



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIO**

HEVERTON EUSTÁQUIO PINTO

**Sistema de plantio direto (SPD) e desempenho produtivo da
agropecuária brasileira**

GOIÂNIA/GO
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Heverton Eustáquio Pinto

3. Título do trabalho

SISTEMA DE PLANTIO DIRETO (SPD) E DESEMPENHO PRODUTIVO DA AGROPECUÁRIA BRASILEIRA

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Heverton Eustáquio Pinto, Discente**, em 28/04/2023, às 11:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Alcido Elenor Wander, Usuário Externo**, em 28/04/2023, às 13:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3702797** e o código CRC **1A188EFE**.

HEVERTON EUSTÁQUIO PINTO

Sistema de plantio direto (SPD) e desempenho produtivo da agropecuária brasileira

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronegócio, da Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para a obtenção do título de Doutor em Agronegócio.

Área de concentração: Sustentabilidade e Competitividade dos Sistemas Agroindustriais.

Linha de Pesquisa: Competitividade dos sistemas agroindustriais.

Orientador: Prof. Dr. Alcido Elenor Wander

Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Dias Paes Ferreira

GOIÂNIA/GO
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

PINTO, HEVERTON EUSTAQUIO
SISTEMA DE PLANTIO DIRETO (SPD) E DESEMPENHO
PRODUTIVO DA AGROPECUÁRIA BRASILEIRA [manuscrito] /
HEVERTON EUSTAQUIO PINTO, ALCIDO ELENOR WANDER,
MARCELO DIAS PAES FERREIRA. - 2023.
77 f.

Orientador: Prof. Dr. Alcido Elenor Wander; co-orientador Dr.
Marcelo Dias Paes Ferreira.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de
Agronomia (EA), Programa de Pós-Graduação em Agronegócio, Goiânia,
2023.

Inclui siglas, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Sustentabilidade. 2. Manejo dos Solos. 3. Eficiência técnica. 4.
Produtividade. 5. Fronteira Estocástica de Produção. I. WANDER,
ALCIDO ELENOR. II. FERREIRA, MARCELO DIAS PAES. III.
Wander, Alcido Elenor, orient. IV. Ferreira, Marcelo Dias Paes, co
orient. V. Título.

CDU 33:349.42



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE AGRONOMIA

ATA DE DEFESA DE TESE

Ata Nº 7 da sessão de Defesa de Tese, de **Heverton Eustáquio Pinto**, que confere o título de Doutor em **Agronegócios**, na área de concentração em **Sustentabilidade e Competitividade dos Sistemas Agroindustriais**.

Aos **vinte e oito dias de abril de dois mil e vinte e três**, a partir das **08h**, na **sala 09** do Desenvolvimento Rural - Escola de Agronomia, realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese intitulada "**SISTEMA DE PLANTIO DIRETO (SPD) E DESEMPENHO PRODUTIVO DA AGROPECUÁRIA BRASILEIRA**". Os trabalhos foram instalados pelo Professor Doutor Alcido Elenor Wander (EMBRAPA), com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor Marcelo Dias Paes Ferreira (UFV), coorientador, por videoconferência; Professor Doutor Cleyzer Adrian da Cunha (FACE/UFV), membro titular interno; Professora Doutora Francine Neves Calil (EA/UFV), membro titular interno; Professor Doutor Carlos Eduardo de Freitas Vian (ESALQ/USP), membro titular externo, por videoconferência; e Professor Doutor Edward Martins Costa (UFC), membro titular externo, por videoconferência. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Tese tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor Alcido Elenor Wander, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **vinte e oito dias de abril de dois mil e vinte e três**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Francine Neves Calil, Professora do Magistério Superior**, em 28/04/2023, às 12:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Dias Paes Ferreira, Usuário Externo**, em 28/04/2023, às 12:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Alcido Elenor Wander, Usuário Externo**, em 28/04/2023, às 13:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Cleyzer Adrian Da Cunha, Professor do Magistério Superior**, em 28/04/2023, às 13:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **EDWARD MARTINS COSTA, Usuário Externo**, em 03/05/2023, às 10:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Eduardo de Freitas Vian, Usuário Externo**, em 04/05/2023, às 10:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3702796** e o código CRC **DFE79272**.

Referência: Processo nº 23070.023393/2023-04

SEI nº 3702796

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão à todos que contribuíram para a realização desta tese. É com imensa alegria que dedico este momento para agradecer à Deus e à minha amada família, em especial à minha querida esposa Tainara Guedes e aos meus filhos Davi, Lucas e Miguel. À minha mãe Maria Jose Ferreira e aos meus irmãos Heder Eustáquio e Helbert Eustáquio, que estiveram ao meu lado em todos os momentos, o meu mais profundo agradecimento. Vocês foram minha base, meu apoio incondicional e minha fonte inesgotável de amor e incentivo. Obrigado por acreditarem em mim, por compreenderem as minhas ausências e por sempre me encorajarem a seguir em frente. Sem o amor e o suporte de vocês, esta conquista não seria possível.

À Universidade Federal de Goiás e ao Programa de Pós Graduação em Agronegócios, quero expressar minha gratidão por proporcionar um ambiente acadêmico enriquecedor e desafiador. Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus orientadores, Professor Doutor Alcido Elenor Wander e Professor Doutor Marcelo Dias Paes Ferreira, pelo apoio e orientação ao longo desta jornada de pesquisa.

Professor Doutor Alcido Elenor Wander, seu comprometimento e expertise foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Sua dedicação em transmitir seus conhecimentos, sua disponibilidade para esclarecer dúvidas e seu rigor acadêmico foram essenciais para o aprofundamento da minha pesquisa. Agradeço por compartilhar sua sabedoria e experiência, por me incentivar a explorar novas perspectivas e por acreditar no meu potencial. Sua orientação foi valiosa em todos os aspectos e serei eternamente grato pela confiança depositada em mim.

Professor Doutor Marcelo Dias Paes Ferreira, sou imensamente grato pela sua contribuição como coorientador nesta tese. Seu comprometimento, habilidades analíticas e sugestões perspicazes agregaram um valor inestimável ao meu trabalho, à minha carreira acadêmica e profissional. Agradeço por suas valiosas contribuições, por me estimular a aprofundar meu pensamento crítico e por seu suporte inabalável.

A parceria entre o professor Doutor Alcido Elenor Wander e o professor Doutor Marcelo Dias Paes Ferreira foi essencial para conclusão desta tese. Agradeço pela harmonia e colaboração que demonstraram durante todo o processo,

proporcionando uma orientação de qualidade e um ambiente propício para o meu crescimento acadêmico.

Por fim, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a minha jornada, especialmente meus colegas de doutorado, seja com palavras de incentivo, apoio emocional ou compartilhando conhecimentos, meu sincero agradecimento.

Esta tese é o resultado de um esforço coletivo e tenho imenso orgulho em compartilhar essa conquista com todos vocês. Vocês foram parte fundamental do meu caminho e jamais esquecerei o impacto que tiveram na minha vida.

Mais uma vez, obrigado do fundo do meu coração.

RESUMO

Alinhar a necessidade de aumentar a produção agropecuária às práticas sustentáveis de produção é o grande desafio dos agentes que atuam no setor agrícola, o que requer uma produção eficiente no ponto de vista econômico e ambiental. É necessário compreender o efeito e impacto nos resultados econômicos em suas variadas dimensões, em especial do avanço das práticas produtivas consideradas sustentáveis. Entre as práticas sustentáveis, a expansão do Sistema de Plantio Direto está entre as práticas de manejo de solos mais incentivadas no Brasil. A presente tese busca testar a hipótese conservacionista de que estas práticas guardam relação de ganhos econômicos respondendo o seguinte questionamento: o avanço do SPD no Brasil promove ganhos econômicos? Para responder o questionamento a presente tese utiliza estudos econométricos em três artigos, sendo: 1) avalia o efeito da expansão do Sistema Plantio Direto (SPD) sobre a eficiência técnica da agropecuária brasileira, através da estimação de uma fronteira de produção estocástica 2) compreender os condicionantes da adoção e o impacto econômico da expansão do SPD no Brasil e 3) avaliar o impacto do SPD sobre as despesas produtivas na agropecuária em cenário de mudanças climáticas. Foi possível concluir que o SPD direto contribui com o aumento da eficiência técnica da agropecuária brasileira, contudo, a sua contribuição ao longo do tempo está condicionada a fatores estruturais, e a sua adoção no Brasil está condicionada às atividades pecuárias e variáveis climáticas, os quais são fatores que contribuem com a probabilidade da adoção do SPD no Brasil. Há evidências de que o SPD afeta positivamente o desempenho econômico das atividades agropecuárias nos municípios brasileiros para diferentes níveis de proporção de área com SPD sobre a área agricultável. Em relação ao impacto do SPD sobre as despesas produtivas em cenário de mudanças climáticas, direcionado a realidade dos municípios do estado de Goiás, o estudo permite concluir, também, que a expansão de SPD no estado tem potencial de aumentar a lucratividade agrícola média dos municípios a partir de menos custos e despesas produtivas, tornando os municípios goianos que mantem SPD em suas áreas agricultáveis menos vulnerável ao clima diante de cenários futuros de mudanças climáticas. É importante ressaltar que o fato de o padrão histórico de temperatura e precipitação influenciar na escolha dessa prática de gestão de solos fortalece os indícios de sua utilização como medida adaptativa às mudanças climáticas. Medidas que possam restringir a inclusão de áreas agricultáveis, aumento da disponibilidade de capital humano e apoio a mecanização, bem como a agroindustrialização da produção agropecuária goiana, são fundamentais para a expansão das áreas cultivadas com SPD no estado de Goiás.

Palavras-chave: Eficiência técnica; Sustentabilidade; Sistema Plantio Direto; Adoção de tecnologia; Agropecuária

ABSTRACT

Aligning the need to increase agricultural production with sustainable production practices is the great challenge for agents working in the agricultural sector, which requires efficient production from an economic and environmental point of view. It is necessary to understand the effect and impact on economic results in their various dimensions, of the advancement of productive practices considered sustainable. Among the sustainable practices, the expansion of the No-tillage (NT) is the result of public policies of direct and indirect incentives in Brazil. This thesis seeks to test the conservationist hypothesis that these practices are related to economic gains by answering the following question: does the advance of the NT in Brazil promote economic gains? To answer the question, this thesis uses econometric studies in three articles, namely: 1) evaluates the effect of the expansion of the No-Tillage (NT) on the technical efficiency of Brazilian agriculture, through the estimation of a stochastic production frontier 2) understand the conditioning factors for the adoption and the economic impact of the expansion of the NT in Brazil and 3) evaluate the impact of the NT on productive expenses in agriculture and livestock in a climate change scenario. It was possible to conclude that direct NT contributes to increasing the technical efficiency of Brazilian agriculture, however, its contribution over time is conditioned to structural factors, and its adoption in Brazil is conditioned to livestock activities and climate variables, which are factors that contribute to the likelihood of NT adoption in Brazil. There is evidence that NT positively affects the economic performance of agricultural activities in Brazilian municipalities for different levels of the proportion of area with NT over arable land. Regarding the impact of the NT on productive expenses in a scenario of climate change, directed at the reality of the municipalities in the state of Goiás, the study also allows the conclusion that the expansion of NT in the state has the potential to increase the average agricultural profitability of the municipalities from less costs and productive expenses, making the municipalities of Goiás that maintain NT in their arable areas less vulnerable to the climate in the face of future climate change scenarios. It is important to point out that the historical pattern of temperature and precipitation influences the choice of this soil management practice strengthens the evidence of its use as an adaptive measure to climate change. Measures that can restrict the inclusion of arable areas, increase the availability of human capital and support mechanization, as well as the agro-industrialization of agricultural production in Goiás, are fundamental for expanding areas cultivated with NT in the state of Goiás.

Keyword: Technical efficiency; Sustainability; No-Tillage; Technology adoption; Farming production

LISTA DE TABELAS, FIGURAS E QUADROS

Artigo 1 - Sistema Plantio Direto: implicações sobre a eficiência agropecuária brasileira

Figura 1 - Efeito esperado sobre a eficiência técnica da adoção de SPD na agropecuária brasileira

Figura 2 - Efeito Marginal do SPD sobre a (in)eficiência (a), dispersão da eficiência persistente (b) e transiente sobre a proporção de área agricultável sob SPD (c)

Figura 3: Distribuição de Kernel das eficiências: Persistente e Transiente

Quadro 1 – Descrição das variáveis empregadas no modelo

Tabela 1 - Estatísticas descritivas das variáveis da fronteira de produção e variância da ineficiência

Tabela 2 – Coeficientes da Fronteira de Produção Estocástica

Tabela 3 – Análise descritiva das Eficiências Técnicas

Artigo 2 - Condicionantes e Efeito Tratamento da Adoção de Sistema Plantio Direto (SPD) na agropecuária brasileira

Tabela 1 – Descrição das variáveis que compõem o modelo

Tabela 2. Análise descritiva das variáveis

Tabela 3 – Estimativas do modelo Logit de determinação da probabilidade de adotar SPD no Brasil

Tabela 4 - Impacto sobre o VBP de municípios com e sem uso do SPD

Figura 1 – Dose-resposta e efeito tratamento do SPD sobre VBP agropecuária

Artigo 3 - Sistema Plantio Direto como estratégia de adaptação climática – evidências para os municípios goianos.

Quadro 1 – Contribuição do SPD para o meio ambiente e o enfrentamento das mudanças climáticas.

Tabela 1 - Variáveis utilizadas e suas fontes.

Tabela 2 – Estatística descritivas das variáveis utilizadas no estudo.

Tabela 3 – Estimativas do modelo Logit de determinação da probabilidade de adotar SPD em Goiás – em cenário presente e futuro.

Tabela 4 - Impacto sobre as despesas produtivas de municípios com e sem uso do SPD.

Tabela 5 - Impacto dos cenários climáticos sobre o valor médio das despesas agropecuárias nos municípios goianos com e sem uso de SPD, presente e simulação climática futura.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

COP – 15 - 15º Conferência das Partes da Convenção do Clima das Nações Unidas

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

SPD – Sistema Plantio Direto

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

PSM – *Propensity Score Matching*

PSG - *Propensity Score Matching Generalized*

SUMÁRIO

1. Introdução Geral.....	09
1.1 SISTEMA PLANTIO DIRETO: IMPLICAÇÕES SOBRE A EFICIÊNCIA AGROPECUÁRIA BRASILEIRA	10
1.2 Introdução	10
1.3 Literatura relacionada	13
1.3.1 Impactos ambientais e econômicos do Sistema Plantio Direto	13
1.3.2 Eficiência técnica e Sistema Plantio Direto (SPD).....	16
1.4 Metodologia	18
1.4.1 Fonte de dados e variáveis	20
1.5 Resultados e discussões	22
1.6 Conclusões	29
1.7 Referências.....	30
2. CONDICIONANTES E EFEITO TRATAMENTO DA ADOÇÃO DE SISTEMA PLANTIO DIRETO (SPD) NA AGROPECUÁRIA BRASILEIRA.....	38
2.1 Introdução	38
2.2 Sistema Plantio Direto (SPD): definição e seu uso no Brasil	39
2.3 Metodologia	41
2.3.1 Fonte de dados e variáveis utilizadas.....	41
2.3.2 Modelo de escolha binária (Logit) e Propensity Score Matching.....	42
2.3.3 PSG e Efeito Dose-Resposta.....	44
2.4 Resultados e discussões	45
2.4.1 Análise descritiva das variáveis.....	45
2.4.2 Análise dos fatores associados à decisão de utilização de SPD.....	47
2.5 Conclusões	49
2.6 Referências.....	51
3 SISTEMA PLANTIO DIRETO COMO ESTRATÉGIA DE ADAPTAÇÃO CLIMÁTICA – EVIDÊNCIAS PARA OS MUNICÍPIOS GOIANOS	54
3.1 Introdução	54
3.2 Literatura relacionada	57
3.3 Metodologia	59
3.3.1 Estratégia Empírica	59
3.3.2 Fonte de dados e variáveis utilizadas.....	60
3.4 Resultados e discussões	61
3.5 Conclusões	65
3.6 Referências.....	66
4 Considerações Gerais.....	68
5 Relevância do estudo.....	71

1. INTRODUÇÃO GERAL

A necessidade de aumentar a produção agropecuária para suprir a demanda crescente por alimentos tem sido um desafio enfrentado pelos agentes que atuam no setor agrícola. No entanto, esse aumento deve ocorrer de forma sustentável, levando em consideração as práticas que promovem a preservação do meio ambiente. Nesse contexto, o Sistema de Plantio Direto (SPD) tem se destacado como uma prática sustentável fruto de políticas públicas de incentivo no Brasil.

Esta tese tem como objetivo principal testar a hipótese conservacionista de que o avanço do SPD no Brasil promove ganhos econômicos. Para responder a essa questão, foram realizados estudos econométricos em três artigos distintos. O primeiro artigo avalia o efeito da expansão do SPD sobre a eficiência técnica da agropecuária brasileira, por meio da estimação de uma fronteira de produção estocástica. O segundo artigo busca compreender os fatores que influenciam a adoção e o impacto econômico da expansão do SPD no Brasil. Por fim, o terceiro artigo avalia o impacto do SPD sobre as despesas produtivas na agropecuária em um cenário de mudanças climáticas para os municípios do estado de Goiás.

Os resultados obtidos ao longo dessa pesquisa permitiram concluir que o SPD contribui para o aumento da eficiência técnica da agropecuária brasileira. No entanto, verificou-se que sua contribuição ao longo do tempo está condicionada a fatores estruturais e que a adoção do SPD no Brasil é influenciada pelas atividades pecuárias e variáveis climáticas. Esses fatores são determinantes para aumentar os incentivos da probabilidade de adoção do SPD no país.

Além disso, as evidências apontam que o SPD afeta positivamente o desempenho econômico das atividades agropecuárias nos municípios brasileiros, em diferentes níveis de proporção de área com SPD sobre a área agricultável. No entanto, em relação ao impacto do SPD sobre as despesas produtivas em um cenário de mudanças climáticas, os resultados não encontraram evidências de que o SPD seja uma tecnologia adaptativa às condições climáticas, de acordo com a realidade dos municípios goianos e os critérios estabelecidos neste estudo.

Assim, esta tese contribui para a compreensão dos efeitos e impactos econômicos do avanço das práticas produtivas sustentáveis, em particular, o Sistema de Plantio Direto no Brasil. Os resultados obtidos fornecem subsídios para a formulação de políticas públicas e estratégias de desenvolvimento agrícola que promovam a eficiência econômica e ambiental, alinhando a necessidade de aumento da produção agropecuária com práticas sustentáveis de produção.

1.1 SISTEMA PLANTIO DIRETO: IMPLICAÇÕES SOBRE A EFICIÊNCIA AGROPECUÁRIA BRASILEIRA

RESUMO

A sustentabilidade da produção da agropecuária brasileira é primordial para a segurança alimentar no Brasil e no mundo, o que exige compreender o efeito das práticas sustentáveis sobre a produtividade agropecuária brasileira. O presente estudo avalia o efeito da expansão do Sistema Plantio Direto (SPD), uma prática de manejo de solo considerada sustentável, sobre a eficiência técnica da agropecuária brasileira, através da estimação de uma fronteira de produção estocástica. Foram utilizados dados do Censo Agropecuário brasileiro em nível de microrregiões para os anos de 2006 e 2017. Os resultados apontaram que a expansão do SPD na agropecuária brasileira está relacionada ao aumento a eficiência produtiva. Por outro lado, a ineficiência produtiva da agropecuária brasileira está associada a fatores estruturais e persistentes. Recomenda-se manter e aumentar os mecanismos de incentivos à expansão de SPD nas áreas agricultáveis das microrregiões brasileiras.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Manejo dos Solos; Eficiência técnica; Produtividade; Fronteira Estocástica;

Introdução

O *trade-off* entre conservar o meio ambiente e garantir a segurança alimentar a partir da produção agropecuária tem sido apontado como o maior desafio da sociedade contemporânea. Existem evidências que o processo de modernização agrícola proposto pela Revolução Verde não conseguiu alinhar a seus altos indicadores de desempenho produtivo a entrega de serviços ambientais, conservação dos recursos naturais, maior equidade na geração de renda no campo e mitigações dos impactos climáticos, o que elevou as pressões ambientais, econômicas e sociais sobre o setor agropecuário (Kassam; Friedrich; Derpsch, 2018; Omara et al., 2019; De Jesus; Ommati, 2017).

A produção agropecuária brasileira está fundamentada no financiamento agropecuário, exposição ao comércio internacional, presença de serviços de extensão rural, empresas de pesquisas agropecuárias e políticas de incentivos à adoção de práticas sustentáveis. O alto índice da produtividade da agropecuária brasileira e a sua disponibilidade de terras tornou o país no maior produtor e exportador de alimentos no

mundo (Arias et al, 2017; OCDE, 2019; Lachaud; Bravo-Ureta, 2020).

