0.000247 (0.000278)	0.000248 (0.000278)	-0.000958 (0.00120)	-0.00119 (0.00127)	-0.00112 (0.00127)
Controles	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Variável hospital	Não	Não	Sim	Não	Não	Sim
Efeitos fixos município	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Efeitos fixos ano	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Efeitos fixos Estado-ano	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Observações	10,006	9,955	9,955	10,001	9,950	9,950
R ²	0.009	0.010	0.011	-	-	-
Nr. Municípios	5,328	5,325	5,325	5,325	5,322	5,322

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: Erros-padrão robustos entre parênteses. Significância: *** p<0,01; ** p<0,05; * p<0,1. Em todas as regressões, a variável dependente é o número de óbitos por intoxicações intencionais por 100 mil habitantes.

De maneira geral, observa-se que a intensidade do uso de agrotóxicos não apresentou efeito estatisticamente significativo sobre a taxa de mortalidade por intoxicações. Vale lembrar que os óbitos aqui analisados referem-se apenas aos provenientes de intoxicações agudas, isto é, aquelas cujos sintomas são apresentados em até 24 horas da exposição ao composto químico. No entanto, há efeitos crônicos associados à exposição contínua aos agrotóxicos, como os apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Classificação e efeitos e/ou sintomas agudos e crônicos dos agrotóxicos

Classe	Grupo Químico	Exemplos (produtos/substâncias/agentes)	Sintomas de intoxicação aguda	Sintomas de intoxicação crônica
Inseticidas	Organofosforados e carbamatos	Acefato ¹ , Malation, Palation	Fraqueza, cólicas, abdominais, vômitos, espasmos musculares, e convulsões	Efeitos neurotóxicos retardados, alterações cromossômicas e dermatites de contato
	Organoclorados	Aldrin*, DDT*, BHC*	Náuseas, vômitos, contrações musculares involuntárias	Lesões hepáticas, arritmias cardíacas, lesões renais e neuropatias periféricas
	Piretróides sintéticos	Deltametrina, Permetrina	Irritações das conjuntivas, espirros, excitação, convulsões	Alergias, asma brônquica, irritações nas mucosas, hipersensibilidade
Fungicidas	Ditiocarbamatos	Mancozebe ² , Tiram, Metiram	Tonteiras, vômitos, tremores musculares, dor de cabeça	Alergias respiratórias, dermatites, doença de Parkinson, cânceres
	Fentalamidas	Captafol e Captam	-	Teratogêneses
Herbicidas	Dinitrofenóis e pentaciclorofenol	Bromofenoxim, Dinoseb, DNOC	Dificuldade respiratória, hipertemia, convulsões	Cânceres (PCP-formação de dioxinas), cloroacnes
	Fenoxiacéticos	2,4D ³ , 2,4,5T	Perda de apetite, enjoo, vômitos, fasciculação muscular	Indução da produção de enzimas hepáticas, cânceres, teratogêneses
	Dipiridilos	Diquate, Paraquate*, ⁴ , Difenzoquate	Sangramento nasal, fraqueza, desmaios, conjuntivites	Lesões hepáticas, dermatite de contato, fibrose pulmonar

Fonte: Adaptado de Peres e Moreira (2003) e Carneiro *et al.* (2015).

Nota: * Ingredientes ativos proibidos no Brasil. ¹ Quarto ingrediente ativo mais vendido no Brasil em 2017; ² terceiro ingrediente ativo mais vendidos no Brasil em 2017; ³ segundo ingrediente ativo mais vendido no Brasil em 2017; ⁴ oitavo ingrediente ativo mais vendido no Brasil em 2017 (IBAMA, 2017), ingrediente com importação, produção e comercialização proibidas no Brasil desde 22 de setembro de 2020 e utilização totalmente banida desde 01 de agosto de 2021 (ANVISA, 2021).

Diante disso, os resultados devem ser analisados com cautela. Alguns estudos têm demonstrado relação entre o uso de agrotóxicos e a maior taxa de mortalidade por Parkinson (RITZ e YU, 2000; MEDEIROS *et al.*, 2020); por doenças cardiovasculares (BAO *et al.*, 2020); por câncer de colo (MARTIN *et al.*, 2018); por linfoma não-Hodgkin (BOCCOLINI *et al.*, 2013); por câncer infanto-juvenil (PIGNATI *et al.*, 2017).

Portanto, a intensidade do uso de pesticidas pode estar associada à mortalidade por outras doenças, sendo essencial o desenvolvimento de estratégias para que esses compostos químicos sejam utilizados de maneira mais consciente e menos nociva à saúde.

2.5.4. Discussão dos resultados

Nesta pesquisa, constatou-se que o aumento na intensidade do uso de agrotóxicos aumenta a incidência de intoxicações por agrotóxicos no Brasil, demonstrando a importância de medidas para reduzir o uso indevido desses compostos químicos. Os resultados revelam que o aumento em R\$10/ha nas despesas com agrotóxicos aumenta 13,09% na incidência de

intoxicações. Considerando que, na média, foram registrados 9,34 casos de intoxicações por 100 mil habitantes (cerca de 19.395 casos) no país em 2017²³ e que o custo médio hospitalar com intoxicação por agrotóxicos pode variar entre US\$129,00 e US\$ 740,21 (SOARES e PORTO, 2012), o aumento de 13,09% na incidência de intoxicações corresponde ao aumento de cerca de 2.539 casos de intoxicações no país e implica o aumento de até US\$ 1.879.393,19 nos custos hospitalares com essas intoxicações.

Em relação ao custo de oportunidade associado à recuperação do trabalhador intoxicado que, como mensurado por Soares e Porto (2012), varia entre US\$131,34 e US\$358,20, o aumento de 2.539 casos de intoxicação, resultante da elevação de R\$10,00/ha nas despesas com agrotóxicos, corresponde ao aumento de até US\$ 909.469,80 nos custos associados à ausência nos dias de trabalho.

Portanto, considerando as despesas hospitalares e os dias necessários para reestabelecer a saúde do trabalhador, a elevação de R\$10,00/ha nas despesas com agrotóxicos (4,64% na intensidade média do uso de agrotóxicos) pode implicar aumento de até US\$ 2.788.862,99 nos custos com a intoxicação por pesticidas.

É importante ressaltar que esses valores consideram apenas os casos de pessoas que procuraram atendimento médico (custos com remediação²⁴). Além disso, não se consideram as perdas resultantes dos casos que vieram à óbito, mas apenas a remuneração perdida pelos dias de ausência no trabalho decorrente da intoxicação²⁵. Vale ainda mencionar que foram analisadas apenas as intoxicações agudas e sabe-se que o uso de agrotóxicos está associado a doenças crônicas como alteração do funcionamento do fígado, malformação congênita, problemas respiratórios e de fertilidade (HU *et al.*, 2015; PIGNATI *et al.*, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2014; UEKER *et al.*, 2016; REGIDOR *et al.*, 2004; NEGHAH *et al.*, 2014; HOPPIN *et al.*, 2010). Em outras palavras, os valores apresentados não refletem o custo social total dos agrotóxicos, dado que não são considerados todos os efeitos dos agroquímicos sobre o bem-estar relacionado à saúde da população. Ou seja, os custos decorrentes das intoxicações por pesticidas são superiores aos aqui estimados.

Vale mencionar que esses custos não são internalizados pelos produtores, sendo impostos à sociedade. Nesse contexto, ressalta-se a importância da regulação do setor, por meio da qual é possível limitar os custos a terceiros, priorizando o bem-estar da sociedade. Segundo Maumbe e Swinton (2003), a contabilização dessas externalidades negativas

²³ A população residente estimada no Brasil neste ano foi de 207.660.929 (IBGE, 2017).

²⁴ Equivale ao termo $(\partial x_r / \partial I)$ da equação (11).

²⁵ Equivale ao termo $(\partial U / \partial s) / \lambda$ da equação (11), para os casos de intoxicação sem óbito.

possivelmente reduziria os benefícios líquidos advindos do uso de agrotóxicos e permitiria que os agricultores ficassem cientes dos riscos à saúde associados ao uso inadequado de pesticidas, os auxiliando nas decisões sobre o manejo de pragas.

Adicionalmente, o desenvolvimento de produtos mais eficazes e menos nocivos ao meio ambiente e à saúde, incluindo novas técnicas de controle fitossanitário como o manejo integrado de pragas (MIP), e avaliações contínuas dos agrotóxicos disponíveis no mercado e dos limites máximos de resíduos (LMRs) podem contribuir para mitigar os riscos à saúde relacionados ao uso de agrotóxicos.

Ressalta-se que, no Brasil, a nocividade da maioria dos novos produtos liberados entre 2005 e 2019 é semelhante ou superior aos já existentes no mercado. Dos 493 novos agrotóxicos registrados em 2020, apenas 30% dos produtos formulados são de baixa toxicidade²⁶ (MAPA, 2021), demonstrando o baixo incentivo ao desenvolvimento de produtos mais eficientes e menos nocivos à saúde, o que tende agravar os problemas relacionados ao seu uso.

Além disso, observa-se a liberação de produtos proibidos em outros países. Friedrich *et al.* (2021) revelam que, de 399 ingredientes ativos de agrotóxicos agrícolas registrados no Brasil, 41,6% não têm autorização na Comunidade Europeia e 25,6% não são autorizados nos Estados Unidos. Ressalta-se ainda que, entre 2015 e 2017, o país aumentou o número de registros de agrotóxicos proibidos na União Europeia para as culturas de soja, milho e cana-de-açúcar, por exemplo²⁷ (BOMBARDI, 2017). Ressalta-se que a participação dessas culturas no total da venda de agrotóxicos em 2016 foi de 76% (MORAES, 2019).

Outra questão relevante trata-se da validade dos registros dos agrotóxicos. Enquanto na União Europeia e nos EUA o registro tem prazo de 10 e 15 anos, respectivamente, no Brasil, esse prazo é indeterminado (PELAEZ *et al.*, 2015; PELAEZ, SILVA e BORGES, 2013). Nesse contexto, diante dos avanços da tecnologia e de pesquisas científicas, avaliações periódicas dos agroquímicos tornam-se necessárias para acompanhar os riscos toxicológicos dos produtos registrados, identificando a necessidade de revisar as condições de uso ou mesmo proibir sua utilização (BOMBARDI, 2017; DIAS, ROCHA e SOARES, 2020).

²⁶ Os produtos formulados de baixo risco são os produtos biológico, microbiológico, bioquímico, extrato vegetal, regulador de crescimento ou semioquímico para agricultura orgânica ou com classificações classe IV - Produto Pouco Perigoso ao Meio Ambiente, conforme avaliação do IBAMA, e Categoria 5 - Produto Improvável de Causar Dano Agudo ou Não classificado - Produto não classificado, pela ANVISA (MAPA, 2021).

²⁷ Em 2015, foram autorizados, respectivamente, 20, 26 e 26 agrotóxicos para as culturas de cana-de-açúcar, milho e soja proibidos na União Europeia. Em 2017, esses valores passaram para, nessa ordem, 25, 32 e 35 (BOMBARDI, 2017).

Como exemplo, pode-se citar o glifosato, ingrediente ativo mais utilizado no mundo. Estudos têm demonstrado seus impactos na saúde humana, como na taxa de mortalidade infantil (DIAS, ROCHA e SOARES, 2020) e no desenvolvimento de câncer de mama (FRANKE et al., 2021). Esse ingrediente ativo é classificado como provavelmente carcinogênico para humanos pela *International Agency for Research on Cancer* (IARC) (INCA, 2019). No Brasil, ele é classificado como pouco tóxico pela Anvisa²⁸ (INCA, 2019) e permanece sendo utilizado de forma generalizada pelos produtores²⁹.

Outra questão regulatória que deve ser considerada são os limites máximos de resíduos (LMRs) estabelecidos no país. Ao comparar esses limites com os de outros países, como os da União Europeia, observa-se que os valores estabelecidos no Brasil de alguns ingredientes ativos para determinadas culturas³⁰ e para água potável³¹ são significativamente superiores aos limites estabelecidos na União Europeia (BOMBARDI, 2017). Restrições em relação aos LMRs atingem toda a população e podem contribuir para reduzir a intensidade do uso de agroquímicos e, por conseguinte, as intoxicações. Handford, Elliott e Campbell (2015) e Li (2018) demonstram que a unificação dos LMRs entre as nações pode diminuir a exposição aos pesticidas e controlar os riscos à saúde humana.

Todas essas questões regulatórias contribuem para que a população brasileira esteja mais exposta aos agrotóxicos e, conseqüentemente, mais vulnerável aos riscos associados ao seu uso. Isso porque essa permissibilidade favorece a intensificação do uso de agroquímicos e, como apresentado nesta pesquisa, quanto mais intensiva sua utilização, maior o número de intoxicações (Tabela 2).

Os resultados ainda revelam que a presença de unidades de vigilância em saúde nos municípios faz com que o efeito da intensidade do uso de agrotóxicos sobre as intoxicações deixe de ser significativo (Tabela 3), revelando a importância dessas unidades para mitigar os riscos à saúde relacionados ao uso de agrotóxicos. Vale mencionar que um dos objetivos da Secretaria de Vigilância em Saúde é detectar fatores que interfiram na saúde humana e

²⁸ O glifosato estava em reavaliação no Brasil desde 2008 e, em 2020, seu registro foi mantido com restrições. Para mais detalhes ver a Resolução de Diretoria Colegiada (RDC) nº 441, de 02 de dezembro de 2020, disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-rdc-n-441-de-2-de-dezembro-de-2020-293190758>.

²⁹ Em 2020, foram vendidas 246.017,51 toneladas de glifosato no Brasil (IBAMA, 2021).

³⁰ Destaca-se o caso da malationa para as culturas de brócolis e feijão e do glifosato, o agrotóxico mais vendido no Brasil, para soja, cujos LMR's permitidos no Brasil são mais de 100 vezes superiores aos valores permitidos na União Europeia (BOMBARDI, 2017).

³¹ Em relação à água potável, os valores são ainda maiores, chegando a ser 5.000 vezes maior no Brasil que na União Europeia no caso do glifosato. Para o acefato (proibido na União Europeia desde 2003) e malationa não existe limite estabelecido no Brasil para água potável (BOMBARDI, 2017).

identificar medidas de prevenção e controle dos fatores de risco ambientais relacionados a doenças e agravos à saúde (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2017).

Ademais, a Vigilância em Saúde de Populações Expostas a Agrotóxicos (VSPEA), cujo objetivo é a promoção da qualidade de vida, reduzindo, controlando ou eliminando a vulnerabilidade de populações expostas ou potencialmente expostas aos agrotóxicos por meio de medidas de prevenção, promoção, vigilância e atenção integral à saúde, integra as unidades de vigilância em saúde (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2017). Sendo assim, a expansão dessas unidades pode contribuir para atenuar os riscos das populações expostas aos agrotóxicos, reduzindo suas externalidades negativas.

Por fim, é importante ressaltar a vulnerabilidade da população rural. Constatou-se que os efeitos da intensidade do uso de pesticidas são significativos nos municípios rurais (Tabela 3). Assim, é preciso direcionar políticas públicas que visem atenuar os riscos dos agrotóxicos à saúde nesses municípios. Considerando que a agropecuária é predominante nos municípios rurais (ENDLICH, 2010) e que os produtores fazem parte do grupo de risco por terem contato direto com os pesticidas (LONDRES, 2012), programas que incentivem o uso de equipamentos de proteção individual (EPIs) podem colaborar para redução das intoxicações ao reduzir a exposição dos agricultores a esses compostos químicos.

Ressalta-se que a utilização de EPIs é pouco expressiva no Brasil. De acordo com os dados do Censo Agropecuário de 2006³², apenas 21,24% dos estabelecimentos agropecuários brasileiros utilizaram equipamentos de proteção individual³³. Santos et al. (2017); Monquero, Inácio e Silva (2009) e Soares, Freitas e Coutinho (2005) demonstram que a ausência ou uso incompleto de EPIs são fatores de risco de intoxicação dos agricultores. Isso posto, ratifica-se a importância da formulação e implementação de políticas que visem estimular o uso desses equipamentos.

Simultaneamente ao desenvolvimento dessas políticas, programas de conscientização devem ser implementados. Isso porque, para proteção efetiva dos agricultores, é preciso que os EPIs sejam utilizados de forma adequada, visto que seu manuseio e uso incorretos podem potencializar os riscos de intoxicação (VEIGA *et al.*, 2007).

Além disso, é necessário o desenvolvimento de equipamentos adaptados para o clima brasileiro e para as especificidades da atividade agrícola nacional. Estudos revelam que uma das principais justificativas dadas pelos agricultores para não utilizar equipamentos de

³² O Censo Agropecuário de 2017 não apresenta informações sobre o uso de equipamentos de proteção individual.

³³ Utilizaram qualquer tipo de proteção (chapéu ou capuz, óculos ou protetor facial, máscara, macacão, avental ou capa, luvas, botas, trator ou veículo utilizado com cabine protetora).

proteção é o desconforto dos EPIs que, além de serem quentes, dificultam a respiração e a mobilidade (PETARLI *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2017).

Nesse ínterim, vale ressaltar que, embora possa haver resistência de alguns produtores em relação ao uso desses equipamentos, seu uso é obrigatório, conforme regulamentado pelas Normas Regulamentadoras n^{os} 6 e 31 (NR-6 e NR-31)³⁴. Adicionalmente, de acordo com o art.14 da Lei 7.802/89, o empregador que não fornecer e não fizer a manutenção dos equipamentos de proteção à saúde dos trabalhadores ou dos equipamentos de aplicação dos produtos é responsável administrativa, civil e penalmente pelos danos causados à saúde e ao meio ambiente pelo uso e manuseio inadequados do composto químico. Em linha com a regulamentação vigente, os resultados apresentados na Tabela B.2 do Apêndice B³⁵ ratificam a importância do uso desses equipamentos como forma de mitigação dos riscos associados ao uso de agrotóxicos.

Diante do exposto, o investimento em pesquisas, o desenvolvimento de programas de conscientização dos agricultores a fim de incentivar o uso de EPIs, assim como a implementação de políticas que visem à expansão das unidades de vigilância em saúde nos municípios podem contribuir para redução dos impactos negativos do uso de pesticidas na saúde da população. Considerando que a aplicação dos agrotóxicos está sujeita à regulamentação nacional (FANTKE, FRIEDRICH e JOLLIET, 2012), para que as políticas sejam eficazes, é primordial que a regulamentação esteja alinhada com os objetivos das políticas, ou seja, vise ao desenvolvimento sustentável do setor agrícola.

Nesse ínterim, um dos principais desafios no Brasil refere-se aos aspectos regulatórios. Além do aumento expressivo de liberações de pesticidas e de outros fatores já discutidos, o projeto de Lei 6.299/02 foi aprovado pela Câmara dos Deputados em 09 de fevereiro de 2022. Esse projeto modifica a Lei 7.802/89, também conhecida como Lei dos Agrotóxicos.

³⁴ A NR-6 – Equipamentos de proteção individual (EPIs) estabelece os requisitos para aprovação, comercialização, fornecimento e utilização de equipamentos de proteção individual. A NR-31 – Segurança e saúde no trabalho na agricultura, pecuária, silvicultura, exploração florestal e aquicultura estabelece os preceitos a serem observados na organização e no ambiente de trabalho rural, de forma a tornar compatível o planejamento e o desenvolvimento das atividades do setor com a prevenção de acidentes e doenças relacionadas ao trabalho rural. Mais especificamente, o item 31.7 refere-se aos agrotóxicos, aditivos, adjuvantes e produtos afins. Para mais detalhes, ver <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-06-atualizada-2022.pdf> e <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-31-atualizada-2022-retif.pdf>.

³⁵ Esses resultados referem-se a análises *cross-section*, dado que apenas o Censo Agropecuário 2006 disponibilizou a informação sobre o uso de EPIs. Os resultados ainda revelam que a inclusão do uso de EPIs como controle praticamente não interferiu nas estatísticas pontuais, contribuindo para validação dos instrumentos utilizados.

Uma das mudanças refere-se à centralização de competências de registro, normatização e reavaliação de agrotóxicos no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), destituindo o sistema de regulação tríplice vigente no Brasil, em que, para o registro de um novo agrotóxico, juntamente com a aprovação do MAPA, é necessária aprovação da Anvisa (Ministério da Saúde) e do Ibama (Ministério do Meio Ambiente), que são os órgãos responsáveis pelas avaliações de segurança à saúde (classificação toxicológica) e de risco ambiental (classificação de periculosidade ambiental), respectivamente. Com a aprovação desse projeto de Lei o poder decisório passa para o MAPA e a Anvisa e o Ibama passam a ser órgãos consultivos.

Outro ponto que pode ter impacto significativo na saúde da população é a proposta de avaliação de risco para o registro de agrotóxicos e afins. Enquanto a Lei 7.802/89 proíbe a liberação e o registro de pesticidas que tenham características teratogênicas, carcinogênicas ou mutagênicas ou que provoquem distúrbios hormonais; o projeto de Lei 6.299/02, nesses casos, obriga a realização de análise de riscos e proíbe o registro desses agrotóxicos apenas se, nas condições recomendadas de uso, o risco for inaceitável para os seres humanos ou para o meio ambiente (ANVISA, 2018). Em outras palavras, o projeto de lei permite a concessão desses ingredientes ativos desde que o risco seja “aceitável”.

De maneira geral, a aprovação do projeto de Lei 6.299/02 pela Câmara dos Deputados sugere que a produtividade está sendo priorizada em detrimento dos riscos à saúde e ao meio ambiente. Conforme apresentado nesta pesquisa, os danos à saúde associados ao uso de agrotóxicos são significativos. Tornar a legislação mais flexiva pode potencializá-los. Os resultados aqui apresentados podem contribuir para o debate de um tema de grande relevância para a sociedade brasileira.

2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil está entre os maiores consumidores mundiais de agrotóxicos. Além disso, observa-se aumento expressivo no ritmo de liberação de agroquímicos no país, o que pode contribuir para intensificação no uso deste insumo agrícola. Vale ressaltar que, embora a utilização de pesticidas esteja relacionada a aumentos na produtividade, seu uso excessivo e inadequado está associado a externalidades negativas, como os danos à saúde.

Nesse contexto, esta pesquisa analisou os efeitos da intensidade no uso de agrotóxicos sobre a incidência de intoxicações e a taxa de mortalidade por agrotóxicos no país. Os resultados revelaram que a intensidade no uso de agrotóxicos e os casos de intoxicação por

100 mil habitantes estão correlacionados e que, na média, o aumento de R\$10,00/ha nas despesas com agrotóxicos resulta no aumento de, aproximadamente, 13,09% nos casos de intoxicação. Esse percentual aumenta para 16,74% nos municípios rurais e para 22,76% nos municípios sem unidades de vigilância em saúde.

Com relação à taxa de mortalidade, os resultados não apresentaram significância estatística. Ainda assim, é importante considerar que há efeitos crônicos associados à intensidade do uso de pesticidas, o que pode contribuir para mortes por outras doenças.

Diante disso, ressalta-se a importância da formulação de políticas que visem ao controle e direcionamento da utilização deste insumo de forma consciente e eficaz. Programas que incentivem a utilização de EPIs, assim como a expansão das unidades de vigilância em saúde nos municípios, podem ser estratégias eficazes para atenuar os riscos à saúde associados ao uso de agrotóxicos. Ao mesmo tempo, a regulamentação do mercado de agrotóxicos, de forma que produtos com maior eficácia e menor toxicidade sejam disponibilizados, é essencial para o desenvolvimento sustentável do setor agrícola brasileiro.

Nesse ínterim, os resultados apontam para necessidade de uma revisão da regulamentação vigente sobre agrotóxicos no país. Os custos sociais apresentados tornam essa discussão primordial. Vale mencionar que esses efeitos podem ser ainda mais significativos no longo prazo, dado que a saúde é um dos fatores do capital humano, essencial para o desenvolvimento econômico do país.

Uma das limitações deste estudo refere-se à falta de dados sobre a quantidade utilizada de agrotóxicos por cultura, o tipo (herbicidas, fungicidas, inseticidas) e o ingrediente ativo dos pesticidas utilizados, informações relevantes para avaliar o impacto dos agrotóxicos na saúde. Além disso, deve-se considerar o problema de subnotificação dos registros de intoxicações por agrotóxicos.

Mesmo diante dessas limitações, os resultados contribuem para discussão de um tema relevante, trazendo informações úteis para os *policy makers*, auxiliando no desenvolvimento de políticas e estratégias que visem ao desenvolvimento sustentável do setor agrícola brasileiro, melhorando a qualidade de vida de toda a população, dos trabalhadores rurais aos consumidores de seus produtos.

REFERÊNCIAS

ANGELOTTI, F.; GHINI, R.; BETTIOL, W. (2017). **Como o aumento da temperatura interfere nas doenças de plantas?** In: Bettiol, W.; Hamada, E.; Angelotti, F.; Auad, A. M.; Ghini, R. (Ed.). Aquecimento global e problemas fitossanitários. Brasília, Embrapa, p. 116-146, 2017.

ANGRIST J. D.; J. S. PISCHKE. **Mostly harmless econometrics**: An empiricist's companion. Massachusetts Institute of Technology e The London school of Economics, n. March, p. 290, 2008.

ANVISA – AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Programa de Análise de Resíduos de Agrotóxicos em Alimentos – PARA. **Relatório das amostras analisadas no período de 2017-2018**, 2019. Disponível em: http://portal.anvisa.gov.br/documents/111215/0/Relat%C3%B3rio+%E2%80%93+PARA+2017-2018_Final.pdf/e1d0c988-1e69-4054-9a31-70355109acc9. Acesso em: 30 de julho de 2020.

ANVISA – AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Legislação**, 2021. Disponível em: <<http://antigo.anvisa.gov.br/legislacao#/visualizar/357436>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2021.

ANVISA – AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Nota técnica da Dicoi**, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/noticias-anvisa/2018/agrotoxicos-anvisa-e-contraria-ao-pl-6299-02/sei-_anvisa-0202694-nota-tecnica-da-dicol-_.pdf>. Acesso em: 20 de janeiro de 2022.

BAGHERI, A.; BONDORI, A.; ALLAHYARI, M. S.; DAMALAS, C. A. Modeling farmers' intention to use pesticides: An expanded version of the theory of planned behavior. **Journal of Environmental Management**, v. 248, 2019.

BANJO, A.D.; AINA, S.A.; RIJE, O.I. Farmers' knowledge and perception towards herbicides and pesticides usage in Fadama area of Okun-Owa, Ogun State of Nigeria. **African Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 2, n.5-6, p. 188–194, 2010.

BAO, W.; LIU, B.; SIMONSEN, D. W.; LEHMLER, H. J. Association between exposure to pyrethroid insecticides and risk of all-cause and cause-specific mortality in the general US adult population. **JAMA Internal Medicine**, v. 180, n. 3, p. 367-374, 2020.

BEARD, J. DDT and human health. **Science of the Total Environment**, v. 355, p. 78-89, 2006.

BOCCOLINI, P. M. M.; BOCCOLINI, C. S.; CHRISMAN, J. R.; MARKOWITZ, S. B.; KOIFMAN, S.; KOIFMAN, R. J.; MEYER, A. Pesticide use and non-Hodgkin's lymphoma mortality in Brazil. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 216, p. 461-466, 2013.

BOMBARDI, L. M. **Geografia do uso de agrotóxicos no Brasil e conexões com a União Europeia**. FFLCH – USP São Paulo, 2017.

BRASIL. Lei nº 7.802, de 11 de julho de 1989. Dispõe sobre a pesquisa, a experimentação, a produção, a embalagem e rotulagem, o transporte, o armazenamento, a comercialização, a propaganda comercial, a utilização, a importação, a exportação, o destino final dos resíduos e embalagens, o registro, a classificação, o controle, a inspeção e a fiscalização de agrotóxicos, seus componentes e afins, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l7802.htm>. Acesso em: 10 de março de 2020.

BRASIL. Projeto de Lei nº 6.299, de 2002. Altera os arts 3º e 9º da Lei nº 7.802, de 11 de julho de 1989, que dispõe sobre a pesquisa, a experimentação, a produção, a embalagem e rotulagem, o transporte, o armazenamento, a comercialização, a propaganda comercial, a utilização, a importação, a exportação, o destino final dos resíduos e embalagens, o registro, a classificação, o controle, a inspeção e a fiscalização de agrotóxicos, seus componentes e afins, e dá outras providências. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=1669849>. Acesso em: 10 de março de 2020.

CAMERON, A. C.; TRIVEDI, P. K. **Microeconometrics**: methods and applications. New York: Cambridge University Press, 2005.

CARNEIRO, F. F.; RIGOTTO, R. M.; AUGUSTO, L. G. S.; FRIEDRICH, K.; BÚRIGO, A. C., organizadores. **Dossiê Abrasco**: um alerta sobre os impactos dos agrotóxicos na saúde. Rio de Janeiro: EPSJV, São Paulo: Expressão Popular, 2015.

CARSON, R. **Silent Spring**. Boston: Cambridge, Mass.: Houghton Mifflin, 1962.

CHANDRASEKARA, A.I.; WETTASINGHE, A.; AMARASIRI, S.L. Pesticide usage by vegetable farmers. **Paper presented at Annual Research Conference ISTI**, Gannoruwa, Sri Lanka, 1985.

CHEN, C.C.; McCARL, B.A. An investigation of the relationship between pesticide usage and climate change. **Climatic Change**, v. 50, p. 475–487, 2001.

CIRILLO, P. M.; LA MERRILL, M. A.; KRIGBAUM, N. Y.; COHN, B. A. Grandmaternal Perinatal Serum DDT in Relation to Granddaughter Early Menarche and Adult Obesity: Three Generations in the Child Health and Development Studies Cohort. **Cancer Epidemiol Biomarkers Prev**, v. 30, n. 8, p. 1480-1488, 2021. **Doi: 10.1158/1055-9965**.

CUNHA, B.A.; NEGREIROS, M.M.; ALVES, K.A; TORRES, J.P. Influência da época de semeadura na severidade de doenças foliares e na produtividade do milho safrinha. **Summa Phytopathologica**, v.45, n.4, p.424-427, 2019.

CUNHA, L. N.; SOARES, W. L. Os incentivos fiscais aos agrotóxicos como política contrária à saúde e ao meio ambiente. **Caderno de Saúde Pública**, v.36, n.10, p.1-15, 2020.

DASGUPTA, S.; MAMINGI, N.; MEISNER, C. Pesticide use in Brazil in the era of agroindustrialization and globalization. **Environment and Development Economics**, v. 6, p. 459-482, 2001.

DATASUS – DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA DO SUS. **Intoxicação por agrotóxicos** – Notificações registradas no Sistema de Informação de Agravos de Notificação – SINAN – 2001 a 2006. Disponível em: <<http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/deftohtm.exe?sinanwin/cnv/agrobr.def>>. Acesso em: 28 de dezembro de 2020.

DATASUS – DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA DO SUS. **Intoxicação exógena** – Notificações registradas no Sistema de Informação de Agravos de Notificação – SINAN –

2007 a 2017. Disponível em: <<http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/deftohtm.exe?sinannet/cnv/Intoxbr.def>>. Acesso em: 28 de dezembro de 2020.

DELCOUR, I.; SPANOGHE, P.; UYTENDAELE, M. Literature review: Impact of climate change on pesticide use. **Food Research International**, v. 68, p. 7-15, 2015.

DESCHÊNES, O.; GREENSTONE, M. Climate change, mortality, and adaptation: evidence from annual fluctuations in weather in the US. **American Economic Journal: Applied Economics**, v. 3, n. 4, p. 152-185, 2011.

DIAS, M.; ROCHA, R.; SOARES, R. R. **Down the River: Glyphosate Use in Agriculture and Birth Outcomes of Surrounding Populations**, 2020. Disponível em: <<https://www.insper.edu.br/wp-content/uploads/2021/04/Dias-Rocha-Soares-2020.12.30.pdf>>. Acesso em: 12 de março de 2021.

ENDLICH, A. M. **Perspectivas sobre o urbano e o rural**. In: SPOSITO, M. E. B.; WHITACKER, A. M. (Org.). Cidade e campo: relações e contradições entre urbano e rural. 2. Ed. São Paulo: Expressão Popular, 2010. P. 11-31. (Geografia em movimento).

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **DDT – A Brief History and Status**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/ddt-brief-history-and-status>>. Acesso em: 12 de junho de 2021.

FANTKE, P.; FRIEDRICH, R.; JOLLIET, O. Health impact and damage cost assessment of pesticides in Europe. **Environment International**, v. 49, p. 9-17, 2012.

FEDER, G.; JUST, R.; ZILBERMAN, D. Adoption of Agricultural Innovations in Developing Countries: A Survey. **Economic Development and Cultural Change**, v. 33, p. 255-298, 1985.

FRANKE, A. A.; LI, X.; SHVETSOV, Y. B.; LAI, J. F. Pilot study on the urinary excretion of the glyphosate metabolite amino methylphosphonic acid and breast cancer risk: The Multiethnic Cohort study. *Environmental Pollution*, v. 277, 2021.

FRIEDRICH, K.; SILVEIRA, G. R.; AMAZONAS, J. C.; GURGEL, A. M.; ALMEIDA, V. E. S.; SARPA, M. Situação regulatória internacional de agrotóxicos com uso autorizado no Brasil: potencial de danos sobre a saúde e impactos ambientais. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 37, n. 4, 2021.

GHINI, R. **Mudanças climáticas globais e doenças de plantas**. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2005.

GROSSMAN, M. The human capital model. In: CULYER, A. J.; NEWHOUSE, J. P. **Handbook of health economics**. Amsterdam: North-Holland, 2000. V. 1A.

HANDFORD, C. E.; ELLIOTT, C. T.; CAMPBELL, K. **A review of the global pesticide legislation and the scale of challenge in reaching the global harmonization of food safety standards**. *Integrated Environmental Assessment and Management*, v.11, n.4, p. 525-536, 2015. Doi: 10.1002/ieam.1635.

HARRINGTON, W.; PORTNEY, P. R. Valuing the benefits of health and safety regulation. **Journal of Urban Economics**, v. 22, p. 101-112, 1987.

HAWKINS, N. J.; BASS, C.; DIXON, A.; NEVE, P. The evolutionary origins of pesticide resistance. **Biological Reviews**, v. 94, p. 135-155, 2019.

HOPPIN, J. A.; VALCIN, M.; HENNEBERGER, P. K.; KULLMAN, G. J.; UMBACH, D. M.; LONDON, S. J.; ALAVANJA, M. C. R.; SANDLER, D. P. Pesticide use and chronic bronchitis among farmers in the agricultural health study. **American Journal of Industrial Medicine**, v. 50, n. 12, p. 969-979, 2010.

HOU, L.; LIU, P.; HUANG, J.; DENG, X. The influence of risk preferences, knowledge, land consolidation, and landscape diversification on pesticide use. **Agricultural Economics**, n. 52, p. 759-775, 2020.

HU R.; HUANG X.; HUANG J.; LI Y.; ZHANG C.; YIN Y. et al. Long- and Short-Term Health Effects of Pesticide Exposure: A Cohort Study from China. **PloS ONE**, v.10, n.6, 2015. Doi:10.1371/ journal.pone.0128766

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Boletim 2020**: Histórico de comercialização 2000-2020, 2021. Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos#boletinsanuais>>. Acesso em: 26 de abril de 2022.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Classificação e caracterização dos espaços rurais e urbanos do Brasil**: uma primeira aproximação. Rio de Janeiro: IBGE, 84p., 2017^a. Disponível em: < <https://biblioteca.ibge.gov.br/59/mu59/mu59/livros/liv100643.pdf>>. Acesso em: 12 de abril de 2022.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário de 2006**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuário/censo-agropecuário-2006/segunda-apuração>>. Acesso em: 22 de dezembro de 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário de 2017**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuário/censo-agropecuário-2017>>. Acesso em: 22 de dezembro de 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas de População – EstimaPop**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/estimapop/tabelas>>. Acesso em: 08 de janeiro de 2021.

INCA – INSTITUTO NACIONAL DO CÂNCER. **Agrotóxicos**, 2019 Disponível em: <<https://www.inca.gov.br/exposicao-no-trabalho-e-no-ambiente/agrotoxicos>>. Acesso em: 22 de dezembro de 2020.

JIN, S.; BLUEMLING, B.; MOL, A. P. J. Information, trust and pesticide overuse: Interactions between retailers and cotton farmers in China. **NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences**, v. 72-73, p. 23-32, 2015.

JONES, R. A. C. Future scenarios for plant virus pathogens as climate change progresses. **Advances in Virus Research**, v. 95, p. 87-147, 2016.

JU, H.; VAN DER VELDE, M.; LIN, E.; XIONG, W.; LI, Y. The impacts of climate change on agricultural production systems in China. **Climatic Change**, v. 120, p. 313-324, 2013. Doi:10.1007/s10584-013-0803-7

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

LI, Z. Evaluation of regulatory variation and theoretical health risk for pesticide maximum residue limits in food. **Journal of Environmental Management**, v. 219, p. 153-167, 2018.

LICHTENBERG, E.; ZILBERMAN D.; BOGEN, K. T.. Regulating Environmental Health Risks under uncertainty: Groundwater contamination in California. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 17, p. 22-34, 1989.

LIN, W.; WOOLDRIDGE, J. M. Testing and Correcting for Endogeneity in Nonlinear Unobserved Effects Models. In: **Panel Data Econometrics**. Academic Press, 2019.

LONDRES, F. **Agrotóxicos no Brasil: um guia para ação em defesa da vida**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Rede Brasileira de Justiça Ambiental; Articulação Nacional de Agroecologia, 2012.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Informações técnicas**: registros concedidos 2005-2020, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/agrotoxicos/informacoes-tecnicas>>. Acesso em: 16 de janeiro de 2021.

MARTIN, F. L.; MARTINEZ, E. Z.; STOPPER, H.; GARCIA, S. B.; UYEMURA, S. A.; KANNEN, V. Increased exposure to pesticides and colon cancer: Early evidence in Brazil. **Chemosphere**, v. 209, p. 623-631, 2018.

MAUMBE, B. M.; SWINTON, S. M. Hidden health costs of pesticide use in Zimbabwe's smallholder cotton growers. **Social Science & Medicine**, v. 57, p. 1559-1571, 2003.

MEDEIROS, M. S.; REDDY, S. P.; SOCAL, M. P.; SCHUMACHER-SCHUH, A. F.; RIEDER, C. R. M. Occupational pesticide exposure and the risk of death in patients with Parkinson's disease: an observational study in southern Brazil. **Environmental Health**, v. 19, n. 68, 2020.

MELLO, C. M.; SILVA, L. F. Fatores associados à intoxicação por agrotóxicos: estudo transversal com trabalhadores da cafeicultura no sul de Minas Gerais. **Epidemiol. Serv. Saúde**, v. 22, n. 4, p. 609-62, 2013.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Diretrizes nacionais para a vigilância em saúde de populações expostas a agrotóxicos**. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <https://bvsmis.saude.gov.br/bvsmis/ma60icos/diretrizes_vigilancia_populacoes_expostas_agrotoxicos.pdf>. Acesso em: 12 de abril de 2021.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Relatório nacional de vigilância em saúde de populações expostas a agrotóxicos**. Brasília, DF, 2018.

MONQUERO, P. A.; INÁCIO, E. M.; SILVA, A. C. Levantamento de agrotóxicos e utilização de equipamento de proteção individual entre os agricultores da região de Araras. **Instituto Biológico**, v. 76, n. 1, p. 135-39, 2009.

MORAES, F. R. **Agrotóxicos no Brasil**: padrões de uso, política da regulação e prevenção da captura regulatória. Texto para discussão. IPEA: Brasília, set. 2019.

MOREIRA, J.C.; JACOB, S. C.; PERES, F.; LIMA, J. S.; MEYER, A.; OLIVEIRA-SILVA, J. J.; SARCINELLI, P. N.; BATISTA, D. F.; EGLER, M.; FARIA, M. V. C.; ARAÚJO, A. J.; KUBOTA, A. H.; SOARES, M. O.; ALVES, S. R.; MOURA, C. M.; CURI, R. Avaliação integrada do impacto do uso de agrotóxicos sobre a saúde humana em uma comunidade agrícola de Nova Friburgo, RJ. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 7, n. 2, p. 299-311, 2002.

NEGHAH, M.; MOMENBELLA-FARD, M.; NAZIAGHDAM, R.; SALAHSHOUR, N.; KAZEMI, M.; ALIPOUR, H. The effects of exposure to pesticides on the fecundity status of farm workers resident in a rural region of Fars province, southern Iran. **Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine**, v. 4, n. 4, p. 324–328, 2014.

OLIVEIRA, N. P.; MOI, G. P.; ATANAKA-SANTOS, M.; SILVA, A. M. C.; PIGNATI, W. A. Malformações congênitas em municípios de grande utilização de agrotóxicos em Mato Grosso, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 19, n. 10, p. 4123-4130, 2014.

PELAEZ, V.; SILVA, L.; BORGES, E. Regulation of pesticides: a comparative analysis. **Science & Public Policy**, v. 40, n. 5, p. 644-656, 2013.

PELAEZ, V. M.; SILVA, L. R.; GUIMARÃES, T. A.; DAL RI, F.; TEODOROVICZ, T. A. (des)coordenação de políticas para a indústria de agrotóxicos no Brasil. **Revista Brasileira de Inovação**, Campinas, SP, v. 14, p. 153–178, 2015. DOI: 10.20396/rbi.v14i0.8649104.

PERES, F.; MOREIRA, J.C., orgs. **É veneno ou é remédio?: agrotóxicos, saúde e ambiente** [online]. Rio de Janeiro: Editora FIOCRUZ, 2003.

PETARLI, G. B.; CATTAFESTA, M.; LUZ, T. C.; ZANDONADE, E.; BEZERRA, O. M. P. A.; SALAROLI, L. B. Exposição ocupacional a agrotóxicos, riscos e práticas de segurança na agricultura familiar em município do estado do Espírito Santo, Brasil. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, 44:e15, 2019.

PIGNATI, W. A.; LIMA, F. A. N. S.; LARA, S. S.; CORREA, M. L. M.; BARBOSA, J. R.; LEÃO, L. H. C.; PIGNATTI, M. G. Distribuição espacial do uso de agrotóxicos no Brasil: uma ferramenta para a Vigilância em Saúde. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 22, n.10, p. 3281-3293, 2017.

PIGNATI, W.; PEREIRA, N. O.; SILVA, A. M. C. Vigilância aos agrotóxicos: quantificação do uso e previsão de impactos na saúde-trabalho-ambiente para os municípios brasileiros. **Ciência e Saúde Coletiva**, v. 19, n. 12, p. 4669-4678, 2014.

PORTO, M. F.; SOARES, W. L. Modelo de desenvolvimento, agrotóxicos e saúde: um panorama da realidade agrícola brasileira e propostas para uma agenda de pesquisa inovadora. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v. 37, n. 125, p. 17-50, 2012.

RAHMAN, S. Agroecological, climatic, land elevation and socio-economic determinants of pesticide use at the farm level in Bangladesh. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 212, p. 187-197, 2015.

RANI, L.; THAPA, K.; KANOJIA, N.; SHARMA, N.; SINGH, S.; GREWAL, A. S.; SRIVASTAV, A. L.; KAUSHAL, J. An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, 2021.

REGIDOR, E.; RONDA, E.; GARCÍA, A. M.; DOMÍNGUEZ, V. Paternal exposure to agricultural pesticides and cause specific fetal death. **Occup Environ Med**, v. 61, n. 4, p. 334-339, 2004.

RHODES, L. A.; McCARL, B. An Analysis of Climate Impacts on Herbicide, Insecticide, and Fungicide Expenditures. **Agronomy**, v. 10, n. 745, p. 1-12, 2020.

RITZ, B.; YU, F. Parkinson's disease mortality and pesticide exposure in California 1984-1994. **International Journal of Epidemiology**, v. 19, p. 323-329, 2000.

ROSENZWEIG, C.; IGLESIAS, A.; YANG, X. B.; EPSTEIN, P. R.; CHIVIAN, E. Climate change and extreme weather events; Implications for food production, plant diseases, and pests. **Global Change & Human Health**, v. 2, n. 2, p. 90-104, 2001.

SANKOH, A. I.; WHITTLE, R.; SEMPLE, K. T.; JONES, K. C.; SWEETMAN, A. J. An assessment of the impacts of pesticide use on the environment and health of rice farmers in Sierra Leone. **Environment International**, v. 94, p. 458-466, 2016.

SANTOS, A. O.; BORGES-PALUCH, L. R.; CERQUEIRA, T. P. S.; TELES, A. L. B. Utilização de equipamentos de proteção individual e agrotóxicos por agricultores de município do recôncavo baiano. *Revista da Universidade Vale do Rio Verde, Três Corações*, v. 15, n. 1, p.738-754, 2017.

SCHERM, H. Climate change: Can we predict the impacts on plant pathology and pest management? **Canadian Journal of Plant Pathology**, v. 26, n.3, p. 267-273, 2004.

SHAKHRAMANYAN, N. G.; SCHNEIDER, U. A.; McCARL, B. A. US agricultural sector analysis on pesticide externalities – the impact of climate change and a Pigovian tax. **Climatic Change**, v. 117, p. 711-723, 2013.

SHEAHAN, M.; BARRETT C, B.; GOLDVALE, C. Human health and pesticide use in Sub-Saharan Africa. **Agricultural Economics**, v. 48, n. S1, p. 27-41, 2017.

SILVA, J. M. *Et al.* Agrotóxico e trabalho: uma combinação perigosa para a saúde do trabalhador rural. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 4, n. 10, p. 891-903, 2005.

SOARES, W. L.; FREITAS, E. A. V.; COUTINHO, J. A. Trabalho rural e saúde: intoxicações por agrotóxicos no município de Teresópolis – RJ. **Revista de Economia e**

Sociologia Rural, v. 43, n. 4, p. 685-701, 2005.

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

SOARES, W. L.; PORTO, M. F. S. Uso de agrotóxicos e impactos econômicos sobre a saúde. **Revista de Saúde Pública**, v. 46, n. 2, p.209-17, 2012.

UEKER, M. E.; SILVA, V. M.; MOI, G. P.; PIGNATI, W. A.; MATTOS, I. E.; SILVA, A. M. C. Parenteral exposure to pesticides and occurrence of congenital malformations: hospital-based case–control study. **BMC Pediatric**; v. 16, n. 125, p. 1-7, 2016.

VALADARES, A.; ALVES, F.; GALIZA, M. **O crescimento do uso de agrotóxicos: uma análise descritiva dos resultados do Censo Agropecuário 2017**, 2020. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=35512>. Acesso em: 04 de janeiro de 2021.

VEIGA, M. M.; DUARTE, F. J. C. M.; MEIRELLES, L. A.; GARRIGOU, A.; BALDI, I. A contaminação por agrotóxicos e os Equipamentos de Proteção Individual (EPIs). **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v. 32, n. 116, p. 57-68, 2007.

WELTI, E. A. R. et al. Temperature drives variation in flying insect biomass across a German malaise trap network. **Insect Conservation and Diversity**, v. 15, n. 2, p.168–180, 2022.

WOOLDRIDGE, J.M. Distribution-free estimation of some nonlinear panel data models. **Journal of Econometrics**, v. 90, p. 77-97, 1999.

WOOLDRIDGE, J. M. **Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data**. London: The MIT Press Cambridge, Massachusetts, 2002.

WU, Y.; XI, X.; TANG, X.; LUO, D.; GU, B.; LAM, S. K.; VITOUSEK, P. M.; CHEN, D. Policy distortions, farm size, and the overuse of agricultural chemicals in China. **PNAS**, v. 115, n. 27, 2018.

ZHANG, Y. W.; McCARL, B. A.; LUAN, Y.; KLEINWECHTER, U. Climate change effects on pesticide usage reduction efforts: a case study in China. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 23, p. 685-701, 2018.

ZHU, W.; WANG, R. Impact of farm size on intensity of pesticide use: Evidence from China. **Science of the Total Environment** , v. 753, 2021.

APÊNDICES

Apêndice A: A *proxy* utilizada para mensurar a intensidade no uso de agrotóxicos

Uma das limitações encontradas por pesquisadores que analisam os efeitos do uso de agrotóxicos sobre a saúde da população refere-se à indisponibilidade de dados referentes ao uso de agroquímicos, como a quantidade de ingredientes ativos utilizados. Nesse contexto, alguns estudos utilizam como *proxy* da intensidade do uso de agrotóxicos os custos/despesas com pesticidas (Rahman, 2015; Jin, Bluemling e Mol, 2015; Wu et al., 2018; Zhu e Wang, 2021). Essa estratégia também é adotada neste estudo, em que a intensidade no uso de agrotóxicos corresponde à razão entre as despesas com agrotóxicos e a área dos estabelecimentos destinada à lavoura. Ou seja, as despesas com agrotóxicos por área agrícola (R\$/ha) representam uma *proxy* para intensidade.

No entanto, deve-se considerar algumas questões ao utilizar despesas como *proxy* de quantidade, pois o preço dos agrotóxicos pode influenciar essa variável. Uma das premissas para validar essa *proxy* é que o aumento nas despesas está associado a aumentos na quantidade de pesticidas utilizada e nos impactos à saúde (Jin, Bluemling e Mol, 2015). Desta forma, assume-se que os agricultores que cultivam a mesma cultura utilizam ingredientes ativos similares (em termos de toxicidade) e que o preço dos mesmos agrotóxicos é semelhante em diferentes regiões (Jin, Bluemling e Mol, 2015; Zhu e Wang, 2021).

Tendo em vista que as condições edafoclimáticas são consideradas no modelo, o primeiro pressuposto é plausível. Já com relação à segunda condição, é possível que municípios onde o preço dos pesticidas seja menor utilizem este insumo de forma mais intensa. Nesse caso, é provável que municípios onde as despesas com agrotóxicos por hectare (intensidade no uso de agrotóxicos) sejam menores utilizem proporcionalmente mais agroquímicos e, conseqüentemente, tenham maior incidência de intoxicações, resultando em estimativas tendenciosas.