O avanço da produção agropecuária no Brasil veio acompanhada de graves problemas ligados à degradação ambiental, resultando em excesso de desmatamento, compactação do solo, erosão, assoreamento de rios, contaminação da água subterrânea, e perda de biodiversidade, com reflexos sobre todo o ecossistema ambiental, todos os biomas, em especial no cerrado e na Amazônia. À medida que a degradação ambiental avança naqueles biomas, provoca sérias restrições à economia e à cadeia alimentar. (Omara et al., 2019; Araujo; Combes; Féres, 2019; Ferreira; Féres, 2020; Tateishi; Bragagnolo; De Faria, 2020)

O incentivo à adoção de técnicas produtivas agrícolas com preceitos conservacionistas tem sido a principal estratégia de gestores de política pública para o enfrentamento de tais problemas (Arias et. al., 2017; Moreira, 2000; Altieri, 2009; Kassam; Friedrich; Derpsch, 2018; OCDE, 2019; Ortiz-Bohea, 2021). O princípio por tais técnicas seria, de uma forma mais ou menos intensa, reduzir o impacto ambiental e, ao mesmo tempo, aumentar a produtividade agrícola. Em outras palavras, reduzir o trade-off observado entre produção agrícola e impacto ambiental.

Entre os pacotes tecnológicos de cultivo agrícola conservacionista, a adoção de Sistema Plantio Direto (SPD) é incentivado pela *Food Agriculture Organization* (FAO), principalmente em países em desenvolvimento, dado a sua resposta em termos de gestão sustentável do solo e da água, bem como o uso eficiente dos recursos operacionais na produção agrícola, promovendo economia no uso de insumo e a potencialização da capacidade de produção (Denardin et. al., 2012; Rebello; Turetta, 2017; Andrade et. al., 2018; Omara et. al., 2019; Maia et. al., 2021; Anghinomi et. al., 2021).

Apropriada às condições de solo e às características ambientais do Brasil, a prática é um importante instrumento de política pública para o desenvolvimento rural, estratégia de mitigação a mudanças climáticas, recuperação de solos degradados e redução de emissões de gases do efeito estufa (GEE) (Denardin et al., 2012; Rebello; Turetta, 2017). O SPD tem sido uma das principais técnicas financiada pelo poder público brasileiro através do programa de financiamento às atividades produtivas sustentáveis conhecido como Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura,

conhecido como Plano ABC+ (Mangabeira; Tôsto; Romeiro, 2011; Gianetti, 2018).

Pesquisas experimentais ¹têm encontrado importantes implicações econômicas a partir dos efeitos da sustentabilidade do SPD. Alguns trabalhos demonstram impactos nas propriedades do solo sob uso de Sistema de Plantio Direto em diversas culturas no Brasil, principalmente na produção de grãos, a qual a técnica é majoritariamente adotada (Andrade et. al., 2018; Dos Santos Soares et. al., 2019; Anghinomi et. al., 2021).

Entre os diversos impactos sobre o solo que a técnica proporciona, destacam-se os de propriedades físicos-hídricos, a qual promove menor perda de solo por erosão, perda de água por evaporação, menor capacidade de compactação do solo e armazenamento de carbono nos solos, o que reforça a capacidade de mitigar os gases efeito estufa da produção agrícola (Stone; Silveira; Moreira, 2006; Casão Junior; Araújo; Llanillo, 2012; Denardin et. al., 2012; Rebello; Turetta, 2017; Omara et. al., 2019; Somasundaram et. al., 2020; Kawa, 2021; Sainju, 2021; Hati et. al., 2021; Carlos et. al., 2022; Haruna & Anderson, 2022; Veresoglou et. al., 2023; Anghinomi et al., 2021).

Efeitos sobre as propriedades químicas e biológicas são também apontados, por exemplo, maiores teores de matéria orgânica e biomassa, carbono orgânico, nitrogênio, potássio, cálcio, magnésio, maiores valores de pH, bem como a maior difusão, fertilidade e solução do solo e absorção pelas plantas (Piccini, 2005; Gatiboni et al., 2007; Boer et al., 2007; Crusciol et al., 2008; Giongo et al., 2011; Dos Santos Soares et al., 2019; Omara et al., 2019; Mello Ivo et al., 2021; Sainju, 2021).h

Outros estudos apontam que o Sistema Plantio Direto (SPD) está entre os principais conjuntos de técnicas de cultivo responsável, em boa parte, pelo aumento da produtividade da agricultura no Brasil, que culminou na viabilidade de duas safras de grãos por ano agrícola (Denardin et al., 2012; Rebello; Turetta, 2017).

Dado a importância estratégica do SPD como um instrumento de políticas públicas de conservação dos solos e mudanças climáticas, é necessário compreender como estas tecnologias de produção sustentáveis têm agido sobre a produtividade e eficiência técnica da produção agrícola brasileira, já que o aumento da eficiência produtiva é o principal argumento conservacionista em defesa do uso de SPD.

O objetivo do presente artigo é verificar se a expansão da adoção de SPD na

¹ Pesquisas em ambientes controlados

produção na agropecuária brasileira está relacionada com eficiência técnica refletida na literatura sobre a produtividade da agropecuária brasileira, investigando os efeitos da adoção do SPD na eficiência técnica em duas perspectivas: (1) perspectiva de curto-prazo ao analisar os (in)eficiência conjuntural (transiente), que pode variar ao longo do tempo e o papel do SPD na eficiência transiente; (2) e a perspectiva de longo prazo, onde busca-se analisar a (in)eficiência estrutural (persistente).

Para atingir tal objetivo, foi utilizado uma técnica de fronteira estocástica de produção em dados em painel proposto por Lien, Kumbhakar e Alem (2018), que amplia a análise de eficiência técnica por considerar os vieses de variáveis não observáveis, o controle da heterogeneidade individual, além de avaliar e decompor a eficiência em transiente e persistente, permitindo responder se a evolução da área agricultável sobre SPD está relacionada a ganhos de eficiência produtiva da produção agropecuária brasileira. Foram utilizados dados de 2006 e 2017, de 557 microrregiões brasileiras do Censo Agropecuário do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Os resultados obtido pelo método proposto apresenta outras implicações para a análise de políticas públicas. Em primeiro lugar, permite avaliar se questões estruturais estão impedindo que a produção agropecuária brasileira produza mais com o atual nível de insumos. Tais questões seriam capturadas na eficiência persistente. Em segundo lugar, capta o papel relativo da expansão do SPD sobre a eficiência transiente, o que permite avaliar o papel potencial do SPD sobre a mitigação da ineficiência persistente. Uma vez verificado tal papel, poderia ser verificado se a política de crédito subsidiado para SPD no Brasil teria um duplo dividendo na forma dos benefícios ambientais listados e no aumento da produção mediante incremento da eficiência no uso de recursos aplicados.

O presente trabalho segue, além desta introdução, com apresentação da literatura relacionada aos impactos ambientais, econômicos e implicações sobre a eficiência técnica da adoção de SPD. Apresenta a estratégia empírica e fonte de dados, seguida dos resultados e discussões, e finaliza com as conclusões e implicações científicas.

2. Literatura Relacionada

2.1 Impactos ambientais e econômicos do Sistema Plantio Direto

O SPD faz parte do complexo de práticas produtivas sustentáveis baseada nos preceitos da ciência dos solos conhecida como agricultura conservacionista, compreendida como agricultura gerenciada sob complexos tecnológicos sistêmicos com a finalidade de preservar, manter e restaurar (ou recuperar) os recursos naturais, através da adoção de manejo integrado do solo, da água e da biodiversidade. Tais complexos tecnológicos devem estar compatibilizados com uso de insumos externos, caracterizando agricultura conservacionista como agricultura eficiente ou efetiva no uso dos recursos disponíveis (Denardin et al., 2014; Sainju, 2021).

De forma sintética, o SPD pode ser definido como ferramenta da agricultura conservacionista capaz de viabilizar, em termos econômicos e eficiência operacional, o ato de produzir sem preparo prévio do solo, safra após safra de modo contínuo. Além disso, o SPD potencialmente elimina a erosão, otimiza o uso de fertilizantes, aumenta a floculação e a agregação do solo e reduz a decomposição da matéria orgânica, estabelecendo sincronismo entre a disponibilidade de nutrientes e o crescimento das formas de vida presentes no solo. Além de reduzir os custos operacionais ao diminuir a necessidade de operações mecânicas (Fuentes- Llanillo et al., 2018; Telles; Reydon; Maia, 2018; EMBRAPA, 2020; FEBRAPDP, 2020).

O SPD é adotado no Brasil há 40 anos e, atualmente, estima-se que são cultivados entre 31,5 a 33 milhões de hectares sobre a técnica, representando 9% do total de 351 milhões de hectares de produção agropecuária e 52% da área total cultivada com culturas temporárias, aproximadamente 64 milhões de hectares (IBGE, 2020). A técnica faz parte dos complexos tecnológicos que compõem os compromissos firmados pelo Brasil na COP-15 (15ª Conferência das Partes da Convenção do Clima das Nações Unidas), que vislumbram a redução das emissões de gases de efeito estufa estimada para 2020, entre 36,1% e 38,9%. Esses valores projetam reduções de um bilhão de toneladas de CO₂.

Nos últimos anos, o poder público e entidades privadas brasileiras têm se desdobrado para ampliar a adoção do SPD no Brasil. Por meio de crédito para financiar adoção de tecnologias que visam a mitigação de GEEs na produção agropecuária, o programa Plano ABC+ 2020 a 2030 é a principal política pública brasileira de estímulo à adoção e difusão do SPD no Brasil. A primeira fase do programa superou a meta de adoção de 8 milhões de hectares, chegando num total de 12 milhões de hectares

plantados e a estimativa de mitigação de 18,25 milhões de Mg CO₂, além de ser o segundo destino entre as tecnologias contempladas pelo programa, quanto a finalidade dos recursos, chegando a 28% no total de recursos aplicados entre 2013 a 2016 (Assad et al., 2019; Freitas, 2018; Gianetti, 2018).

A adoção do SPD é justificada por fatores ambientais e econômicos. Com efeito, a literatura que investiga o uso de Plantio Direto na produção agrícola concentra-se sob impactos ambientais e valoração econômica da adoção de SPD (Rebello; Turetta, 2017; Rodrigues, 2005; Dantas; Monteiro, 2010; Aryal et al., 2015; Telles; Reydon; Maia, 2018), sobre as diferenças na performance produtiva e/ou econômica entre os métodos convencionais de cultivo e o uso do SPD através de métodos experimentais (Ferreira; Freitas; Moreira, 2015; Fuentes- Llanillo et al., 2018; Dos Santos; Fontaneli, 2010), e os impactos econômicos e produtivos entre adotantes e não adotantes de SPD, bem como o processo de adoção de SPD por métodos quase-experimentais (Delate; Cwach; Chase, 2012; Llewellyna; D'emden; Kuehnea, 2012; Aryal; Sapkota; Bishnoi 2014; Krishna; Veettil, 2014; Keil, D'souza; Mc Donald 2015; El-Shater Et Al., 2016).

Alguns trabalhos têm encontrado importantes impactos sociais, de eficiência econômica e de sustentabilidade ambiental na produção agropecuária onde há adoção de SPD. Delate, Cwalch e Chase (2012) identificaram uma relação positiva entre a adoção do SPD na produção de soja com a produção conjunta de tomate orgânico e irrigação, demonstrando que o desempenho produtivo sobre o SPD aumenta em anos de seca.

Llewellyna, D'emden e Kuehnea (2012) apontam que 90% dos produtores australianos utilizam a técnica, e, além de se encontrar no seu ápice de difusão no país, o processo de adoção tem como principal determinante uso de assistência técnica privada e a formação do produtor no ensino superior. Aryal, Sapkota e Bishnoi (2014) identificaram que os agricultores indianos adotantes de plantio direto podem economizar aproximadamente US\$ 79 por hectare em custos produtivos e obter um aumento na receita líquida de US\$ 97,5 por hectare produzido devido ao aumento da produtividade.

Krishna e Veettil (2014) e Keil, D'Souza e Mc Donald (2015) verificaram que há uma economia significativa de custos de produção associada à adoção de Plantio Direto no cultivo de trigo, acompanhado do aumento da produtividade e uma melhora

na eficiência técnica da produção.

El-Shater et al. (2016) demonstram que pequenos produtores sírios apresentaram maior desempenho produtivo na produção de trigo após a introdução de plantio direto na produção, com aumento médio de 26 kg no consumo anual de trigo e US\$ 189,00/ha a mais na renda líquida das pequenas propriedades sírias. Neste sentido, constata-se que a adoção de SPD em diferentes culturas agrícolas em diversos locais do mundo traz benefícios econômicos, em conjuntocom os já mencionados benefícios ambientais.

Telles, Reydon e Maia (2018) encontraram evidências que as terras agrícolas no Brasil sob o cultivo de culturas temporárias e que são plantadas utilizando SPD, apresentam maior valor de mercado que terras plantadas sob outros sistemas de manejo do solo. Tais evidências das diferenças do preço de mercado da terra cultivada sob SPD foram constatadas nos estados brasileiros de maiores níveis de produção agrícola, incluindo Paraná, Rio Grande do Sul, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás e Bahia.

El-Shater, Mugerá e Yigezu (2020) demonstram que a adoção de SPD por produtores de trigo elevaram os níveis de gerenciamento de risco da atividade tritícola na Síria. Através de estimação de fronteira estocástica os autores demonstram que a adoção de SPD elevou os níveis de eficiência técnica da produção e reduziu os riscos de baixa produtividade da cultura.

2.2 Eficiência técnica e Sistema de Plantio Direto

O presente estudo fundamenta-se no conceito de produtividade e eficiência técnica que se inserem na teoria neoclássica da produção, em que a produtividade de uma unidade de produção pode ser medida pela razão entre sua produção e a quantidade de insumos empregados, podendo ser decomposta em: nível de tecnologia, eficiência técnica, efeito de escala e efeitos aleatórios ou do ambiente. Assim, a produtividade varia de acordo com as diferenças tecnológicas de produção, o processo de produção em si e as diferenças nas instituições e ambientes em que a produção ocorre. Por vez, produtores são considerados eficientes se atingem a produção máxima possível, em vista de suas restrições orçamentárias ao emprego de insumos a custos mínimos (Fried; Lovell; Schmidt, 2008; Porcelli, 2009).

A eficiência técnica refere-se na capacidade de se evitar desperdícios, sendo

orientado pelo aumento de produção ou orientado pela diminuição do insumo. A mensuração do componente de eficiência técnica na orientação produto é medida observando o volume produzido à produção máxima potencial dada a quantidade de insumos utilizadas, e é considerado uma medida de desempenho gerencial da atividade (Fried; Lovell; Schmidt, 2008; Porcelli, 2009).

O principal interesse do presente artigo é isolar o componente de eficiência técnica da produção sob Sistema de Plantio Direto (SPD), medindo sua contribuição para a produtividade total. É importante ressaltar que a eficiência é apenas uma parte do desempenho geral, mesmo que na estratégia empírica a atenção esteja voltada para medir a eficiência técnica da produção sob SPD, o desafio é compreender como as dimensões da produtividade são afetadas pela adoção da técnica, que no presente artigo são investigados os efeitos da expansão da adoção de SPD sobre a eficiência técnica nos municípios brasileiros ao longo do tempo. A Figura 1 sintetiza o efeito esperado sobre a eficiência técnica da adoção de SPD sobre a partir do conceito de eficiência técnica.

Figura 1: Efeito esperado sobre a eficiência técnica da adoção de SPD na agropecuária brasileira



Fonte: Elaboração própria

Assim, o SPD está associado com o aumento da eficiência técnica a partir do

conjunto de atividades de manejo da fertilidade do solo, fundamentado em três princípios: o não revolvimento do solo, cobertura permanente do solo e rotação de culturas. O não revolvimento do solo contribui para um uso mais eficiente de fertilizantes ao restringir a operação na linha de plantio, além de ser menos agressivo ao solo, a técnica aumenta a resistência do solo às gotas d'água (De Sá; Santos Junior; Franz, 2009; De Resende, 2011; Casão Junior; Araújo; Llanillo, 2012; Denardin Et Al., 2012; Daryanto; Wang; Jacinthe, 2020).

A cobertura do solo por palhada aumenta a disponibilidade de matéria orgânica, combate o processo erosivo e plantas daninhas, contribui para a umidade e variação bruscas de temperatura do solo, aumentando o potencial produtivo do solo. (Piccini, 2005; Gatiboni Et Al., 2007; Boer Et Al., 2007; Crusciol Et Al., 2008; Giongo Et Al., 2011; Kawa, 2021; Sainju, 2021).

A rotação de culturas de espécies diferentes melhora as características físicas, químicas e biológicas do solo, repõe matéria orgânica, diminui a suscetibilidade às pragas e às doenças, além da possibilidade de resultar em renda direta, pela produção de grãos, sementes ou forragem, ou indiretamente por meio de efeitos positivos sobre as culturas subsequentes (Stone; Silveira; Moreira, 2006; Crusciol et al., 2008; Giongo et al., 2011; Alghamdi; Cihacek, 2022).

Assim, a disseminação do sistema de plantio direto promoveria um aumento na produtividade da agropecuária brasileira pelo fato de aumentar a produção e reduzir a necessidade de insumos principalmente relacionados à mecanização agrícola. Contudo, a utilização de plantio direto exige o uso de insumos modernos, como é o caso da soja transgênica e herbicidas (Perry; Moschini; Hennessy, 2016; Fuentes- Llanillo et al., 2018; Telles; Reydon; Maia, 2018).

Vários trabalhos têm evidenciado uma série de benefícios socioeconômicos e ambientais como resultado da eficiência técnica do SPD sobre a atividade agropecuária quando comparadas a sistemas convencionais. (Dos Santos; Fontaneli, 2010; Aryal; Sapkota; Bishnoi 2014; Krishna; Veettil, 2014; Ferreira; Freitas; Moreira, 2015; Keil, D'souza; Mc Donald 2015; El-Shater et al., 2016; Fuentes- Llanillo et al., 2018; Veresoglou et. al., 2023).

3. Metodologia

O procedimento adotado foi proposto por Lien, Khumbakar e Aliem (2018),

que desintegra o termo de erro em 4 componentes, permitindo avaliar a ineficiência persistente (que não varia ao longo do tempo), ineficiência transiente (que varia no curto-prazo), o terceiro componente que captura a heterogeneidade latente e o quarto componente captura os choques aleatórios.

Tal procedimento é uma extensão recente de fronteiras estocásticas em dados em painel (Colombi et al. (2014), Kumbhakar et al. (2014) e Tsionas and Kumbhakar (2014). Tal especificação é uma extensão introduzidas no modelo são para estimação tradicional de fronteira estocástica que permitem determinantes de ineficiência no componente de ineficiência transitória.

No presente estudo tal modelo foi estimado a partir de uma abordagem de três estágios e utilizada a variação do modelo empírico denominada *Generalized True Fixed Effects* (GTFE), conforme procedimentos empíricos recentes (Kumbhakar et al. 2020, Lien, Kumbhakar & Alem 2018, Musau et al. 2021)

Para a estimação da fronteira estocástica partiu-se de uma função de produção Cobb-Douglas conforme representado pela Equação 1:

$$\ln y_{it} = f(x_{it}; \beta) + \beta_t t + b_i - \eta_i + v_{it} - u_{it}(z_{it}) \quad (1)$$

O modelo traz os parâmetros dos insumos da função produção ($\sum_{j=2} \beta_j \ln x_{it}$) estão normalizados para a média geométrica, um regressor de tendência de tempo ($\beta_t t$), que verifica o deslocamento da função de produção (mudança tecnológica), e quatro componentes estendido para acomodar os determinantes para eficiência transiente, o primeiro componente é (b_i) refere-se a captura da heterogeneidade latente das microrregiões, o segundo componente (η_i) captura a ineficiência persistente, o terceiro componente (v_{it}) capta os choques aleatórios e o último componente captura a ineficiência transitória.

No segundo estágio são utilizados valores preditos de α_i do primeiro estágio, em vista que, segundo Lien, Khumbakar e Aliem (2018), a diferença entre o valor verdadeiro e os valores previstos de α , devido ao fato de os parâmetros β no passo 1 serem consistentes, estima-se a equação 2:

$$\alpha_i = b_i - (\eta_i - a) = a + b_i - \eta_i \quad (2)$$

Sendo assim, o procedimento assume que a distribuição de b_i é identicamente e independentemente distribuída ($iid - N(0, \sigma_b^2)$) e η_i ($iid - N^+(0, \sigma_\eta^2)$). Neste estágio são obtidos os valores preditos da ineficiência técnica persistente, que pode ser definida

por $\exp(-\eta_i)$.

Outra vantagem desta abordagem em relação às outras utilizadas para dados em painel, como por exemplo *True Fixed Effects* (Greene, 2005), é a capacidade de capturar a ineficiência transiente e a persistente entre os termos compostos de erros, além de permitir avaliar os efeitos de determinantes ao longo do tempo.

O método possibilita avaliar a in(eficiência) por meio de determinantes, o qual no presente estudo a tecnologia SPD está presente na variância do termo de erro, o que permite avaliar se o aumento da eficiência técnica da agropecuária brasileira está ligada ao aumento da expansão de SPD no período avaliado. Além de estimar os efeitos marginais dos determinantes sobre a ineficiência, possibilitando avaliar estimativas de mudanças de ineficiência dado a mudanças nos fatores correspondentes.

A eficiência técnica transiente é calculado através do procedimento proposto por Battese e Coelli (1988):

$$TTE = E[\exp(-u_{it}) | e_{it}] \quad (3)$$

Para o modelo utilizado neste procedimento empírico, composto por quatro termos de erro, a ineficiência geral (OTE) pode ser obtido pelo produto da ineficiência persistente (PTE) e ineficiência transiente (TTE), conforme a equação 4:

$$OTE = PTE \times TTE \quad (4)$$

Em termos econômicos o ambiente produtivo das microrregiões são rígidas a mudanças de longo prazo capturada em PTE, o que por sua vez tem um efeito persistente na OTE. Já a ineficiência transiente (TTE) refere-se aos ajustes de manejo que os agricultores podem fazer em o curto prazo, adotando ou não SPD.

3.1 Fonte de dados e variáveis

Os dados utilizados no presente estudo são de microrregiões brasileiras coletados nos Censos Agropecuários de 2006 e 2017, e foram utilizados 557 microrregiões brasileiras, totalizando 1114 observações. No estudo são incluídas as variáveis climáticas temperatura e precipitação calculados pela *Global Monitor Climate*.

Para estimar o modelo proposto, utilizou-se como variável dependente (y_i) o

valor bruto da produção agropecuária (VBP) em mil reais com valores reajustados a níveis de preços de 2017. No Quadro 1 são apresentadas as variáveis que compõem a função produção e o vetor de determinantes de ineficiência.

Quadro 1 – Descrição das variáveis empregadas no modelo

Variáveis	Unidade	Descrição	Fonte dos dados
Valor da produção	RS em mil	Valor da produção animal e vegetal por microrregiões, atualizadas para os níveis de preço par ano de 2017 – índice IPA-DI;	Censo agropecuário IBGE (2006 e 2017) – aos níveis de preços de 2017 – IPA-DI..
Trabalho	Unidades	Pessoal ocupado em estabelecimentos agropecuários por microrregiões;	Censo agropecuário IBGE (2006 e 2017)
Terra destinado às lavouras	ha	Área dos estabelecimentos agropecuários nas microrregiões com lavoura permanente, lavoura temporária e matas/florestas plantadas;	Censo agropecuário IBGE (2006 e 2017)
Terra destinado às pastagens	ha	Área dos estabelecimentos agropecuários nas microrregiões com pastagens naturais, pastagens em boas condições e pastagens em más condições;	Censo agropecuário IBGE (2006 e 2017)
Capital	Unidades	Soma do número de tratores existentes nos estabelecimentos de cada microrregião;	Censo agropecuário IBGE (2006 e 2017)
Despesas	RS em mil	Total de despesas das propriedades em cada município com: adubos e corretivos; sementes e mudas; defensivos agrícolas; medicamento para animais; sal, rações e outro suplementos para animais; energia elétrica; e combustíveis e lubrificantes;	Censo agropecuário IBGE (2006 e 2017) – aos níveis de preços de 2017.
Pecuária	Unidade animal	Número equivalente a cabeças de gado em relação a quantidade de Bubalinos Equinos Asininos Muas Caprinos Ovinos Suínos Aves, na microrregião calculado pela unidade animal;	Censo agropecuário IBGE (2006 e 2017) – Calculado pela unidade animal pelo índice de IOWA University.
Temperatura e Precipitação	°C e mm	Temperatura e precipitação média nas microrregiões nos últimos 20 anos. Utiliza-se também tais variáveis em seus formatos quadráticos;	Global Climate Monitor
Desvios da Temperatura e precipitação	°C e mm	Desvios em relação a média da temperatura e precipitação nos últimos 20 anos nas microrregiões brasileiras;	Global Climate Monitor
Determinante da (in)eficiência			
Área em SPD	proporção	Proporção da área em SPD sobre a área agricultável.	

As variáveis insumos da fronteira estocástica de produção, que compõem o vetor covariáveis (x_i), foram: a quantidade de trabalhadores na produção agropecuária, a

quantidade de terra agricultável, a quantidade de máquinas agrícolas como *proxy* de capital fixo, gastos com insumos variáveis e apicultura, representado pelo calculado da unidade animal equivalente, uma variável de tendência temporal e duas variáveis climáticas, temperatura e precipitação. Tais variáveis que compõe o produto e insumos foram escolhidas de acordo com a literatura empírica recente de análise de eficiência técnica-produtiva para agricultura brasileira (Ferreira; Féres, 2018; Ferreira; Féres, 2020; Rada; Helfand; Magalhães, 2019; Ferreira; Viera Filho, 2020; Tateishi Et Al., 2021).

Quanto as variáveis do vetor (z_i), são utilizados: a área da microrregião em hectares produzidos sobre Plantio Direto dividido pela área agricultável na microrregião. Essa é a variável determinante da eficiência, ou seja o vetor de variáveis z_i , que explica a variância do termo de ineficiência.

4. Resultados e discussão

A Tabela 1 apresenta a média e os desvios das variáveis entre os períodos de 2006 e 2017 que compõe o modelo da função produção e o determinantes da ineficiência, neste caso, proporções de áreas agricultáveis sob SPD. Nota-se que há aumento na média no valor bruto da produção nas microrregiões brasileiras, queda no número de empregados nas atividades agropecuárias, aumento das despesas produtivas e do capital fixo empregado na produção.

Tabela 1 - Estatísticas descritivas das variáveis da fronteira de produção e variância da ineficiência

Variáveis	Censo 2006		Censo 2017	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Produção (R\$/mil) ²	608.242,40	631.437,10	906.047,60	1.212.256
Pessoal ocupado (unidade)	31.505,85	25.551,03	28.597,69	22.149,97
Área agricultável (ha)	456.702,10	535.684,40	480.638,20	589.401,10
Áreas em lavouras (ha)	118.396,10	154.823,90	141.037,50	218.361,00
Áreas em pecuária (ha)	313.480	467.944,20	313.250,50	472.837,60
Áreas em SPD (%)	7%	15%	11%	19%
Capital (unidade)	1.613,15	1.903,13	2.414,18	2.766,36

² Todas as variáveis monetárias das estimativas foram deflacionadas para o ano de 2017.

Pecuária (cabeças)	385.933,90	482.989	345.026	485.291,30
Despesas (R\$/mil)	232.740,50	446.692,20	329.314	503.951,90
Precipitação (mm)	1.442,07	452,71	1336,17	545.599
Desvios Precipitação (mm)	-139,90	221,95	-83,19	268.11
Temperatura (°C)	23,92	2,72	22,87	3,14
Desvios Temperatura (°C)	0,25	0,20	2,6e+16	5,81e+17
Proporção de SPD (SPD /0,07 Terra)	0,15	0,11	0,19	

Fonte: Resultados da pesquisa, a partir de dados dos Censos Agropecuários 2006 e 2017 (IBGE, 2020).

O valor médio da produção agropecuária nas microrregiões brasileiras cresceu 48,96% de 2006 a 2017 aos preços de 2017, saindo de R\$ 608 milhões em 2006 para R\$ 906 milhões em 2017. Houve aumento médio também na área agricultável, crescimento de 5,31%, bem como crescimento nas áreas destinadas às lavouras em 19,12%. Para as áreas destinadas a pecuária houve um leve decréscimo de -0,07%, denotando estabilidade na alocação de terras às atividades pecuárias.

Quanto ao número de pessoal empregado, observa-se uma queda na quantidade média de trabalhadores no setor nas microrregiões brasileiras, saindo de uma média de 31.505 em 2006 para 28.597 em 2017, queda relativa de 9,23%. Tal estatística podem indicar um aumento da tecnificação agropecuária nas microrregiões brasileiras, e a possibilidade desta estar substituindo mão de obra, evidenciando efeito poupa trabalho.

Quanto ao capital empregado na agropecuária, o número médio de tratores empregados na produção agropecuária aumentou em 50%, as despesas correntes em 41,49% e a pecuária, como *proxy* do número de cabeças de animais (em unidade animal), decresceu em 10,6% entre o período analisado.

Em relação a área média sob SPD nas microrregiões brasileiras, nota-se um crescimento de 85% no período analisado, onde a média de 35.534 hectares em 2006 saltou para 65.740. No que diz respeito a variável de interesse, a proporção de SPD sobre áreas agricultáveis, percebe-se um aumento relativo de 57% na proporção. Em 2006, em média, o uso de SPD compreendia em 7% da área agricultável das microrregiões brasileiras, já em 2017 a proporção chegou em torno de 11%. Sendo assim, os dados descritivos indicam um aumento substancial do uso de SPD nas atividades agropecuárias brasileira.

Os resultado da estimação da função produção por fronteira estocástica (SFA)

estão na Tabela 2. Foi realizado o teste de razão verossimilhança para identificar a forma funcional da função produção, o que permitiu não rejeitar a hipótese nula de de uma função Cobb- Douglas em relação a uma translog, em outras palavras, o resultado do teste indica a forma funcional Cobb-Douglas como a mais adequada para a estimação da fronteira estocástica de produção (LR = 0,0359). O teste de Wald indica que a agropecuária nas microrregiões brasileiras opera sobre retornos constantes de escala (RTS), indicando que um aumento no uso de todos os insumos provoca um aumento na produção agropecuária de forma proporcional.

Tabela 2 – Coeficientes da Fronteira de Produção Estocástica

	Coef.	Erro Padrão	P>t
Equação da produção			
Pessoal Ocupado	0,3157511	0,0765413	0,000
Área em lavouras	0,3572285	0,0351473	0,000
Área em pecuária	-0,020257	0,0745894	0,786
Capital	0,3426601	0,0441973	0,000
Pecuária	0,0429103	0,647448	0,508
Despesas	0,1449167	0,0327222	0,000
Precipitação	-0,0005433	0,0002937	0,065
Precipitação ²	5,72e-08	5,35e-08	0,286
Desvios Precipitação	0,0003984	0,0002254	0,078
Temperatura	-0,2241614	0,1220011	0,067
Temperatura ²	0,0068885	0,0027192	0,012
Desvios Temperatura	3,80e-20	3,20e-08	0,286
Ano	0,0053134	0,0558422	0,924
Constante	-0,0001251	0,0092643	0,989
Equação da Ineficiência			
SPD	-1,359635	0,4450728	0,002

Fonte: Resultados da pesquisa.

Os principais parâmetros da fronteira estocástica de produção (pessoal ocupado, área em lavouras, capital, despesas) são significativos a 1% e impactam positivamente a produção agropecuária, como esperado. Os resultados demonstram que o fator áreas destinadas a lavouras é o insumo de maior elasticidade na produção agropecuária brasileira, indica que o resultado econômico da produção agropecuária brasileira é mais sensível ao fator terras agricultáveis destinado a lavouras, o que reforça a necessidade de compreender como as tecnologias de práticas de manejo do solo afeta a produtividade da agropecuária brasileira.. Resultado esperado e em linha com a

literatura sobre os efeitos da SPD sobre o cultivo convencional, a produção sob SPD aumenta a produtividade do solo e os ganhos econômicos da produção de várias culturas (Tripathi, R. S.; Raju, R.; Thimmappa, 2013; El-Shater et al., 2016; Fuentes-Llanillo et al., 2018; Kawa, 2021; Sainju, 2021; Veresoglou et al., 2023)

Segunda maior elasticidade refere-se ao capital fixo empregado na produção agropecuária. Fuentes-Llanillo et al. (2018) identificaram que maiores margens brutas sobre a produção SPD na produção de grãos no norte do Paraná estão associados a posse de maquinário e equipamentos próprios para a prática. Dessa forma, a modernização do maquinário, que visa substituir tratores de menor potência pelo uso de veículos de médio e grande porte, além de adaptáveis às práticas sustentáveis de produção, levaria a ganhos na produção na agropecuária brasileira. O fator trabalho (pessoal ocupado) impacta positivamente a produção agropecuária nas microrregiões brasileiras, no sentido de potencializar os ganhos da produção agropecuária.

Os resultados das estimativas destes fatores de produção sobre a produção agropecuária nas microrregiões estão em linhas com a literatura que investiga a produtividade brasileira, os resultados do presente trabalho reafirma que a produtividade da agropecuária tem sido liderado pela produtividade dos fatores, em especial o capital e trabalho (Fornazier; Vieira Filho, 2013; Rada, 2013; Helfand; Magalhães; Rada, 2015; Gasques et al. 2016; Arias et al., 2017; Telles; Reydon; Maia, 2018; Rada; Helfand; Magalhães, 2019; Silva et al., 2019; Ferreira e Féres, 2020).

É importante ressaltar que a variável despesas com insumos tem relação positiva e significativa com a produção agropecuária. O que é muito diferente dos resultados encontrados nos estudos sobre a produtividade agropecuária brasileira. Uma resposta a esse resultado pode ser pela intensa heterogeneidade espacial da agropecuária brasileira, o que demanda mais gastos no processo produtivo.

Alguns trabalhos demonstram que o SPD vem sendo adotado como tecnologia complementar aos insumos modernos na produção agrícola, como herbicidas, fertilizantes e adaptações mecânicas. (Gattinger et al., 2011; Telles, Reydon e Maia, 2018; Veresoglou et al., 2023). Huggins e Regnanold (2008) e Gattinger et al. (2011) demonstram que a expansão do SPD em outras áreas agricultáveis no mundo tem sido acompanhado por pacotes tecnológicos que envolvam o uso intensivo de herbicidas, cultivares geneticamente modificados (OGM) e adaptações mecânicas. O que é reforçado pelas evidências de Telles, Reydon e Maia (2018), que demonstram que a adoção de SPD no Brasil tem acompanhado o uso intensivo de tecnologias e, segundo

seus achados, a adoção de SPD guarda relação com o elevado preço da terra agricultável em várias regiões brasileiras. Este resultado reforça que a política de financiamento de práticas sustentáveis deve continuar como instituição que incentiva a adoção de SPD, e conseqüentemente a sua expansão no Brasil.

A variável *dummy* tempo (Ano) apresenta um sinal positivo e não significativo, indicando que no período analisado não ocorreu uma evolução tecnológica, resultado que está em linha com as evidências científica na literatura sobre produtividade agropecuária brasileira (Rada; Helfand; Magalhães, 2019; Silva et. al., 2019; Ferreira e Féres, 2020)

No que diz respeito às variáveis climáticas, temperatura e temperatura ao quadrado são significantes, em 10% e 5% respectivamente. O coeficiente que refere-se a precipitação e o seu desvio são significantes. Estas constatações na função produção acompanha a literatura sobre os efeitos climáticos sobre a produção agropecuária, o qual SPD é um mitigador dos efeitos climáticos sobre a produtividade agropecuária, em vista das propriedades químico-físicas permitirem maior resistência às temperaturas e aos impactos de altos níveis de precipitação. Llewellyna; D'emden; Kuehnea, 2012; Somasundaram et al., 2020; Kawa, 2021; Sainju, 2021; Hati et. al., 2021; Carlos et. al., 2022; Haruna e Anderson, 2022; Veresoglou et. al., 2023).

A variável pecuária, que trata das unidades animais nas microrregiões, apresenta sinal positivo e não foi significativo, ou seja, estatisticamente não implica em ganhos na produção. Alguns autores, como Ferreira e Féres (2018), argumentam que a produção pecuária é vista como estratégia de mitigação de risco através do aumento da riqueza pela valorização da terra incorporada na atividade agropecuária. Em outras palavras, a pecuária está sendo utilizada como um ativo especulativo no mercado imobiliário de terra, e não como ativo dentro de um portfólio produtivo voltado a geração de renda.

A variável determinante da ineficiência SPD apresenta-se negativa e significativa a 1%. Tal resultado confirma a hipótese conservacionista de que a técnica de cultivo em SPD tem contribuído para o aumento da eficiência da agropecuária brasileira. Como esperado, a partir da literatura dedicada às investigações sobre a produtividade da agropecuária brasileira, a expansão de SPD no Brasil nos últimos anos contribuiu também com os índices eficiência produtiva da agropecuária brasileira.

O resultado do coeficiente era esperado e está em linha com estudos dedicados

ao avaliar a eficiência técnica produtiva do uso de SPD, ou seja, a gestão de manejo dos solos, o seu não revolvimento, sucessão e a manutenção da palhada residual, tem potencializado a produção agropecuária nos solos brasileiros como verificado amplamente na literatura dedicada ao impacto econômico da adoção de SPD (Tripathi, R. S.; Raju, R.; Thimmappa, 2013; El-Shater Et Al., 2016; Perry; Moschini; Hennessy, 2016; Telles; Reydon; Maia, 2018; Fuentes- Llanillo et al., 2018; Kawa, 2021; Sainju, 2021; Veresoglou et. al., 2023).

No que diz respeito aos *scores* de eficiência e efeito marginal, que são apresentados na Tabela 3, indica que a média da eficiência persistente nas microrregiões brasileiras é de 0,6660, o que denota que a ineficiência produtiva da agropecuária brasileira está ligada a fatores que não variam com o tempo, ou seja, fatores estruturais são importantes fontes de ineficiência técnica da agropecuária brasileira.

Tabela 3 – Análise descritiva das Eficiências Técnicas

Eficiência	Média	Desvio Padrão	Min	Max
Persistente	0,6660146	0,1390994	0,1968891	0,9058595
Transiente	0,8962531	0,0356774	0,6090176	0,9717576
Eficiência Geral	0,5969992	0,1272457	0,1726518	0,8362732
Efeito Marginal do SPD	-0,0890913	0,0103543	-0,0948313	-0,045626

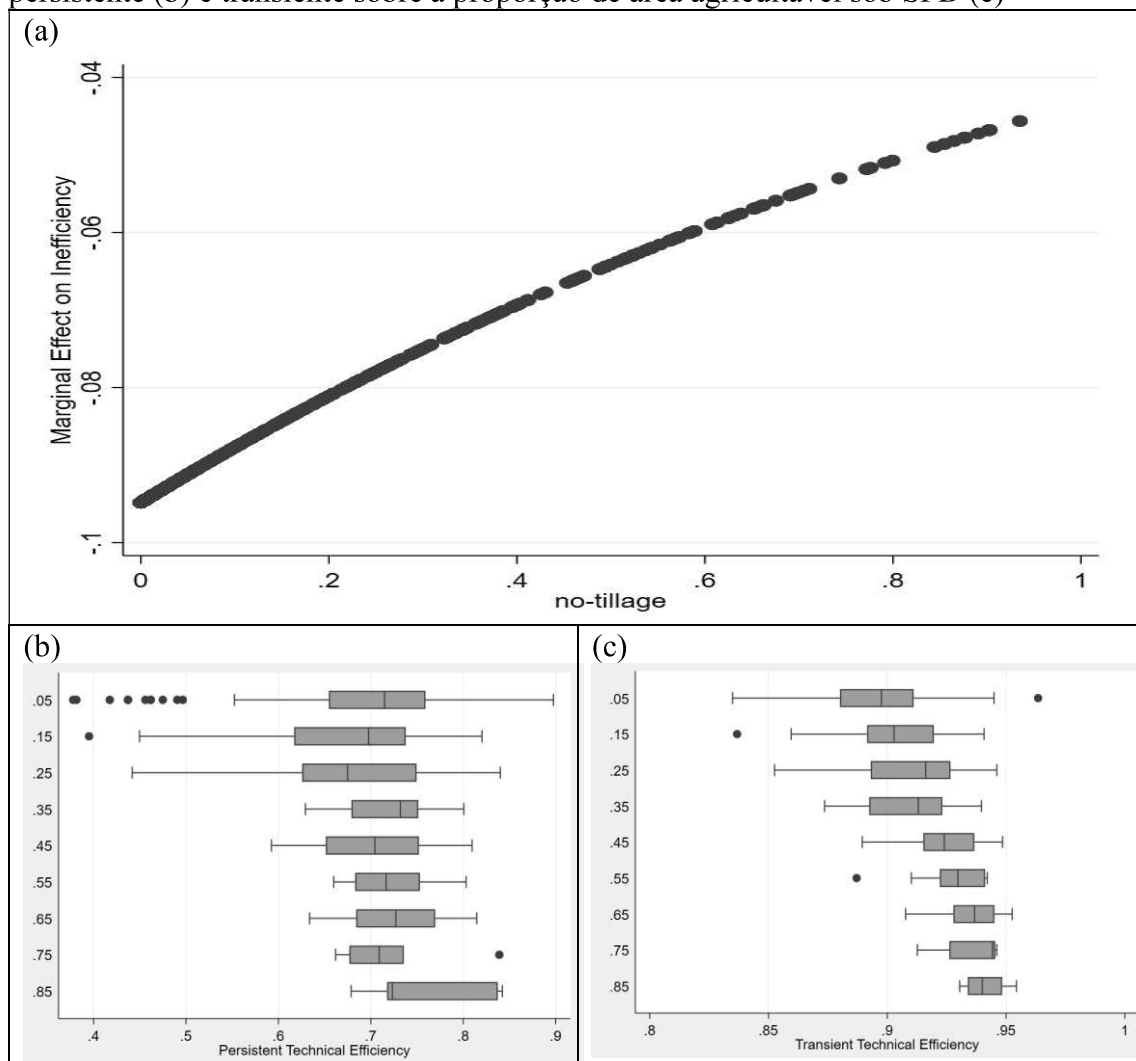
Fonte: Resultados da pesquisa

A eficiência transiente, aquela que varia ao longo do tempo, apresenta uma média de 0,8962, indicando que, em média, a produção agropecuária nas microrregiões brasileiras pode aumentar sua produção em aproximadamente 12,3%, mantendo a mesma quantidade de recursos produtivos. O resultado que tem chamado atenção é o índice de eficiência geral, que apresenta 0,5970, permitindo avaliar que, em média, a produção agropecuária nas microrregiões brasileiras podem aumentar em até 66% (1/0,6), mantendo a mesma quantidade de insumos na produção.