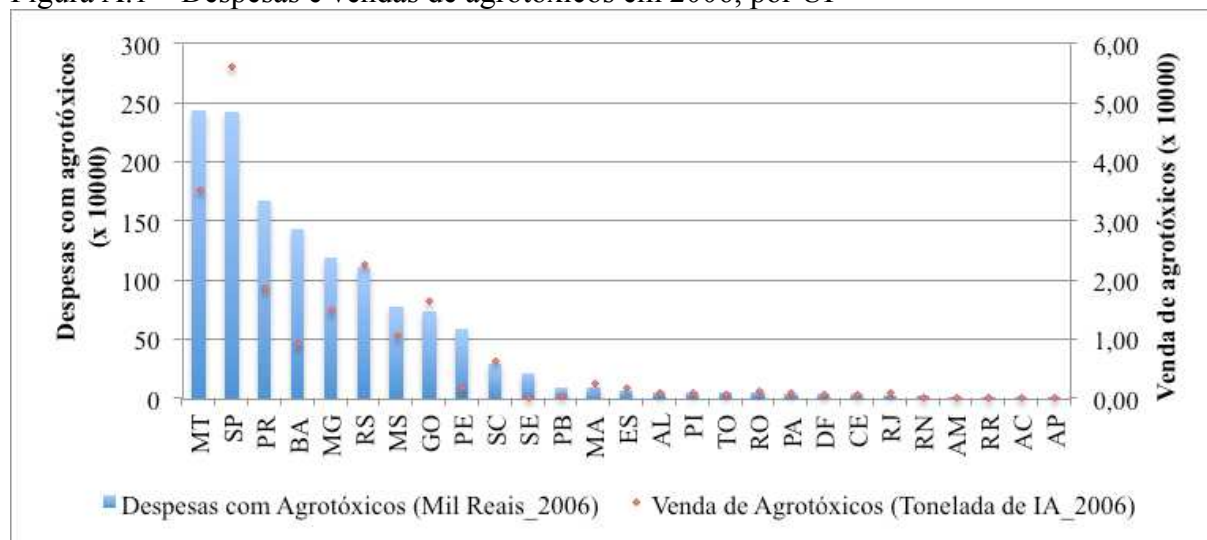
Além disso, é possível que a redução no preço desses compostos químicos seja acompanhada pela intensificação do seu uso. Nesse caso, a *proxy* utilizada não conseguiria captar esse aumento. Em outras palavras, se houver redução no preço dos pesticidas ao longo do tempo e a demanda por esse insumo agrícola permanecer inalterada, o valor das despesas com agrotóxicos será relativamente menor, indicando, erroneamente, que houve redução na intensidade no uso de agrotóxicos. Analogamente, caso a redução do preço seja acompanhada pelo aumento no consumo de agroquímicos, as despesas podem não captar o aumento real da

intensidade no uso de pesticidas. Consequentemente, é possível que menores despesas estejam associadas ao maior número de intoxicações.

Deste modo, diante de variações no preço deste insumo agrícola, as estimativas podem ser viesadas. Sendo assim, o ideal seria utilizar a quantidade de ingredientes ativos em detrimento das despesas com agrotóxicos. Porém, devido à indisponibilidade de dados, isso não é possível.

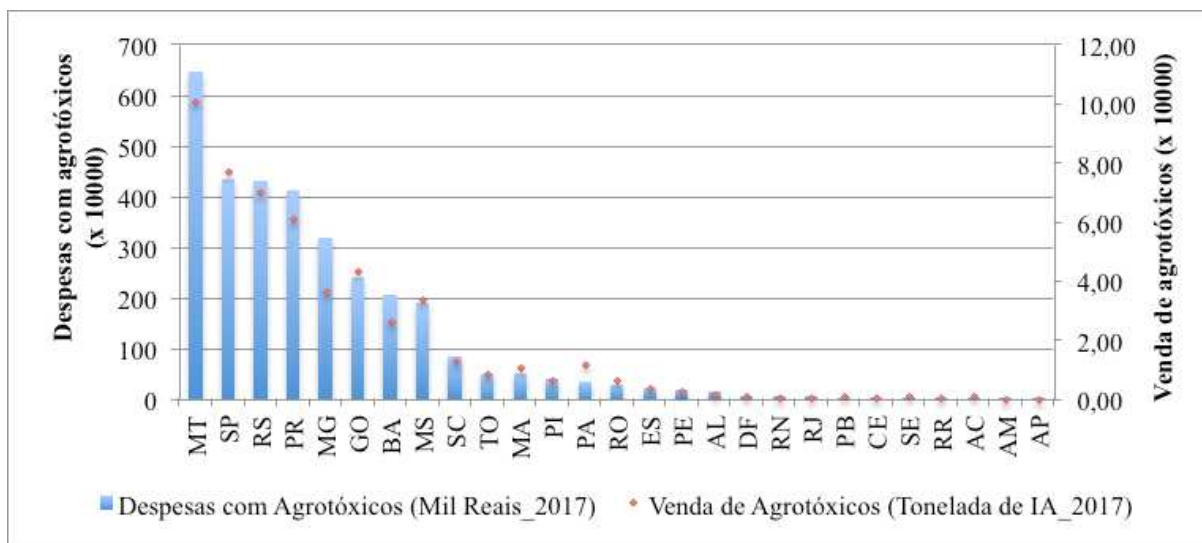
Nesse contexto, para validar a métrica utilizada para intensidade no uso de agrotóxicos, apresentam-se, nas Figuras A.1 e A.2, a quantidade vendida e as despesas com pesticidas por Unidade Federada em 2006 e 2017, respectivamente. Note que os entes federados com maiores despesas com agrotóxicos são também os que utilizam maiores quantidades de ingredientes ativos. Por meio do coeficiente de correlação de *Spearman*, verifica-se que essas variáveis estão altamente correlacionadas, com valores de 0,8773 (p-valor 0,000) em 2006 e 0,9609 (p-valor 0,000) em 2017. Sendo assim, as despesas com agrotóxicos podem refletir a quantidade utilizada desses compostos químicos, sendo uma boa *proxy* para quantidade de ingredientes ativos utilizada.

Figura A.1 – Despesas e vendas de agrotóxicos em 2006, por UF



Fonte: Elaboração própria, conforme dados do IBAMA e IBGE.

Figura A.2 – Despesas e vendas de agrotóxicos em 2017, por UF



Fonte: Elaboração própria, conforme dados do IBAMA e IBGE.

Outra questão que deve ser considerada é a relação inversa que pode existir entre toxicidade e despesas com agrotóxicos. Isso porque produtos de maior toxicidade podem ser mais baratos. Como exemplo, pode-se citar o Glifosato, classificado como pouco tóxico, e o 2,4D, classificado como extremamente tóxico. Segundo o Instituto de Economia Agrícola, em 2016, o custo relativo do glifosato foi cerca de 30% superior ao custo relativo do 2,4D³⁶. Nesse caso, a menor despesa com pesticidas de determinado município pode ser resultado do consumo de produtos de maior toxicidade. Consequentemente, a menor intensidade no uso de agrotóxicos estaria associada ao maior nível de intoxicação.

Para verificar o quanto nossa variável pode ser afetada por essa questão apresenta-se, nas Figuras A.3 e A.4, a proporção de agrotóxicos comercializada nas Unidades Federativas do país, segundo a classe de periculosidade ambiental³⁷. Note que a proporção é semelhante entre os estados brasileiros, ou seja, não há diferenças expressivas no nível de periculosidade dos agroquímicos utilizados entre os estados. Sendo assim, é possível que o viés decorrente da diferença nos preços de produtos de maior ou menor periculosidade não seja significativo. Em outras palavras, considerando que os estados utilizam, proporcionalmente, quantidades semelhantes de agrotóxicos de classes I, II, III e IV, pressupõe-se que a diferença dos preços relacionada ao grau de periculosidade não afeta de maneira distinta os estados brasileiros.

³⁶ O Instituto avalia a relação de troca entre defensivos e produtos agrícolas no estado de São Paulo. Em 2016, para o produtor de soja consumir 20 litros de glifosato e de 2,4D, seriam necessárias 5,52 e 4,22 sacas de soja, respectivamente (IEA, s.d.).

³⁷ Não há dados disponíveis em relação à toxicidade. Desta forma, apresentam-se os dados relacionados à periculosidade ambiental disponibilizados pelo IBAMA. Nesse contexto, vale mencionar, que os ingredientes ativos de maior periculosidade ambiental afetam a saúde da população por meio dos seus efeitos sobre fatores bióticos e abióticos. Como exemplo, pode-se citar o estudo de Dias, Rocha e Soares (2020), que demonstra como os resíduos de glifosato na água afetam o nascimento de crianças.

Vale ressaltar que, quando se considera as regiões brasileiras, as proporções são ainda mais semelhantes. Deste modo, é possível que o impacto de diferenças nos preços relacionadas à periculosidade do ingrediente ativo torna-se ainda menor. Nesse ínterim, é válido lembrar que são utilizados efeitos fixos de estado e ano nas estimativas.

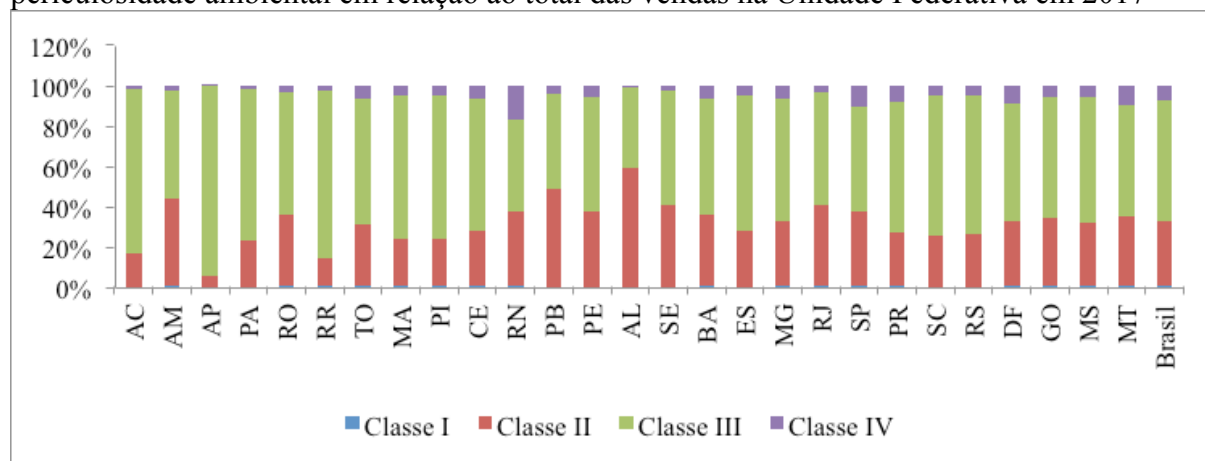
Figura A.3 – Proporção da quantidade comercializada de agrotóxicos segundo a classe de periculosidade ambiental em relação ao total das vendas na Unidade Federativa em 2009³⁸



Fonte: Elaboração própria, conforme dados do IBAMA.

Nota: Classe I – produto altamente perigoso ao meio ambiente; Classe II – produto muito perigoso ao meio ambiente; Classe III – produto perigoso ao meio ambiente; Classe IV – produto pouco perigoso ao meio ambiente.

Figura A.4 – Proporção da quantidade comercializada de agrotóxicos segundo a classe de periculosidade ambiental em relação ao total das vendas na Unidade Federativa em 2017



Fonte: Elaboração própria, conforme dados do IBAMA.

Nota: Classe I – produto altamente perigoso ao meio ambiente; Classe II – produto muito perigoso ao meio ambiente; Classe III – produto perigoso ao meio ambiente; Classe IV – produto pouco perigoso ao meio ambiente.

³⁸ Os Boletins referentes à venda de agrotóxicos por classe de periculosidade ambiental publicados pelo IBAMA estão disponíveis a partir de 2009.

Adicionalmente, na Tabela A.1, observa-se a correlação entre quantidade e proporção de ingredientes ativos utilizados, por classe de periculosidade, e despesas com agrotóxicos. Note que, enquanto a correlação entre despesas e quantidade é positiva e estatisticamente significativa, a correlação com a proporção comercializada por classe de periculosidade não apresentou significância estatística e, quando significativas, a correlação é baixa ou é para produtos das classes I e IV, que são as classes menos utilizadas no Brasil. Já com relação à quantidade de produtos por classe de periculosidade, observa-se que todas as classes estão altamente correlacionadas com as despesas com pesticidas. Como pode-se observar na Tabela A.1, a diferença dos coeficientes não é expressiva. Logo, pode-se dizer que o aumento no consumo de pesticidas, independente do sua classe de periculosidade, está altamente correlacionado com as despesas com esses produtos. Em outras palavras, independentemente do tipo de agrotóxico consumido (em relação à periculosidade), maiores despesas refletem maior consumo.

Tabela A.1 – Correlação entre despesas com agrotóxicos e quantidade comercializada por classe de periculosidade ambiental

Comercialização de ingredientes ativos (IA)	Classificação por periculosidade ambiental	Despesas com agrotóxicos	
		2006	2017
Proporção de IA comercializados	Classe I	0,7241***	0,4060**
	Classe II	0,3718*	-0,0208
	Classe III	-0,1777	-0,0592
	Classe IV	0,2344	0,6313***
Quantidade de IA comercializados	Classe I	0,8864***	0,9444***
	Classe II	0,9035***	0,9725***
	Classe III	0,8394***	0,9536***
	Classe IV	0,8187***	0,9707***

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: A proporção e quantidade de IA comercializados são referentes aos anos 2009 (ano mais próximo ao ano de 2006 com dados disponíveis) e 2017. *** significativo a 1%; ** significativo a 5%; * significativo a 10%.

Com relação à proporção vendida por classe de periculosidade, a correlação é negativa em alguns casos (classe III em 2006 e classes II e III em 2017), mas sua magnitude é relativamente baixa e sem significância estatística. Nos casos em que a correlação é estatisticamente significativa, os valores mais elevados são das classes de produtos cuja proporção no total das vendas é pequena (classes I e IV).

Sendo assim, presume-se que o tipo de ingrediente ativo comercializado, em relação à toxicidade, nos municípios brasileiros não exercem influência expressiva nas despesas com agroquímicos. Em outras palavras, a proporção de produtos mais tóxicos consumidos por determinando município não afeta as despesas com esses produtos de maneira que os impactos nas intoxicações sejam divergentes dos esperados, isto é, não há evidências de que

municípios que consomem proporcionalmente mais pesticidas de alta toxicidade terão despesas relativamente menores e maiores níveis de intoxicação.

Diante do exposto, apesar das potenciais limitações, pode-se concluir que a métrica proposta para calcular a variável intensidade no uso de agrotóxicos é válida, dado que as despesas com agrotóxicos estão altamente correlacionadas com a quantidade vendida de ingredientes ativos, enquanto a proporção da toxicidade dos pesticidas não se correlaciona de maneira significativa e/ou expressiva com as despesas com agroquímicos.

Apêndice B: A relevância e validade dos instrumentos utilizados

Tabela B.1 – Estimativas dos efeitos das variáveis climáticas sobre a intensidade no uso de agrotóxicos – 1º estágio das estimativas

	Poisson (função controle)		MQ2E	
	(1)	(2)	(3)	(4)
Temperatura média	-71.031*** (12.573)	-63.501*** (15.008)	-71.031*** (17.578)	-63.501*** (17.824)
Temperatura desvio	-161.133*** (27.957)	-157.210*** (31.459)	-161.133*** (36.930)	-157.210*** (37.647)
Controles	Não	Sim	Não	Sim
Efeitos fixos município	Sim	Sim	Sim	Sim
Efeitos fixos ano	Sim	Sim	Sim	Sim
Efeitos fixos Estado-ano	Sim	Sim	Sim	Sim
R ² within	0.3973	0.4038	0.3973	0.4038
Observações	10,001	9,950	10,001	9,950
Nr. Municípios	5,325	5,322	5,325	5,322

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela B.2 – Estimativas dos efeitos da intensidade no uso de agrotóxicos sobre o número de pessoas intoxicadas nos municípios brasileiros em 2006 – MQ2E

	Primeiro estágio			VI		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Agrotóxicos	-	-	-	0.0448*** (0.0161)	0.0501*** (0.0188)	0.0468*** (0.0157)
Uso de EPI	-	-	4.04*** (0.1537)	-	-	-0.1246** (0.0545)
Temperatura média	-10.59191*** (2.439303)	-11.17391*** (2.378133)	-12.12533*** (2.181939)	-	-	-
Temperatura desvio	-69.04226*** (9.318906)	-59.64772*** (8.867514)	-78.66496*** (8.394019)	-	-	-
Controles	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Variável EPI	Não	Não	Sim	Não	Não	Sim
Dummies Estado	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
R ² ajustado	0.3026	0.3609	0.4560	-	-	-
Nr. Municípios	5,027	4,976	4,976	5,027	4,976	4,976

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: Erros-padrão robustos entre parênteses. Significância: *** p<0,01; ** p<0,05; * p<0,1. Em todas as regressões, a variável dependente é o número de registros de pessoas intoxicadas (não intencionalmente) por 100 mil habitantes. EPI refere-se ao percentual de estabelecimentos agropecuários que utilizaram algum tipo de equipamento de proteção individual no município.

3. USO DE AGROTÓXICOS NO BRASIL: CICLO VIRTUOSO OU CICLO VICIOSO?

3.1. INTRODUÇÃO

O uso de agrotóxicos³⁹ é uma das principais formas utilizadas no controle de pragas e patógenos, contribuindo significativamente para o aumento da produção e produtividade agrícolas (OERKE e DEHNE, 2004; SEXTON, ZHEN e ZILBERMAN, 2007; JALLOW et al., 2017; SHEAHAN, BARRETT e GOLDVALE, 2017; WANG, CHU e MA, 2018). No entanto, seu uso indiscriminado está associado a externalidades negativas, como os danos à saúde (PIGNATI et al. 2014, 2017; SANKOH et al., 2016; KIM, KABIR e JAHAN, 2017) e ao meio ambiente (WILSON e TISDELL, 2001; BALE, VAN-LENTEREN e BIGLER, 2008; MAHMOOD et al., 2016; PRASHAR e SHAH, 2016).

O Brasil está entre os maiores consumidores mundiais de agrotóxicos e seu consumo permanece em ascensão. Entre 2009 e 2017, a venda de agrotóxicos aumentou em, aproximadamente, 76% (IBAMA, 2019). No mesmo período, a intensidade do uso aumentou em torno de 8,78%, passando de 5,47 kg/ha em 2009 para 5,95 kg/ha em 2017 (FAO, s.d.).

A evolução da produção agrícola nacional; a expansão da monocultura no país, que pode alterar o ecossistema e a biodiversidade, contribuindo para a manifestação de pragas e patógenos; e o clima tropical brasileiro, em que o país não usufrui os benefícios advindos do inverno para interromper o ciclo das pragas são fatores que contribuem para o maior consumo de pesticidas no país (VASCONCELOS, 2018). Cabe ainda destacar que o clima tropical brasileiro permite o cultivo de múltiplas safras, como é o caso do milho safrinha, cujo plantio durante todo o ano cria uma “ponte verde” que favorece o desenvolvimento e a permanência de pragas e doenças (CUNHA *et al.*, 2019). Consequentemente, mais agrotóxicos são utilizados.

Ressalta-se que a intensificação no uso de agroquímicos pode afetar o rendimento do setor agrícola. De acordo com Wilson e Tisdell (2001), embora o uso de pesticidas seja uma tecnologia de custo relativamente baixo e aumente os rendimentos no curto prazo, o custo de produção pode aumentar e o rendimento diminuir no longo prazo. Isso porque os pesticidas afetam micro-organismos do solo, interferindo na sua atividade biológica e,

³⁹ Referem-se aos “produtos e agentes de processos físicos, químicos ou biológicos, destinados ao uso nos setores de produção, no armazenamento e beneficiamento de produtos agrícolas, nas pastagens, na proteção de florestas, nativas ou plantadas, e de outros ecossistemas e de ambientes urbanos, hídricos e industriais, cuja finalidade seja alterar a composição da flora ou da fauna, a fim de preservá-las da ação danosa de seres vivos considerados nocivos, bem como as substâncias e produtos empregados como desfolhantes, dessecantes, estimuladores e inibidores de crescimento” (Art.1º, Decreto 4.072/02).

consequentemente, reduzindo sua fertilidade, e também afetam predadores naturais, favorecendo a manifestação e infestação de pragas e patógenos (WILSON e TISDELL, 2001; ROMEIRO, 2014; MAHMOOD et al., 2016; PRASHAR e SHAH, 2016; SHEAHAN, BARRETT e GOLDVALE, 2017).

Assim, além dos custos associados à saúde, há os custos decorrentes da perda de produção devido à proliferação de pragas e patógenos e à redução da fertilidade do solo (WILSON e TISDELL, 2001). No Brasil, entre 2001 e 2016, o retorno para cada unidade adicional de agrotóxicos em termos do valor bruto de produção agrícola cresceu a taxas decrescentes nos estados brasileiros (MORAES, 2019), indicando possível redução na produtividade desses compostos químicos.

Carlson (1977) identificou redução substancial da produtividade marginal dos inseticidas em algumas regiões produtoras de algodão nos EUA entre 1964 e 1969. Teague e Brorsen (1995) demonstraram uma tendência de queda no valor do produto marginal dos agrotóxicos nos estados de Iowa e Texas no período de 1949 a 1991. Rahman (2013) revelou que, entre 1977 e 2009, a produtividade dos agrotóxicos reduziu cerca de 8,6% ao ano em Bangladesh. Sun, Zhang e Hu (2020), em uma análise feita na China, encontraram que o efeito dos gastos com agrotóxicos varia ao longo do tempo e, à medida que esses gastos aumentam, seu efeito marginal sobre os rendimentos das culturas de arroz, milho e trigo diminui.

Deste modo, além dos efeitos negativos sobre o meio ambiente e a saúde, o uso indiscriminado de agrotóxicos pode ter impactos econômicos. Nesse contexto, pesquisas têm sido realizadas para identificar fatores que afetam o uso excessivo⁴⁰ de agroquímicos (JHA e REGMI, 2011; ZHANG et al., 2015; WANG, CHU e MA, 2018; SCHREINEMACHERS et al., 2020; SUN, ZHANG e HU, 2020; CAI et al., 2021).

É importante considerar que a quantidade de pesticidas que maximiza a produção é diferente da que maximiza o lucro dos produtores, dado que os custos com agroquímicos são considerados no cálculo do lucro, mas não no da produção (FRISVOLD, 2019). Em outras palavras, não se pode afirmar que o aumento do uso de agrotóxicos implica, necessariamente, maior rendimento. Sheahan, Barrett e Goldvale (2017) apontam que os ganhos de produtividade associados ao simples aumento do uso de pesticidas podem ser totalmente anulados pelos custos resultantes desse aumento.

⁴⁰ Assume-se que o uso excessivo ocorre quando aplicam-se agrotóxicos acima do nível ótimo que, do ponto de vista econômico, é o nível em que o retorno marginal é igual ao custo marginal. Ou seja, o uso excessivo ocorre quando o custo marginal supera o retorno marginal.

Sendo assim, análises sobre a produtividade e sobre o uso excessivo de agrotóxicos tornam-se pertinentes. As estimativas de que a população mundial será superior à nove bilhões em 2050 (FAO, 2009) e a necessidade de garantir a segurança alimentar dessa população, juntamente com a preocupação com o meio ambiente e com a saúde humana, ratificam a importância desse tipo de análise.

Mesmo o Brasil sendo um dos maiores consumidores mundiais de pesticidas e a importância da agricultura brasileira no contexto nacional e internacional, nenhum estudo, no melhor do nosso conhecimento, fez esse tipo de análise para o país. A fim de preencher esta lacuna, este estudo tem como objetivo analisar a produtividade e dimensionar o eventual uso excessivo dos agrotóxicos no setor agrícola brasileiro, respondendo às seguintes questões: Qual o impacto do aumento nas despesas com agrotóxicos no valor bruto da produção (VBP) em 2006 e 2017? Qual o efeito de um incremento marginal nas despesas com agrotóxicos sobre o VBP nesses dois períodos? O valor do produto marginal dos agrotóxicos é maior em 2017 do que em 2006? O uso de agrotóxicos no Brasil é excessivo? Em caso afirmativo, esse comportamento é identificado nos dois períodos analisados e na mesma proporção? Quais fatores influenciam o uso excessivo de pesticidas no país?

Ao responder essas questões, é possível demonstrar se o uso deste composto químico tem beneficiado os produtores que o utilizam ou tem os colocado em um ciclo vicioso, em que se tornam dependentes de um insumo cuja eficácia pode estar reduzindo ao longo do tempo, exigindo que maiores quantidades sejam aplicadas a cada safra.