Com relação ao efeito marginal da expansão do SPD, que cabe salientar que sua escala varia em escala menor que uma unidade, o resultado indica que o aumento de 1 ponto percentual na área SPD sobre a área agricultável brasileira pode diminuir, em média, 0,89% a ineficiência técnica da agropecuária nas microrregiões brasileiras. De acordo com esse resultado, o incentivo e a manutenção dos financiamentos à adoção de SPD pode aumentar os ganhos da produtividade da agropecuária brasileira.

A Figura 2 demonstra que os efeitos marginais proporcionados pela expansão de SPD são menores em áreas onde há maior participação da técnica em relação às áreas agricultáveis nas microrregiões brasileiras. É possível observar que as microrregiões com grandes proporções de terra agricultável sobre SPD apresenta altos índices de eficiência técnica persistente e transitente.

Figura 2: Efeito Marginal do SPD sobre a (in)eficiência (a), dispersão da eficiência persistente (b) e transitente sobre a proporção de área agricultável sob SPD (c)

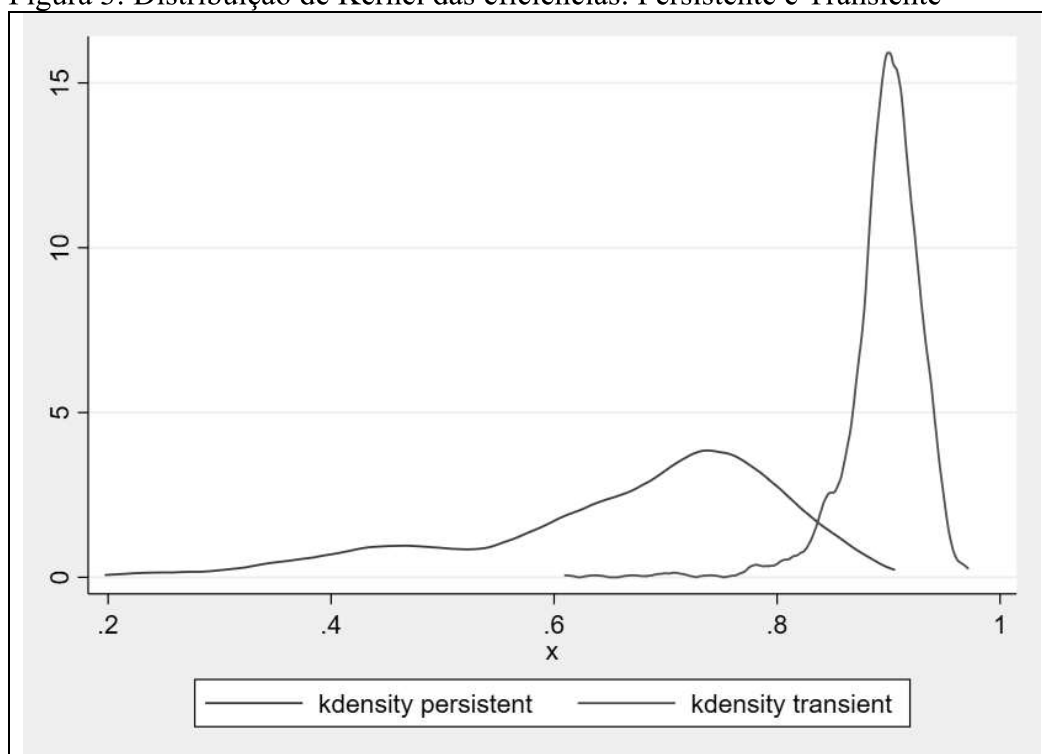


Fonte: Resultado da pesquisa

A Figura 3 expõe a distribuição Kernel das eficiências persistente e transitente. Quanto a distribuição da eficiência persistente, é possível notar a heterogeneidade estrutural da produção agropecuária brasileira, poucas regiões com altos índices de eficiência produtiva, e a grande maioria expostas a problemas estruturais que impactam diretamente a atividade agropecuária, mantendo as ineficiente e consequentemente

mantendo a pressão sobre a desigualdade socioeconômica entre as diferentes regiões brasileiras. Em relação ao score de eficiência transiente, que varia no tempo e está ligada às decisões do gestor, apresenta uma concentração entre 0,85 a 0,95 das microrregiões brasileiras.

Figura 3: Distribuição de Kernel das eficiências: Persistente e Transiente



Fonte: Resultado da pesquisa

Os resultados confirmam que as práticas sustentáveis de manejo do solo proposto pelo SPD explica a eficiência técnica da agropecuária brasileira, contudo, identifica-se que boa parte da ineficiência técnica da agropecuária brasileira é persistente, ou seja, não mudou no período. Apesar de o SPD ter uma contribuição para o aumento da eficiência técnica total, problemas estruturais tem que ser discutidos para lidar com a eficiência persistente, o que poderia potencializar, ainda mais, os efeitos positivos do SPD sobre a produtividade da agropecuária brasileira.

5. Considerações finais

O presente estudo buscou avaliar os efeitos sobre a produtividade da expansão do Sistema de Plantio Direto no Brasil, utilizando dados de microrregiões brasileiras. As estimativas indicam que a estrutura produtiva, avaliada pela ineficiência persistente, é a causa principal da ineficiência da agropecuária brasileira, ou seja, os fatores ligados

as condições que não variam no tempo implicam em aumento da ineficiência na agropecuária brasileira. Políticas públicas que debruçam sobre as variáveis que não variam no tempo (marcos regulatórios, níveis educacionais, qualidade do solo, entre outras) podem aumentar a eficiência técnica da produção agropecuária brasileira.

A eficiência transiente, condições que variam com tempo que podem afetar a eficiência técnica, aponta que a produção agropecuária pode aumentar em até 12,3% mantendo o volume de insumos constantes. Os efeitos marginais demonstram que a expansão do SPD pode resultar em ganhos de produtividade na agropecuária brasileira.

A função produção apresentou seus parâmetros em linha com a literatura, e demonstra com significância estatística que a expansão do SPD tem contribuído com aumento da eficiência técnica, e que os efeitos marginais são maiores em microrregiões com pouca participação de SPD sobre a área agricultável. Sendo assim, os resultados permitem dizer que, além de alcançar os objetivos ambientais firmados pelo Brasil, o SPD tem contribuído para uma agropecuária mais eficiente no ponto de vista econômico das diversas microrregiões brasileiras.

A partir dos resultados é possível apontar alguns desdobramentos de políticas públicas, por exemplo, crédito para implementação de SPD direcionado a microrregiões que guardam baixa proporção de SPD em áreas agricultáveis, além de campanhas publicitárias e educacionais que demonstrem os resultados econômicos e ambientais proporcionados pela técnica.

Políticas públicas e investimentos privados devem ser direcionados a resolver gargalos estruturais, para que a eficiência produtiva possa aumentar naquelas regiões tecnicamente atrasadas, e concomitantemente, manter os incentivos à adoção de práticas sustentáveis como o SPD. Os resultados deste estudo revelam a necessidade de se investigar as ineficiências ligadas às condições estruturais da agropecuária brasileira, bem como avaliar o efeito das políticas públicas brasileira sobre o processo de adoção do SPD.

6. Referências

Alghamdi, Rashad S., and Larry Cihacek. "Do post-harvest crop residues inno-till systems provide for nitrogen needs of following crops?." *Agronomy Journal* 114.1 (2022): 835-852.

Altieri, M. A. (2009). Agroecology, small farms, and food sovereignty. *Monthly review*, 61(3), 102-113.

Andrade, A. T., Torres, J. L. R., Torres, J. L. R., Paes, J. M. V., Teixeira, C. M., & Condé, A. B. T. (2018). Desafios do sistema plantio direto no Cerrado. *Informe Agropecuário*, 39(302), 18-26.

Arias, D., Vieira, P. A., Contini, E., Farinelli, B., & Morris, M. (2017). Agriculture Productivity Growth in Brazil.

Araujo, C., Combes, J. L., & Féres, J. G. (2019). Determinants of Amazon deforestation: the role of off-farm income. *Environment and Development Economics*, 24(2), 138-156.

Aryal, J. P., Sapkota, T. B., Jat, M. L., & Bishnoi, D. K. (2015). On-farm economic and environmental impact of zero-tillage wheat: a case of North-West India. *Experimental Agriculture*, 51(1), 1-16.

Assad, E. D., Costa, L. C., MARTINS, S., Calmon, M., Feltran-Barbieri, R., Campanili, M., & NOBRE, C. (2019). Papel do Plano ABC e do Planaveg na adaptação da agricultura e da pecuária às mudanças climáticas. Working Paper, WRI Brasil.

Battese, G. E., & Coelli, T. J. (1995). A model for technical inefficiency effects in a stochastic frontier production function for panel data. *Empirical economics*, 20, 325-332.

Boer, C. A., Assis, R. L. D., Silva, G. P., Braz, A. J. B. P., Barroso, A. L. D. L., Cargnelutti Filho, A., & Pires, F. R. (2007). Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura na entressafra em um solo de cerrado. *Pesquisa agropecuária brasileira*, 42, 1269-1276.

Carlos, F. S., Camargo, F. A., Marcolin, E., Veloso, M. G., Fernandes, R. S., & Bayer, C. (2022). No-tillage promotes C accumulation in soil and a slight increase in yield stability and profitability of rice in subtropical lowland ecosystems. *Soil Research*, 60(6), 601-609.

Casão, R., Araújo, A. D., & Llanillo, R. F. (2012). Plantio direto no Sul do Brasil-Fatores que facilitaram a evolução do sistema eo desenvolvimento da mecanização conservacionista. *Londrina: Iapar*.

Crusciol, C. A. C., Moro, E., Lima, E. D. V., & Andreotti, M. (2008). Taxas de decomposição e de liberação de macronutrientes da palhada de aveia preta em plantio direto. *Bragantia*, 67, 481-489.

Dantas, K. P., & Monteiro, M. D. S. L. (2010). Valoração econômica dos efeitos internos da erosão: impactos da produção de soja no cerrado piauiense. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 48, 619-633.

Daryanto, S., Wang, L., & Jacinthe, P. A. (2020). No-till is challenged: Complementary management is crucial to improve its environmental benefits under a changing climate. *Geography and Sustainability*, 1(3), 229-232.

De Jesus, A. S. S., & Ommati, J. E. M. (2017). Segurança alimentar e revolução verde: questionamentos atuais acerca da luta contra.

Delate, K., Cwach, D., & Chase, C. (2012). Organic no-tillage system effects on soybean, corn and irrigated tomato production and economic performance in Iowa, USA. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 27(1), 49-59.

Denardin, J. E., Kochhann, R. A., Faganello, A., Denardin, N. D., & Wiethölter, S. (2012). Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista. *Passo Fundo: Embrapa Trigo*, 15, 15.

Denardin, J. E., Kochhann, R. A., Faganello, A., Cogo, N. P., Leite, L. F. C., Maciel, G. A., & Araújo, A. S. F. (2014). Agricultura conservacionista no Brasil: Uma análise do conceito à adoção. *Agricultura conservacionista no Brasil. Brasília, DF: Embrapa*, 23-41.

De RESENDE, A. V. (2011). O sistema plantio direto proporciona maior eficiência no uso de fertilizantes.. Sete Lagoas-MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2011. (Embrapa Milho eSorgo. Documentos, 118).

De SA, M. A. C., SANTOS JUNIOR, J., & FRANZ, C. (2009). Manejo e conservação do solo e da água em sistema de plantio direto no Cerrado. Brasília-DF: Embrapa Cerrados, 2009. (Embrapa Cerrados. Documentos, 258).

Dos SANTOS, H. P., & FONTANELI, R. (2010). Aspectos biológicos na elevação do rendimento de grãos de cereais de inverno em plantio direto.. In: DOS SANTOS, Henrique Pereira; FONTANELI, Renato Serena; SPERA, Silvio Tulio. (Ed.). **Sistemas de produção para cereais de inverno sob plantio direto no sul do Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2010.

Dos Santos Soares, D., Ramos, M. L. G., Marchao, R. L., Maciel, G. A., de Oliveira, A. D., Malaquias, J. V., & de Carvalho, A. M. (2019). How diversity of crop residues in long-term no-tillage systems affect chemical and microbiological soil properties. *Soil and Tillage Research*, 194, 104316.

El-Shater, T., Yigezu, Y. A., Muger, A., Pigg, C., Haddad, A., Khalil, Y., ... & Aw-Hassan, A. (2016). Does zero tillage improve the livelihoods of smallholder cropping farmers?. *Journal of Agricultural Economics*, 67(1), 154-172.

El-Shater, T., Muger, A., & Yigezu, Y. A. (2020). Implications of adoption of zero tillage (ZT) on productive efficiency and production risk of wheat production. *Sustainability*, 12(9), 3640.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária. **NASA confirma dados da Embrapa sobre área plantada no Brasil**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasília, 2017. Acesso em 10/06/19. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/30972114/nasa-confirma-dados-da-embrapa-sobre-area-plantada-no-brasil>>.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Aprimoramento, inovação e desenvolvimento de conhecimento e tecnologias em Sistema Plantio Direto (SPD) para o agronegócio brasileiro – SPDBrasil 2018**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-projetos/-/projeto/203747/aprimoramento-inovacao-e-desenvolvimento-de-conhecimentos-e-tecnologias-em-sistema-plantio-direto-para-o-agronegocio-brasileiro---spdbrasil>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

FEBRAPDP. **O que é Sistema de Plantio Direto (SPD)?** Federação Brasileira de

Plantio Direto e Irrigação. Disponível em: < <https://febrapdp.org.br/sistema-plantio-direto-o-que-e>>. Acesso em: 28 abr. 2020.

Ferreira, M. D. P., & Vieira Filho, J. E. R. (2020). Eficiência técnica na agropecuária: capacidade de armazenagem e densidade de rodovias. *Uma jornada pelos contrastes do Brasil, 100*. In: VIEIRA FILHO, José Eustáquio Ribeiro; GASQUES, José Garcia (org.). Uma jornada pelos contrastes do Brasil: cem anos de Censo Agropecuário. Brasília: IPEA, 2020.

Ferreira, B. G. C., Freitas, M. M. L., & Moreira, G. C. (2015). Custo operacional efetivo de produção de soja em sistema de plantio direto. *Revista iPecege, 1*(1), 39-50.

FERREIRA, Marcelo Dias Paes.; FÉRES, J. G. Farm size and productive efficiency in Brazilian Amazon. International Association of Agricultural Economists (IAAE) > 2018 Conference, July 28-August 2, 2018, Vancouver, British Columbia, 2018.

FERREIRA, Marcelo Dias Paes; FÉRES, José Gustavo. Farm size and Land use efficiency in the Brazilian Amazon. *Land Use Policy*, v. 99, p. 104901, 2020.

FREITAS, S. M. de. **Programa ABC: oferta de recursos para investimentos em tecnologias com baixa emissão de carbono, safras 2015/16 a 2018/19**. Análises e Indicadores do Agronegócio, 2018. 01/08/2018. 7 p. Disponível em: <<http://www.http://observatorioabc.com.br/publicacoes/publicacoes-abc/page/2/#1881analise-dos-recursos-do-programa-abc-finalidades-de-investimentos>>. Acesso em: 11 abr. 2020.

Fried, H. O., Lovell, C. K., & Schmidt, S. S. (2008). Efficiency and productivity. *The measurement of productive efficiency and productivity growth, 3*, 3-91.

Fuentes-Llanillo, R., Telles, T. S., Volsi, B., Soares, D., Carneiro, S. L., & de Fátima Guimarães, M. (2018). Profitability of no-till grain production systems. *Semina: Ciências Agrárias, 39*(1), 77-86.

Fornazier, A., & Vieira Filho, J. E. R. (2013). *Heterogeneidade estrutural na produção agropecuária: uma comparação da produtividade total dos fatores no Brasil e nos Estados Unidos* (No. 1819). Texto para Discussão.

GASQUES, José Garcia; BACCHI, Mirian Rumenos P.; RODRIGUES, Luciano; BASTOS, Eliana Teles; VALDES, Constanza. Produtividade da agricultura brasileira: a hipótese da desaceleração. In Agricultura, transformação produtiva e sustentabilidade / organizadores: José Eustáquio Ribeiro Vieira Filho, José Garcia Gasques ; Alexandre Xavier Ywata de Carvalho. IPEA – Brasília, 2016.

Gatiboni, L. C., Kaminski, J., Rheinheimer, D. D. S., & Flores, J. P. C. (2007). Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, 31*, 691-699. Gattinger, A., Jawtusich, J., Müller, A., & Mäder, P. (2011). No-till agriculture—a climate smart solution?.

GASPARINI, Liz Vanessa Lupi; COSTA, Thayane Souza; HUNGARO, Oksana Aparecida de Lago; SZNITOWSKI, Adelize Minetto; VIEIRA-FILHO, José Eustáquio. **Sistemas Integrados de Produção Agropecuária e Inovação em Gestão: estudos de casos no Mato Grosso**. Texto para Discussão N° 2296. Brasília: IPEA,

2017.

Giongo, V., Mendes, A. M. S., Cunha, T. J. F., & Galvão, S. R. S. (2011). Decomposição e liberação de nutrientes de coquetéis vegetais para utilização no Semiárido brasileiro. *Revista Ciência Agronômica*, 42, 611-618.

Gianetti, G. W. (2017). *O Plano e Programa ABC: uma avaliação da execução e distribuição dos recursos* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

Greene, W. (2010). A stochastic frontier model with correction for sample selection. *Journal of productivity analysis*, 34, 15-24.

Hati, K. M., Jha, P., Dalal, R. C., Jayaraman, S., Dang, Y. P., Kopittke, P. M., ... & Menzies, N. W. (2021). 50 years of continuous no-tillage, stubble retention and nitrogen fertilization enhanced macro-aggregate formation and stabilisation in a Vertisol. *Soil and Tillage Research*, 214, 105163.

Haruna, S. I., & Anderson, S. H. (2022). Influence of no-till cover crop management on soil thermal properties. *Soil Research*, 60(6), 580-589.

Helfand, S. M., Magalhães, M. M., & Rada, N. E. (2015). *Brazil's agricultural total factor productivity growth by farm size* (No. IDB-WP-609). IDB Working paper series.

Huang, C. J., Huang, T. H., & Liu, N. H. (2014). A new approach to estimating the metafrontier production function based on a stochastic frontier framework. *Journal of productivity Analysis*, 42, 241-254.

Huggins, D. R., & Reganold, J. P. (2008). No-till: the quiet revolution. *Scientific American*, 299(1), 70-77.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário 2017. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: <https://bit.ly/2wzsoU0>.

KASSAM, Amir; FRIEDRICH, Theodor; DERPSCH, Rolf. Global spread of conservation agriculture. **International Journal of Environmental Studies**, v. 76, n. 1, p. 29-51, 2019.

Kawa, Nicholas C. "A "Win-Win" for Soil Conservation? How Indiana Row-Crop Farmers Perceive the Benefits (and Trade-offs) of No-Till Agriculture." *Culture, Agriculture, Food and Environment* 43.1 (2021): 25-35.

Keil, A., D'souza, A., & McDonald, A. (2015). Zero-tillage as a pathway for sustainable wheat intensification in the Eastern Indo-Gangetic Plains: does it work in farmers' fields?. *Food Security*, 7(5), 983-1001.

Koch, N., zu Ermgassen, E. K., Wehkamp, J., Oliveira Filho, F. J., & Schwerhoff, G. (2019). Agricultural productivity and forest conservation: evidence from the Brazilian Amazon. *American Journal of Agricultural Economics*, 101(3), 919-940.

Koopmans, T. C. (1951). An analysis of production as an efficient combination of activities. *Activity analysis of production and allocation*.

Krishna, V. V., & Veettil, P. C. (2014). Productivity and efficiency impacts of conservation tillage in northwest Indo-Gangetic Plains. *Agricultural Systems*, 127, 126-138.

LACHAUD, Michée A.; BRAVO-URETA, Boris E. Agricultural productivity growth in Latin America and the Caribbean: an analysis of climatic effects, catch-up and convergence. **Australian Journal of Agricultural and Resource Economics**, v. 65, n. 1, p. 143-170, 2021.

Lien, G., Kumbhakar, S. C., & Alem, H. (2018). Endogeneity, heterogeneity, and determinants of inefficiency in Norwegian crop-producing farms. *International Journal of Production Economics*, 201, 53-61.

Llewellyn, R. S., D'Emden, F. H., & Kuehne, G. (2012). Extensive use of no-tillage in grain growing regions of Australia. *Field Crops Research*, 132, 204-212.

Maia, A. G., Miyamoto, B. C. B., & Garcia, J. R. (2018). Climate change and agriculture: do environmental preservation and ecosystem services matter?. *Ecological Economics*, 152, 27-39.

Mbow, C., Van Noordwijk, M., Luedeling, E., Neufeldt, H., Minang, P. A., & Kowero, G. (2014). Agroforestry solutions to address food security and climate change challenges in Africa. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6, 61-67.a.

Mbow, C., Smith, P., Skole, D., Duguma, L., & Bustamante, M. (2014). Achieving mitigation and adaptation to climate change through sustainable agroforestry practices in Africa. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6, 8-14.b

Mello, Ivo, et al. "Benefits of conservation agriculture in watershed management: participatory governance to improve the quality of no-till systems in the Paraná 3 Watershed, Brazil." *Agronomy* 11.12 (2021): 2455.