A abordagem de função de produção e o modelo de controle de danos foram utilizados para estimar o valor do produto marginal dos agrotóxicos e verificar se seu uso é excessivo. Posteriormente, por meio de modelos de regressão múltipla e de probabilidade, identificaram-se alguns fatores que influenciam o uso excessivo de pesticidas no Brasil. Os dados são dos Censos Agropecuários 2006 e 2017, publicados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Os resultados podem auxiliar na formulação de políticas públicas e em estratégias para promover o desenvolvimento sustentável do setor agrícola, estimulando o desenvolvimento de produtos mais eficazes e sustentáveis para o controle fitossanitário e de programas que visem à conscientização dos produtores em relação aos danos associados ao uso de pesticidas.

Além desta introdução, este trabalho está organizado em mais seis seções. Na segunda seção, apresenta-se uma revisão de literatura sobre a produtividade e o uso excessivo de agrotóxicos. Na terceira seção, o modelo teórico é apresentado. A quarta seção apresenta a

estratégia empírica. Na quinta e na sexta seções, os resultados são apresentados e discutidos. Por fim, as considerações finais são apresentadas.

3.2. AGROTÓXICOS: PRODUTIVIDADE, USO EXCESSIVO E SEUS DETERMINANTES

A adoção de agrotóxicos no setor agrícola surgiu com a Revolução Verde, movimento iniciado na Europa e nos EUA e expandida para os países em desenvolvimento nos anos 60, que promovia a modernização da agricultura por meio do uso de genótipos melhorados, do uso intensivo de agrotóxicos e fertilizantes sintéticos e da mecanização (BARROS et al., 2016). Desde então, os agroquímicos passaram a ser insumo essencial para a produção agrícola.

No entanto, as externalidades negativas associadas ao uso de pesticidas como a contaminação de corpos de água, ar e solo, ameaçando a biodiversidade aquática e terrestre e interferindo no conteúdo nutricional, na diversidade estrutural e funcional das populações microbianas e nas atividades das enzimas do solo (MAHMOOD et al., 2016; PRASHAR e SHAH, 2016) e os danos à saúde (PIGNATI et al., 2014, 2017; SANKOH et al., 2016; KIM, KABIR e JAHAN, 2017) têm colocado em questão o uso de agroquímicos.

Nesse contexto, diversos estudos começaram a analisar a produtividade marginal dos agrotóxicos a fim de identificar os custos e os benefícios provenientes do seu uso. De acordo com Campbell (1976), estimar a produtividade marginal dos agrotóxicos pode: (i) fornecer informações sobre a eficiência da produção agrícola, em termos de custos e retornos privados; (ii) fornecer informações sobre o quadro econômico dentro do qual os produtores operam; (iii) indicar os custos resultantes da redução do uso de pesticidas, em termos de perda de produção agrícola.

O estudo de Headley (1968) foi um dos primeiros. Por meio da função de produção Cobb-Douglas e com dados de 48 estados norte-americanos, demonstrou que, em média, o gasto de um dólar com pesticidas resulta em US\$ 4,00 no valor da produção. O autor ainda estimou que o benefício médio advindo do uso de pesticidas nas lavouras equivale à cerca de US\$ 1,8 bilhão, que corresponde à, aproximadamente, 4,5% da renda bruta ou 10,5% da receita agrícola em 1963.

Campbell (1976), usando dados *cross-section* de produtores de frutas canadenses e a função de produção Cobb-Douglas, encontrou que o retorno marginal na produção por dólar gasto com pesticidas é de US\$12,00, sugerindo que o custo de oportunidade de políticas

públicas que visem à proteção ambiental por meio da redução do uso de pesticidas é relativamente elevado em termos de produção agrícola perdida.

Estudos posteriores revelam que a produtividade dos agrotóxicos está diminuindo. Carlson (1977), em uma análise feita com produtores de algodão norte-americanos de diferentes regiões, revelou que a produtividade dos inseticidas se reduziu entre 1964 e 1969 e destaca que, exceto para a Califórnia, as taxas anuais de redução foram maiores no segundo período (1966-1969). Segundo o autor, esse declínio pode estar associado à resistência das pragas aos inseticidas.

Teague e Brorsen (1995) analisaram a produtividade dos agrotóxicos em dez estados dos EUA entre 1949 e 1991. Utilizando o modelo de coeficientes aleatórios, encontraram que o retorno marginal médio dos pesticidas nesse período, com exceção dos anos 1949 e 1951, ficou entre US\$ 3,00 e US\$ 9,00. Os resultados ainda revelaram tendência de queda na produtividade dos agrotóxicos em Iowa, cujo valor do produto marginal dos pesticidas passou de US\$ 32,79 em 1949 para US\$ 3,19 em 1991 e no Texas, com redução de US\$ 15,87 em 1949 para US\$ 3,32 em 1991.

É importante dizer que os resultados dos estudos supracitados devem ser interpretados com cautela, haja vista as formas funcionais utilizadas para mensurar o valor do produto marginal dos agrotóxicos. Utilizar especificações tradicionais da função de produção, que não consideram insumos que reduzem os riscos de produção, como os pesticidas, pode levar a resultados tendenciosos (JUST e POPE, 1978, 1979). Conforme Lichtenberg e Zilberman (1986), os agrotóxicos, como agente de controle de danos, afetam a produção de forma diferente dos demais insumos e essa característica deve ser considerada na mensuração de sua produtividade. Nesse contexto, os autores desenvolvem um modelo de controle de danos com diferentes especificações e demonstram que utilizar a função de produção com especificação Cobb-Douglas superestima a produtividade dos pesticidas. A partir de então, o modelo de controle de danos elaborado por Lichtenberg e Zilberman (1986)⁴¹ passou a ser utilizado na maior parte dos trabalhos que mensuram a produtividade dos agrotóxicos.

Praneetvatakul e Waibel (2002) analisaram a produtividade marginal dos pesticidas na produção de arroz na Tailândia. Utilizando a função de produção Cobb-Douglas e o modelo de controle de danos, identificaram que o uso de pesticidas contribui para o aumento na produção, porém a elasticidade de produção é baixa, cujo aumento de 1% nas despesas com agrotóxicos implica aumento inferior à 0,03% na produção de arroz no período analisado.

⁴¹ Este modelo é apresentado de forma detalhada na seção 3.3. Modelo teórico.

Adicionalmente, verificaram que o valor do produto marginal dos agrotóxicos é praticamente nulo na especificação exponencial em ambos os períodos. Já na especificação Cobb-Douglas, os valores são superiores à unidade (5,24 em 1999/2000 e 4,54 em 2000/2001), ratificando a hipótese de que a função Cobb-Douglas superestima a produtividade dos pesticidas.

Nessa mesma perspectiva, Jha e Regmi (2011), por meio de um estudo transversal em que foram entrevistados 211 agricultores no Nepal, demonstraram que, na média, a produtividade dos agrotóxicos é próxima de zero. Adicionalmente, identificaram que o agricultor médio utiliza 3,9 vezes mais pesticidas do que o nível ótimo e que mais de 70% dos agricultores utilizam pesticidas em excesso. Nesse ínterim, os autores ressaltam a importância de programas que visem ao uso eficiente de pesticidas na produção de hortaliças no país.

Em estudo realizado na China, Zhang et al. (2015), utilizando a função de produção Cobb-Douglas e de controle de danos com especificação Weibull, identificaram que, embora o uso de pesticidas aumente a produção de arroz, algodão e milho, seu uso é excessivo em todas as três culturas. Os autores ainda ressaltam que o efeito da produtividade dos pesticidas pode ser superestimado ao usar a especificação Cobb-Douglas.

Mais recentemente, diante da intensificação do uso de agrotóxicos e das externalidades negativas associadas ao seu uso, além de mensurar o valor do produto marginal dos agroquímicos, busca-se identificar se seu uso é excessivo e fatores que afetam esse comportamento.

Wang, Chu e Ma (2018), em uma análise com 861 produtores de arroz em duas províncias chinesas, verificaram que o uso de pesticidas é excessivo nessas áreas, com produtividade marginal próxima de zero. Os autores encontraram que, ao contrário do esperado, o conhecimento sobre a toxicidade dos pesticidas; a crença de que o uso massivo de pesticidas prejudica o meio ambiente e participar de treinamentos sobre agrotóxicos organizados pelo governo aumentam a propensão de usar agrotóxicos em excesso. Já agricultores homens e com mais experiência têm menos chance de utilizar pesticidas excessivamente. Segundo os autores, os resultados contraditórios indicam a insensibilidade em relação ao uso excessivo de pesticidas e a aversão a perdas dos agricultores.

O estudo de Schreinemachers et al. (2020), utilizando dados de 1.000 horticultores de três países do Sudeste Asiático (Camboja, Laos e Vietnã), verificou que 100%, 73% e 59% dos agricultores de Camboja, Laos e Vietnã, nessa ordem, utilizam agrotóxicos em excesso. Adicionalmente, identificou-se que seguir recomendações de vendedores de pesticidas e a crença na eficácia dos agroquímicos estão associados ao seu uso excessivo. Já o uso de alternativas não químicas para o manejo de pragas reduz o uso em excesso de agrotóxicos.

Diante disso, os autores ressaltam a importância da promoção de métodos alternativos para o controle de pragas e de fontes imparciais de informação para orientação dos agricultores.

Nessa mesma perspectiva, Cai et al. (2021), com dados de 452 fazendas produtoras de maçãs nas províncias chinesas de Shaanxi e Shandong e utilizando o modelo de controle de danos, identificaram que 70,6% das fazendas usam agrotóxicos em excesso e que a maior aversão ao risco, o tamanho do pomar e a idade das macieiras afetam a intensidade do uso de pesticidas.

Sun, Zhang e Hu (2020) estimaram, por meio do modelo de controle de danos, o efeito produtivo e o uso excessivo de pesticidas na produção de arroz, milho e trigo na China entre 1985 e 2016. Os resultados demonstram que, embora o uso de agrotóxicos aumente de maneira significativa a produção dos grãos, as despesas com pesticidas excedem o nível economicamente ótimo. Os resultados ainda demonstram que o efeito produtivo dos agrotóxicos varia ao longo dos anos, indicando que o efeito marginal dos pesticidas no rendimento das lavouras diminui à medida que as despesas com agrotóxicos aumentam.

De maneira geral, os estudos mais recentes apontam para o uso excessivo de pesticidas. Vale lembrar, que o uso impróprio de agrotóxicos está associado a externalidades negativas, tornando relevante análises sobre a produtividade e o uso desses compostos químicos. Ressalta-se que, no melhor do nosso conhecimento, tais análises ainda não foram feitas para o Brasil. Deste modo, na tentativa de preencher essa lacuna, esta pesquisa tem como objetivo mensurar o valor do produto marginal dos agrotóxicos, verificar se há uso excessivo de pesticidas no país e identificar fatores que contribuem para esse uso.

3.3. MODELO TEÓRICO

Com o objetivo de encontrar a produtividade dos agrotóxicos, este estudo tem como base o modelo de controle de danos elaborado por Lichtenberg e Zilberman (1986). De acordo com esses autores, os agrotóxicos, diferentemente dos demais insumos agrícolas, afetam a produção indiretamente, por meio da redução dos danos causados pela infestação de pragas. Sendo assim, utilizar a função de produção com a especificação Cobb-Douglas para mensurar a produtividade marginal dos agrotóxicos superestima os resultados (LICHTENBERG e ZILBERMAN, 1986; PRANEETVATAKUL e WAIBEL, 2002; ZHANG et al., 2015; FRISVOLD, 2019). Isso porque essa especificação impõe uma forma à curva de produtividade marginal dos fatores que não é apropriada para agentes de controle de danos, como os agrotóxicos, restringindo a taxa de declínio da produtividade marginal dos

fatores e, conseqüentemente, superestimando o valor do produto marginal dos pesticidas (SEXTON, ZHEN e ZILBERMAN, 2007).

Além disso, o modelo de controle de danos considera as mudanças na produtividade do agente de controle ao longo do tempo, o que é relevante no caso dos agrotóxicos, em que as pragas se adaptam aos pesticidas (SEXTON, ZHEN e ZILBERMAN, 2007). Ressalta-se que, diferentemente do que ocorre com os demais fatores de produção, cuja demanda é reduzida quando sua eficácia diminui, a demanda por agrotóxicos pode aumentar com a redução de sua eficácia e o modelo de controle de danos prevê esse comportamento (LICHTENBERG e ZILBERMAN, 1986; SEXTON, ZHEN e ZILBERMAN, 2007).

Em suma, os agrotóxicos, como agentes de controle de danos, devem ser inseridos na função de produção de maneira distinta dos demais insumos. Conforme Lichtenberg e Zilberman (1986), a função de produção é representada da seguinte forma:

$$Y = F[X, G(Z)] \quad (1)$$

em que Y representa a produção; X é um vetor de insumos agrícolas usuais e Z corresponde ao agente de controle de danos (agrotóxicos). Assume-se que $F(.)$ tem as propriedades padrão das funções de produção (côncava em (X, Z)) e $G(.)$ representa a função de redução de danos e demonstra a capacidade do agente de controle (agrotóxicos) conter os danos causados pelos agentes de danos (pragas e patógenos). Assume-se que $0 \leq G(Z) \leq 1$, logo, quando $G(Z) = 1$, não há danos (a capacidade destrutiva foi totalmente eliminada) e a produção potencial, $F(X, 1)$, é obtida. Caso $G(Z) = 0$, o máximo de danos ocorre (capacidade destrutiva máxima) e a produção será mínima ($F(X, 0)$). À medida que o uso do agente de controle de danos (agrotóxicos) aumenta, mais próximo da unidade a função de redução de danos. Ou seja, $G(Z) \rightarrow 1$ quando $Z \rightarrow \infty$ (Lichtenberg e Zilberman, 1986).

Isso posto, pode-se dizer que a função de controle de danos ($G(Z)$) possui as propriedades de uma distribuição de probabilidade cumulativa que representa a eficácia dos agentes de controle para limitar as perdas de produção. Essa função pode assumir diferentes especificações como exponencial, logística, Pareto e Weibull (LICHTENBERG e ZILBERMAN, 1986).

Em geral, no modelo de controle de danos, assume-se a seguinte estrutura da função de produção:

$$Y = F(X)G(Z) \quad (2)$$

em que $F(X)$ representa a função Cobb-Douglas, ou seja, $F(X) = e^{\alpha} X^{\beta}$ e $G(Z)$ representa a função controle de danos que, como mencionado, pode assumir as especificações exponencial, logística, Pareto e Weibull, apresentadas, respectivamente, pelas equações (3), (4), (5) e (6) a seguir:

$$G(Z) = 1 - \exp(-\lambda Z) \quad (3)$$

$$G(Z) = [1 + \exp(\mu - \sigma Z)]^{-1} \quad (4)$$

$$G(Z) = 1 - \kappa^{\lambda} Z^{-\lambda} \quad (5)$$

$$G(Z) = 1 - \exp(-Z^{\lambda}) \quad (6)$$

em que $\lambda, \mu, \sigma, \kappa$ são os parâmetros a serem estimados.

Tendo como base a equação (2), o efeito marginal dos agrotóxicos sobre a produção (EMg) pode ser obtido da seguinte forma:

$$EMg = \frac{\partial Y}{\partial Z} = \left(\frac{\partial Y}{\partial G(Z)} \right) \left(\frac{\partial G(Z)}{\partial Z} \right) \quad (7)$$

$$EMg = F(X) G'(Z)$$

De acordo com a teoria econômica, o nível ótimo de pesticidas é aquele que iguala o retorno marginal ao custo marginal dos agrotóxicos, ou seja, maximiza o lucro. Assumindo que os agrotóxicos (Z) e a produção (Y) estão em termos monetários, pode-se dizer que o nível ótimo é aquele em que uma unidade adicional nas despesas com pesticidas resulta no aumento de uma unidade monetária no valor da produção ($\partial Y / \partial Z = 1$). Em outras palavras, no ótimo, a receita marginal em relação às despesas com agrotóxicos (RMA) é igual à unidade.

Para as especificações Cobb-Douglas e Weibull, tem-se, respectivamente:

$$RMA = \lambda e^{\alpha} X^{\beta} Z^{\lambda-1} = 1 \quad (8)$$

$$RMA = \lambda e^{\alpha} X^{\beta} \exp(-Z^{\lambda}) Z^{\lambda-1} = 1 \quad (9)$$

Note que a diferença entre as equações (8) e (9) refere-se ao termo exponencial presente no modelo de controle de danos (equação 9). Como este termo está entre zero e um, a *RMA* obtida por meio da especificação Weibull será sempre menor do que a obtida por meio da Cobb-Douglas. Sendo assim, a especificação Cobb-Douglas, ao superestimar a *RMA*, subestima o uso em excesso de pesticidas. Em outras palavras, utilizar a especificação Cobb-Douglas pode fazer com que o nível ótimo de aplicação de agroquímicos recomendado seja superior ao recomendado pelo modelo de controle de danos, subestimando o uso excessivo de pesticidas.

Diante do exposto, o modelo de controle de danos mostra-se mais adequado para o cálculo da produtividade dos agrotóxicos e tem sido adotado por diversos estudos (CARRASCO-TAUBER e MOFFIT, 1992; SEXTON, ZHEN e ZILBERMAN, 2007; WANG, CHU e MA, 2018; SCHREINEMACHERS et al., 2020; SUN, ZHANG e HU, 2020; CAI et al., 2021).

3.4. MODELO EMPÍRICO

Nesta seção, apresenta-se a estratégia empírica desta pesquisa. Foram utilizados modelos de dados em painel, o que permitiu controlar efeitos de fatores não observáveis potencialmente correlacionados com os regressores, obtendo estimativas mais precisas (CAMERON e TRIVEDI, 2005). Inicialmente, o método para estimar a produtividade marginal dos agrotóxicos e verificar se há uso excessivo de pesticidas no Brasil é apresentado. Posteriormente, apresenta-se o método utilizado para identificar fatores que influenciam o uso de agrotóxicos no Brasil. Por fim, a base de dados utilizada na pesquisa é apresentada.

3.4.1 Produtividade marginal dos agrotóxicos

A abordagem da função de produção é adotada para estimar a produtividade dos agrotóxicos. Assumem-se duas formas funcionais para a função de produção: Cobb-Douglas e controle de danos. Como apresentado na seção anterior, o modelo de controle de danos é o mais apropriado para o cálculo da produtividade dos pesticidas (LICHTENBERG e ZILBERMAN, 1986; FRISVOLD, 2019). Sendo assim, a especificação de Cobb-Douglas é estimada apenas para comparação, como feito por Carrasco-Tauber e Moffit (1992);

Praneetvatakul e Waibel (2002); Jha e Regmi (2011); Zhang et al. (2015); Wang, Chu e Ma (2018).

A especificação adotada para a função controle de danos é a de Weibull, que apresentou melhor ajuste aos dados⁴². Além dos fatores de produção, foram inseridos como controles variáveis climáticas, características dos produtores, efeitos fixos de ano, região e região-ano. As funções de produção estimadas são apresentadas a seguir:

$$\begin{aligned} \ln Y_{it} = & \alpha + \lambda \ln Agrotóxicos_{it} + \beta_1 \ln Trabalho_{it} + \beta_2 \ln Despesa_{it} \\ & + \beta_3 \ln Capital_{it} + \beta_4 \ln CapitalAnimal_{it} + \beta_5 C_{it} + \beta_6 Clima_{it} \\ & + \beta_7 Ano_t + \beta_8 Reg_i + \beta_9 Ano_t * Reg_i + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \ln Y_{it} = & \alpha + \ln(1 - \exp(-Agrotóxicos_{it}^\lambda)) + \beta_1 \ln Trabalho_{it} + \beta_2 \ln Despesa_{it} \\ & + \beta_3 \ln Capital_{it} + \beta_4 \ln CapitalAnimal_{it} + \beta_5 C_{it} + \beta_6 Clima_{it} \\ & + \beta_7 Ano_t + \beta_8 Reg_i + \beta_9 Ano_t * Reg_i + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (11)$$

Y_{it} representa o valor da produção animal e vegetal (em mil reais) no município i , no período t . *Trabalho* equivale ao número de trabalhadores familiares e contratados acima de 14 anos; *Despesa* refere-se à soma de despesas com adubos e corretivos, sementes e mudas, medicamentos para animais, sal e ração, transporte, energia (em mil reais); *Capital* representa o número de tratores, semeadeiras e plantadeiras, colheitadeiras e adubadeiras e/ou distribuidoras de calcário; *Capital Animal* refere-se ao valor da venda de cabeças de bovinos, suínos e aves⁴³ (em mil reais); *Agrotóxicos* corresponde às despesas com agrotóxicos (em mil reais). O produto e todos os insumos são divididos pelo fator terra, que corresponde à área destinada às lavouras e pastagens (em hectares).

Com relação aos controles, *Clima* refere-se às variáveis climáticas, especificamente, médias e desvios da temperatura e da precipitação acumulada; C é um vetor composto por características dos produtores (idade, escolaridade e sexo). *Ano* é uma *dummy* com valor igual à unidade para o ano de 2017 e *Reg* são *dummies* das regiões brasileiras. Essas variáveis representam, respectivamente, o efeito fixo de ano e de região, que permitem controlar fatores não observáveis fixos no tempo nessas regiões. Com o objetivo de controlar a tendência observada nas regiões brasileiras no período analisado, isto é, controlar fatores não observáveis variantes no tempo nas regiões analisadas, a variável $Ano * Reg$, que equivale à

⁴² As estimativas com as especificações exponencial e logística encontram-se no Apêndice.

⁴³ As aves incluem galinhas, galos, frangas, frangos e pintos.

interação entre região e ano, foi inserida nas regressões. O erro aleatório é representado pelo termo ε e $\alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7, \beta_8, \beta_9, \lambda$ são parâmetros a serem estimados.

Para verificar se houve alteração na produtividade dos agrotóxicos entre 2006 e 2017, segue-se o procedimento adotado por Sun, Zhang e Hu (2020), em que o parâmetro λ , que representa o efeito produtivo dos pesticidas, é dado por: $\lambda = \lambda_{2006} + \lambda_{2017} * Ano$. Desta forma, é possível capturar mudanças no efeito das despesas com agrotóxicos no valor da produção entre 2006 e 2017.

Para estimar a equação (10), utiliza-se o método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO). Já a equação (11) é estimada por Mínimos Quadrados Não Lineares. Os erros-padrão são clusterizados a nível de município a fim de evitar potencial correlação espacial e heterocedasticidade. Baseado nos coeficientes estimados e na quantidade de recursos observada, é possível mensurar a receita marginal dos agrotóxicos (RMA). Para as especificações Cobb-Douglas e Weibull, esse efeito é obtido, respectivamente, por meio das equações (12) e (13).

$$RMA_{it} = \frac{\partial Y(.)}{\partial Agrotóxicos} = F(X) \lambda (Agrotóxicos_{it})^{\lambda-1} \quad (12)$$

$$RMA_{it} = \frac{\partial Y(.)}{\partial Agrotóxicos} = F(X) \lambda (Agrotóxicos_{it})^{\lambda-1} \exp(-Agrotóxicos_{it}^{\lambda}) \quad (13)$$

em que, $F(X) = e^{\alpha} Trabalho_{it}^{\beta_1} Despesa_{it}^{\beta_2} Capital_{it}^{\beta_3} CapitalAnimal_{it}^{\beta_4} \exp(\beta_5 C_{it} + \beta_6 Clima_{it} + \beta_7 Ano_t + \beta_8 Reg_i + \beta_9 Ano_t * Reg_i)$.

Note que a diferença entre as equações (12) e (13) é o termo $\exp(-Agrotóxicos^{\lambda})$, que considera a especificidade dos agrotóxicos como agente de controle de danos, permitindo que a elasticidade dos agrotóxicos não seja constante e, por conseguinte, que as estimativas da sua produtividade não sejam superestimadas (Lichtenberg e Zilberman, 1986).

Note ainda que a receita marginal não depende apenas das despesas com pesticidas, mas também é afetado pelos demais insumos. Sendo assim, cada município terá um nível ótimo de aplicação de pesticidas, de acordo com seus recursos. Diante disso, a receita marginal dos agrotóxicos é calculada para cada município e, assim, é possível identificar aqueles com uso excessivo. Para obter a produtividade dos pesticidas no setor agrícola brasileiro, calcula-se a média dos efeitos marginais de todos os municípios avaliados.

É importante lembrar que, do ponto de vista econômico, o nível ótimo ocorre quando os retornos marginais e os custos marginais se igualam. Em outras palavras, no nível ótimo, o valor do rendimento da produção resultante de uma unidade adicional de pesticida é igual ao custo de uma unidade adicional de pesticida (ZHANG et al., 2015; WANG, CHU e MA, 2018; SCHREINEMACHERS et al., 2020; CAI et al., 2021). Portanto, os municípios que aplicam o nível ótimo de agroquímicos maximizam seu lucro.

Como as variáveis referentes aos agrotóxicos e à produção estão em termos monetários, assume-se que, quando a $RMA = 1$, a aplicação dos pesticidas encontra-se no nível ótimo. No caso em que o $RMA > 1$, isto é, o aumento de um real nas despesas com agrotóxicos implica aumento superior à um real no valor da produção, há subutilização dos pesticidas. Já se o gasto adicional com agrotóxicos resulta no rendimento inferior à unidade na produção, ou seja, o $RMA < 1$, o uso de pesticidas é excessivo.

3.4.2 Determinantes do uso excessivo de agrotóxicos

Para identificar fatores que afetam o uso excessivo de pesticidas no Brasil, são utilizados modelos de regressão múltipla e de probabilidade. A regressão estimada é apresentada a seguir:

$$\begin{aligned} Over_{it} = & \alpha + \delta_1 C_{it} + \delta_2 Clima_{it} + \delta_3 Ano_t + \delta_4 Reg_i + \delta_5 Ano_t * Reg_i \\ & + \delta_6 Crédito_{it} + \delta_7 Area_{it} + \delta_8 Ater_{it} + \delta_9 Associado_{it} \\ & + \delta_{10} AgriculturaOrgânica_{it} + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (14)$$

O modelo de probabilidade é estimado por meio do *Correlated Random Effects Probit (MLE pooled)*, que apresenta resultados robustos independentemente do tipo de correlação serial (Wooldridge, 2010). Nesse modelo, a variável dependente (*Over*) é binária e recebe valor igual a um, quando há uso excessivo de pesticidas e zero, caso contrário. O uso excessivo de pesticidas é determinado por meio da equação (13). Vale lembrar que, se o $RMA < 1$, há uso excessivo de pesticidas no município. Já se o $RMA \geq 1$, o uso de agrotóxicos é igual ou inferior ao nível ótimo e, portanto, seu uso não é excessivo.

No modelo de regressão múltipla, estimado por MQO, a variável dependente representa quão excessivo é o uso de agrotóxicos. Nesse caso, *Over* refere-se à diferença entre o RMA ótimo (igual à unidade) e o RMA observado, ou seja, $Over = 1 - RMA_{obs}$. Quanto maior o valor da variável *Over*, maior a quantidade de agrotóxicos usada em excesso.

As variáveis de controle, *C*, *Clima*, *Ano*, *Reg* e *Ano*Reg*, foram definidas anteriormente. As demais variáveis, descritas no Quadro 1, representam o acesso ao crédito rural (*Crédito*) e aos serviços de assistência técnica e extensão rural (*Ater*); a associação do produtor a cooperativas ou entidades da classe (*Associado*); a adoção do sistema de produção orgânico (*Agricultura Orgânica*) e a área total do estabelecimento agropecuário (*Area*).

Quadro 1 – Definição das variáveis utilizadas nas estimativas

Variáveis	Descrição das variáveis
<i>Insumos e produto</i>	
Valor bruto da produção	Valor da produção animal e vegetal, em mil reais
Agrotóxicos	Valor das despesas com agrotóxicos, em mil reais
Trabalho	Número de trabalhadores (familiar e contratado) acima de 14 anos
Despesas	Valor das despesas com adubos e corretivos, sementes e mudas, medicamentos para animais, sal e ração, transporte e energia, em mil reais
Capital	Número de tratores, semeadeiras, plantadeiras, colheitadeiras e adubadeiras e/ou distribuidoras de calcário
Capital Animal	Valor das cabeças vendidas de bovinos, suínos e aves, em mil reais
Área utilizada	Área do estabelecimento agropecuário destinada a lavouras e pastagens, em hectares
<i>Características socioeconômicas</i>	
Gênero (homem) [#]	Percentual de estabelecimentos agropecuários cujo dirigente é homem
Acima de 45 anos [#]	Percentual de estabelecimentos agropecuários cujo dirigente tem mais de 45 anos
Ensino superior [#]	Percentual de estabelecimentos agropecuários cujo dirigente possui ensino superior completo
Ater	Percentual de estabelecimentos agropecuários que receberam orientação técnica
Crédito	Percentual de estabelecimentos agropecuários que obtiveram financiamento rural
Associado	Percentual de estabelecimentos agropecuários onde o produtor é associado à cooperativa e/ou à entidade de classe
Agricultura Orgânica	Percentual de estabelecimentos agropecuários que adotaram o sistema de produção orgânico
Área	Média da área dos estabelecimentos agropecuários
<i>Características climáticas (Clima)</i>	
Temperatura média verão ^{##}	Média da temperatura (°C) nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro
Temperatura média inverno ^{##}	Média da temperatura (°C) nos meses de junho, julho e agosto
Precipitação média verão ^{##}	Média da precipitação acumulada (mm) nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro
Precipitação média inverno ^{##}	Média da precipitação acumulada (mm) nos meses de junho, julho e agosto
Temperatura desvio verão ^{##}	Desvio padrão da temperatura nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro
Temperatura desvio inverno ^{##}	Desvio padrão da temperatura nos meses de junho, julho e agosto
Precipitação desvio verão ^{##}	Desvio padrão da precipitação nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro
Precipitação desvio inverno ^{##}	Desvio padrão da precipitação nos meses de junho, julho e agosto

Fonte: Elaboração própria.

Nota: [#]Variáveis que compõem o vetor *C*. ^{##}Variáveis que compõem o vetor *Clima*.

Segundo Rahman (2015) e Zhang et al. (2018a), a idade do agricultor pode influenciar a decisão associada ao uso de agrotóxicos. Sheahan e Barret (2017) demonstram que o gênero

do produtor também exerce influência na decisão de aplicar insumos modernos como os pesticidas. A escolaridade pode facilitar a compreensão das especificações técnicas para o uso adequado dos agrotóxicos e a aceitação de métodos alternativos e sustentáveis (SANKOH et al., 2016), podendo influenciar o uso excessivo de pesticidas.

O crédito agrícola pode ser outro fator determinante do uso em excesso de agrotóxicos, haja vista o modelo agrícola adotado no Brasil, que incentivou seu uso intensivo (PORTO e SOARES, 2012). Os serviços de assistência técnica e extensão rural (Ater) têm papel importante no direcionamento dos agricultores para o uso e manuseio adequados dos pesticidas (SOARES e PORTO, 2012), além de contribuir para a adoção do manejo integrado de pragas (MIP) (TIMPRASERT, DATTA e RANAMUKHAARACHCHI, 2014), podendo influenciar a quantidade utilizada de agrotóxicos. Analogamente, as cooperativas, ao fornecerem informações precisas e confiáveis sobre a dosagem dos agroquímicos, podem contribuir para redução do seu uso inadequado (JIN, BLUEMLING e MOL, 2015).

A agricultura orgânica também pode influenciar a intensidade no uso de agrotóxicos, dado que não utiliza produtos químicos sintéticos no seu processo produtivo. Segundo Rahman (2015), a agroecologia é uma oportunidade para os agricultores decidirem sua carteira de cultivo, sendo uma alternativa às culturas químico-dependentes.

O tamanho da propriedade, representado pela variável *Area*, pode contribuir para intensificação do uso de agrotóxicos (DASGUPTA, MAMINGI e MEISNER, 2001; RAHMAN, 2003, 2013; BURGER, MOL e GEROWITT, 2012). Já as variáveis climáticas podem influenciar a intensidade do uso, haja vista seus efeitos sobre a manifestação de pragas e patógenos (DELCOUR, SPANOGHE e UYTENDAELE, 2015). Nesta pesquisa, assim como realizado por Cunha, Coelho e Féres (2015) e Moraes et al. (2021), são calculadas as médias e desvios-padrão de temperatura e precipitação de verão e inverno devido às alterações significativas do clima observadas entre essas estações no Brasil.

Assim como nas estimativas da produtividade, para verificar os fatores que influenciam o uso excessivo de pesticidas, foram incluídos, na equação (14), efeitos fixos de ano, região e região-ano para controlar fatores não observáveis invariantes e variantes no tempo das regiões analisadas.

3.4.3 Fonte e tratamento dos dados

Os dados utilizados nesta pesquisa tiveram como principal fonte os Censos

Agropecuários de 2006 e 2017⁴⁴, publicados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Esta base de dados, disponível por meio do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA), contém informações sobre os produtores e estabelecimentos agropecuários agregados a nível municipal. Desta forma, neste estudo, utiliza-se o conceito de fazendas representativas, em que o valor de cada variável é dividido pelo número de estabelecimentos agropecuários do respectivo município. Sendo assim, as variáveis representam uma média e os municípios passam a ser considerados estabelecimentos agropecuários representativos.

É importante dizer que foram criados seis municípios entre 2006 e 2017, passando de 5.564 para 5.570. Deste modo, para possibilitar a comparação intertemporal de uma mesma área geográfica, os municípios emancipados e os que deram origem a eles foram excluídos da amostra. Esse procedimento não gera viés de seleção, dado que não está relacionado com as despesas com agrotóxicos ou com o valor da produção agropecuária. Além disso, esses municípios representam cerca de 0,25% do total de municípios brasileiros.

Ainda em relação ao tratamento dos dados, a amostra foi composta por municípios que tiveram despesas com agrotóxicos nos dois períodos analisados, totalizando 5.195 municípios. Foram excluídos 24 municípios por falta de informações completas. Diante disso, a amostra foi composta por 5.171 municípios (92,84% do total de municípios brasileiros) e 10.342 observações.

As variáveis climáticas foram obtidas no banco de dados disponibilizado pelo grupo *Terrestrial Hydrology Research Group* (THRG), cuja construção seguiu os procedimentos descritos em Sheffield, Goteti e Wood (2006)⁴⁵. Tratam-se de dados georreferenciados diários de temperatura (°C) e precipitação (mm) com resolução de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (~28 km x 28 km) entre o período de 1985 a 2016. Para construir as variáveis climáticas, utilizam-se os dados de temperatura média (°C) e precipitação acumulada (mm) de 2006 e 2016⁴⁶. A partir desses dados, usando os valores mensais, calcularam-se as médias sazonais de temperatura e precipitação acumulada: de dezembro a fevereiro representando a estação de verão e de junho a agosto correspondendo ao inverno.

⁴⁴ O período de referência do Censo Agropecuário de 2017 é de 1º de outubro de 2016 a 30 de setembro de 2017.

⁴⁵ Agradeço ao professor Marcelo José Braga pelo fornecimento desses dados.

⁴⁶ O THRG disponibilizou os dados climáticos até o ano 2016. Deste modo, considerou-se a temperatura e precipitação de 2016 para as análises de 2017. Assume-se que, na média, não há diferenças significativas nessas variáveis entre dois anos consecutivos.

3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, os resultados são apresentados e discutidos. Inicialmente, apresenta-se a análise descritiva das variáveis. Em seguida, analisam-se o efeito dos agrotóxicos sobre o valor da produção e sua produtividade marginal. Por fim, os resultados sobre o uso excessivo de pesticidas e os fatores que o influenciam são apresentados e discutidos.

3.5.1 Análise descritiva

A Tabela 1 apresenta a estatística descritiva das variáveis utilizadas nesta pesquisa para os anos de 2006 e 2017. Note que as despesas com agrotóxicos aumentaram durante o período assim como os demais fatores de produção, exceto o trabalho, que teve pequena redução (6,64%). O VBP também foi maior em 2017 em relação à 2006.

Tabela 1 – Estatísticas descritivas das variáveis utilizadas nos anos 2006 e 2017

Variáveis	2006		2017	
	Média	DP	Média	DP
Insumos e produto				
Valor bruto da produção (mil R\$)	58.768,75	99.051,73	88.070,72	173.741,60
Agrotóxicos (mil R\$)	4.879,44	47.047,27	6.215,97	22.772,02
Trabalho (nr. trabalhadores)	2.897,10	2.968,93	2.704,75	2.818,25
Despesas com insumos (mil R\$)	16.029,77	70.591,07	23.499,59	52.327,47
Capital (unidades)	267,46	414,84	380,46	592,77
Capital animal (mil R\$)	10.926,23	31.305,37	19.262,39	41.826,12
Área Utilizada (hectares)	41.364,28	87.798,62	41.891,38	91.036,99
Características socioeconômicas*				
Gênero (homem)	89,13	5,87	83,54	7,43
Idade (Acima de 45 anos)	64,54	8,74	74,49	8,25
Escolaridade (ensino superior completo)	4,88	6,05	9,04	8,23
Assistência técnica	30,77	23,76	28,50	23,20
Crédito	18,75	14,46	17,44	12,24
Associado	39,67	22,36	47,17	31,28
Agricultura Orgânica	1,88	3,94	1,64	3,90
Área (hectares)**	94,10	202,67	95,34	197,95
Características climáticas				
Temperatura verão – média (°C)	25,87	1,95	25,72	2,00
Temperatura inverno – média (°C)	22,69	3,76	21,02	4,35
Precipitação verão – média (mm)	155,65	83,97	187,91	77,10
Precipitação inverno – média (mm)	58,83	64,17	51,44	42,26
Temperatura verão – desvio padrão	0,90	0,55	0,68	0,39
Temperatura inverno – desvio padrão	0,83	0,44	0,44	0,15
Precipitação verão – desvio padrão	70,21	42,86	99,33	60,90
Precipitação inverno – desvio padrão	19,97	23,02	33,60	29,44

Fonte: Elaboração própria, conforme dados dos Censos Agropecuários 2006 e 2017 e do THRG.

Nota: Os valores monetários de 2006 foram deflacionados pelo IGP-DI da Fundação Getúlio Vargas (FGV).

*Correspondem ao percentual de estabelecimentos agropecuários do município cujo dirigente possui determinada característica. **Média da área dos estabelecimentos agropecuários.

A redução no número de trabalhadores no setor agropecuário brasileiro pode estar associada ao êxodo rural e à redução da taxa de fecundidade⁴⁷ rural, que diminuiu a mão de obra disponível para a atividade agrícola (MAIA e BUAINAIN, 2015). O aumento da proporção de estabelecimentos agropecuários cujos dirigentes possuem mais de 45 anos pode ser consequência desse fenômeno. Como apontado por DelGrossi e Balsadi (2020), a migração rural-urbana no Brasil tende a ser mais intensa entre os mais jovens, as mulheres e aqueles com maiores níveis de escolaridade. Além disso, a automação e mecanização do setor agropecuário brasileiro, com a adoção de tecnologias poupadoras de mão de obra, também contribuíram para redução do trabalho rural (DelGROSSI e BALSADI, 2020).

Ao mesmo tempo que houve redução no fator de produção trabalho, o fator capital, capital animal e as despesas com demais insumos aumentaram cerca de 42,25%, 76,29% e 46,60%, respectivamente, no período analisado. Já a área destinada a lavouras e pastagens cresceu apenas 1,27%. Segundo Gasques et al. (2020), o crescimento da agricultura brasileira tem se dado com mais capital do que mão de obra e terra.

As despesas com agrotóxicos aumentaram 27,39% entre 2006 e 2017. Este aumento está associado à expansão significativa na comercialização de ingredientes ativos no Brasil, que passou de 204.124,24 toneladas em 2006 para 539.944,95 toneladas em 2017 (IBAMA, 2019). Vale mencionar que, de acordo com os dados do IBAMA e dos Censos Agropecuários, houve redução no preço médio dos agrotóxicos no Brasil, que passou de R\$ 124,38/kg de ingredientes ativos em 2006 para R\$ 60,14/kg em 2017⁴⁸. Entre 2009 e 2017, verifica-se redução de, aproximadamente, 12,87%, 31% e 31,79% nos preços médios dos herbicidas, inseticidas e fungicidas, respectivamente⁴⁹ (CONAB, s.d.). Diante disso, pode-se dizer que o aumento nas despesas com agrotóxicos é resultante da maior quantidade aplicada.

⁴⁷ Refere-se ao número médio de filhos nascidos vivos que uma mulher teria no seu período reprodutivo (entre 15 e 49 anos de idade) (IBGE, 2016).

⁴⁸ O preço médio foi calculado baseado na quantidade de ingredientes ativos comercializados e nas despesas com agrotóxicos no Brasil em 2006 e 2017, cujos dados são disponibilizados, respectivamente, pelo IBAMA e pelo IBGE. Os valores de 2006 foram corrigidos pelo IGP-DI da Fundação Getúlio Vargas.

⁴⁹ Os valores de 2009 foram corrigidos pelo IGP-DI da Fundação Getúlio Vargas. Agrotóxicos considerados: (i) Herbicidas: 2,4-D; 2,4 D Fersol; Aminol, 806; Atranex, 500 sc; Atrazinax, 500; Aurora, 400; Basagran, 480; Basagran, 600; Callisto; Clincher; Cobra; Diuron, 500 SC; DMA, 806 BR; Dropp, Ultra SC; Dual, Gold; Finale; Finish; Flex; Gamit; Gamit 360 CS, 360 G/L, Clomazine, Isoxazolidinona, CS; Glifosato, Atanor; Glifosato, Nortox; Goal, BR; Gramocil; Gramoxone, 200; Laço, CE; Msma, Sanachem 720 SL; Pivot; Podium, S; Primatop, SC; Primóleo; Reglone; Ricer; Ronstar, 250 BR; Roundup, Original; Roundup, Ready; Roundup, Transorb; Sanson, 40 SC; Select, 240 CE; Sirius, 250 SC; Staple, 280 CS; Totril; Trop, 480; Verdict, R; Volcane; (ii) Inseticidas: Abamectin Nortoxa; Arrivo, 200 EC; Atabron, 50 CE; Avaunt, 150.0; Baculovirus, Nital; Bulldock, 125 SC; Certero; Cipermetrina; Cipermetrina, Nortox 250 EC; Clorpirifós, Clorpirifós, 480 CE Milenia; Cropstar; Cruiser, 350 FS; Curyom, 550 CE; Decis, 025 EC; Decis, 200 SC; Engeo; Engeo, Pleno; Fastac 100 SC, 100 G/L, Alfacipermetrina, Piretróide, SC; Furadan, 50 G; Furazin, 310 FS; Fury, 180 EW; Fury, 200 EW; Fury, 400 EC; Gaucho, FS; Hostathion, 400 BR; Karate, Zeon 250 CS; Karate, Zeon 50 Cs; Klap; Lannate, Br; Lorsban, 480 Br; Marshal, 400 Sc; Match, Ce; Nomolt, 150.0; Parathion, Metílico Cheminova;

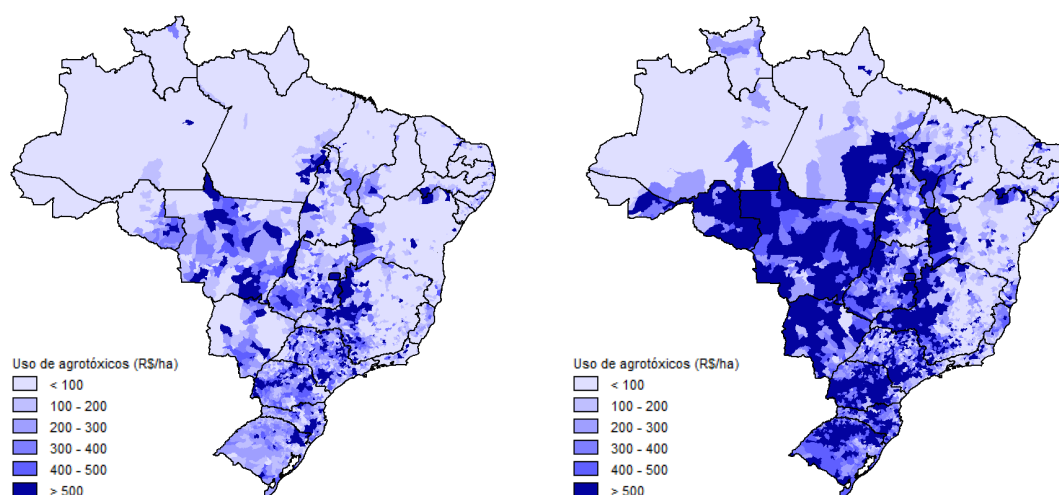
Na Figura 1, observa-se que a intensificação do uso de pesticidas ocorreu em grande parte do território nacional, com destaque para as regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste, cujas médias das despesas com agroquímicos em 2017 foram de, respectivamente, R\$ 23.419,76 mil, R\$ 7.917,41 mil e R\$ 5.109,87 mil. Note que a média das regiões Centro-Oeste e Sul supera a média nacional (R\$ 6.203,13 mil) (IBGE, 2017). Em relação à quantidade de ingredientes ativos comercializada, essas regiões também se destacam, sendo responsáveis por 85,56% da comercialização de agrotóxicos no país em 2017, o que corresponde ao consumo de 461.981,45 toneladas de ingredientes ativos (IBAMA, 2019).

Ressalta-se o predomínio do plantio de soja e milho nas regiões Sul e Centro-Oeste, com 72,67% e 85,92%, respectivamente, da área de plantio destinada a essas culturas e de cana-de-açúcar no Sudeste, que ocupou 45,20% da área de plantio em 2017 (PAM, 2017). Tendo em vista que as lavouras de soja, milho e cana-de-açúcar foram responsáveis por 76% do consumo de agrotóxicos em 2016 (MORAES, 2019), é possível que a produção de *commodities* esteja vinculada ao maior uso de pesticidas nessas regiões.

Figura 1 – Evolução das despesas com agrotóxicos por área destinada a lavouras (R\$/ha) em 2006 e 2017

1a – Despesas com agrotóxicos em 2006 (R\$/ha)

1b – Despesas com agrotóxicos em 2017 (R\$/ha)



Fonte: Elaboração própria, conforme dados dos Censos Agropecuários 2006 e 2017.

Com relação às características socioeconômicas, destaca-se o aumento de dirigentes com nível superior. Embora a proporção ainda seja pouco significativa (inferior à 10%), o aumento é um sinal positivo, haja vista a importância da educação formal para redução da

Pirephos, EC; Polo, 500 SC; Pounce, 384 CE; Rimon, 100 EC; Standak; Sumithion, 500 CE; Supracid, 400 CE; Talcord, 250 CE; Talstar, 100 CE; Tamaron, BR; Thiodan, EC; Tracer; Veget Oil, Oil.; (iii) Fungicidas: Alto, 100; Baytan, SC; Bendazol; Bravonil, 500.0; Cercobin, 500 SC; Cercobin, 700 PM; Comet; Derosal, 500 SC; Derosal, Plus; Eminent, 125 EW; Folicur, 200 CE; Frowncide, 500 SC; Maxim, XL; Mertin, 400.0; Nativo; Opera; Opus; Priori; Priori, Xtra; Ridomil, Gold MZ; Rovral, SC; Tilt; Vitavax-Thiram, 200 SC.

intensidade do uso e dos riscos associados à aplicação de pesticidas (SOARES e PORTO, 2009; JALLOW et al., 2017; MARIYONO, KUNTARININGSIH e KOMPAS, 2018 e ZHANG et al., 2018a) e para adoção de tecnologias agrícolas (RAMÍREZ e SCHULTZ, 2000; CHALLA e TILAHUM, 2014; SANKOH et al., 2016; ZHANG et al. 2018a), contribuindo para o desenvolvimento do setor.

O aumento na proporção de estabelecimentos cujos produtores são membros de cooperativas e/ou entidades da classe é outro ponto positivo, haja vista o papel das cooperativas na comercialização de insumos e produtos, no acesso a mercados, prestação de serviços e tecnologias, contribuindo para o aumento da competitividade dos produtores associados e para redução das falhas de mercado (COSTA, VIZCAINO e COSTA, 2020).

Outros fatores, também importantes para o desenvolvimento do setor, apresentaram redução entre 2006 e 2017, como os serviços de assistência técnica e extensão rural (Ater) e o crédito agrícola. Além do baixo percentual de estabelecimentos agropecuários que obtiveram esses serviços em 2006 (cerca de 30% para Ater e 18% para crédito rural), o valor foi ainda menor em 2017. A redução do crédito rural pode ter sido influenciada por questões macroeconômicas e/ou por alterações na estrutura fundiária brasileira e não pela política agrícola per si, cujas condições foram mais atrativas em 2017 relativamente à 2006 (ARAÚJO et al., 2020).

Com relação aos serviços de Ater, a despeito da institucionalização da Política Nacional de Assistência Técnica e Extensão Rural para a Agricultura Familiar e Reforma Agrária (PNATER)⁵⁰ em 2010 e da criação da Agência Nacional de Assistência Técnica e Extensão Rural (Anater)⁵¹ em 2014, as crises fiscal e econômica dos anos seguintes restringiram os recursos destinados a essa política, impossibilitando a expansão desses serviços para os produtores (PEIXOTO, 2020).

A proporção de estabelecimentos agropecuários com produção orgânica, outro fator que pode contribuir para o desenvolvimento sustentável do setor, diminuiu entre 2006 e 2017. Em contrapartida, o percentual de estabelecimentos que relataram utilizar agrotóxicos aumentou, passando de 27% em 2006 para 33% em 2017 (IBGE, 2006; 2017).

De maneira geral, nos dois períodos analisados, observa-se o predomínio de dirigentes homens, com mais de 45 anos e com baixo nível de escolaridade. Ademais, quase metade dos estabelecimentos possuem dirigentes associados a cooperativas e/ou entidades da classe em

⁵⁰ Política instituída pela Lei nº 12.188, de 11 de janeiro de 2010 (Brasil, 2010).

⁵¹ Instituída pelo Decreto nº 8.252, de 26 de maio de 2014 (Brasil, 2014).

2017. No entanto, menos de 30% dos estabelecimentos agropecuários receberam algum tipo de orientação técnica ou contrataram crédito rural no período.