Moreira, R. J. (2000). Críticas ambientalistas à revolução verde. *Estudos sociedade e agricultura*.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Agricultural Policy Monitoring and Evaluation 2019 - Part II – Developments in Agricultural Policy and Support by Country**. OECD Publishing, 2019.

Omara, P., Aula, L., Eickhoff, E. M., Dhillon, J. S., Lynch, T., Wehmeyer, G. B., & Raun, W. (2019). Influence of no-tillage on soil organic carbon, total soil nitrogen, and winter wheat (*Triticum aestivum* L.) grain yield. *International Journal of Agronomy*, 2019, 1-9.

PICCININ, Jorge Luiz. **Modificações no perfil de solo sob plantio direto contínuo e com intervenção mecânica sob sucessão e rotação de culturas**. Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, SP. 2005.

- Perry, E. D., Moschini, G., & Hennessy, D. A. (2016). Testing for complementarity: Glyphosate tolerant soybeans and conservation tillage. *American Journal of Agricultural Economics*, 98(3), 765-784.
- Porcelli, F. (2009). Measurement of Technical Efficiency. A brief survey on parametric and non-parametric techniques. *University of Warwick*, 11(527), 1-27.
- Rada, N. (2013). Assessing Brazil's Cerrado agricultural miracle. *Food Policy*, 38, 146-155.
- Rada, N., Helfand, S., & Magalhães, M. (2019). Agricultural productivity growth in Brazil: Large and small farms excel. *Food policy*, 84, 176-185.
- Rebello, C., & Turetta, A. P. D. (2017). Ferramentas para avaliação do potencial à prestação de serviços ambientais pelo Sistema Plantio Direto.. (Embrapa Solos. Comunicado Técnico, 75).
- Rodrigues, W. (2005). Valoração econômica dos impactos ambientais de tecnologias de plantio em região de Cerrados. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 43, 135-153.
- ROLOFF, Glaucio; LUTZ, Ramiro AT; MELLO, Ivo. Validação do Índice de Qualidade Participativo do Plantio Direto. Boletim Técnico. FEBRAPDP, p. 16p, 2011. Disponível em:
<http://www.febrapdp.org.br/peq3/publicacoes/Validacao_Indicie_de_Qualidade_do_Plantio_%20Direto,_2011..pdf>, 2011.
- Sainju, Upendra M. "The benefits of the no-till system on soil health and crop yields in dryland cropping systems." *Soil Research* 60.4 (2021): 399-411.
- Scherer, C. E. M., & Porsse, A. A. (2017). Eficiência Produtiva Regional da Agricultura Brasileira: uma análise de fronteira estocástica. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 55, 389-410.
- Silva, F. P. D., Araujo, J. A., Costa, E. M., & Vieira Filho, J. E. R. (2019). Eficiência técnica e heterogeneidade tecnológica na agropecuária das regiões semiárida e não semiárida do Nordeste brasileiro. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 57, 379-395.J.
- Somasundaram, N. K. Sinha, Ram C. Dalal, Rattan Lal, M. Mohanty, A. K. Naorem, K. M. Hati, R. S. Chaudhary, A. K. Biswas, A. K. Patra & S. K. Chaudhari (2020) No-Till Farming and Conservation Agriculture in South Asia – Issues, Challenges, Prospects and Benefits, *Critical Reviews in Plant Sciences*, 39:3, 236-279,
- Stone, L. F., SILVEIRA, P. D., & Moreira, J. A. A. (2006). Atributos físico-hídricos do solo sob plantio direto. Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão.
- Ortiz-Bobea, A., Ault, T. R., Carrillo, C. M., Chambers, R. G., & Lobell, D. B. (2021). Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. *Nature Climate Change*, 11(4), 306-312.
- Tateishi, H. R., Bragagnolo, C., & de Faria, R. N. (2020). Economic and environmental

efficiencies of greenhouse gases' emissions under institutional influence. *Technological Forecasting and Social Change*, 161, 120321.

Telles, T. S., Reydon, B. P., & Maia, A. G. (2018). Effects of no-tillage on agricultural land values in Brazil. *Land Use Policy*, 76, 124-129.

Thamo, T., Addai, D., Pannell, D. J., Robertson, M. J., Thomas, D. T., & Young, J. M. (2017). Climate change impacts and farm-level adaptation: Economic analysis of a mixed cropping–livestock system. *Agricultural Systems*, 150, 99-108.

Tripathi, R. S., Raju, R., & Thimmappa, K. (2013). Impact of zero tillage on economics of wheat production in Haryana. *Agricultural Economics Research Review*, 26(1), 101-108.

Veresoglou, SD, Chen, J., Du, X. *et al.* O plantio direto supera o preparo convencional em condições áridas e após a fertilização. *Solo Eco. Deix* 5 , 137–141 (2023).

Vieira Filho, J. E. R. V., & Silveira, J. M. F. J. D. (2016). Competências organizacionais, trajetória tecnológica e aprendizado local na agricultura: o paradoxo de Prebisch. *Economia e Sociedade*, 25, 599-630.

CONDICIONANTES E EFEITO TRATAMENTO DA ADOÇÃO DE SISTEMA PLANTIO DIRETO (SPD) NA AGROPECUÁRIA BRASILEIRA

RESUMO

O incentivo à adoção do Sistema de Plantio Direto (SPD) tem sido a principal política de manejo sustentável do solo no Brasil. O presente trabalho tem como objetivo compreender os condicionantes da adoção e o impacto econômico da expansão do SPD no Brasil. Como estratégia empírica, estimou-se um modelo *logit*, para encontrar os condicionantes da adoção e método de efeito tratamento para encontrar o impacto econômico da adoção do SPD. Foram utilizados dados do Censo Agropecuário de 2017 do IBGE em nível municipal para as estimativas. Verificou-se que as despesas, atividade pecuária e variáveis climáticas são fatores que contribuem com a probabilidade da adoção do SPD no Brasil. Há evidências de que o SPD afeta positivamente o desempenho econômico das atividades agropecuárias nos municípios brasileiros para diferentes níveis de proporção de área com SPD sobre a área agricultável.

Palavra-chave: Agricultura conservacionista; Desempenho econômico; Adoção tecnológica; Agropecuária brasileira;

ABSTRACT

Encouraging the No-Tillage System (NTS) use has been the central policy for sustainable soil management in Brazil. The present study aims to understand the conditions for the adoption and the economic impact of the expansion of NTS in Brazil. As an empirical strategy, a logit model was estimated to find the determinants of adoption and a treatment effect method to find the economic impact of NTS adoption. Data from the 2017 IBGE Agricultural Census at the municipal level were used for the estimates. It was found that expenses, livestock activity, and climate variables contribute to the probability of adopting NTS in Brazil. Furthermore, there is evidence that NTS positively affects the economic performance of agricultural activities in Brazilian municipalities for different levels of the proportion of area with NTS over arable land.

Keywords: Conservation agriculture; Economic performance; Technological adoption; Brazilian agriculture

1. INTRODUÇÃO

Garantir a segurança alimentar e ser mais uma alternativa de fonte de energia, respeitando a sustentabilidade dos recursos naturais, é o que se espera da agropecuária mundial. Combinar desempenho econômico e difusão de práticas sustentáveis de produção agrícola é o grande desafio dos formuladores de políticas públicas para aumentar a oferta de alimentos utilizando menos recursos e minimizando impactos

ambientais negativos. Entre as práticas agrícolas sustentáveis o Sistema Plantio Direto (SPD) tem desempenhado importantes papéis, conservar solos diante da pressão do mercado para aumentar a produção de alimentos e ser ferramenta para redução dos gases efeito estufa (GEE). (KEIL, D’SOUZA; MC DONALD 2015; ARYAL; SAPKOTA; BISHNOI, 2015; FUENTES- LLANILLO ET AL., 2018; DOS SANTOS SOARES ET. AL., 2019; DARYANTO; WANG; JACINTHE, 2020; SAINJU, 2020; EL-SHATER, MUGERA E YIGEZU, 2020; ; KAWA, 2021; VERESOGLOU ET. AL., 2023)

O SPD está entre as principais práticas incentivadas no Brasil através do programa governamental Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono (PLANO ABC+), que se encontra na sua segunda fase. O Plano ABC+ está entre as estratégias setoriais brasileira que compõem a Política Nacional sobre Mudanças do Clima – PNMC (Lei nº 12.187/2009), que visa reduzir as emissões de GEE’s na economia brasileira. (FREITAS, 2018; GIANETTI, 2018; Fuentes- Llanillo et al., 2018)

Dado a importância estratégica do SPD para políticas públicas de mitigação de emissões de GEE, da conservação dos solos e da pressão sobre florestas, é necessário compreender os determinantes da adoção do SPD no Brasil, pois sua adoção, ainda que estimulada via financiamento, e assim como qualquer inovação produtiva, depende de fatores institucionais, ambientais e da percepção do produtor frente aos benefícios operacionais que a técnica pode proporcionar para a agropecuária brasileira (RUTTAN; HAYAMI, 1984; FOSTER; ROSENZWEIG, 2012; FUENTES-LLANILLO et al, 2018;). Neste sentido, observar-se-ia um duplo-dividendo encontrado na literatura em defesa da adoção da técnica que, em suma, além de ser melhor para o meio-ambiente, o dinheiro investido por programas governamentais pode promover ganhos produtivos.

Neste contexto, o presente estudo buscou contribuir para a literatura sobre a adoção do SPD no Brasil respondendo dois questionamentos: (i) quais os condicionantes (socioeconômicos, institucionais e climáticos) da adoção do SPD no Brasil? (ii) os municípios nos quais há presença do SPD na produção agrícola apresentam resultado econômico superior?

O artigo segue, a partir desta introdução, com as definições e o uso do SPD no Brasil, seguido da apresentação da estratégia empírica utilizada no trabalho, análise descritiva dos dados e variáveis, resultados das estimativas e, por fim, as conclusões.

2. SISTEMA PLANTIO DIRETO (SPD): DEFINIÇÃO E SEU USO NO BRASIL

O Sistema Plantio Direto (SPD) está entre as inovações mais importantes para o aumento da produtividade da agricultura no Brasil, pelo tanto que a técnica representou e representa para o manejo e conservação do solo e da água, bem como sua contribuição para o aumento da produtividade dos fatores, que culminou na viabilidade de duas safras de grãos por ano agrícola, e na implementação técnica e econômica da integração lavoura-pecuária na região tropical (DENARDIN et al., 2012; REBELLO; TURETTA, 2017).

De forma sintética, o SPD pode ser definido como ferramenta da agricultura conservacionista capaz de viabilizar, em termos econômicos e eficiência operacional, o ato de produzir sem preparo prévio do solo, safra após safra de modo contínuo. Além disso, o SPD potencialmente elimina a erosão, melhora o uso de fertilizantes, aumenta a flocculação e a agregação do solo e reduz a decomposição da matéria orgânica, estabelecendo sincronismo entre a disponibilidade de nutrientes e o crescimento das formas de vida presentes no solo (EMBRAPA, 2020; FEBRAPDP, 2020).

O SPD, quando comparado às práticas convencionais, como à aração, à escarificação e à gradagem do solo, o que diminui a emissão de GEE, isso se dá pelo fato da técnica conservacionista limitar a mobilização de solo à linha de semeadura, promover menor consumo de combustíveis fósseis; ao manter os restos de cultura na superfície do solo, ao reduzir as taxas de decomposição da palha e de oxidação da matéria orgânica do solo; outras razões está no fato de, ao abrandar as perdas por erosão e minimizar a imobilização de certos nutrientes pelos minerais de argila, e em razão da mobilização intensa do solo, possibilita redução do consumo de fertilizantes industrializados; e ao requerer sistemas de produção diversificados, por sua vez. prenuncia redução do uso de agrotóxicos industrializados.

O SPD faz parte dos complexos tecnológicos que compõe os compromissos firmados pelo Brasil na COP – 15 (15^o Conferência das Partes da Convenção do Clima das Nações Unidas), que vislumbram a redução das emissões de gases de efeito estufa estimada para 2020, entre 36,1% e 38,9%. Esses valores projetam reduções de um bilhão de toneladas de CO₂ equivalente. Sendo assim, a contribuição do SPD na mitigação de gases de efeito estufa (GEEs) virá pelo aumento da expansão da adoção (DENARDIN et al., 2012).

Nos últimos anos, o poder público e entidades privadas brasileiras têm se desdobrado para ampliar a adoção do SPD no Brasil. Por meio de crédito para financiar

adoção de tecnologias que visam a mitigação de GEEs na produção agropecuária, o programa Plano ABC é principal política pública brasileira de estímulo à adoção e difusão do SPD no Brasil. O programa teve como meta estimular a adoção do SPD em 8 milhões de hectares na sua primeira fase do período de vigência (2010 a 2020), o que foi superado em 125% entre os anos de 2010 a 2016 com uma estimativa de 9,97 milhões de hectares produzindo sobre SPD.

O Plano ABC+, que se encontra na sua segunda fase (2020-2030), tem como meta estimular a adoção em 12,5 milhões de hectares, o que gera um potencial de -12,99 milhões de CO₂eq. Ressalta-se que o SPD é o segundo destino entre as tecnologias contemplados pelo programa, quanto a finalidade dos recursos, chegando a 28% em do total de recursos aplicados entre 2013 a 2016 (ASSAD et al., 2019; FREITAS, 2018; GIANETTI, 2018).

3. METODOLOGIA

3.1 FONTE DOS DADOS E VARIÁVEIS UTILIZADAS

O modelo empírico utilizou base de dados em nível municipal do Censo Agropecuário de 2017. As variáveis utilizadas para investigar os determinantes da adoção do SPD, de modo geral, são variáveis ligadas às disponibilidades de recursos econômicos e naturais, opções tecnológicas, informações e habilidades, infraestrutura e instituições.

Tabela 1 – Descrição das variáveis que compõem o modelo

Variável	Unidade	Descrição
Sistema Plantio Direto (SPD)		Variável dependente – Diz respeito a presença ou não de adoção de SPD no município. Também é utilizada como proporção para os níveis de dose para a resposta sobre o VBP agropecuária.
Valor da produção	R\$ em mil	Valor da produção animal e vegetal por municípios.
Trabalho	Unidades	Pessoal ocupado em estabelecimentos agropecuários por municípios.
Terra	ha	Área total das propriedades da microrregião decrescidas de: áreas cobertas por água e caminhos; áreas impróprias para a agricultura; áreas de florestas naturais destinadas à reserva legal e áreas de preservação permanentes.
Capital	Unidades	Soma do número de tratores e implementos agropecuários existentes nos estabelecimentos de cada município.
Despesas	R\$ em mil	Total de despesas das propriedades em cada município com: adubos e corretivos; sementes e mudas; defensivos agrícolas; medicamento para animais; sal, rações e outro suplementos para animais; energia elétrica; e combustíveis e lubrificantes.
Pecuária	Unidade animal	Número equivalente a cabeças de gado calculado pela unidade animal.
Temperatura e	°C e mm	Temperatura e precipitação média dos últimos 20 anos nos municípios, bem como seus desvios e termos quadráticos.

precipitação		
Idade do produtor	proporção	Proporção de produtores com menos de 25 anos e mais de 55 anos
Nível educacional	proporção	Proporção de produtores que tem ensino médio e superior
Associado	proporção	Proporção de produtores que participa de alguma cooperativa ou associação

Fonte: Censo Agropecuário 2017

3.2 MODELO DE ESCOLHA BINÁRIA (LOGIT) E *PROPENSITY SCORE MATCHING (PSM)*

Para responder os questionamentos propostos neste trabalho, avaliar o impacto econômico nos municípios brasileiros da adoção do SPD, é necessário comparar municípios nos quais há diversificação por meio do SPD com aqueles municípios em que SPD não é utilizado. Na avaliação do impacto econômico do SPD do município em que há adoção, deve-se considerar a ocorrência de um viés de seleção, em outras palavras, a agropecuária brasileira apresenta estrutura produtiva heterogênea, algumas regiões altamente produtivas e tecnificadas, e outras com baixos níveis tecnológicos empregados na produção. Portanto, é necessário levar em conta este argumento, já que heterogeneidade tecnológica da estrutura produtiva agrícola brasileira é considerada um entrave para o desenvolvimento agrário brasileiro, no avanço na adoção e difusão tecnológica (FORNAZIER; VIEIRA FILHO, 2013; VIERA FILHO; SANTOS; FORNAZIER, 2013; GASQUES et al., 2014).

Entender como ocorre o processo de adoção de tecnologias pode fornecer indicadores para políticas públicas e estratégias privadas para uma maior difusão tecnológica. Sendo assim, a metodologia utilizada neste trabalho se baseou numa tentativa de eliminação (ou mesmo redução) desse viés, através do método *Propensity Score Matching*.

Supondo que, inicialmente, y_{1i} seja o termo referente a presença de SPD na atividade agropecuária no município i , igualmente, y_{0i} denota a ausência da adoção de SPD no município. A diferença entre os ganhos obtidos pelos dois diferentes municípios, $y_{1i,t} - y_{0i,t}$, é definida como o impacto econômico que a adoção do SPD tem sobre os municípios nos quais essa técnica de produção agrícola é adotada.

Tecnicamente, para avaliar o impacto da adoção, foi estimado o Efeito do

Tratamento Médio sobre o Tratado – ETM: $ETM = E(y_{1i} - y_{0i} | D = 1)$ (1) em que $E(y_{1i} - y_{0i})$, o qual refere-se à expectativa do efeito do tratamento; e $D = 1$ que denota a adoção do SPD. Sendo assim, é necessário utilizar como variável de controle um grupo de municípios nos quais SPD não tenham sido adotado, mas que guardam características similares aos municípios que possuem áreas cultivadas sob SPD. Portanto, define-se um contrafactual que possibilite avaliar o ganho médio dos municípios nos quais há agricultores que se diversificaram a sua produção adotando SPD, caso eles não tivessem nenhuma área dedicada a técnica.

A obtenção do contrafactual é feito através da técnica de *Propensity Score Matching (PSM)*, proposta por Rosenbaum e Rubin (1983). Segundo os autores, o escore de propensão definido é definido como a probabilidade condicional de receber o tratamento, dadas as características pré-estabelecidas. Espera-se teoricamente que os agricultores decidam adotar SPD quando a utilidade esperada (mas não observada) da adoção ($D=1$) for maior que a utilidade da não adoção ($D=0$). A adoção do SPD é observável como uma escolha dicotômica:

$$D_i^* = Z_i\beta + \varepsilon_i, \text{ sendo } D_i = 1, \text{ então } D_i^* > D_0^*, \text{ ao contrário } D_i = 0 \quad (1)$$

onde Z representa uma matriz das variáveis explicativas, β é o vetor de parâmetros a serem estimados e ε_i é o termo de erro normalmente distribuído com média zero e variância constante.

Sendo assim, estima-se o escore de propensão, através do modelo *logit*, definido como a probabilidade condicional de receber o tratamento, dadas as características pré-estabelecidas:

$$p(W) \equiv \Pr(D = 1 | W) = E(D | W) \quad (2)$$

em que $D = (1)$ é a *dummy* indicadora de utilização do SPD (tratamento) e W , o vetor multidimensional de características antes do tratamento (tipos de solos, temperatura e precipitação, fatores demográficos, socioeconômicos e estruturais dos municípios).

Considerando cada município i , se o escore de propensão, $p(W)$, é conhecido, então o efeito tratamento sobre os tratados (ETM) pode ser estimado da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} ETM_1 &= \{y_{1i} - y_{0i} | D_i = 1\} \\ &= [E\{y_{1i} - y_{0i} | D_i = 1, p(W)\}] \\ &= [E\{y_{1i} | D_i = 1, p(W)\} - E\{y_{0i} | D_i = 0, p(W)\} | D_i = 1] \end{aligned} \quad (3)$$

Para a estimação do escore de propensão $p(W_i)$ deve ser utilizado um modelo de

probabilidade, $\Pr(D_i = 1 | W_i) = F\{h(W_i)\}$. Neste trabalho, utilizou-se o modelo Logit, de modo que $F(\cdot)$ é a distribuição normal, onde indica-se a ocorrência ou não de determinado evento, no caso do presente estudo, se há adoção do SPD no município ou não. Tal modelo vem sendo utilizado em várias investigações empíricas sobre adoção tecnológica (WINSTEAD et al., 2010; ROBERTSON et al., 2012; LAMBERT et al., 2015).

Adicionalmente, para a construção do grupo de comparação a partir dos municípios não tratados (sem SPD), o presente trabalho empregou o método do vizinho mais próximo (*Nearest Neighbor Matching*), para cada elemento do grupo dos tratados, n indivíduos do grupo de controle (os valores de n neste trabalho são 5 e 1) são selecionados considerando que sejam o mais próximo possível com base no valor do escore de propensão. Quando ocorre esse tipo de pareamento, cada observação de controle somente será utilizada uma vez na comparação com tratados.