3.5.2 Estimativas da função de produção e a produtividade dos agrotóxicos

Os resultados das estimativas da função de produção encontram-se na Tabela 2. Para o modelo de controle de danos, assume-se a especificação de Weibull, que apresentou melhor ajuste aos dados⁵². A qualidade de ajuste dos modelos (R^2) foi de 0,802 para a função Cobb-Douglas e 0,795 para a função controle de danos, indicando que os modelos utilizados têm um bom poder de explicação. Adicionalmente, observa-se que os resultados obtidos por ambos os modelos, com relação ao sinal e significância dos coeficientes, são similares, indicando que as estimativas são robustas.

Tabela 2 – Resultados das estimativas da função de produção Cobb-Douglas e controle de danos (Weibull)

Variáveis	Cobb-Douglas (pooled)	Controle de danos (Weibull)
Agrotóxicos	0.121*** (0.00677)	0.164*** (0.0185)
Agrotóxicos*2017	0.0222*** (0.00627)	0.0247 (0.0215)
Trabalho	0.296*** (0.00998)	0.261*** (0.00993)
Despesas	0.400*** (0.0126)	0.477*** (0.0112)
Capital	0.0105*** (0.00363)	0.0143*** (0.00364)
Capital animal	0.0881*** (0.00781)	0.0668*** (0.00770)
Constante	5.509*** (0.178)	5.749*** (0.181)
Controles [#]	Sim	Sim
EF ano	Sim	Sim
EF Região	Sim	Sim
EF Região-Ano	Sim	Sim
AIC	14875.58	15252.42
BIC	15071.17	15448.01
R^2	0.802	0.795
F estatístico	1543.67***	-
Observações	10,342	10,342

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: Erros-padrão robustos entre parênteses. *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$. [#]Os controles utilizados são variáveis climáticas (médias e desvios da temperatura e da precipitação acumulada nas estações de verão e inverno) e características dos produtores (sexo, idade e escolaridade).

⁵² Os resultados das estimativas da função de produção com as distribuições logística e exponencial encontram-se no Apêndice. O modelo com distribuição de Pareto não foi estimado, pois este assume que o produto é inelástico, o que não descreve as características do modelo de controle de danos (Lichtenberg e Zilberman, 1986).

Como esperado, todos os fatores de produção contribuem para o aumento no valor da produção agropecuária. Da mesma forma, os agrotóxicos tem efeito positivo sobre a produção. Resultado similar foi encontrado por Zhang et al. (2015); Wang, Chu e Ma (2018); Sun, Zhang e Hu (2020); Schreinemachers et al. (2020) e Cai et al. (2021).

No entanto, não se pode afirmar que o efeito positivo dos agrotóxicos sobre a produção implica que seu uso é adequado. Diante disso, na Tabela 3, verifica-se receita marginal dos agrotóxicos (RMA). Vale lembrar que, quando o RMA é igual à unidade, a aplicação de pesticidas está sendo feita no nível ótimo. Se o valor é superior (inferior) à unidade, seu uso está abaixo (acima) do nível ótimo.

Note que os resultados são divergentes entre os modelos estimados. Enquanto na especificação Cobb-Douglas, o efeito marginal médio indica que os pesticidas são subutilizados no Brasil, o modelo de controle de danos sugere o contrário. Em todas as regiões brasileiras, observa-se que os coeficientes estimados por meio da especificação Cobb-Douglas são maiores que os estimados pela especificação Weibull. Tais resultados corroboram a hipótese de Lichtenberg e Zilberman (1986) de que a função de produção Cobb-Douglas superestima a produtividade dos agrotóxicos por não o considerar um agente de controle de danos, ou seja, que seu efeito sobre a produção é indireto, por meio do controle dos danos causados pelas pragas e patógenos. Zhang et al. (2015) e Praneetvatakul e Waibel (2002) também encontraram valores maiores para a produtividade dos agrotóxicos quando se utiliza a função Cobb-Douglas em relação à função de controle de danos, ratificando a importância de considerar a especificidade dos agrotóxicos na mensuração de sua produtividade. Como apresentado no modelo teórico, a RMA obtida por meio da especificação Cobb-Douglas é sempre superior à obtida pela especificação Weibull, assim, utilizá-la superestima a produtividade dos agrotóxicos e, conseqüentemente, subestima o uso em excesso de pesticidas. Diante disso, a interpretação e discussão dos resultados são baseadas nas estimativas obtidas por meio do modelo de controle de danos⁵³.

Na Tabela 3, observa-se que o aumento de R\$10,00/ha nas despesas com agrotóxicos eleva, em média, R\$7,71/ha no valor bruto da produção agrícola brasileira. Ou seja, a receita marginal desses insumos é inferior a seu custo marginal, indicando que os agrotóxicos estão sendo aplicados acima do nível ótimo. Conseqüentemente, os produtores não estão maximizando seu lucro. O uso excessivo de agrotóxicos também foi encontrado na produção

⁵³ As interpretações consideram os erros-padrão das estimativas obtidas por meio do modelo de controle de danos, que são inferiores aos obtidos pela função de produção Cobb-Douglas, os intervalos de confiança e o teste de igualdade das médias entre os períodos analisados. Todas essas informações são apresentadas na Tabela 3.

de vegetais na Tailândia (GROVERMANN, SCHREINEMACHERS e BERGER, 2013), no Nepal (JHA e REGMI, 2011), no Camboja, Laos e Vietnã (SCHREINEMACHERS et al., 2020), e na produção de maçãs (CAI et al., 2021), de arroz (ZHANG et al., 2015; WANG, CHU e MA, 2018 e SUN, ZHANG e HU, 2020), de milho (ZHANG et al., 2015 e SUN, ZHANG e HU, 2020), de algodão (ZHANG et al., 2015) e de trigo (SUN, ZHANG e HU, 2020) na China. Em relação aos países desenvolvidos, pode-se citar o estudo de Lechenet et al. (2017), que revela a possibilidade de reduzir o uso de pesticidas na França, sem impactar o lucro e produtividade agrícolas.

Tabela 3 – Estimativas da média da receita marginal dos agrotóxicos (RMA) no Brasil e por região

Região	Cobb-Douglas (pooled)				Controle de danos (Weibull)			
	Média	EP	IC (95%)		Média	EP	IC (95%)	
Brasil								
RMA 2006-2017	1.611	0.052	1.508	1.713	0.771	0.032	0.708	0.833
RMA 2006	1.727	0.054	1.621	1.833	0.827	0.031	0.766	0.887
RMA 2017	1.494	0.072	1.352	1.636	0.715	0.046	0.624	0.805
Diferença	0.233***	0.090	0.056	0.411	0.112**	0.056	0.003	0.221
Norte								
RMA 2006-2017	2.131	0.189	1.760	2.502	1.051	0.111	0.833	1.268
RMA 2006	2.656	0.297	2.072	3.241	1.372	0.181	1.016	1.727
RMA 2017	1.605	0.202	1.207	2.003	0.730	0.112	0.509	0.951
Diferença	1.051***	0.360	0.345	1.757	0.642***	0.213	0.224	1.060
Nordeste								
RMA 2006-2017	2.701	0.131	2.443	2.958	1.349	0.080	1.191	1.506
RMA 2006	2.816	0.117	2.586	3.045	1.368	0.066	1.239	1.497
RMA 2017	2.587	0.196	2.203	2.970	1.329	0.126	1.082	1.576
Diferença	0.229 ^{ns}	0.228	-0.218	0.676	0.039 ^{ns}	0.142	-0.239	0.318
Centro-Oeste								
RMA 2006-2017	0.786	0.079	0.632	0.941	0.361	0.048	0.266	0.456
RMA 2006	1.090	0.146	0.802	1.378	0.552	0.092	0.370	0.733
RMA 2017	0.483	0.034	0.417	0.549	0.170	0.017	0.138	0.203
Diferença	0.607***	0.150	0.312	0.902	0.381***	0.094	0.197	0.565
Sudeste								
RMA 2006-2017	1.495	0.080	1.337	1.653	0.707	0.049	0.611	0.804
RMA 2006	1.539	0.090	1.364	1.715	0.728	0.052	0.626	0.829
RMA 2017	1.451	0.103	1.249	1.652	0.687	0.068	0.554	0.820
Diferença	0.088 ^{ns}	0.136	-0.179	0.356	0.041 ^{ns}	0.085	-0.126	0.208
Sul								
RMA 2006-2017	0.361	0.019	0.324	0.397	0.099	0.009	0.081	0.116
RMA 2006	0.370	0.020	0.330	0.410	0.115	0.010	0.095	0.134
RMA 2017	0.351	0.021	0.310	0.393	0.083	0.010	0.063	0.103
Diferença	0.019 ^{ns}	0.029	-0.039	0.077	0.032**	0.014	0.004	0.060

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: EP: erros-padrão robustos; IC: intervalos de confiança. ***, ** indicam que a média da RMA entre os anos 2006 e 2017 é significativamente diferente ao nível de 1% e 5%, respectivamente.

Além da receita marginal ser menor que o custo marginal, na média, houve redução da produtividade dos pesticidas no período analisado (Tabela 3). Enquanto, em 2006, o

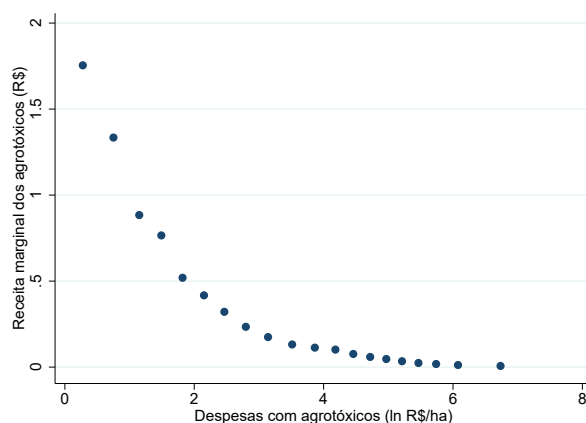
incremento de R\$10,00/ha nas despesas com agrotóxicos equivale ao aumento de R\$8,27/ha no VBP, esse valor é de R\$7,15/ha em 2017. Esses resultados são semelhantes aos obtidos por Rahman (2013) e Sun, Zhang e Hu (2020), que demonstraram redução da produtividade dos agrotóxicos em Bangladesh e na China, respectivamente.

Ressalta-se a redução significativa e o baixo nível da produtividade dos agrotóxicos nas regiões Centro-Oeste e Sul, principais produtoras de soja, cultura que utiliza intensivamente pesticidas e da qual o Brasil é o maior produtor mundial (EMBRAPA, s.d.). Enquanto em 2006 o incremento de R\$10,00/ha nas despesas com agrotóxicos equivale ao aumento de 5,52/ha e 1,15/ha no VBP das regiões Centro-Oeste e Sul, respectivamente, esses valores são de 1,70/ha e 0,83/ha para as respectivas regiões em 2017.

Diante disso, os impactos econômicos provenientes da redução da produtividade dos pesticidas no setor agrícola brasileiro podem ser significativos. Isso porque o modelo de produção agrícola adotado no país é dependente de agrotóxicos (CARNEIRO et al., 2015) e, desta forma, com a redução da eficácia desses insumos, a tendência é que sejam aplicadas maiores quantidades de pesticidas, elevando os custos de produção (WILSON e TISDELL, 2001; SEXTON, ZHEN e ZILBERMAN, 2007).

Ao mesmo tempo que a redução da eficácia do produto faz com que sejam utilizadas maiores quantidades, o uso inadequado de agrotóxicos pode estar contribuindo para redução de sua produtividade (SEXTON, ZHEN e ZILBERMAN, 2007; CAI et al., 2021). Na Figura 2, é possível observar que o valor da receita marginal dos agrotóxicos reduz à medida que aumenta a intensidade do seu uso.

Figura 2 – Valor da receita marginal dos agrotóxicos para diferentes níveis de despesas com agrotóxicos



Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: Utilizou-se o comando *binscatter* no *software* Stata para construção desta Figura.

É importante dizer que, no período analisado, o poder de compra dos produtores de soja, milho e cana-de-açúcar⁵⁴ em relação aos herbicidas frequentemente utilizados nessas lavouras aumentou entre 2006 e 2017 (Tabela 4), indicando redução do preço relativo dos agrotóxicos. Isso sugere que a redução da produtividade dos pesticidas apresentada na Tabela 3 não é consequência do aumento no preço dos agroquímicos e/ou redução do preço das culturas, mas de uma possível redução da eficácia dos pesticidas no período analisado.

Tabela 4 – Relação de troca entre ingredientes ativos e produtos agrícolas em 2006 e 2016

Ingrediente ativo (20 litros)	Soja (sc. 60 kg)		Milho (sc. 60 kg)		Cana-de-açúcar (tonelada)	
	2006	2016	2006	2016	2006	2016
2,4D Amina	9,99	4,22	-	-	8,68	5,14
Glifosato	8,52	5,52	-	-	-	-
Atrazina + Simazina	-	-	15,20	8,80	-	-

Fonte: Elaboração própria, conforme dados do Instituto de Economia Agrícola (IEA, s.d.). Os valores são referentes ao mês de janeiro dos respectivos anos.

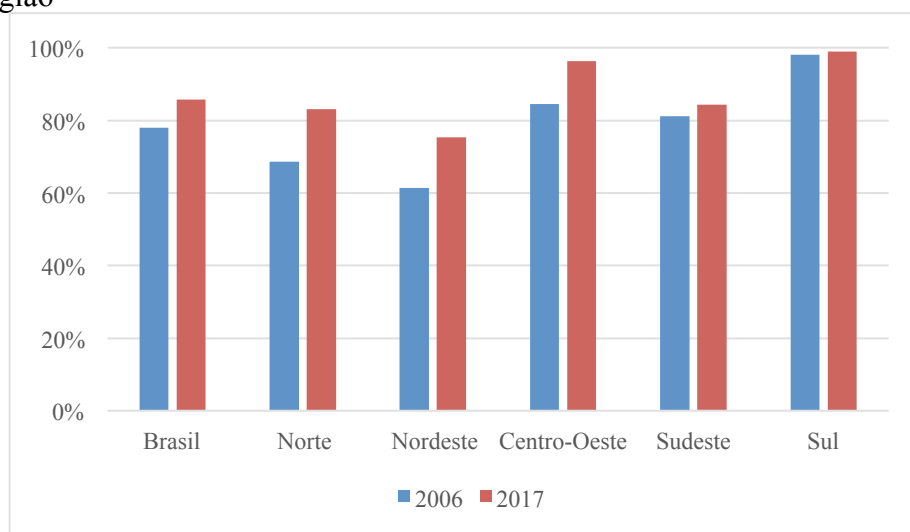
3.5.3 O uso excessivo de agrotóxicos e seus determinantes

Nesta seção, alguns fatores que afetam o uso excessivo de pesticidas são analisados. Vale lembrar que cada município tem seu nível ótimo de aplicação de agrotóxicos, de acordo com seus recursos. Dos 5.171 municípios da amostra, 4.034 utilizaram agrotóxicos acima do nível ótimo em 2006 e 4.432 em 2017⁵⁵. Em outras palavras, mais de 75% dos municípios analisados utilizaram agrotóxicos em excesso em ambos os anos. Na Figura 3, verifica-se que houve aumento no número de municípios com uso excessivo de pesticidas em todas as regiões brasileiras. Mais uma vez, destaca-se as regiões Centro-Oeste e Sul, onde mais de 95% dos municípios aplicaram agrotóxicos acima do nível ótimo em 2017.

⁵⁴ Tratam-se das culturas responsáveis pela maior parte do consumo de agrotóxicos no país. Em 2016, 76% dos agrotóxicos vendidos no Brasil foram destinados a esses cultivos (MORAES, 2019).

⁵⁵ Para identificar se o município usou agrotóxicos em excesso, foram considerados os intervalos de confiança. Assim, naqueles municípios onde o intervalo de confiança continha o valor unitário, assumiu-se que o nível ótimo de agrotóxicos está sendo aplicado.

Figura 3 – Percentual de municípios com uso excessivo de agrotóxicos em 2006 e 2017 no Brasil e por região

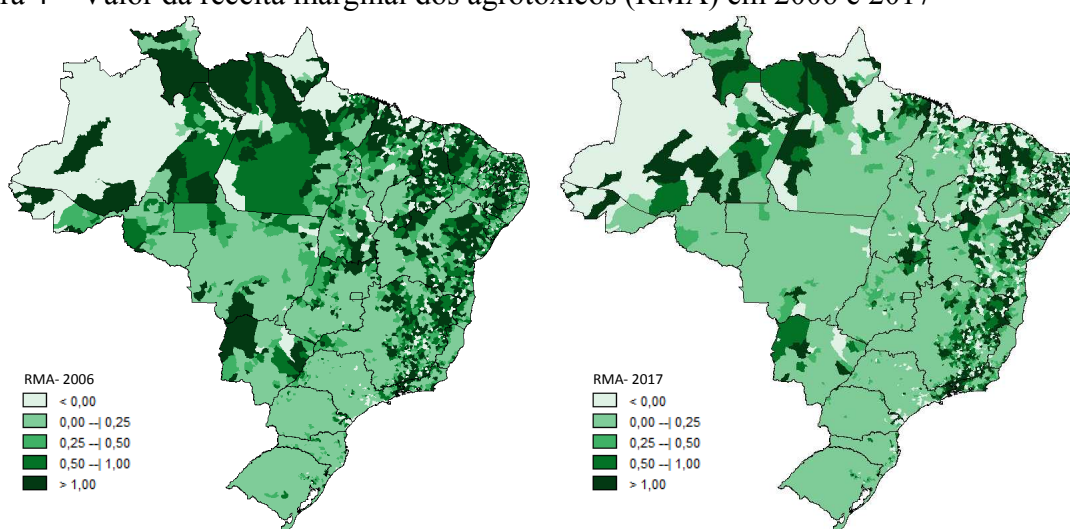


Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: Número de municípios analisados por região: Norte: 377; Nordeste: 1.659; Centro-Oeste: 452; Sudeste: 1.517; Sul: 1.166.

Na Figura 4, é possível observar o quão excessivo é o uso de pesticidas no território nacional. Note que a maior parte dos municípios obteve valor da receita marginal dos agrotóxicos inferior à 0,25. Ou seja, o aumento de R\$10,00/ha nas despesas com agrotóxicos resulta no aumento de até R\$2,50/ha no valor bruto da produção. Adicionalmente, verifica-se redução na produtividade dos pesticidas (aumento do uso excessivo de pesticidas) na maior parte do território nacional.

Figura 4 – Valor da receita marginal dos agrotóxicos (RMA) em 2006 e 2017



Fonte: Resultados da pesquisa.

A Tabela 5 apresenta alguns fatores que afetam a probabilidade de usar pesticidas em excesso (coluna 2) e o quão excessivo é seu uso (coluna 3). As variáveis *crédito*, *média de precipitação no verão* e o efeito fixo de ano foram significativas em ambos os modelos, revelando que tais variáveis afetam tanto a probabilidade quanto a intensidade do uso excessivo de pesticidas. Já a *agricultura orgânica* e a *média de temperatura no verão* foram significativas apenas no modelo de probabilidade e a associação a cooperativas ou entidades da classe (*associado*), as médias de *temperatura e precipitação de inverno* e a variabilidade da *temperatura no verão* (desvios) apresentaram significância estatística apenas no modelo em que se verifica o quão excessivo é o uso de agroquímicos. É importante dizer que, no modelo de regressão múltipla (coluna 3), a amostra é composta apenas por municípios que utilizaram agrotóxicos em excesso.

O crédito rural tem efeito positivo e significativo tanto na probabilidade de usar agrotóxicos em excesso, quanto na intensidade do uso excessivo. Esses resultados corroboram os obtidos por Rahman (2003), que encontrou que o crédito exerce efeito positivo sobre a intensidade no uso de pesticidas em Bangladesh, mas vão de encontro aos estudos de Kabir, Rainis e Azad (2017), que demonstraram que o crédito é um instrumento para incentivar a adoção de técnicas mais sustentáveis e, portanto, reduzir o uso excessivo de pesticidas.

É importante lembrar que o modelo agrícola adotado no Brasil incentivou o uso intensivo de agroquímicos, inclusive por meio do crédito agrícola (PORTO e SOARES, 2012). Portanto, tal resultado não surpreende e demonstra a necessidade da reformulação da política de crédito agrícola nacional.

A participação em cooperativas e/ou entidades da classe apresentou impacto significativo e negativo no quão excessivo é o uso de pesticidas. Esse resultado converge com os obtidos por Jin, Bluemling e Mol (2015), que demonstram a importância das cooperativas na redução do uso impróprio de agrotóxicos por meio do fornecimento de informações precisas e confiáveis a seus cooperados.

A agricultura orgânica é outro fator que reduz a probabilidade de usar agroquímicos em excesso. Esse resultado vai ao encontro do estudo realizado por Soares e Porto (2012) e aponta para a importância do desenvolvimento de políticas que incentivam a adoção deste sistema de produção. Vale salientar que a produção orgânica promove a interação do agricultor com o meio ambiente, melhorando a qualidade de vida (ALENCAR et al., 2013).

Tabela 5 – Estimativas dos determinantes do uso excessivo de pesticidas

Variáveis explicativas	Variável dependente	
	Quando o uso é excessivo (Probit [#])	Quão excessivo é o uso (MQO)
Homens	0.000699 (0.000959)	0.000298 (0.000668)
Acima de 45 anos	0.00130 (0.000948)	-0.000204 (0.000523)
Ensino superior	-0.00217 (0.00141)	-2.86e-05 (0.000618)
Crédito	0.00144** (0.000715)	0.00101*** (0.000307)
Área do estabelecimento	0.000109 (8.34e-05)	-2.43e-05 (1.90e-05)
Ater	0.000283 (0.000394)	-0.000124 (0.000198)
Associado	-7.65e-05 (0.000274)	-0.000303** (0.000142)
Agricultura orgânica	-0.00268*** (0.000859)	0.000344 (0.000847)
Temperatura média (verão)	-0.0531* (0.0289)	-0.00818 (0.0148)
Temperatura média (inverno)	-0.0117 (0.00999)	0.0106** (0.00506)
Precipitação média (verão)	-0.000437*** (0.000110)	-0.000144** (6.66e-05)
Precipitação média (inverno)	-8.83e-05 (0.000228)	-0.000342*** (0.000112)
Temperatura desvio (verão)	0.0201 (0.0139)	0.0238*** (0.00620)
Temperatura desvio (inverno)	0.000348 (0.0254)	-0.00573 (0.0119)
Precipitação desvio (verão)	3.02e-05 (0.000108)	7.04e-05 (6.45e-05)
Precipitação desvio (inverno)	3.89e-05 (0.000371)	5.29e-05 (0.000127)
2017	0.0624*** (0.0219)	0.0949*** (0.0123)
Constante	- -	0.812** (0.410)
EF ano	Sim	Sim
EF Região	Sim	Sim
EF Região-Ano	Sim	Sim
Obs.	10,342	8,466
Pseudo-R ² / R ²	0.204	0.133

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: [#] Os coeficientes do modelo probit são os efeitos marginais de cada variável. Erros-padrão robustos entre parênteses. Significância: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1.

As demais variáveis que afetam o uso excessivo de pesticidas são as condições climáticas. De maneira geral, estudos revelam que aumentos na temperatura e na precipitação estão associados ao uso mais intensivo de pesticidas (CHEN e McCARL, 2001;

SHAKHRAMANYAN, SCHNEIDER e McCARL, 2013; ZHANG et al., 2018b). No entanto, os resultados desta pesquisa, ao contrário do esperado, demonstram que aumentos na média da temperatura e da precipitação no verão reduzem a probabilidade de usar agrotóxicos em excesso e aumentos no nível de precipitação contribui para redução do uso excessivo de pesticidas.

Diante disso, vale mencionar que os efeitos das variáveis climáticas sobre o uso de pesticidas ocorrem devido a sua influência na infestação de pragas e patógenos, ou seja, por meio dos efeitos sobre a relação planta-pragas-patógenos. Trata-se de uma relação complexa em que as condições climáticas podem interferir no crescimento e na resistência das plantas e na multiplicação, disseminação, sobrevivência e atividades do patógeno (GHINI, 2005). Sendo assim, esses resultados devem ser analisados com cautela.

Segundo Jones (2016), ao mesmo tempo que aumentos na temperatura podem beneficiar a transmissão de doenças em climas frios, podem prejudicar em climas quentes. Considerando o clima brasileiro, com média de temperatura acima de 20°C durante o ano (Tabela 1), é possível que a redução do uso excessivo de pesticidas seja devido à redução dos patógenos resultante de aumentos na temperatura. Já o efeito da precipitação pode estar associado a maior frequência de surtos de praga e ao favorecimento do ciclo de determinados patógenos em períodos de seca (SHARMA e PRABHAKAR, 2014; BETTIOL et al., 2017).

Cabe ainda destacar que os resultados da Tabela 5 referem-se ao uso excessivo (acima do nível ótimo) de pesticidas. Considerando que, diante de maiores temperaturas e precipitação, é possível que a infestação de pragas e patógenos aumente, o nível ótimo de aplicação de agrotóxicos pode ser maior nos municípios com maiores médias de temperatura e precipitação. Por conseguinte, o uso em excesso de agrotóxicos nesses municípios seria menor.

O nível de escolaridade não apresentou efeito significativo sobre o uso excessivo de pesticidas, corroborando os resultados de Wang, Chu e Ma (2018); Schreinemachers et al. (2020) e Cai et al. (2021). No entanto, esse resultado contradiz os estudos de Jallow et al. (2017), Mariyono, Kuntariningsih e Kompas (2018) e Zhang et al. (2018a), que demonstram que níveis mais elevados de educação reduzem a intensidade no uso de pesticidas.

Um resultado não esperado é o efeito não significativo da variável Ater. Isso porque os serviços de assistência técnica e extensão rural podem auxiliar na redução do uso em excesso dos agrotóxicos por meio da disseminação de conhecimento, auxiliando no uso correto dos pesticidas e na implementação de práticas sustentáveis de manejo de pragas, como o MIP (TIMPRASERT, DATTA e RANAMUKHAARACHCHI, 2014; SANKOH et al., 2016;

ABADI, 2018; HOU et al., 2020). Uma possível explicação para esse resultado pode ser o fato de não ter sido considerado o tipo de orientação técnica recebida (pública ou privada). Segundo Freitas et al. (2019), a extensão pública contribui com aumentos maiores nos níveis de eficiência técnica do que os obtidos por meio da extensão privada.

Por fim, o efeito fixo de ano foi significativo em ambos os modelos, indicando possível impacto de choques agregados, programas e/ou políticas nacionais no uso excessivo de pesticidas. Nesse contexto, destaca-se o aumento significativo no registro de novos agrotóxicos no Brasil nesse período, passando de 109 registros concedidos em 2006 para 404 em 2017. Segundo Valadares, Alves e Galiza (2020), o resultado da expansão desses registros tende a ser a redução dos preços dos pesticidas e, consequentemente, o aumento do consumo.

3.5.4 Discussão dos resultados

Os resultados desta pesquisa apontam para o uso excessivo de agrotóxicos no Brasil. Enquanto em 2006 o aumento de R\$10,00/ha nas despesas com agrotóxicos resultava no aumento de R\$8,27/ha no valor bruto de produção, em 2017, esse valor foi de R\$7,15/ha (Tabela 3). Em outras palavras, constatou-se que a receita marginal dos agrotóxicos (RMA) não cobre o custo marginal e, deste modo, os produtores não estão maximizando seu lucro. Ademais, verificou-se que a produtividade dos pesticidas diminuiu entre 2006 e 2017, com destaque para o Centro-Oeste e Sul do país que, além do uso excessivo de pesticidas nos dois períodos analisados, o nível de excesso aumentou entre 2006 e 2017 nessas regiões (Tabela 3).

A intensificação do uso deste composto químico, além de potencializar os danos à saúde e ao meio ambiente, pode promover resultados econômicos contrários aos esperados. Isso porque esses produtos afetam organismos não-alvo que são benéficos ao ambiente, como predadores naturais e micro-organismos do solo (WILSON e TISDELL, 2001; BALE, VAN-LENTEREN e BIGLER, 2008, PRASHAR e SHAH, 2016). Deste modo, embora, no curto prazo, o uso de pesticidas tenha um custo relativamente baixo e aumente os rendimentos agrícolas, no longo prazo, essa relação pode se inverter, com aumento no custo de produção e redução nos rendimentos (WILSON e TISDELL, 2001).

Cabe ainda ressaltar que um dos problemas enfrentados pelos produtores tem sido a evolução de patógenos, ervas daninhas e pragas resistentes, que ameaçam a eficácia dos agrotóxicos (HAWKINS et al., 2019). Como resultado, faz-se necessário o desenvolvimento contínuo de novos produtos, o que tem sido inviabilizado pelos custos crescentes da pesquisa

e pela falta de conscientização da população sobre os riscos ambientais associados ao uso de pesticidas⁵⁶ (ROMEIRO, 2014).

Vale mencionar que, com o acúmulo da resistência e na ausência de pesticidas com maior eficácia agronômica, os agricultores aumentam a dosagem e a frequência de aplicação dos agrotóxicos, contribuindo para aumentar o estoque de resistência (SEXTON, ZHEN e ZILBERMAN, 2007). Em outras palavras, o agricultor está inserido em um ciclo vicioso em que o aumento na taxa de aplicação dos pesticidas para combater pragas resistentes favorecem o desenvolvimento de pragas ainda mais resistentes. Como apontado por Sexton, Zhen e Zilberman (2007), a resistência deve ser combatida com a redução do uso de agroquímicos.

Diante disso, ressalta-se a importância do desenvolvimento de técnicas sustentáveis para o combate a pragas e doenças. O controle biológico, um dos pilares do manejo integrado de pragas (MIP) (NARANJO, ELLSWORTH e FRISVOLD, 2015), é uma alternativa de controle fitossanitário com a vantagem agronômica de menor possibilidade do desenvolvimento de resistência das pragas (SEXTON, ZHEN e ZILBERMAN, 2007; BALE, VAN-LENTEREN e BIGLER, 2008; FONTES e VALADARES-INGLIS, 2020). Além disso, essa técnica não atinge organismos não alvo, que beneficiam o ambiente agrícola, como os predadores naturais e organismos benéficos do solo, e não causa danos à saúde e ao meio ambiente, dado que não gera resíduos e não possui riscos toxicológicos (BALE, VAN-LENTEREN e BIGLER, 2008; FONTES e VALADARES-INGLIS, 2020).

Analogamente, destaca-se a agricultura orgânica como um dos fatores que contribuem para redução da probabilidade de utilizar agrotóxicos em excesso (Tabela 5). De acordo com Soares e Porto (2012), a agricultura orgânica tem se mostrado como alternativa eficiente para os produtores, mantendo a produção de determinadas culturas com a redução do uso de agroquímicos. Ademais, o sistema de produção orgânico beneficia o meio ambiente, as relações trabalhistas, a cadeia produtiva e a saúde do trabalhador rural, contribuindo para melhorar a qualidade de vida das famílias (ALENCAR et al., 2013).

Além dos benefícios ao meio ambiente e à saúde, essas técnicas podem resultar em benefícios econômicos para os produtores que as adotam. Tzouvelekas et al. (2001) e Türkten et al. (2017) demonstraram que produtores que adotaram a agricultura orgânica na produção

⁵⁶ Ainda que no Brasil observa-se aumento significativo na liberação de novos agrotóxicos, a maioria é baseada em produtos técnicos equivalentes. Dos 3.551 novos agrotóxicos liberados no Brasil entre 2006 e 2020, 2.463 (69,36%) são produtos técnicos equivalentes ou produtos formulados a base de produtos técnicos equivalentes (MAPA, 2021). Ou seja, são produtos genéricos que utilizam ingredientes ativos já existentes no mercado.

de pimenta na Turquia e de azeitonas na Grécia são tecnicamente mais eficientes quando comparados com aqueles que adotaram o cultivo convencional (com uso de pesticidas).

Rahman e Norton (2019) revelaram que os produtores de *bitter gourd* em Bangladesh que adotaram o manejo integrado de pragas (MIP) alcançaram maior eficiência técnica do que os não adotantes. No Brasil, Rodrigues, Fortini e Neves (2022) demonstraram que os municípios intensivos no uso de controle biológico estão mais próximos de sua fronteira eficiente em relação aos municípios não intensivos, ou seja, fazem alocação de recursos de maneira mais eficiente.

Mesmo diante dos benefícios, a adoção dessas técnicas ainda é pouco relevante no Brasil. Enquanto apenas 1,3% dos estabelecimentos agropecuários adotaram o controle biológico em 2006⁵⁷, 1,75% utilizaram agricultura orgânica⁵⁸ em 2006 e 1,27% adotaram em 2017 (IBGE, 2006, 2017). A falta de conhecimento e de assistência técnica são fatores limitantes para implementação de práticas mais sustentáveis (COLMENAREZ et al., 2016; KABIR, RAINIS e AZAD, 2017). Adicionalmente, a orientação técnica apresenta-se como determinante para o uso adequado de agrotóxicos (ABADI, 2018). Segundo Sankoh et al. (2016), a falta de treinamento sobre o uso de pesticidas pode resultar no seu uso excessivo e indevido.

Os resultados desta pesquisa revelam que os serviços de Ater não impactaram o uso excessivo de pesticidas no período analisado. Isso pode ser consequência de uma tendência global, em que se observa o aumento dos serviços de extensão prestados por empresas fornecedoras de insumos produtivos ou empresas de processamento (SWINNEN e MAERTENS, 2007). Vale mencionar que a orientação de revendedores de agrotóxicos está associada ao sobreuso desses produtos (JALLOW et al., 2017; JIN, BLUEMLING e MOL, 2015; SOARES e PORTO, 2009; 2012). De acordo com os dados censitários, enquanto a proporção de estabelecimentos que receberam orientação técnica pública passou de 13,45% em 2006 para 10,39% em 2017, a proporção de estabelecimentos que receberam os demais tipos de orientação passou de 17,33% em 2006 para 18,10% em 2017 (IBGE, 2006; 2017). Além da orientação pública ser inferior à orientação privada⁵⁹ nos dois períodos, ela diminuiu

⁵⁷ O Censo Agropecuário 2017 não disponibilizou a informação dos estabelecimentos que adotaram controle biológico.

⁵⁸ Conforme definido na Lei nº 10.831 de 23 de dezembro de 2003. Em 2006, o Censo Agropecuário fez o seguinte questionamento: “No estabelecimento se faz agricultura orgânica?”. Em 2017, a questão é: “No estabelecimento se faz agricultura orgânica ou pecuária orgânica?”.

⁵⁹ Assume-se como privada a orientação técnica que não foi recebida do governo (federal, estadual e/ou municipal). De acordo com os censos agropecuários, a orientação técnica pode ser proveniente do governo, de ONGs, de cooperativas, de empresas integradoras, de empresas privadas de planejamento, orientação própria entre outras (IBGE, 2006; 2017).

enquanto a privada aumentou. Isso posto, salienta-se a necessidade de investimentos para ampliação dos serviços de Ater pública.

Assim como os serviços de assistência técnica e extensão, as cooperativas podem exercer influência significativa na intensidade do uso de agrotóxicos. Os resultados mostram efeito negativo da associação a cooperativas ou entidades da classe sobre o uso excessivo de pesticidas (Tabela 5). As cooperativas podem contribuir para difusão do conhecimento e incentivo à adoção de práticas sustentáveis, além de auxiliar na redução do uso indevido de agrotóxicos por meio da orientação dos produtores sobre a dosagem correta de aplicação dos pesticidas (CULLEN et al., 2008; GAO et al., 2019; JIN, BLUEMLING e MOL, 2015). Adicionalmente, as associações podem facilitar a comercialização de produtos orgânicos, que é um dos desafios enfrentados pelos produtores (MATTEI e MICHELLON, 2021).

Uma outra forma de fomentar a comercialização de produtos orgânicos é por meio da certificação, que confere maior transparência ao processo produtivo, conquistando a credibilidade dos consumidores (CAMPANHOLA e VALARINI, 2001). Vale mencionar que os produtos com certificação conseguem ser inseridos no mercado com maior valor agregado e, por conseguinte, são vendidos a preços mais elevados (mercado *premium*), promovendo maior remuneração dos agricultores (CASTRO NETO et al., 2010; FROEHLICH, MELO e SAMPAIO, 2018). As cooperativas também podem contribuir no processo de certificação, auxiliando na padronização da produção e na organização dos produtores (MATTEI e MICHELLON, 2021). Assim, políticas que visem ao desenvolvimento das cooperativas podem ter impactos socioeconômicos significativos.

Concomitantemente ao fortalecimento dos serviços da Ater pública e das cooperativas, a formulação de políticas de crédito agrícola específicas para adoção de técnicas sustentáveis são importantes, haja vista o custo da transição agroecológica. Conforme apontado por Wilson e Tisdell (2001), uma vez que os pesticidas são adotados pelos produtores, os custos iniciais para implementar alternativas sustentáveis de controle fitossanitário são elevados, o que pode ser uma barreira para os agricultores. Nesse sentido, o financiamento pode ser uma das formas de auxiliar essa transição. Ressalta-se que os resultados demonstram que o crédito rural está associado ao uso excessivo de pesticidas (Tabela 5), revelando a necessidade de reformular a política de crédito rural nacional, em que o desenvolvimento de linhas específicas para adoção de práticas sustentáveis seja priorizado.

Vale mencionar a existência de algumas linhas de crédito direcionadas para implementação de práticas mais sustentáveis no Brasil, como o programa ABC, o Moderagro, o Pronaf Agroecologia, o Pronaf Floresta, o Pronaf Semi-Árido e o Pronaf Eco (LOPES e

LOWERY, 2015; SAMBUICHI e OLIVEIRA, 2011). Porém, nenhuma dessas linhas tem como finalidade específica financiar a implementação de tecnologias sustentáveis de manejo de pragas e patógenos e, por conseguinte, reduzir o uso de pesticidas.

Um outro ponto que merece destaque são as diferenças regionais, em que o Centro-Oeste, o Sul e o Sudeste apresentaram os maiores níveis de sobreuso, com mais de 80% dos municípios com uso excessivo de pesticida em ambos os períodos analisados (Figuras 3 e 4). Além disso, as regiões Centro-Oeste e do Matopiba⁶⁰ se destacam no que diz respeito ao aumento do uso excessivo de pesticidas no período (Figura 4).

Nesse contexto, vale mencionar o predomínio de latifúndios e do cultivo de *commodities*, com destaque para soja e milho, nessas regiões. Ressalta-se que, no Brasil, 96,5% (32,7 milhões de hectares) da produção de soja e 88,4% (15,7 milhões de hectares) da produção de milho são realizadas com sementes transgênicas (BOMBARDI, 2017). O uso dessa tecnologia está associado à disseminação do uso de glifosato⁶¹, dado que parte significativa dessas sementes são resistentes a esse ingrediente ativo (PIGNATI, OLIVEIRA E SILVA, 2014; PIGNATI *et al.*, 2017; BOMBARDI, 2017). Como resultado, observou-se a evolução de resistência em mais de 40 espécies de plantas daninhas, reduzindo a utilidade das variedades de culturas tolerantes ao herbicida (GOULD, BEOWN e KUZMA, 2018).

Adicionalmente, o Centro-Oeste é a principal região produtora do milho safrinha. Em 2017, a região foi responsável por cerca de 69% da produção total brasileira, sendo mais de 90% da produção de milho da região proveniente da 2ª safra (PAM, 2017). Vale lembrar, que a produção da 2ª safra ocorre, majoritariamente, após a colheita de soja, fazendo com que o período de “vazio sanitário” não ocorra. Consequentemente, cria-se o ambiente favorável para o desenvolvimento de pragas e patógenos (CUNHA *et al.*, 2019), contribuindo para o uso excessivo de pesticidas.

Diante disso, destaca-se o modelo de desenvolvimento agrícola adotado no Brasil. A expansão da produção de *commodities*, em detrimento dos cultivos de alimentos⁶² pode estar contribuindo para o uso em excesso de pesticidas. Isso porque a produção de *commodities* é acompanhada por pacotes tecnológicos que incluem o uso intensivo de agroquímicos (VALADARES, ALVES e GALIZA, 2020).

⁶⁰ Fronteira agrícola brasileira que abrange os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia.

⁶¹ O glifosato é o ingrediente ativo mais vendido no país. Em 2017, foram vendidas 173.150,75 toneladas desse ingrediente ativo no Brasil (IBAMA, 2017).

⁶² Entre 2006 e 2017, houve redução significativa (superior à 40%) da área destinada ao cultivo de feijão e mandioca no Brasil. Com relação à produção, a redução foi de cerca de 12% para o feijão, cuja produção passou de 3.457.744 toneladas em 2006 para 3.046.079 toneladas em 2017, e de aproximadamente 30% para a mandioca, que passou de 26.639.013 toneladas produzidas em 2006 para 18.501.645 toneladas em 2017 (PAM, 2006, 2017).

Nesse contexto, um dos desafios para redução do uso excessivo de pesticidas no Brasil é o desenvolvimento de alternativas sustentáveis para o manejo de pragas considerando as extensas áreas de produção agrícola e as variedades edafoclimáticas encontradas no país. Simultaneamente, é preciso a conscientização dos produtores. Como apontado por Langenbach et al. (2021), para que haja transição agroecológica, é preciso que, juntamente com o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, haja um processo de conscientização dos produtores.

3.6. CONCLUSÕES

Esta pesquisa analisou a produtividade dos agrotóxicos no setor agrícola brasileiro a partir dos Censos Agropecuários 2006 e 2017, publicados pelo IBGE. Adicionalmente, identificou se o uso de agroquímicos é excessivo no Brasil e seus determinantes.

Inicialmente, por meio do modelo de controle de danos, estimou-se o valor do produto marginal dos pesticidas. Os resultados demonstram que, embora o uso de agrotóxicos contribua para o aumento da produção, seu uso é excessivo no Brasil, revelando que os produtores não estão maximizando seu lucro. Adicionalmente, a produtividade deste composto químico foi menor em 2017 quando comparado com 2006 nas principais regiões produtoras de soja do Brasil (Centro-Oeste e Sul), indicando que a produtividade dos pesticidas está diminuindo, ou seja, aplicam-se maiores quantidades de agrotóxicos para manter a mesma produção de safras anteriores.

Diante disso, é possível que as externalidades negativas associadas ao uso de pesticidas estejam atenuando seus benefícios. Ou seja, a redução da produtividade marginal dos agrotóxicos pode ser devido aos seguintes fatores: (i) resistência das pragas; (ii) danos causados a predadores naturais; (iii) danos a organismos benéficos do solo. Ressalta-se que esses fatores são resultantes do uso inadequado dos agrotóxicos e favorecem a infestação de pragas e patógenos, além de reduzir a fertilidade do solo.

Sendo assim, o produtor encontra-se em um ciclo em que o uso inadequado de pesticidas causa prejuízos ao meio ambiente, favorecendo a manifestação e infestação de pragas e patógenos e, por conseguinte, tornando necessárias maiores quantidades de pesticidas para combatê-los.

Ressalta-se que o modelo químico-dependente adotado no Brasil pode cooperar para inserção dos produtores nesse ciclo. Os resultados indicam potencial relação entre a produção de *commodities* e o uso intensivo de pesticidas. Constatou-se ainda que o crédito rural

contribui para o uso em excesso de agrotóxicos, o que pode ser resultante do movimento de modernização da agricultura (Revolução Verde) em que uma das formas utilizadas pelo governo brasileiro para incentivar o uso de agroquímicos foi por meio do crédito rural.

Diante do exposto, o desenvolvimento de políticas públicas que visem à racionalização do uso de pesticidas é de suma importância. Como mencionado, o uso excessivo e a redução da produtividade marginal dos agrotóxicos podem estar inserindo os produtores em um ciclo vicioso, se tornando dependentes de um produto químico com produtividade decrescente.

O desenvolvimento de alternativas sustentáveis para o controle fitossanitário como o controle biológico e o MIP, juntamente com o fortalecimento de cooperativas e a formulação de linhas de crédito específicas podem contribuir para “romper” esse ciclo. Enquanto as cooperativas podem auxiliar na difusão de conhecimento e na adoção dessas tecnologias, o crédito contribui para arcar com os custos de implementá-las.

Simultaneamente, programas de conscientização dos produtores em relação aos danos causados pelo uso incorreto de pesticidas e aos benefícios advindos da adoção de alternativas para o manejo de pragas e doenças são essenciais para a transição agroecológica. Analogamente, é importante o treinamento dos agrônomos e técnicos agrícolas para a implementação eficaz dessas tecnologias.

É importante dizer que os agrotóxicos tiveram participação significativa no aumento da produção e produtividade agrícolas brasileira e, conforme apresentado neste trabalho, seus efeitos sobre a produção permanecem positivos. No entanto, é preciso considerar os prejuízos associados ao seu uso inadequado, a fim de manter o Brasil não só como uma potência agrícola, mas como uma potência agrícola sustentável. Embora o caminho seja longo, este estudo sugere algumas estratégias que podem contribuir para o avanço do país nessa direção.

Uma das limitações deste estudo é não considerar a infestação de pragas e doenças nas estimativas, o que pode subestimar a produtividade dos agrotóxicos. No entanto, as variáveis climáticas e os efeitos fixos de região e região-ano captaram, ao menos em parte, o efeito desse fator sobre a produtividade dos pesticidas. Da mesma forma, o efeito fixo de ano controlou, ainda que parcialmente, o efeito dos preços dos agrotóxicos e da produção agrícola sobre a produtividade dos pesticidas, haja vista a indisponibilidade desses dados para realizar as análises.

Outro ponto que merece destaque é a não inclusão dos danos à saúde e ao meio ambiente na mensuração da produtividade dos agrotóxicos. Sabe-se que toda a população está exposta por meio dos resíduos na água e nos alimentos. Isso posto, é provável que a inclusão

dessas externalidades nas estimativas reduza o valor do produto marginal dos agrotóxicos. Portanto, para estudos futuros, pretende-se incluir essas externalidades na mensuração da produtividade dos agroquímicos no Brasil.

REFERÊNCIAS

- ABADI, B. The determinants of cucumber farmers' pesticide use behavior in central Iran: Implications for the pesticide use management. **Journal of Cleaner Production**, v. 205, p. 1069-1081, 2018.
- ALENCAR, G. V.; MENDONÇA, E. S.; OLIVEIRA, T. S.; JUCKSCH, I.; CECON, P. R. Percepção ambiental e uso do solo por agricultores de sistemas orgânicos e convencionais na Chapada da Ibiapaba, Ceará. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 51, n. 2, p. 217-236, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-20032013000200001>
- ARAÚJO, W. V.; MORAES, A. L. M.; SOUZA, J. C. S.; MOREIRA, J. A.; CARVALHO, R. R. D.; MONTE, R. R. **Crédito rural: Política e desempenho**. In: Vieira Filho, J. E. R.; Gasques, J. G. (eds). *Uma jornada pelos contrastes do Brasil: cem anos do Censo Agropecuário*. Brasília, IPEA, p. 266-279, 2020.
- BALE, J. S.; VAN-LENTEREN, J. C.; BIGLER, F. Biological control and sustainable food production. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 363, p. 761-776, 2008.
- BARROS, I.; MARTINS, C. R.; RODRIGUES, G. S.; TEODORO, A.V. **Intensificação Ecológica da Agricultura**. Embrapa, Aracaju-SE, 2016.
- BETTIOL, W.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; AUAD, A. M.; GHINI, R. **Aquecimento global e problemas fitossanitários**. Embrapa, Brasília-DF, 2017.
- BOMBARDI, L. M. **Geografia do uso de agrotóxicos no Brasil e conexões com a União Europeia**. FFLCH - USP São Paulo, 2017.
- BURGER, J.; MOL, F.; GEROWITT, B. Influence of cropping system factors on pesticide use intensity – A multivariate analysis of on-farm data in North East Germany. **European Journal of Agronomy**, v. 40, p. 54-63, 2012.
- CAI, J.; XIONG, J.; HONG, Y.; UH, R. Pesticide overuse in apple production and its socioeconomic determinants: Evidence from Shaanxi and Shandong provinces, China. **Journal of Cleaner Production**, v. 315, 2021.
- CAMERON, A. C.; TRIVEDI, P. K. **Microeconometrics: methods and applications**. New York: Cambridge University Press, 2005.
- CAMPANHOLA, C.; VALARINI, P. J. A agricultura orgânica e seu potencial para o pequeno agricultor. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v.18, n.3, p.69-101, 2001.
- CAMPBELL, H.F. Estimating the Marginal Productivity of Agricultural Pesticides: The Case of Tree Fruit Farms in the Okangan Valley. **Canadian Journal of Agricultural Economics**, v. 24, n. 2, p. 23-30, 1976.

CARLSON, G. A. Long-run productivity of insecticides. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 59, n. 3, p. 543-548, 1977.

CARNEIRO, F. F.; RIGOTTO, R. M.; AUGUSTO, L. G. S.; FRIEDRICH, K.; BÚRIGO, A. C., organizadores. **Dossiê Abrasco**: um alerta sobre os impactos dos agrotóxicos na saúde. Rio de Janeiro: EPSJV, São Paulo: Expressão Popular, 2015.

CARRASCO-TAUBER, C.; MOFFITT, L. J. Damage Control Econometrics: Functional Specification and Pesticide Productivity. **Amer. J. Agr. Econ.**, v. 74, p. 158-162, 1992.

CASTRO NETO, N.; DENUZI, V. S. S.; RINALDI, R. N.; STADUTO, J. A. R. Produção orgânica: uma potencialidade estratégica para a agricultura familiar. **Revista Percorso NEMO**, v. 2, n. 2, p. 73-95, 2010 .

CHALLA, M.; TILAHUM, U. Determinants and impacts of modern agricultural technology adoption in West Wollega: the case of Gulliso District. **J Biol, Agricult Healthcare**, v. 4, n. 20, p. 63-77, 2014.

CHEN, C.C.; McCARL, B.A. An investigation of the relationship between pesticide usage and climate change. **Climatic Change**, v. 50, p. 475–487, 2001.