A literatura que versa sobre adoção tecnológica aponta um conjunto de fatores condicionantes que determinam a adoção de alguma tecnologia ou prática/processo produtivo. Algumas variáveis são frequentemente apontadas, como: o papel da aversão a riscos (mercadológico e edafoclimáticos), tamanho de propriedade, comercialização, infraestrutura física e institucional, capital humano, qualidade do ambiente, tecnologia disponível, variáveis demográficas, características ou formas de gestão, arrendamento, nível educacional, entre outros. Tais fatores explicam a adoção através do caráter comportamental do agente produtor/empreendedor no mercado. Em outras palavras, a decisão de adotar é dada pela utilidade percebida dos fatores produtivos e de seus preços (RYN; GROSS, 1943; GRILICHES, 1957; MANSFIELD, 1961; RUTTAN; HAYAMI, 1984; ZILBERMAN, 1985; FEDER; UMALI, 1993; ROGERS, 2010; ROSENBERG, 2014).

Nesses trabalhos, o objetivo é modelar os fatores e condicionantes que aumentam a probabilidade de uso de tecnologias, ou seja, buscam entender o que vem contribuindo para a adoção ou não de determinada inovação tecnológica ou procedimento produtivo. A probabilidade logística de y assumir 0 ou 1 é função das variáveis explicativas representadas pelo vetor x cujos parâmetros expressam a decisão de adotar ou não.

3.2.1 Propensity Score Matching Generalizado (PSG) – Função Dose-Resposta

A estratégia empírica do presente trabalho busca comparar municípios brasileiros com características suficientemente similares, mas com diferentes intensidades de

tratamento, proporção da área agricultável sobre SPD, com o objetivo de construir um cenário de quase experimento.

Imbens (2000) e Hirano e Imbens (2004) propõem a estimação de uma função dose-resposta, que se baseia na estimação da probabilidade de recebimento de cada nível de tratamento, onde:

$$T_i = t, \text{ dado por } r(t, X) \quad (4)$$

Os autores demonstram que, condicional à probabilidade de recebimento do tratamento t , o status de tratamento independe do resultado potencial na ausência da intervenção. À essa propriedade, análoga à hipótese do modelo PSM, é dado o nome de ignorabilidade fraca.

$$Y(t) \perp 1[T = t] \mid r(t, X), \forall t \quad (5)$$

Para estimar $r(t, X)$, assume-se que o tratamento tenha uma distribuição normal, condicional nas variáveis de controle, isto é, $T_i | X \sim N(\beta_0 + \beta_1 X_i, \sigma^2)$. Após estimar os parâmetros β , é possível obter o valor da função densidade de probabilidade associado ao valor observado da variável de tratamento.

$$\hat{f}_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi\hat{\sigma}^2}} \exp\left(-\frac{1}{2\hat{\sigma}^2} (T_i - f(\hat{\beta}, X_i))^2\right) \quad (6)$$

Para obter a relação condicional $E[Y | r(t, X)]$ regride-se o resultado sobre o tratamento para definir os *propensity scores* generalizados.

$$E[Y_i | T_i, \hat{f}_i] = \alpha_0 + \alpha_1 f(T_i) + \alpha_2 f(T_i)^2 + \alpha_3 \hat{f}_i + \alpha_4 \hat{f}_i^2 + \alpha_5 f(T_i) \hat{f}_i \quad (7)$$

A equação acima informa a relação entre o resultado observado, o tratamento e a probabilidade de receber cada nível de tratamento. Uma vez estimados os coeficientes α_i , pode-se avaliar os resultados potenciais para cada nível de tratamento.

4 RESULTADOS

4.1 ANÁLISE DESCRITIVA DAS VARIÁVEIS

Inicialmente, são apresentadas as estatísticas descritivas das variáveis utilizadas no modelo, ou seja, as características socioeconômicas, as variáveis climáticas e fatores institucionais nos municípios brasileiros (Tabela 1). Essa análise exploratória tem como objetivo fornecer informações gerais para o entendimento dos resultados do efeito de

tratamento que será apresentado na próxima seção.

Os dados demonstram que 13% da área agricultável média nos municípios brasileiros estão produzindo sobre SPD. Dos 5.572 municípios considerados na pesquisa, 4.857 foram identificados pelo Censo Agropecuário de 2017 como tendo áreas cultivadas com uso do SPD. E há apenas 13% que não apresentam valores de área agricultável sobre SPD (Tabela 2).

Tabela 2. Análise descritiva das variáveis

Variáveis	Média	Desvio-padrão	Min	Max
VPB (2017)	R\$ 83.203,01	169513,5	16	3.248.127,00
Uso do SPD	13,2%	24%	0	98%
Pessoal Ocupado (und)	2.718	2.945,04	6	48.246
Terra agricultável	50.088,55	103.697,80	3	3.411.216
Menos 25 anos	7,42%	4,08%	0	100%
Mais de 55 anos	74,43%	8,75%	0	100%
Capital	374,8	583,9684	0	7401
Despesas	R\$ 31.559,04	R\$ 74.211,15	R\$ 73	R\$ 1.423.489,00
Ensino Méd	17,71%	7,66%	0	100%
Ensino Sup.	9,18%	8,69%	0	57%
Associado	38%	21,31%	0,17%	100%
Precipitação	1333,256mm	572,2901mm	147,4mm	3197,8mm
Desvio da Precipitação	-79,24361 mm	288,9245 mm	-1401,582 mm	728,52 mm
Temperatura	22,61923°C	3,16881°C	14,7875°C	31,8408°C
Desvio da Temperatura	1,87e+16	1,39e+18	-2,0649	1,04e+20

Fonte: Dados da pesquisa – Censo Agropecuário 2017

Em termos absolutos, o censo agropecuário de 2017 revela que a área média em hectare de municípios que produz sobre SPD é de 7.615 hectares. A proporção média de produtores com menos de 25 anos nos municípios brasileiros é de 7%, enquanto produtores acima de 55 anos são 74%. A proporção de produtores com ensino médio e superior estão em média 18% e 9%, respectivamente. Espera-se que a proporção de jovens produtores e produtores com níveis educacionais contribuam positivamente com a probabilidade de adoção do SPD. É esperado também uma relação positiva entre capital e despesas, que são considerados os indicadores econômicos afetados pela adoção, já que alguns estudos revelam que SPD otimiza o uso de maquinários e consequentemente, os gastos operacionais.

A variáveis climáticas utilizadas foram precipitação e temperatura, na sua forma

linear e quadrática, e os seus desvios à média. Espera-se uma relação positiva entre tais variáveis e a probabilidade da adoção do SPD, já que a prática de cobertura do solo mitiga o impacto das quedas de gotas no solo, evitando erosão e uma melhor cobertura térmica.

Pode-se observar que 38% dos produtores agropecuários nos municípios participam, em média, de alguma associação ou cooperativa. Tais formas de organização são consideradas redes de informação importante para a difusão e engajamento para adoção de tecnologias ou práticas agropecuárias. Sendo assim, espera-se também uma relação positiva entre a variável associação e a probabilidade de adoção do SPD.

4.2 ANÁLISE DOS CONDICIONANTES ASSOCIADOS À DECISÃO DE UTILIZAÇÃO DO SPD

Neste tópico são demonstradas as estimativas do modelo Logit, que visa explicar os fatores associados à decisão de adoção do SPD (Tabela 3). Tal procedimento tem como objetivo responder a primeira questão de pesquisa deste trabalho e é, ao mesmo tempo, o procedimento inicial para a comparação dos municípios que possuem áreas agricultáveis sobre SPD e aqueles nos quais esse sistema não está presente (Modelo de Efeito de Tratamento). Esse procedimento permitirá responder concretamente a segunda questão de interesse nesta pesquisa, qual seja, municípios brasileiros em que há adoção do SPD apresenta um resultado econômico superior àqueles que não apresenta adoção?

Tabela 3 – Estimativas do modelo Logit de determinação da probabilidade de adotar SPD no Brasil

Variáveis	Coefficientes	Erro padrão	P>z
Pessoal Ocupado	7,63e-06	0,0000238	0,748
Terra agricultável	-3,78e-6	2,53e-06	0,135
Menos 25 anos	-3,412441	5,605029	0,491
Mais de 55 anos	-0,6290183	2,368807	0,791
Capital	0,0008137	0,0005717	0,155
Despesas	0,0000259	7,60e-06	0,001
Pecuária	7,13e-06	4,04e-06	0,077
Ensino Méd	0,1787427	1,399595	0,898
Ensino Sup.	0,2323429	1,889641	0,902
Associado	0,3310891	0,3175089	0,297
Precipitação	0,0022502	0,0001927	0,000
Desvio da Precipitação	-0,0013464	0,0003643	0,000
Temperatura	-0,2030416	0,0438214	0,000
Desvio da Temperatura	0,1353235	0,1438853	0,347
Constante	3,972338	2,497293	0,112

LR chi2(14)	835,17
Prob > chi2	0,0000
R2	0,3220

Quanto aos ajustes das estimativas, os resultados do modelo levaram 7 interações para ser estimado. O LR chi2 indica que os coeficientes são conjuntamente significativos para explicar a probabilidade da adoção do SPD em nível municipal. O valor da estatística Prob>Chi permite rejeitar a 1% hipótese que todos os coeficientes sejam iguais a zero. O Pseudo R2 revela que 32% da variação da variável dependente (adotar ou não SPD), pode ser explicado pelas variáveis independentes do modelo.

As variáveis Pessoal Ocupado e Terra agricultável não apresentam coeficientes estatisticamente significante, em outras palavras, não são fatores determinantes da adoção do SPD. As variáveis relacionadas as idades do produtor, escolaridades e associado não apresentaram coeficientes com significância estatística para explicar a adoção do SPD nos municípios brasileiros. O que não era esperado, já que produtores jovens, associados, maior nível de despesas e escolaridades segundo a literatura, são fatores determinantes na adoção de tecnologias agrícolas. A variável capital, que se refere ao número de maquinários e implementos agrícolas, revela uma relação positiva e, porém, não significativa com a probabilidade de adoção do SPD.

As variáveis climáticas que compõe o estudo, a temperatura e precipitação apresenta significância estatística, o que era esperado. Maiores níveis de precipitação aumenta a probabilidade de adoção do SPD. Tal resultado traz indício importante para a questão climática, talvez os produtores percebam a técnica como ferramenta para adaptação climática.

A partir das considerações a respeito dos condicionantes da adoção do SPD no Brasil, avaliou-se as diferenças de desempenho agropecuário através da variável VBP (Valor Bruto da Produção) nos municípios com e sem uso do SPD, como observado na Tabela 4.

Tabela 4 - Impacto sobre o VBP de municípios com e sem uso do SPD

	Coeficiente	z	P>z
ATE	R\$ 82.587,75	17,00	0,000
ATET	R\$ 98.477,97	17,27	0,000

Fonte: Dados da pesquisa.

Na Tabela 4 pode-se observar o efeito tratamento (AET) e o efeito tratamento médio sobre os tratados (ATET) que o VBP nos municípios com uso do SPD foi superior ao dos municípios nos quais essa técnica não é utilizada. As diferenças calculadas são

estatisticamente significativas a 1% de probabilidade. Esses resultados indicam que em municípios que apresentam SPD, o VBP pode chegar até R\$ 98.477,97 reais. Tais resultados revelam que há indícios de que SPD tem contribuído com o VBP agropecuária no país, em vista dos benefícios econômicos e ambientais que a prática proporciona.

4.3 PSG e Efeito Dose-Resposta

Esta seção apresenta os resultados obtidos pelas estimações do *propensity score* generalizado (*PSG*) e da função dose-resposta. Foram avaliados os efeitos dos diferentes níveis proporção do SPD sobre a área agricultável dos municípios utilizando o método PSG.

A análise do efeito dose se inicia por volta de R\$ 100 mil, em VBP. Os efeitos crescentes iniciais podem indicar que uma associação positiva entre a presença do SPD e maiores níveis de VBP agropecuária nos municípios brasileiros.

O método de dose-resposta indica que o efeito variou conforme o a proporção do SPD sobre a área agricultável nos municípios brasileiros. Na Figura 1, percebe-se que o efeito tratamento por níveis de proporção do SPD é decrescente na proporção. Em outras palavras, o efeito se reduz à medida que se verifica maiores níveis de proporção do SPD sobre a área agricultável, o que poderia indicar que o impacto do SPD nos diferentes níveis de adoção não mudaria tanto o VBP agropecuários nos municípios brasileiros.

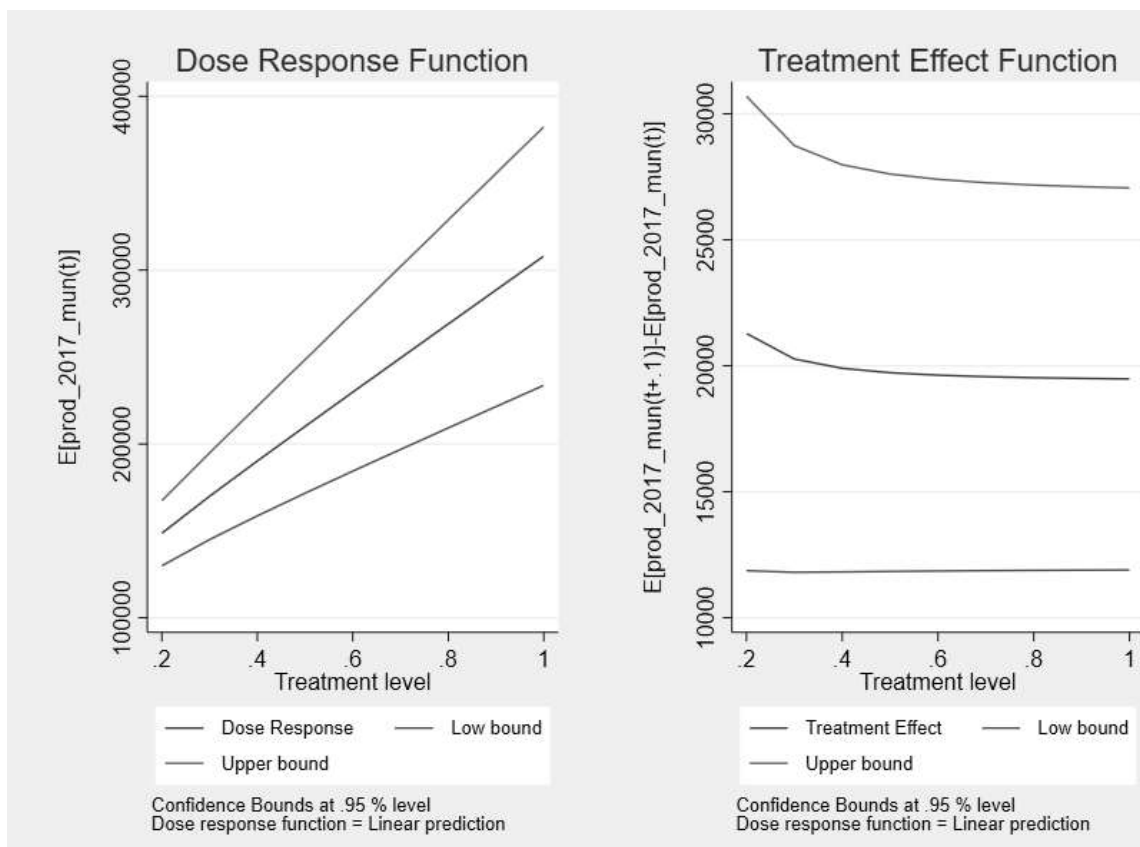


Figura 1 – Dose-resposta e efeito tratamento do SPD sobre VBP agropecuária

Fonte: Dados da pesquisa

Em suma, a função dose-resposta apresenta evidências de que os níveis do SPD estão relacionados positivamente com maiores níveis de VBP da agropecuária nos municípios brasileiros. Entretanto, o impacto sobre a renda da atividade agropecuária municipal em resposta a maiores níveis do SPD é menores a medida da expansão da técnica sobre a área.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados do estudo permitem concluir que a adoção do SPD no Brasil é condicionada pelas condições econômicas e climáticas dos municípios. Adicionalmente, o fato de o padrão histórico precipitação e temperatura influenciar na escolha dessa técnica de manejo agrícola reforça a ideia de que seu processo de escolha esteja ligado à sua utilização como medida adaptativa às mudanças climáticas.

As estimativas de efeito tratamento revelam impacto positivo e significativo sobre o VBP agropecuária nos municípios brasileiros, porém, na análise de dose-resposta, constatou-se que a contribuição do SPD a partir dos níveis de proporção sobre a área agricultável nos municípios contribui de forma decrescente, à medida que SPD avança

sobre a terra agricultável no município, o impacto econômico diminui, porém, mantém-se positivo.

É possível concluir, também que os SPD guarda potencial de elevar o valor bruto da produção agropecuária dos municípios, além de tornar a produção agropecuária menos vulnerável ao clima. Diante dessa constatação do processo de adoção do SPD, recomenda-se como agenda de pesquisa mais estudos relacionados ao impacto do SPD como medida adaptativa climática, além de as proposições da técnica, bem como os benefícios a ela associados.

É fundamental ressaltar a necessidade de fornecer melhores condições de crédito para a implementação do SPD para que incentivem os produtores ao método de produção mais sustentável em relação as condições do solo. Para isso deve contar com assistência técnica e informação sobre a prática de manejo e seus benefícios que possam ser obtidos. O incentivo a adoção do SPD deve ser estimulado em vista do potencial aumento da produção agropecuária em bases sustentáveis, além de ter a possibilidade de ampliar os rendimentos provenientes do bom desempenho dos solos, além de estar em alinhado com os acordos climáticos internacionais firmados pelo país.

Sinteticamente, os resultados desse trabalho sugerem que, dado o ainda restrito à participação média da adoção do SPD na área agricultável no Brasil, a utilização desses sistemas seja incentivada, dado o duplo dividendo entre ganhos econômicos e ambientais. É preciso observar as condições econômicas e financeira para que haja maior investimento por unidade de área, uma vez que esse recurso marginal pode representar grande ganho de eficiência viabilizado pela prática. O referido “esforço adicional” visaria o oferecimento, principalmente, de assistência técnica aos produtores, de modo a dotá-los do conhecimento adequado para o uso do SPD. É importante ressaltar que esses avanços somente serão obtidos num ambiente de evolução das políticas públicas e do sistema de extensão rural.

Um dos principais argumentos econômicos em defesa do uso da técnica está na sua capacidade de otimização de recursos na produção agropecuária, sendo assim, a estimativa revela que a técnica tem potencial de reduzir o risco do produtor contra quebras de safras, além de novas adaptações decorrentes de veranicos mais intensos, possibilitando ainda ao produtor beneficiar-se da produção da safrinha. Portanto, e em modo geral, o SPD potencialmente pode elevar o crescimento e a competitividade do agronegócio brasileiro de forma sustentável, em conformidade com os fundamentos da “agricultura inteligente face ao clima” (*climate-smart agriculture*).

REFERÊNCIAS

ARYAL, Jeetendra Prakash et al. On-farm economic and environmental impact of zero-tillage wheat: a case of North-West India. **Experimental Agriculture**, v. 51, n. 1, p. 1-16, 2015.

DARYANTO, Stefani; WANG, Lixin; JACINTHE, Pierre-André. No-till is challenged: Complementary management is crucial to improve its environmental benefits under a changing climate. **Geography and Sustainability**, v. 1, n. 3, p. 229-232, 2020.

DOS SANTOS SOARES, Daiane et al. How diversity of crop residues in long-term no-tillage systems affect chemical and microbiological soil properties. **Soil and Tillage Research**, v. 194, p. 104316, 2019.

EL-SHATER, Tamer; MUGERA, Amin; YIGEZU, Yigezu A. Implications of adoption of zero tillage (ZT) on productive efficiency and production risk of wheat production. **Sustainability**, v. 12, n. 9, p. 3640, 2020.

FUENTES-LLANILLO, Rafael et al. Profitability of no-till grain production systems. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 39, n. 1, p. 77-86, 2018.

DENARDIN, José Eloir; KOCHHANN, Rainoldo Alberto; FAGANELLO, Antônio; SANTI, Anderson; DENARDIN, Norimar D'Ávila; WIETHÖLTER, Sírio. Diretrizes do Sistema Plantio Direto no contexto da agricultura conservacionista. Passo Fundo: Embrapa Trigo, p. 15, 2012.

DE RESENDE, Alvaro Vilela. O sistema plantio direto proporciona maior eficiência no uso de fertilizantes. Embrapa Milho e Sorgo-Documents (INFOTECA-E), 2011.

DE SA, M. A. C.; SANTOS JUNIOR, J.; FRANZ, CAB. Manejo e conservação do solo e da água em sistema de plantio direto no Cerrado. Embrapa Cerrados-Documents (INFOTECA-E), 2009.

DOS SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S. Aspectos biológicos na elevação do rendimento de grãos de cereais de inverno em plantio direto In: SANTOS, H. P. dos; FONTANELI, R. S.; SPERA, S. T. (Ed.). Sistemas de produção para cereais de inverno sob plantio direto no sul do Brasil. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2010.

EL-SHATER, Tamer; YIGEZU, Yigezu A.; MUGERA, Amin; PIGGIN, Colin; HADDAD, Atef; KHALIL, Yaseen; LOSS, Stephen; AW-HASSAN, A. Does Zero

Tillage Improve the Livelihoods of Smallholder Cropping Farmers? *Journal of Agricultural Economics*, v. 67, n. 1, p. 154-172, 2016.

FEBRAPDP. O que é Sistema de Plantio Direto (SPD)? Federação Brasileira de Plantio Direto e Irrigação. Acessado em: 28/04/2020.

FOSTER, Andrew D.; ROSENZWEIG, Mark R. Microeconomics of technology adoption. *Annu. Rev. Econ.*, v. 2, n. 1, p. 395-424, 2010.

FUENTES-LLANILLO, Rafael; TELLES, Tiago Santos; VOLSI, Bruno; SOARES JUNIOR, Dimas; CARNEIRO, Sergio Luiz; GUIMARÃES, Maria de Fátima. Profitability of no-till grain production systems. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 39, n. 1, p. 77-86, 2018.

GASQUES, José Garcia; BASTOS, E. T; VALDES, C.; BACCHI, M. R. P. Produtividade da agricultura: resultados para o Brasil e estados selecionados. *Revista de Política Agrícola*, v. 23, n. 3, p. 87-98, 2014.

GIANETTI, Giovani William. O Plano e Programa ABC: uma avaliação da execução e distribuição dos recursos. Tese de Doutorado – Departamento Economia Aplicada. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2018.

KASSAM, A.; FRIEDRICH, T.; DERPSCH, R. Global spread of conservation agriculture. *International Journal of Environmental Studies*, v. 76, n. 1, p. 29-51, 2019.

KAWA, Nicholas C. A “Win-Win” for Soil Conservation? How Indiana Row-Crop Farmers Perceive the Benefits (and Trade-offs) of No-Till Agriculture. **Culture, Agriculture, Food and Environment**, v. 43, n. 1, p. 25-35, 2021.

KEIL, Alwin; D’SOUZA, Alwin; MCDONALD, Andrew. Zero-tillage as a pathway for sustainable wheat intensification in the Eastern Indo-Gangetic Plains: does it work in farmers’ fields?. **Food Security**, v. 7, n. 5, p. 983-1001, 2015.

RUTTAN, Vernon W.; HAYAMI, Yujiro. Toward a theory of induced institutional innovation. *The Journal of development studies*, v. 20, n. 4, p. 203-223, 1984.

ROSENBAUM, P. R. e RUBIN D. B. The Central role of the Propensity Score in observational studies for causal effects. *Biometrika*, v. 70, n. 1, p. 41-55, 1983.

VERESOGLOU, SD, CHEN, J., DU, X. *et al.* O plantio direto supera o preparo convencional em condições áridas e após a fertilização. *Solo Eco. Deix* **5**, 137–141, 2023.

VIERA FILHO, José Eustáquio Ribeiro; SILVEIRA, José Maria Ferreira Jardim da. Competências organizacionais, trajetória tecnológica e aprendizado local na agricultura. *Economia e Sociedade*, Campinas, v. 25, n.3 (58), p. 599-629, dez, 2016.

SISTEMA PLANTIO DIRETO COMO ESTRATÉGIA DE ADAPTAÇÃO CLIMÁTICA – EVIDÊNCIAS PARA OS MUNICÍPIOS GOIANOS

RESUMO

O impacto das mudanças climáticas sobre a agropecuária goiana é uma importante agenda de pesquisa, em especial, para estudos que revelam as contribuições de práticas sustentáveis de produção agropecuária no estado que está entre os maiores produtores de alimentos no Brasil. O presente estudo tem como objetivo avaliar os condicionantes e impacto do Sistema Plantio Direto (SPD) nas despesas produtivas na produção agropecuária dos municípios do estado em cenário de mudanças climáticas. Foram utilizadas técnicas econométricas quase-experimentais para avaliar os condicionantes da adoção e tratamento do SPD sobre as despesas produtivas agropecuárias dos municípios do estado. As variações climáticas, a disponibilidade de pessoal ocupado e capital são os condicionantes da adoção de SPD no estado de Goiás. Há evidências nas diferenças nas despesas produtivas em áreas com e sem a presença de SPD na agropecuária do estado em cenário de mudança climática. O estudo revela que há indícios de que o processo de adoção de SPD no estado esteja associado a um processo de adaptabilidade climática.

Abstract

The impact of climate change on agriculture in Goiás is an important research agenda, especially for studies that reveal the contributions of sustainable agricultural production practices in the state, which is among the largest food producers in Brazil. This study aims to evaluate the constraints and impact of the No-Tillage System (NTS) on productive expenses in agricultural production in the municipalities of the state in a scenario of climate change. Quasi-experimental econometric techniques were used to evaluate the conditions for the adoption and treatment of the SPD on agricultural production expenses in the municipalities of the state. Climatic variations, the availability of employed personnel and capital are the conditioning factors for the adoption of (NTS) in the state of Goiás. There is evidence of differences in production expenses in areas with and without the presence of NTS in agriculture in the state in a scenario of climate change. The study reveals that there are indications that the process of adopting NTS in the state is associated with a process of climate adaptability.

3.1 Introdução

As implicações das mudanças climáticas sobre a segurança alimentar mundial tem sido importante agenda de pesquisa para subsidiar a sociedade e governos sobre a adoção de práticas e técnicas produtivas agrícolas que contribuem a sustentabilidade da produtividade e eficiência na produção agropecuária. O Sistema Plantio Direto (SPD) está entre as práticas de gestão sustentável de solos incentivados por diversos programas governamentais e organismos, tal fato se deve pelas evidências das relações entre eficiência produtiva e contribuições ambientais na produção agrícola sob SPD, em especial, suas contribuições para cenários de adversidade climática. (Lal, 2004; Pellegrini e Fernández, 2021; Tiecher et al, 2020; Haruna & Anderson, 2022)

De acordo com dados do *Food and Agriculture Organization* (FAO), o sistema de

plantio direto é utilizado em mais de 180 milhões de hectares no mundo. Os países com maior área de adoção do sistema são os Estados Unidos, Brasil, Argentina, Canadá e Austrália. A técnica tem ganhado espaço em diversos países, especialmente naqueles com grande produção agrícola, onde a sua adoção tem se mostrado uma prática rentável e sustentável. Além disso, a técnica contribui para a mitigação das mudanças climáticas, por meio da redução da emissão de gases de efeito estufa e do aumento da capacidade de sequestro de carbono no solo.

O SPD é amplamente utilizado no Brasil, especialmente na região Sul e Centro-Oeste do país. Segundo dados da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), a adoção do plantio direto já alcança cerca de 32 milhões de hectares no Brasil, o que representa cerca de 44% da área plantada com grãos no país. (EMBRAPA, 2022)

Os estados com maior área de adoção do sistema plantio direto são: Paraná, Rio Grande do Sul, Mato Grosso do Sul, São Paulo e Mato Grosso. Além disso, o SPD tem se expandido para outras culturas além dos grãos, como a cana-de-açúcar, a mandioca e a horticultura. Estima-se que cerca de 40% da área plantada com cana-de-açúcar no Brasil utilize o plantio direto. A distribuição do uso do sistema de plantio direto varia de acordo com as características do solo e do clima de cada região, e tem sido adotada em diversas culturas e em diferentes regiões do país. (EMBRAPA, 2022)

Em Goiás, o SPD é uma técnica bastante difundida, especialmente em culturas como soja, milho, algodão e feijão. De acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), na safra 2020/2021, a área plantada com soja em Goiás foi de aproximadamente 5,6 milhões de hectares, sendo que 92% dessa área foi cultivada com SPD. Já a área plantada com milho foi de cerca de 1,5 milhão de hectares, sendo que 87% dessa área foi cultivada com SPD.

O SPD tem se mostrado uma prática agrícola cada vez mais relevante e necessária, especialmente diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela necessidade de produzir alimentos de forma sustentável e eficiente.

A adoção do SPD tem uma série de benefícios para a mitigação das mudanças climáticas. Em primeiro lugar, ao preservar a matéria orgânica do solo, o SPD aumenta a capacidade de sequestro de carbono no solo, consequentemente, a técnica potencializa o aumento de armazenamento de carbono pelo solo contribuindo para reduzir a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. (Lal, 2004; Sainju, 2021; Hati et. al., 2021; Haruna & Anderson, 2022; Veresoglou et. al., 2023)

A prática reduz a emissão de gases de efeito estufa associados ao preparo convencional do solo, pois quando o solo é arado ou gradeado, há a liberação de gases como o óxido nitroso (N₂O), que tem um potencial de aquecimento global 300 vezes maior que o CO₂. Portanto, a produção agrícola realizada sobre SPD, o solo é mantido coberto e a emissão desses gases é reduzida. (Lal, 2004; Sainju, 2021; Hati et. al., 2021; Haruna & Anderson, 2022; Veresoglou et. al., 2023)

Outro benefício do SPD é a redução da necessidade de fertilizantes e agrotóxicos, que são produzidos com base em combustíveis fósseis e também contribuem para a emissão de gases de efeito estufa. Com o solo mais saudável e produtivo, potencializa a redução da dependência desses insumos. (Heinemann e Santos, 2019; Schmitt, Ernani e Amaral, 2017; Omara et. al., 2019; Mello et. al., 2021; Veresoglou et. al., 2023)

Diante deste contexto, o presente trabalho busca contribuir com a literatura ao compreender as implicações de práticas produtivas consideradas sustentáveis sobre a produtividade agropecuária brasileira que, especificamente no presente artigo, procura-se avaliar o impacto da adoção de SPD sobre as despesas produtivas da produção agropecuária em ambiente de condições de mudanças climáticas.

Para atingir o objetivo foram utilizados dados a nível municipal do censo agropecuário de 2017 para o estado de Goiás e o uso de dados de simulações climáticas relacionadas a projeções de temperatura e precipitação para a média de período proposto pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC).

Questões que buscam compreender as implicações econômicas da adoção de SPD sobre produção agropecuária como medida de adaptação às mudanças climáticas não tem sido observada na literatura. Sendo assim, o trabalho busca responder a seguinte questão: no estado de Goiás, os municípios goianos que conste a presença de SPD são menos vulneráveis às mudanças climáticas em termos dos resultados econômicos da atividade agropecuária?

O presente estudo está organizado inicialmente por esta introdução, seguido da literatura relacionada que trata dos benefícios ambientais, das contribuições para o desenvolvimento e mitigação das mudanças climáticas promovidas pelo SPD. Na metodologia são disponibilizadas a estratégia empírica e fonte de dados utilizados no trabalho, seguido dos resultados e conclusões.

3.2 Literatura relacionada

O SPD é conhecido como prática de gestão de solos que busca preservar a saúde dos solos, promover a conservação da água e mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Pode-se dividir o SPD em três principais práticas de gestão de solo: a primeira prática é manutenção da cobertura do solo por uma camada de palha ou restos de cultura após a colheita, segunda é a realização do preparo do solo sem arar e gradear, e por fim, realizar a prática de rotação de culturas. (Fuentes-Llanillo et al., 2018)

O SPD também contribui para a adaptação das culturas ao clima frente a cenários de mudanças climáticas. Com a manutenção da matéria orgânica do solo e a melhoria da infiltração de água, estudos demonstram que a produção agrícola sobre SPD promove resiliência das culturas em períodos de seca ou de chuva intensa, que podem se tornar mais frequentes com as mudanças climáticas. (Fuentes-Llanillo et al., 2018; Andrade et al., 2018; Kawa, 2021).

O quadro 1 apresenta as principais contribuições do SPD para o meio ambiente e o enfrentamento das mudanças climáticas.

Tabela 1 – Contribuição do SPD para o meio ambiente e o enfrentamento das mudanças climáticas

Sequestro de carbono	O SPD promove a formação de matéria orgânica no solo, que é composta principalmente de carbono. Esse processo de sequestro de carbono ajuda a reduzir a quantidade de gases de efeito estufa na atmosfera, contribuindo para o combate às mudanças climáticas.
Redução de emissões de gases de efeito estufa	O SPD também contribui para a redução da emissão de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono, o metano e o óxido nítrico. Isso ocorre porque a técnica reduz a necessidade de aração e preparo do solo, que são atividades que liberam esses gases na atmosfera.
Conservação do solo	O plantio direto ajuda a conservar o solo, reduzindo a erosão e a compactação. Dessa forma, o solo fica mais saudável e capaz de armazenar água e nutrientes, além de se tornar mais resistente aos impactos das mudanças climáticas, como secas e enchentes.
Economia de água	Com o plantio direto, a água da chuva é melhor retida no solo, o que ajuda a economizar água e reduzir a necessidade de irrigação.
Redução do uso de insumos	O plantio direto reduz a necessidade de insumos como fertilizantes e agrotóxicos, o que ajuda a reduzir a emissão de gases de efeito estufa associados à produção desses produtos.

Fonte: Resultado da pesquisa

A adoção dessa prática agrícola é uma das promessas mais eficazes de promover a sustentabilidade na produção de alimentos e garantir a preservação dos recursos naturais para as gerações futuras, bem como sua contribuição para a descarbonização da economia.

O SPD guarda relação direta com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU). Tais objetivos têm como meta a promoção do desenvolvimento sustentável em todo o mundo. Os ODS que estão diretamente relacionados com a técnica são:

- ODS 2: Fome Zero e Agricultura Sustentável - O SPD contribui para a produção de alimentos de forma mais sustentável, por meio da conservação do solo e do aumento da produtividade agrícola. Com o plantio direto, é possível produzir alimentos de forma mais eficiente, utilizando menos recursos naturais e reduzindo o impacto ambiental.
- ODS 12: Consumo e Produção Sustentáveis - O plantio direto é uma técnica que promove a produção de alimentos de forma mais sustentável, com menor impacto ambiental e menor consumo de recursos naturais. Além disso, a técnica contribui para a redução do desperdício de alimentos, já que a produção é mais eficiente e produtiva.
- ODS 13: Ação contra a mudança global do clima - O plantio direto é uma técnica que contribui diretamente para a mitigação das mudanças climáticas, por meio do sequestro de carbono no solo e da redução das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, o SPD ajuda a preservar o solo e a conservar a biodiversidade, o que é essencial para a adaptação às mudanças climáticas.
- ODS 15: Vida terrestre - O plantio direto contribui para a preservação da biodiversidade e da saúde do solo, por meio da redução da erosão e da conservação da matéria orgânica. Dessa forma, o SPD ajuda a proteger os ecossistemas terrestres e a garantir a sustentabilidade dos recursos naturais.

O SPD pode estar presente nos diversos sistemas produtivos, como fibras, proteínas, grãos e agroenergia, permitindo entender a necessidade de sua contribuição nos diferentes medidas e aspectos da produtividade agropecuária brasileira, em especial, o retorno líquido por unidade de área agricultável sobre o risco de eventos climáticos. Tais constatações explicam sua importância não somente em termos de sustentabilidade agrícola, mas também em questões relacionadas às mudanças climáticas.

3.3 Metodologia

3.3.1 Estratégia Empírica

O presente estudo busca investigar o potencial impacto econômico da prática SPD sobre as despesas da produção agropecuária nos municípios goianos. O impacto econômico é mensurado pela técnica quase-experimental *Propensity Score Matching*. A diferença entre as despesas produtivas pelos diferentes municípios goianos é definida o impacto econômico que a adoção de SPD tem sobre os municípios goianos nos quais a prática tem presença sobre a área agricultável. Sendo assim, tecnicamente tem-se o Efeito do Tratamento Médio sobre o Tratado – ETM:

$$ETM = E(y_{1i} - y_{0i} | D = 1) \quad (1)$$

Em que $E(y_{1i} - y_{0i})$ refere-se à expectativa do efeito tratamento; $D = 1$ identifica a adoção de SPD. A variável que representa dos ganhos médios resultantes da atividade agrícola é representada pelo valor das despesas produtivas, esse procedimento é semelhante ao adotado pelos estudos de Mendelsohn et al. (1994), Pires e Cunha (2014), Cunha, Coelho e Féres (2015) e Schembergue et al. (2015).

No presente estudo buscou avaliar o efeito tratamento da presença de SPD sobre as despesas operacionais da produção agropecuária. A justificativa se baseia segundo os princípios conservacionista, que argumenta que o SPD promove a otimização dos custos da produção agrícola. Sendo assim, assume-se que, sob mercados competitivos, o custo marginal será igual à receita marginal do seu melhor uso, pressupondo que, segundo a teoria clássica da produção, os produtores sempre praticarão a atividade mais lucrativa.

Ao considerar a despesa produtiva como variável a ser tratada, o modelo estima diretamente os impactos do clima sobre a produção de distintas culturas e, indiretamente, a substituição de insumos e a introdução de diferentes técnicas potenciais de mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Portanto, o procedimento adotado permite medir o impacto das mudanças climáticas sobre o valor econômico de diferentes atividades (MENDELSON et al., 1994; SCHEMBERGUE et al. (2015). Em outras palavras, a redução da vulnerabilidade será avaliada por meio da eficácia do SPD em garantir menores custos produtivos nos municípios que adotam o sistema.

Para verificar se há redução da vulnerabilidade do uso de SPD sobre a área

agricultável nos municípios goianos, partiu-se do cálculo do ETM, realizado para as variáveis no período t (presente) (equação 1), utilizando projeções de temperatura e precipitação para a média dos períodos de tempo propostos pelo IPCC (2013): 2040-2060. A partir deste procedimento, estima-se novos efeitos de tratamento, considerando a diferença no valor das despesas produtivas dos municípios com e sem áreas agricultáveis com SPD.

A partir dos valores do ETM simulados em cada um dos dois períodos (presente e futuro) para cada município, obteve-se a variação percentual das despesas produtivas em relação ao período atual, com o objetivo de avaliar possíveis ganhos ou prejuízos resultantes das mudanças climáticas. Nesse procedimento foi utilizada a seguinte fórmula:

$$\Delta Despesas = \frac{Despesas_{Ti}^m - Despesas_{presente}^m}{Despesas_{presente}^m} \quad (2)$$

em que $\Delta Despesas$ refere-se à variação percentual do valor das despesas estimado, entre o período T_i (2040-2060) e o período t (presente), para cada tipo de município m (com ou sem uso de SPD).

Seguindo o procedimento descrito em Mendelsohn et al. (1994), que é comum em estudos que tratam de mudanças climáticas, as simulações foram realizadas mantendo constantes as variáveis agronômicas e socioeconômicas. Esse procedimento é feito para contabilizar apenas o efeito das mudanças climáticas.

3.3.2 Fonte dos dados e variáveis utilizadas

Para realizar as estimativas do efeito tratamento em adaptação às mudanças climáticas, é necessário estimar um modelo de escolha binária, que no presente estudo foi utilizado o modelo logit. Os determinantes na estimação do modelo logit foram escolhidos de acordo com a proposta de Yohe e Tol (2002), que apresenta um conjunto de determinantes de adoção de tecnologias agropecuárias ligadas a adaptações às mudanças climáticas, como disponibilidade de recursos econômicos e naturais, opções tecnológicas, informações e habilidades, infraestrutura e instituições.

Tabela 1 - Variáveis utilizadas e suas fontes

Variáveis	Descrição e fonte
Pessoal ocupado	Número de trabalhadores no setor agropecuário – Censo Agropecuário 2017
Terra agricultável	Área agricultável – Censo Agropecuário 2017

Proporção da área agricultável sob SPD	Proporção da área agricultável do município que está sob SPD - Censo Agropecuário 2017
Produtores c/ menos de 25 anos	Proporção de produtores com menos de 25 anos nos municípios - Censo Agropecuário 2017
Produtores c/ mais de 25 anos	Proporção de produtores com mais de 55 anos nos municípios - Censo Agropecuário 2017
Capital	Soma do número de tratores e implementos agropecuários existentes nos estabelecimentos de cada município.
Despesas	Total de despesas das propriedades em cada município com: adubos e corretivos; sementes e mudas; defensivos agrícolas; medicamento para animais; sal, rações e outro suplementos para animais; energia elétrica; e combustíveis e lubrificantes.
Pecuária	Número equivalente a cabeças de gado calculado pela unidade animal.
Percentual Ens. Fundamental	Proporção de produtores com ensino fundamental completo
Percentual Ens. Médio	Proporção de produtores com ensino médio completo
Percentual Ens. Superior	Proporção de produtores com ensino superior completo
Associado	Proporção de produtores que participa de alguma cooperativa ou associação
Precipitação e Temperatura 2017	Temperatura e precipitação média dos últimos 20 anos nos municípios - Climate Research Unit – CRU (CRU Times Series 3.2.1)
Precipitação e Temperatura (2040-2060)	Simulação da temperatura e precipitação média entre os anos 2040-2060 nos municípios – Modelos de Circulação Geral - IPCC

Fonte: Autores

3.4 Resultado e discussões

Na tabela 3 são apresentadas as estatísticas descritivas das variáveis utilizadas no modelo, que guardam as características socioeconômicas e condições climáticas dos municípios goianos. A presente análise descritiva e exploratória fornece informações gerais para o entendimento do resultado do modelo efeito tratamento com e sem simulações climáticas.

Tabela 2 – Estatística descritivas das variáveis utilizadas no estudo

Variáveis	Média	Desvio- Padrão	Min	Max
Pessoal ocupado	1.994	1.892	25	14.161
Terra agricultável	94204,81	104.773,3	4415	552.933
Proporção da área agricultável sobre SPD	8,4%	14%	0	69,5%
Produtores c/ menos de 25	4,5%	0,0171105	0	0,1176471

anos				
Produtores c/ mais de 55 anos	0,8047341	0,0496424	0,5	0,9297521
Capital	4.503	6.708,167	0	6.771
Despesas	51.172,45	106.318,8	73	1024902
Rebanho	70.580,72	74.694,59	1.256	583.411
Percentual Ens. Fundamental	22,8%	8,4%	6%	65,2%
Percentual Ens. Médio	24,2%	6%	10%	46%
Percentual Ens. Superior	15,3%	7,0%	1,8%	38,8%
Associado	22,9%	15,6%	0,22%	76,6%
Precipitação 2017	1304,98	115,46	896,9	1.590,22
Temperatura 2017	25,03	1,49	21,90	29,28

Fonte: Censo Agropecuário 2017 (IBGE)

Na média, a disponibilidade de área agricultável nos municípios goianos é de 94 mil hectares. A proporção média de SPD sobre a área agricultável nos municípios em Goiás é de 8%. Entre os municípios que guardam maior proporção da área agricultável sob SPA no estado são: Chapadão do Céu (69%), Vianópolis (58%) e Joviânia (55%).