COLMENAREZ, Y.; WYCKHUYS, K.; CIOMPERLIK, M. A.; REZENDE, D. T. **Uso do manejo integrado de pragas e controle biológico pelos agricultores na América Latina e no Caribe**: desafios e oportunidades. In: Halfeld-Vieira, B.A.; Marinho-Padro, J.S.; Nechet, K. L. et al. (eds). **Defensivos agrícolas naturais: uso e perspectivas**. Embrapa, Brasília, p. 802-853, 2016.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Insumos Agropecuários**, s.d. Disponível em: <<https://consultaweb.conab.gov.br/consultas/consultaInsumo.do?method=acaoListarConsulta>>. Acesso em: 04 de julho de 2021.

COSTA, R. A.; VIZCAINO, C. A. C.; COSTA, E. M. **Participação em cooperativas e eficiência técnica entre agricultores familiares no Brasil**. In: Vieira Filho, J. E. R.; Gasques, J. G. (eds). **Uma jornada pelos contrastes do Brasil: cem anos do Censo Agropecuário**. Brasília, IPEA, p. 242-255, 2020.

CULLEN, R.; WARNER, K. D.; JONSSON, M.; WRATTEN, S. D. Economics and adoption of conservation biological control. **Biological Control**, v. 45, p.272-280, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.01.016>

CUNHA, D. A.; COELHO, A. B.; FÉRES, J. G. Irrigation as an adaptive strategy to climate change: An economic perspective on Brazilian agriculture. **Environment and Development Economics**, v. 20, n. 1, p. 57-79, 2015.

CUNHA, B.A.; NEGREIROS, M.M.; ALVES, K.A; TORRES, J.P. Influência da época de semeadura na severidade de doenças foliares e na produtividade do milho safrinha. **Summa Phytopathologica**, v.45, n.4, p.424-427, 2019.

DASGUPTA, S.; MAMINGI, N.; MEISNER, C. Pesticide use in Brazil in the era of agroindustrialization and globalization **Environment and Development Economics**, v. 6, p. 459-482, 2001.

DELCOUR, I.; SPANOGHE, P.; UYTENDAELE, M. Literature review: Impact of climate change on pesticide use. **Food Research International**, v. 68, p. 7-15, 2015.

DELGROSSI, M. E.; BALSADI, O. V. **Mercado de trabalho e agricultura no Brasil contemporâneo**. In: Vieira Filho, J. E. R.; Gasques, J. G. (eds). Uma jornada pelos contrastes do Brasil: cem anos do Censo Agropecuário. Brasília, IPEA, p. 204-218, 2020.

EMBRAPA. Embrapa soja. **Soja em números**. s.d. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>. Acesso em: maio, 2022.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. How to feed the world in 2050. High level expert forum. Convened at FAO Headquarters in Rome on 12-13, 2009.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database (FAOSTAT)**. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data>>. Acesso em: dezembro, 2019.

FONTES, E. M. G.; VALADARES-INGLIS, M. C. **Controle biológico de pragas da agricultura**. Embrapa, Brasília-DF, 2020.

FREITAS, C. O.; TEIXEIRA E. C.; BRAGA, M. J.; SCHUNTZEMBERGER, A. M. S. (2019) Technical efficiency and farm size: an analysis based on the Brazilian agriculture and livestock census. **Italian Rev Agricult Econo**, v. 74, n. 1, p. 33-48, 2019.

FRISVOLD, G. B. How low can you go? Estimating impacts of reduced pesticide use. **Pest Manag Sci**, v. 75, p.1223-1233, 2019.

FROEHLICH, A. G.; MELO, A. S. S. A.; SAMPAIO, B. Comparing the Profitability of Organic and Conventional Production in Family Farming: Empirical Evidence From Brazil. **Ecological Economics**, v.150, p. 307-314, 2018.

GAO, Y.; LIU, B.; YU, L.; YANG, H.; YIN, S. Social capital, land tenure and the adoption of green control techniques by family farms: evidence from Shandong and Henan Provinces of China. **Land Use Policy**, v. 89, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104250>

GASQUES, J. G.; BACCHI, M. R. P.; BASTOS, E. T.; VALDES, C. **Crescimento e produtividade da agricultura brasileira: Uma análise do Censo Agropecuário**. In: Vieira Filho, J. E. R.; Gasques, J. G. (eds). Uma jornada pelos contrastes do Brasil: cem anos do Censo Agropecuário. Brasília, IPEA, p. 106-119, 2020.

GHINI, R. **Mudanças climáticas globais e doenças de plantas**. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2005.

GOULD, F.; BROWN, Z. S.; KUZMA, J. Wicked evolution: can we address the sociobiological dilemma of pesticide resistance? **Science**, v. 360, p. 728-732, 2018.

HAWKINS, N. J.; BASS, C.; DIXON, A.; NEVE, P. The evolutionary origins of pesticide

resistente. **Biological Reviews**, v. 94, p. 135-155, 2019.

HEADLEY, J. C. Estimating the productivity of agricultural pesticides. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 50, p. 13-25, 1968.

HOU, L.; LIU, P.; HUANG, J.; DENG, X. The influence of risk preferences, knowledge, land consolidation, and landscape diversification on pesticide use. **Agricultural Economics**, v. 51, n. 5, p. 759-776, 2020. <http://dx.doi.org/10.1111/agec.12590>

GROVERMANN, C.; SCHREINEMACHERS, P.; BERGER, T. Quantifying pesticide overuse from farmer and societal points of view: an application to Thailand. **Crop Protection**, v. 53, p.161-168, 2013.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Boletim 2017: Os 10 ingredientes ativos mais vendidos**, 2017. Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos#boletinsanuais>>. Acesso em: 04 de janeiro de 2021.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Relatórios de comercialização de agrotóxicos**, 2019. Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos#historicodecomercializacao>>. Acesso em: 14 de dezembro de 2019.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário de 2006**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2006/segunda-apuracao>>. Acesso em: 22 de dezembro de 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário de 2017**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>>. Acesso em: 22 de dezembro de 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>>. Acesso em: 08 de janeiro de 2021.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Síntese de indicadores sociais: uma análise das condições de vida da população brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, 141p., 2016. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv98965.pdf>>. Acesso em: 22 de abril de 2022.

IEA – INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. **Relação de troca entre defensivos e produtos agrícolas**, s.d. Disponível em: <http://ciagri.iea.sp.gov.br/nia1/RelaTrocaDefensivos.aspx?cod_sis=20>. Acesso em: 6 de abril de 2022.

JALLOW, M. F. A.; AWADH, D. G.; ALBAHO, M. S.; DEVI, V. Y.; THOMAS, B. M. Pesticide risk behaviors and factors influencing pesticide use among farmers in Kuwait. **Science of the Total Environment**, v. 574, p. 490-498, 2017.

JHA, R.; REGMI, A. Pesticide Productivity and Vegetable Farming in Nepal. In Haque, A.; Murty, M.; Shyamsundar, P. (Authors), **Environmental Valuation in South Asia** (p. 115-140), 2011. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511843938.007

JIN, S.; BLUEMLING, B.; MOL, A. P. J. Information, trust and pesticide overuse: Interactions between retailers and cotton farmers in China. **NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences**, v. 72-73, p. 23-32, 2015.

JONES, R. A. C. Future scenarios for plant virus pathogens as climate change progresses. **Advances in Virus Research**, v. 95, p. 87-147, 2016.

JUST, R. E.; POPE, R. D. Stochastic specification of production functions and economic implications. **Journal of Econometrics**, v. 7, n. 1, p. 67-86, 1978.

JUST, R. E.; POPE, R. D. Production Function Estimation and Related Risk Considerations. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 61, n. 2, p. 276-284, 1979.

KABIR, M. H.; RAINIS, R.; AZAD, M. J. Are spatial factors important in the adoption of eco-friendly agricultural technologies? Evidence on integrated Pest management (IPM). **J Geogr Inf Syst**, v. 9, n. (2), p. 98-113, 2017. <https://doi.org/10.4236/jgis.2017.92007>

KIM, K.; KABIR, E.; JAHAN, S. A. Exposure to pesticides and the associated human health effects. **The Science of the Total Environment**, v. 575, p. 525-535, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.009>

LANGENBACH, T.; CALDAS, L.Q.; DE CAMPOS, T.; CORREIA, F.; LORENZ, N.; MARINHO, D.; MANO, D.; MEIRELLES, L.C.; OLIVEIRA, M.; PARENTE, C.; et al. Perspectives on Sustainable Pesticide Control in Brazil. **World**, v. 2, p. 295-301, 2021. <https://doi.org/10.3390/world2020018>

LECHENET, M.; DESSAINT, F.; PY, G.; MAKOWSKI, D.; MUNIER-JOLAIN, N. Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms. **Nature Plants**, v. 3, 2017.

LICHTENBERG E.; ZILBERMAN D. The econometrics of damage control: why specification matters. **Am J Ag Econ**, n. 68, p. 261-273, 1986.

LOPES, D.; LOWERY, S. **Crédito rural no Brasil: Desafios e oportunidades para a promoção da agropecuária sustentável**, 2015. Disponível em: < https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/imported/ft-mapping-rural-credit-in-brazil_port_rev-pdf.pdf>. Acesso em: 12 de março de 2022.

MAHMOOD I.; IMADI S. R.; SHAZADI K.; GUL A.; HAKEEM K. R. Effects of pesticides on environment. In: **Plant, Soil and Microbes**. Springer International Publishing, p.253-269, 2016.

MAIA, A. G.; BUAINAIN, A. M. O novo mapa da população rural brasileira. **Confins**, v. 25, n. 25, p.1-26, 2015.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Informações técnicas:** registros concedidos 2005-2020, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/agrotoxicos/informacoes-tecnicas>>. Acesso em: 16 de janeiro de 2021.

MARIYONO, J.; KUNTARININGSIH, A.; KOMPAS, T. Pesticide use in Indonesian vegetable farming and its determinants. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 29, n. 2, p. 305-323, 2018.

MATTEI, T. F.; MICHELLON, E. Panorama da agricultura orgânica e dos agrotóxicos no Brasil: uma análise a partir dos censos 2006 e 2017. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 59, n. 4, e222254, 2021.

MORAES, F. R. **Agrotóxicos no Brasil:** padrões de uso, política da regulação e prevenção da captura regulatória. Texto para discussão. IPEA: Brasília, set. 2019.

MORAIS, G. A. S.; SILVA, F. F.; FREITAS, C. O.; BRAGA, M. J. Irrigation, technical efficiency, and farm size: the case of Brazil. **Sustainability**, 2021.

NARANJO, S. E.; ELLSWORTH, P. C.; FRISVOLD, G. B. Economic value of biological control in integrated pest management of managed plant systems. **Annu Rev Entomol**, v. 60, n. 32, p. 1-25, 2015.

OERKE, E. C.; DEHNE, H. W. Safeguarding production-losses in major crops and the role of crop protection. **Crop Protection**, v. 23, n. 4, p. 275-285, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cropro.2003.10.001>

PEIXOTO, M. **Assistência técnica e extensão rural: grandes deficiências ainda persistem.** In: Vieira Filho, J. E. R.; Gasques, J. G. (eds). Uma jornada pelos contrastes do Brasil: cem anos do Censo Agropecuário. Brasília, IPEA, p. 322-338, 2020.

PIGNATI, W. A.; LIMA, F. A. N. S.; LARA, S. S.; CORREA, M. L. M.; BARBOSA, J. R.; LEÃO, L. H. C.; PIGNATTI M. G. Distribuição espacial do uso de agrotóxicos no Brasil: uma ferramenta para a Vigilância em Saúde. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 22, n.10, p. 3281-3293, 2017.

PIGNATI, W.; OLIVEIRA, N. P.; SILVA, A. M. C. Vigilância aos agrotóxicos: quantificação do uso e previsão de impactos na saúde-trabalho-ambiente para os municípios brasileiros. **Ciência & Saúde Coletiva**, v.19, n.12, p.4669-4678, 2014.

PORTO, M. F.; SOARES, W. L. Modelo de desenvolvimento, agrotóxicos e saúde: um panorama da realidade agrícola brasileira e propostas para uma agenda de pesquisa inovadora. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v. 37, n. 125, p. 17-50, 2012.

PRANEETVATAKUL, S.; WAIBEL, H. The productivity of pesticide use in Rice Production of Thailand: A Damage Control Approach. **Thai Journal of Agricultural Economics**, v. 22, p. 73- 87, 2002.

PRASHAR, P.; SHAH, S. Impact of fertilizers and pesticides on soil microflora in agriculture. In: LICHTFOUSE, E. (ed.), **Sustainable Agriculture Reviews**, Springer

International Publishing Switzerland, 2016.

RAHMAN, S. Farm-level pesticide use in Bangladesh: determinants and awareness. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 95, n. 1, p. 241-252, 2003.

RAHMAN, S. Pesticide consumption and productivity and the potential of IPM in Bangladesh. **Science of The Total Environment**, v. 445-446, p. 48-56, 2013.

RAHMAN, S. Agroecological, climatic, land elevation and socio-economic determinants of pesticide use at the farm level in Bangladesh. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 212, p. 187-197, 2015.

RAHMAN, Md. S.; NORTON G. W. Adoption and impacts of integrated pest management in Bangladesh: evidence from smallholder bitter melon growers. **Horticulturae**, v. 5, n. 2, p.32, 2019. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5020032>

RAMÍREZ, O. A.; SCHULTZ, S. D. Poisson count models to explain the adoption of agricultural and natural resource management technologies by small farmers in Central American countries. **J Agric Appl Econ**, v. 32, n. 1, p. 21-33, 2000.

RODRIGUES, L.C.C., FORTINI, R.M.; C. R. NEVES, M. Impacts of the use of biological pest control on the technical efficiency of the Brazilian agricultural sector. **Int. J. Environ. Sci. Technol.** (2022). <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04032-y>

ROMEIRO, A. R. O agronegócio será ecológico. **O mundo rural no Brasil do século: a formação de um novo padrão agrário e agrícola**, v. 21, p. 509-530, 2014.

SAMBUICHI, R. H. R.; OLIVEIRA, M. A. C. Análise das linhas de crédito do PRONAF para o desenvolvimento sustentável da agricultura familiar. **Cadernos de Agroecologia**. [S.l.], v. 6, n. 2, p. 1-6, dez. 2011.

SANKOH, A. I.; WHITTLE, R.; SEMPLE, K. T.; JONES, K. C.; SWEETMAN, A. J. An assessment of the impacts of pesticide use on the environment and health of rice farmers in Sierra Leone. **Environment International**, v. 94, p. 458-466, 2016.

SCHREINEMACHERS, P.; GROVERMANN, C.; PRANEETVATAKUL, S.; HENG, P.; NGUYEN, T. T. L.; BUNTONG, B.; LE, N. T.; PINN, T. How much is too much? Quantifying pesticide overuse in vegetable production in Southeast Asia. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, 2020.

SEXTON, S.; ZHEN, L.; ZILBERMAN, D. The economics of pesticides and pest control. **International Review of Environmental and Resource Economics**, v.1, n. 3, p. 271-326, 2007.

SHAKHRAMANYAN, N. G.; SCHNEIDER, U. A.; McCARL, B. A. US agricultural sector analysis on pesticide externalities – the impact of climate change and a Pigovian tax. **Climatic Change**, v. 117, p. 711-723, 2013.

SHARMA, H. C.; PRABHAKAR, C. S. **Impact of Climate Change on Pest Management and Food Security**. In: Abrol, D. P. (ed). Integrated Pest Management. Academic Press, p. 23-36, 2014

SHEAHAN, M.; BARRETT, C. Ten striking facts about agricultural input use in Sub-Saharan Africa. **Food Policy**, v. 67, p. 12-25, 2017.

SHEAHAN, M.; BARRETT, C. B.; GOLDSVALE, C. Human health and pesticide use in Sub-Saharan Africa. **Agricultural Economics**, v. 48, S1, p. 27-41, 2017. <http://dx.doi.org/10.1111/agec.12384>

SHEFFIELD, J.; GOTETI, G.; WOOD, E. F. Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. **J Climate**, v. 19, n. 13, p. 3088-3111, 2006. <https://doi.org/10.1175/JCLI3790.1>

SOARES, W. L.; PORTO, M. F. S. Estimating the social cost of pesticide use: An assessment from acute poisoning in Brazil. **Ecological Economics**, v. 68, p. 2721-2728, 2009.

SOARES, W. L.; PORTO, M. F. S. Uso de agrotóxicos e impactos econômicos sobre a saúde. **Revista de Saúde Pública**, v. 46, n. 2, p.209-17, 2012.

SUN, S.; ZHANG, C.; HU, R. Determinants and overuse of pesticides in grain production: A comparison of rice, maize and wheat in China. **China Agricultural Economic Review**, v. 12, n. 2, p. 367-379, 2020. <https://doi.org/10.1108/CAER-07-2018-0152>

SWINNEN, J. F.; MAERTENS, M. Globalization, privatization, and vertical coordination in food value chains in developing and transition countries. **Agricultural Economics**, v.2, n.37, pp 89-102, 2007.

TEAGUE, M. L.; BRORSEN, B. W. Pesticide productivity: what are the trends? **J. Agr. and Applied Econ.**, v. 27, n. 1, p. 276-282, 1995.

TIMPRASERT, S.; DATTA, A.; RANAMUKHAARACHCHI, S. L. Factors determining adoption of integrated pest management by vegetable growers in Nakhon Ratchasima Province, Thailand. **Crop Protection**, v. 62, p. 32-39, 2014.

TÜRKTEK, H.; YILDIRIM, C.; CEYHAN, V.; SOYTOPRAK, H. The effects of applying biological control measures in greenhouse cultivation on the production efficiency in Kas District of Antalya Province. Turkey. **Euro J Sustain Develop**, v. 6, n. 3, p.1-10, 2017.

TZOUVELEKAS, V.; PANTZIOS, C. J.; FOTOPOULOS, C. Technical efficiency of alternative farming systems: the case of Greek organic and conventional olive-growing farms. **Food Policy**, v. 26, p. 549-569, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0306-9192\(01\)00007-0](https://doi.org/10.1016/S0306-9192(01)00007-0)

VALADARES, A.; ALVES, F.; GALIZA, M. **O crescimento do uso de agrotóxicos: uma análise descritiva dos resultados do Censo Agropecuário 2017**, 2020. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=35512>. Acesso em: 04 de janeiro de 2021.

VASCONCELOS, Y. **Agrotóxicos na berlinda**. Pesquisa FAPESP, set. 2018. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/agrotoxicos-na-berlinda/>. Acesso em: 25 de julho de 2020.

ZHANG, C.; GUANMING, S.; SHEN, J.; HU, R. Productivity effect and overuse of pesticide in crop production in China. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 14, n. 9, p. 1903-1910, 2015.

ZHANG, L.; LI, X.; YU, J.; YAO, X. Toward cleaner production: What drives farmers to adopt eco-friendly agricultural production? **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 550-558, 2018a.

ZHANG, Y. W.; McCARL, B. A.; LUAN, Y.; KLEINWECHTER, U. Climate change effects on pesticide usage reduction efforts: a case study in China. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 23, p. 685-701, 2018b.

WANG, J.; CHU, M.; MA, Y. Measuring rice farmer's pesticide overuse practice and the determinants: a statistical analysis based on data collected in Jiangsu and Anhui provinces of China. **Sustainability**, v. 10, n. 3, p. 677, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10030677>

WILSON, C.; TISDELL, C. Why farmers continue to use pesticides despite environmental, health and sustainability costs. **Ecological Economics**, v. 39, p. 449-462, 2001.

WOOLDRIDGE, J. M. **Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data**. London: The MIT Press Cambridge, Massachusetts, 2010.

APÊNDICE

Tabela A1 – Resultados das estimativas da função de controle de danos (exponencial e logística)

Variáveis	Exponencial	Logística
Agrotóxicos	355.3** (160.0)	-1.35e-06 (5.18e-06)
Agrotóxicos*2017	47,559 (0)	0.0191*** (0.00136)
Trabalho	0.241*** (0.0103)	0.265*** (0.0101)
Despesas	0.552*** (0.0112)	0.493*** (0.0115)
Capital	0.0162*** (0.00376)	0.0143*** (0.00366)
Capital animal	0.0591*** (0.00786)	0.0781*** (0.00801)
Constante	5.228*** (0.191)	6.226*** (0.192)
Controles [#]	Sim	Sim
EF ano	Sim	Sim
EF Região	Sim	Sim
EF Região-Ano	Sim	Sim
AIC	16033.69	15441.86
BIC	16222.03	15644.69
<i>R-squared</i>	0.779	0.791
Observações	10,342	10,342
Nr municípios	5.171	5.171

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: Erros-padrão robustos entre parênteses. *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1. [#]Os controles utilizados são variáveis climáticas (médias e desvios da temperatura e da precipitação acumulada nas estações de verão e inverno) e características dos produtores (sexo, idade e escolaridade).

4. CONCLUSÃO GERAL

O objetivo desta pesquisa foi avaliar alguns dos impactos socioeconômicos dos agrotóxicos no Brasil. Para tal, analisaram-se os efeitos dos agrotóxicos sobre a saúde da população, mais especificamente, sobre a incidência de intoxicações e taxa de mortalidade por agrotóxicos, e a produtividade dos agrotóxicos no setor agrícola brasileiro, identificando se seu uso é excessivo no país.

De maneira geral, os resultados demonstraram que a intensificação do uso de agroquímicos prejudica a saúde da população. Constatou-se que o aumento de R\$10,00/ha nas despesas com agrotóxicos implica aumento de, aproximadamente, 13,09% nos casos de intoxicação no Brasil. Quando consideram-se municípios rurais e municípios sem unidades de vigilância em saúde, esse percentual aumenta para 16,74% e 22,76%, respectivamente. Tais resultados apontam para a relevância das unidades de vigilância em saúde como forma de mitigar os riscos à saúde associados ao uso de pesticidas e para necessidade de priorizar políticas nos municípios rurais.

Ademais, observou-se que, mesmo diante dos prejuízos à saúde causados pelo uso impróprio de agroquímicos, a regulamentação do setor é pouco restritiva quando comparada a de outros países, como os da União Europeia, sugerindo que a regulamentação brasileira seja revista a fim de considerar os custos sociais relacionados ao uso de pesticidas.

Com relação à produtividade dos agrotóxicos no Brasil, verificou-se que sua aplicação é feita de forma excessiva. Ainda que os pesticidas contribuam para aumento da produção agrícola, o aumento de R\$10,00/ha nas despesas com agrotóxicos resulta, em média, no aumento de R\$7,71/ha no valor bruto de produção. Ou seja, os produtores não estão maximizando o lucro. Constatou-se ainda a redução da produtividade dos agrotóxicos entre 2006 e 2017, com destaque para o Centro-Oeste e Sul do país, principais regiões produtoras de soja e milho.

Isso posto, é possível que os benefícios econômicos advindos do uso de agrotóxicos estejam sendo atenuados pelos custos associados ao seu uso inadequado, como o desenvolvimento da resistência das pragas e os prejuízos causados aos predadores naturais e aos organismos do solo. Como resultado, a proliferação de pragas e patógenos pode aumentar e o solo torna-se menos fértil.

Os resultados ainda revelam que a adoção do sistema de produção orgânico e a participação em cooperativas e/ou entidades da classe contribuem para redução do uso excessivo de pesticidas. Já o acesso ao crédito favorece o uso excessivo de pesticidas. Deste

modo, em vista de otimizar o uso de agrotóxicos no Brasil, sugere-se o desenvolvimento de alternativas sustentáveis de controle fitossanitário juntamente com a criação de linhas de crédito que sejam direcionadas para implementação dessas tecnologias, além do fortalecimento das cooperativas.

Em suma, os resultados apontam para custos sociais elevados associados ao uso de agrotóxicos no Brasil. Além disso, observaram-se retornos decrescentes dos pesticidas, indicando sobreuso deste composto químico. Deste modo, é possível que os custos associados ao uso de agrotóxicos estejam sobrepondo seus benefícios. Ou seja, além dos danos à saúde, a aplicação dos agrotóxicos não está sendo feita de forma que os produtores maximizem seu lucro. Em outras palavras, os produtores não estão usufruindo todos os benefícios associados à aplicação de agrotóxicos, mas estão arcando, juntamente com toda a população, com seus custos.

Nesse ínterim, os resultados desta pesquisa sugerem algumas políticas para maximizar os benefícios e minimizar os danos do uso de agrotóxicos. Programas de conscientização dos produtores e o treinamento de agrônomos e técnicos agrícolas com o objetivo de incentivar a adoção de alternativas sustentáveis de manejo de pragas e doenças são fundamentais para promover a transição agroecológica. Adicionalmente, treinamentos para o uso e manuseio corretos dos pesticidas podem contribuir para redução dos riscos associados a utilização destes compostos químicos.

Por fim, é importante dizer que, para eficácia dessas políticas e programas, é essencial que a regulação do setor esteja alinhada com os objetivos das políticas. Assim, ressalta-se a necessidade de revisar a regulação vigente no país. Os resultados desta pesquisa podem contribuir para tal discussão, colaborando para o desenvolvimento sustentável do setor agrícola brasileiro.