Quanto as variáveis socioeconômicas, destaca-se a idade média dos produtores goianos que, segundo o IBGE, em média, 80% dos produtores nos municípios goianos tem 55 anos ou mais. Já em relação a níveis educacionais, 24% dos produtores tem ensino médio completo, 22% ensino fundamental e 15% com ensino superior completo. Segundo a literatura que versa sobre adoção de tecnologias agropecuárias, maiores níveis educacionais e produtores mais experientes aumentam a probabilidade de adoção de práticas sustentáveis. (Abadi Ghadim & Pannell, 1999; Feder & Umali, 1993; Foster & Ghadim & Pannell, 1999; Yohe e Tol, 2002; Zilberman et al., 2012)

Portanto, quanto maior o nível educacional, experiência dos produtores, acesso à informação, mecanismos de associação e cooperativismo, maior a probabilidade de o município apresentar áreas cultivadas com sistemas agrícolas mais sustentáveis em cenários de mudança climática. Evidências podem ser encontradas nos estudos de Bellow et al. (2012) e Cunha et al. (2015).

As associações e cooperativas são importantes mecanismos de difusão tecnológica, em especial no que diz respeito a conscientização do uso de práticas sustentáveis como SPD. No estado de Goiás, em média, os dados revelam que 22% dos produtores nos municípios goianos estão associado a alguma cooperativa.

Tabela 3 – Estimativas do modelo Logit de determinação da probabilidade de adotar SPD em Goiás – em cenário presente e futuro

Variáveis	Cenário presente (2017)		Cenário RCP 4.5 (2040-2060)	
	Coeficientes	P>z	Coeficientes	P>z
Pessoal Ocupado	0,0017673	0,042	0,0021423	0,021
Terra agricultável	-0,0000697	0,011	-0,0000713	0,013
Menos 25 anos	-5,16465	0,835	15,70142	0,521
Mais de 55 anos	-9,068469	0,791	-1,548143	0,862
Capital	0,0174955	0,002	0,0201705	0,001
Pecuária	0,0000263	0,242	0,000175	0,461
Ensino Méd	-1,672142	0,799	-1,963024	0,775
Ensino Sup.	-3,211961	0,560	5,519639	0,392
Associado	-1,744536	0,442	-0,9388849	0,685
Precipitação	0,0805736	0,075	-0,2590981	0,473
Temperatura	-6,296635	0,662	27,68057	0,091
Temperatura ²	0,1103741	0,696	-0,5749807	0,077
Precipitação ²	-0,0000317	0,079	0,0012492	0,459
Constante	45,5743	0,785	-319,414	0,120
LR chi2(14)	46,21		LR chi2(13)	52,89
Prob > chi2	0,0000		Prob > chi2	0,0000
R2	0,3859		R2	0,4416

Fonte: Resultado da pesquisa

Quanto aos ajustes das estimativas dos condicionantes do SPD nos municípios goianos, o LR chi2 indica que os coeficientes são conjuntamente significativos para explicar a probabilidade da adoção do SPD e o valor da estatística Prob>Chi permite rejeitar a 1% hipótese que todos os coeficientes sejam iguais a zero, ambos ajustes presentes nos dois cenários avaliados no estudo.

O Pseudo R2 revela que 39% da variação da variável dependente (adotar ou não SPD), no cenário presente, pode ser explicado pelas variáveis independentes do modelo. Já para o cenário que são considerados as simulações climáticas o Pseudo R2 se apresenta em 44%.

Quanto a análise dos parâmetros das estimativas nos dois cenários de análise, a quantidade de pessoal empregado nas atividades agropecuárias do estado é positiva e significativa sobre a probabilidade de adoção da técnica sobre os municípios goianos. Embora os parâmetros das variáveis ligados a níveis educacionais não sejam significativos para explicar a adoção de SPD no estado, tal resultado revela a necessidade de capital humano disponível e especializado para a difusão da técnica no estado.

O parâmetro terra agricultável revela um resultado não esperado. Segundo as estimativas do modelo, a disponibilidade de terra agricultável implica em diminuição na

probabilidade de adoção do SPD no estado. Espera-se que com maior disponibilidade de área agricultável, aumenta-se a probabilidade de adoção de SPD. Entretanto, outra interpretação deste resultado pode ser feita, por exemplo, os resultados das estimativas podem estar indicando que, quanto maior a restrição de área agricultável no estado, maior a necessidade de potencializar a produtividade do solo e, portanto, maior inclinação dos produtores goianos em adotar a prática.

Em ambos cenários avaliados, a variável capital é positiva e significativa para explicar a probabilidade de adoção de SPD pelos produtores goianos. Ressalta-se que em cenário de adversidade climática intermediária (RCP 4.5), o efeito do capital sobre a probabilidade de adoção é ainda maior. Podendo concluir que em cenário de mudança climática, as inovações sobre a mecanização e automação das operações agropecuárias é um importante difusor do SPD no estado.

As estimativas do modelo revelam que as variáveis climáticas são condicionantes importantes para a probabilidade da adoção de SPD nas áreas agricultáveis no estado de Goiás, como podem ser observados na significância de seus parâmetros. Tal resultado pode estar apontando que o processo de adoção e difusão de SPD pode estar guardando, em certa medida, um processo de adaptação às mudanças climáticas.

A partir das estimativas dos condicionantes da adoção em Goiás, avaliou-se as diferenças nas despesas produtivas nos municípios com e sem uso do SPD, como observado na Tabela 4.

Na Tabela 4 pode-se observar o efeito tratamento (AET) e o efeito tratamento médio sobre os tratamentos (ATET) que as despesas produtivas na agropecuária goiana com a presença do SPD foram superiores às dos municípios nos quais essa técnica não se faz presente.

As diferenças calculadas são estatisticamente significativas a 1% de probabilidade. Esses resultados indicam que em municípios que apresentam SPD, as despesas produtivas podem chegar até R\$ 58.290,75 reais em níveis de preços de 2017.

Na Tabela 5 pode-se observar que o valor das despesas nos municípios goianos com uso de SPD foi superior ao dos municípios nos quais essa prática não é adotada, tanto no presente quanto na simulação, ao considerar o cenário climático no futuro. Esse resultado indica que os atuais municípios com uso de SPD podem ter uma redução de 12,5% nas despesas produtivas agropecuárias no cenário futuro de mudança climática em relação às despesas produtivas no cenário presente.

Tabela 5 - Impacto dos cenários climáticos sobre o valor médio das despesas agropecuárias nos municípios goianos com e sem uso de SPD, presente e simulação climática futura.

	Valor em R\$
Despesas em áreas s/ SPD	R\$ 25.123,19
Despesas em áreas c/ SPD	R\$ 66.665,81
ATET – em simulação climática	R\$ 58.290,75

Fonte: Dados da pesquisa.

Tais resultados revelam que, nestas condições de análise do estado de Goiás, existe evidências de que SPD pode contribuir com a queda das despesas produtivas das atividades agropecuárias no estado. Contudo, tal resultado não dispensa a necessidade de incentivar o uso da técnica no estado, seja em vista dos benefícios econômicos, seja nos benefícios ambientais que a prática proporciona.

Confirma-se, portanto, que a adoção de SPD tem potencial para melhorar o desempenho agrônomo e produtivo da agropecuária goiana, reduzindo a vulnerabilidade da produção agropecuária do estado às variações do climáticas reveladas pelo exercício das simulações propostas pelo IPCC RCP 4.5.

3.5 Conclusões

Os achados do presente estudo possibilitam concluir que a adoção de SPD em Goiás está sendo condicionada pelas condições socioeconômicas, em especial a disponibilidade de capital humano e mecanização, e climáticas dos municípios. É importante ressaltar que o fato de o padrão histórico de temperatura e precipitação influenciar na escolha dessa prática de gestão de solos fortalece os indícios de sua utilização como medida adaptativa às mudanças climáticas.

Medidas que possam restringir a inclusão de áreas agricultáveis, aumento da disponibilidade de capital humano e apoio a mecanização, bem como a agroindustrialização da produção agropecuária goiana, são fundamentais para a expansão das áreas cultivadas com PSD no estado de Goiás.

O estudo permite concluir, também, que a expansão tem potencial de aumentar a lucratividade agrícola média dos municípios a partir de menos custos e despesas produtivas, tornando os municípios que mantem SPD em suas áreas agricultáveis menos vulnerável ao clima diante de cenários futuros de mudanças climáticas.

Diante dessa comprovação da importância de SPD como medida adaptativa para o estado de Goiás, deve-se disseminar as proposições da técnica ao longo das diversas regiões brasileiras, em especial, as novas fronteiras agrícolas. Torna-se ainda fundamental

criar instituições que estimulem a adoção de SPD, por exemplo, mecanismos que fomentem prêmios pagos ao produtor ou ao município onde a presença de SPD, em outras palavras, a potencialidade de sequestro de carbono promovidos pelo SPD pode representar incremento na renda do produtor por meio do Pagamento de Serviços Ambientais (PSA).

Deve-se ainda fornecer melhores condições para que os produtores optem por financiamentos da prática de SPD que de fato se constituam em benefícios à sua propriedade e produção. Melhorias nos parâmetros de percepção econômica, alinhado a serviços de extensão rural são importantes estratégias de estímulo à adoção da prática SPD no estado de Goiás, garantindo assim uma expansão agroindustrial pautada nas práticas sustentáveis de produção e não vulnerável às mudanças climáticas.

3.6 Referências

BELOW, T. B. et al. Can farmers' adaptation to climate change be explained by socio-economic household level variables? *Global Environmental Change*, v. 22, p. 223-235, 2012.

CUNHA, D. A., COELHO, A. e FÉRES, J. 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.

Feder, G., & Umali, D. L. (1993). The adoption of agricultural innovations: a review. *Technological forecasting and social change*, 43(3-4), 215-239.

Foster, A. D., & Rosenzweig, M. R. (2010). Microeconomics of technology adoption. *Annu. Rev. Econ.*, 2(1), 395-424.

Daryanto, S., Wang, L., & Jacinthe, P. A. (2020). No-till is challenged: Complementary management is crucial to improve its environmental benefits under a changing climate. *Geography and Sustainability*, 1(3), 229-232.

Ghadim, A. K. A., & Pannell, D. J. (1999). A conceptual framework of adoption of an agricultural innovation. *Agricultural economics*, 21(2), 145-154.

Haruna, S. I., & Anderson, S. H. (2022). Influence of no-till cover crop management on soil thermal properties. *Soil Research*, 60(6), 580-589.

Hati, K. M., Jha, P., Dalal, R. C., Jayaraman, S., Dang, Y. P., Kopittke, P. M., ... & Menzies, N. W. (2021). 50 years of continuous no-tillage, stubble retention and nitrogen fertilization enhanced macro-aggregate formation and stabilisation in a Vertisol. *Soil and Tillage Research*, 214, 105163.

Kawa, Nicholas C. "A "Win-Win" for Soil Conservation? How Indiana Row-Crop

Farmers Perceive the Benefits (and Trade-offs) of No-Till Agriculture." *Culture, Agriculture, Food and Environment* 43.1 (2021): 25-35.

Mello, Ivo, et al. "Benefits of conservation agriculture in watershed management: participatory governance to improve the quality of no-till systems in the Paraná 3 Watershed, Brazil." *Agronomy* 11.12 (2021): 2455.

Mendelsohn, R., Nordhaus, W. e Shaw, D. The impact of global warming on agriculture: Ricardian analysis. *The American Economic Review*, v. 84, n. 4, p. 753-771, 1994.

Omara, P., Aula, L., Eickhoff, E. M., Dhillon, J. S., Lynch, T., Wehmeyer, G. B., & Raun, W. (2019). Influence of no-tillage on soil organic carbon, total soil nitrogen, and winter wheat (*Triticum aestivum* L.) grain yield. *International Journal of Agronomy*, 2019, 1-9.

Pires, M. V. e Cunha, D. A. Climate Change and Adaptive Strategies in Brazil: the economic effects of genetic breeding. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 52, n. 4, p. 627-642, 2014

Sainju, Upendra M. "The benefits of the no-till system on soil health and crop yields in dryland cropping systems." *Soil Research* 60.4 (2021): 399-411.

Schembergue, A., Cunha, D. A. D., Carlos, S. D. M., Pires, M. V., & Faria, R. M. (2017). Sistemas Agroflorestais como Estratégia de Adaptação aos Desafios das Mudanças Climáticas no Brasil 2. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 55, 9-30.

Somasundaram, N. K. Sinha, Ram C. Dalal, Rattan Lal, M. Mohanty, A. K. Naorem, K. M. Hati, R. S. Chaudhary, A. K. Biswas, A. K. Patra & S. K. Chaudhari (2020) No-Till Farming and Conservation Agriculture in South Asia – Issues, Challenges, Prospects and Benefits, *Critical Reviews in Plant Sciences*, 39:3, 236-279,

Tiecher, T., Gubiani, E., Santanna, M. A., Veloso, M. G., Calegari, A., Canalli, L. B. D. S., ... & Rheinheimer, D. D. S. (2020). Effect of 26-years of soil tillage systems and winter cover crops on C and N stocks in a Southern Brazilian Oxisol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44.

Veresoglou, SD, Chen, J., Du, X. *et al.* O plantio direto supera o preparo convencional em condições áridas e após a fertilização. *Solo Eco. Deixe* 5 , 137–141 (2023).

YOHE, G. e TOL, R. S. J. Indicators for social and economic coping capacity – moving toward a working definition of adaptive capacity. *Global Environmental Change*, v. 12, n. 1, 25-40, 2002.

Zilberman, D., Zhao, J., & Heiman, A. (2012). Adoption versus adaptation, with emphasis on climate change. *Annu. Rev. Resour. Econ.*, 4(1), 27-53.

5. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O estudo abordou os efeitos da expansão do Sistema de Plantio Direto (SPD) na agropecuária no brasileira, utilizando dados de microrregiões. Os resultados indicaram que a estrutura produtiva, avaliada pela ineficiência persistente, é a principal causa da ineficiência da agropecuária brasileira. Isso significa que fatores relacionados às condições que não variam no tempo contribuem para aumentar a ineficiência na agropecuária do país. Portanto, políticas públicas que abordem essas variáveis não voláteis, como marcos regulatórios, níveis educacionais e qualidade do solo, podem aumentar a eficiência técnica da produção agropecuária brasileira.

Além disso, os resultados demonstraram que a adoção do SPD pode levar a ganhos de produtividade na agropecuária brasileira. A eficiência transiente, que está relacionada às condições que variam com o tempo e afetam a eficiência técnica, indicou que a produção agropecuária pode aumentar em até 12,3% mantendo o volume de insumos constante. Esses efeitos marginais foram maiores em microrregiões com baixa participação do SPD sobre a área agricultável, sugerindo que a expansão do SPD pode resultar em ganhos significativos de produtividade.

A função produção utilizada no estudo apresentou parâmetros em linha com a literatura e demonstrou, com significância estatística, que a expansão do SPD contribuiu para o aumento da eficiência técnica. Os resultados sugerem que, além de alcançar os objetivos ambientais estabelecidos pelo Brasil, o SPD tem contribuído para uma agropecuária mais eficiente do ponto de vista econômico nas diversas microrregiões brasileiras.

Com base nesses resultados, é possível apontar desdobramentos importantes para políticas públicas. Recomenda-se a instituições de políticas que facilitam acesso a crédito direcionado à implementação do SPD em microrregiões com baixa proporção dessa prática. Além disso, campanhas publicitárias e educacionais devem ser realizadas para demonstrar os benefícios econômicos e ambientais proporcionados pelo SPD.

Também é necessário direcionar políticas públicas e investimentos privados para resolver os gargalos estruturais que limitam a eficiência produtiva em regiões tecnicamente atrasadas. Ao mesmo tempo, é fundamental manter os incentivos à adoção de práticas sustentáveis, como o SPD. Os resultados destacam a importância

de investigar as ineficiências relacionadas às condições estruturais da agropecuária brasileira e avaliar o impacto das políticas públicas no processo de adoção do SPD.

Os resultados dos estudos também evidenciam que a adoção do SPD no Brasil está condicionada às condições socioeconômicas e climáticas dos municípios. A influência do padrão histórico de precipitação e temperatura na escolha do SPD reforça a ideia de que essa técnica de manejo agrícola pode estar utilizada como medida adaptativa às mudanças climáticas, ao menos na realidade do estado de Goiás. A expansão do SPD pode aumentar a lucratividade agrícola média dos municípios, reduzindo custos e tornando a produção agropecuária menos vulnerável às adversidades climáticas.

Recomenda-se a disseminação das proposições do SPD em diferentes regiões brasileiras, especialmente nas novas fronteiras agrícolas. É importante criar instituições que estimulem a adoção do SPD, como mecanismos de pagamento de serviços ambientais, prêmio por uso de SPD em áreas agricultáveis que possam recompensar os produtores pelos benefícios do sequestro de carbono. Melhores condições de crédito, acompanhadas de assistência técnica e informação sobre a prática do SPD, são essenciais para incentivar os produtores a adotarem essa técnica sustentável.

Em resumo, os resultados dos estudos indicam que a expansão do Sistema de Plantio Direto no Brasil tem o potencial de aumentar a eficiência técnica, a produtividade e a lucratividade da agropecuária brasileira. Além disso, o SPD pode ser uma medida adaptativa às mudanças climáticas, tornando a produção agropecuária menos vulnerável ao clima. Para aproveitar plenamente os benefícios do SPD, é necessário o apoio de políticas públicas adequadas, investimentos em infraestrutura e mecanismos que incentivem a adoção dessa prática sustentável em todo o país.

É importante ressaltar algumas limitações da pesquisa. As estimativas utilizaram dados agregados que envolve toda a região brasileira, o que pode dificultar ou tirar robustez das estimativas. Neste ponto, é importante estudos que lidem com dados desagregados, a exemplo, microdados a nível fazenda, o que permitiria avaliar o efeito da adoção em vários indicadores de produtividade e eficiência econômica.

Outro ponto para aprofundamento da pesquisa e estudos posteriores é buscar a

avaliação e implicações do SPD para as diferentes realidades locais e fronteiras agrícolas no Brasil, buscando identificar suas condições de adoção e impactos sobre as atividades agropecuárias. Estudos posteriores devem levar em consideração as implicações das condições climáticas sobre a adoção de SPD.

6. RELEVÂNCIA DO ESTUDO

A partir dos resultados desta tese, é possível ressaltar a relevância deste estudo e suas contribuições sociais, que podem ser pontuadas em:

1. Sustentabilidade ambiental: A comprovação de que o avanço do Sistema de Plantio Direto (SPD) promove ganhos econômicos traz uma contribuição significativa para a promoção de práticas agrícolas sustentáveis. Isso incentiva os produtores a adotarem o SPD, reduzindo a degradação do solo, a erosão e o uso excessivo de agroquímicos, o que resulta em benefícios para o meio ambiente e a saúde humana.
2. Eficiência econômica: Os estudos econométricos realizados na tese demonstraram que o SPD contribui para o aumento da eficiência técnica da agropecuária brasileira. Isso significa que os produtores que adotam o SPD podem obter melhores resultados econômicos, o que impacta positivamente a renda dos agricultores e contribui para o desenvolvimento sustentável das áreas rurais.
3. Políticas públicas: As evidências geradas por esta pesquisa fornecem subsídios para a formulação de políticas públicas mais efetivas no sentido de promover o avanço do SPD e incentivar a adoção de práticas sustentáveis de produção agropecuária. Isso pode incluir medidas de incentivo financeiro, capacitação técnica e conscientização ambiental, que beneficiam tanto os agricultores quanto a sociedade como um todo.
4. Segurança alimentar: Aumentar a produção agropecuária de forma sustentável é fundamental para garantir a segurança alimentar da população. Ao comprovar que o SPD promove ganhos econômicos, a pesquisa contribui para o desenvolvimento de estratégias que conciliam a produção de alimentos em larga escala com a conservação dos recursos naturais, permitindo o abastecimento de alimentos de forma mais sustentável e equitativa.
5. Transferência de conhecimento: Os resultados dessa tese podem ser utilizados como base para a disseminação do conhecimento sobre práticas sustentáveis de produção agrícola, especialmente em relação ao SPD. Isso pode ser feito por meio de capacitações, treinamentos e programas de extensão rural, alcançando

não apenas os agricultores, mas também estudantes, pesquisadores e demais agentes envolvidos no setor agropecuário.

Em suma, as contribuições sociais desta tese estão relacionadas à promoção da sustentabilidade ambiental, melhoria da eficiência econômica, direcionamento de políticas públicas mais efetivas, fortalecimento da segurança alimentar e disseminação do conhecimento sobre práticas sustentáveis. Essas contribuições impactam positivamente a sociedade como um todo, buscando conciliar o aumento da produção agropecuária com a conservação do meio ambiente e o bem-estar humano.