O PLANTIO DIRETO E A SUA INFLUÊNCIA NA PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA DO CERRADO BRASILEIRO

Autora: Alícia Cechin
Filiação: Unochapecó
E-mail: alicia_cechin@hotmail.com

Autora: Pablo Miranda Guimarães
Filiação: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)
E-mail: pablomguima@gmail.com

GT12. Impactos socioambientais das novas tecnologias no agronegócio

Resumo
No Brasil, a expansão da agricultura desde meados do século XX foi marcada por dois elementos recorrentes como o aumento da fronteira agrícola e a incorporação de inovações tecnológicas, proporcionando uma elevação da produtividade total dos fatores. O presente estudo tem como objetivo analisar o efeito da adoção do plantio direto sobre a produtividade agrícola no Cerrado brasileiro, utilizando os dados do Censo Agropecuário do IBGE, para os anos de 2006 e 2017. Para atingir esse objetivo, foi estimado um modelo de fronteira estocástica, considerando insumos tradicionais (terra, capital e trabalho), além da incorporação, na fronteira, da área plantada com a tecnologia de plantio direto. Os resultados indicam que o plantio direto exerce influência positiva na produtividade agrícola dos municípios do Cerrado, onde uma elevação em 10% na área plantada com a tecnologia de Plantio Direto aumenta a produção em 0,657%. A Mudança Técnica (*Technical Change*) entre 2006 e 2017 mostra um ganho médio de produtividade de aproximadamente 1,5%. Esses resultados confirmam a importância do plantio direto como uma prática essencial para o aumento da produtividade agrícola e, consequentemente, para o fortalecimento de uma agricultura mais sustentável.
Palavras-chave: Agricultura; Cerrado; Sistema de Plantio Direto; Produtividade; Agricultura de baixo carbono.

Abstract
In Brazil, the expansion of agriculture since the mid-20th century has been marked by two recurring elements: the expansion of the agricultural frontier and the incorporation of technological innovations, providing an increase in total factor productivity. This study aims to analyze the effect of the adoption of no-till farming on agricultural productivity in the Brazilian Cerrado, using data from the IBGE Agricultural Census for the years 2006 and 2017. To achieve this objective, a stochastic frontier model was estimated, considering traditional inputs (land, capital, and labor), in addition to the incorporation, in the frontier, of the area planted with no-till technology. The results indicate that no-till farming has a positive influence on the agricultural productivity of the municipalities of the Cerrado, where a 10% increase in the area planted with No-Till technology increases production by 0.657%. Technical Change between 2006 and 2017 shows an average productivity gain of approximately 1.5%. These results confirm the importance of direct planting as an essential practice for increasing agricultural productivity and, consequently, for strengthening a more sustainable agriculture.
Keywords*: Agriculture; Cerrado; Direct Planting System; Productivity; Low-carbon agriculture.*

1. Introdução

As inovações tecnológicas no setor agroalimentar moderno tem sido uma maneira de amenizar o *déficit* e a insegurança alimentar em todo o mundo (Giannakas, 2014). Essas inovações e avanços são resultados de investimentos em práticas produtivas e de processamento, bem como avanços em pesquisa para novos produtos, novos locais de produção e maneiras de organizar as cadeias de abastecimento (Zilberman et al., 2019).

Historicamente, a agricultura desempenhou um papel significativo no crescimento econômico, e não apenas no Brasil. Segundo Jorgenson (1961), em muitos países, durante o

processo de desenvolvimento econômico, a agricultura foi essencial ao fornecer recursos para investimentos em setores emergentes, liberar mão de obra para outras áreas, contribuir com poupança para a acumulação de capital e garantir alimentos a preços acessíveis para a população. Adicionalmente, Fuglie e Wang (2012) destacam as políticas direcionadas para o crescimento da produtividade agrícola, incluindo investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), bem como ações que geraram incentivos para agricultores, melhoraram a educação rural e expandiram a extensão, bem como favoreceram a infraestrutura.

Segundo Barros (1982), o processo de modernização da agricultura foi sustentado por quatro pilares principais: maior abertura ao comércio internacional, ampla expansão dos programas de crédito rural subsidiado, aumento dos investimentos em pesquisa e extensão rural, e tratamento especial ao setor de insumos e fatores de produção, como tratores, fertilizantes, inseticidas e herbicidas.

Conforme Bragagnolo e Barros (2015) antecipando a necessidade de investimentos que a modernização da agricultura demandaria, o governo tomou para si a responsabilidade de financiar esse processo, implantando, em 1965, o Sistema Nacional de Crédito Rural (SNCR). No contexto da agricultura brasileira, a ampla oferta de crédito público, característica marcante nas décadas de 1960, 1970 e 1980, teria influenciado as decisões de investimento dos produtores rurais (Alves; Araujo, 2002). Dado que o capital era subsidiado e a legislação trabalhista e agrária aumentava o custo da mão de obra, a tecnologia passou a ter um papel fundamental na intensificação da mecanização e na ocupação de novas áreas. No Cerrado, especialmente, a agricultura exigia tecnologias específicas para o clima tropical. Esse desenvolvimento tecnológico foi conduzido com excelência pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), que desempenhou um papel crucial no avanço da agricultura no Brasil (Rezende, 2006).

Permeando essa discussão, tem-se no processo de expansão da agricultura brasileira, desde meados do século passado, dois elementos como forte força motriz: o aumento da fronteira agrícola e as inovações tecnológicas. Adicionalmente, toda essa discussão a respeito dessa elevação da capacidade produtiva ocorre com o destaque para a questão da preservação ambiental (Brandão; Rezende; Marques, 2006; Sano, et al., 2020). A utilização do Sistema de Plantio Direto (SPD) no caso brasileiro aconteceu no final de 1960, aplicando-se em pequenas áreas como forma de estudos acadêmicos sobre o manejo conservacionista do solo (Motter; Almeida, 2015). A adoção dessa tecnologia, estabelecida em áreas propensas à degradação, além de prevenir a degradação, limita a perda de nutrientes e aumenta a produtividade de longo prazo (Assunção, Bragança e Hemsley, 2019). Cruz et. al (2021) destacam que essa tecnologia teve grande desenvolvimento a partir da década de 1990 no Brasil, e já se encontra, atualmente, difundida em diferentes sistemas e regiões bem como em diferentes níveis tecnológicos.

Elucida-se que uma das práticas mais eficiente da agricultura contemporânea para uma produção agropecuária sustentável é o SPD. Esse método se baseia no preparo do solo apenas nas áreas específicas de semeadura ou plantio, na manutenção de uma cobertura vegetal constante no terreno e na variedade de espécies por meio da rotação e/ou associação de culturas, com intervalos mínimos entre colheita ou plantio. Utilizando o SPD, os sistemas agrícolas requerem menos infraestrutura e mão de obra, consomem menos energia derivada de combustíveis fósseis, diminuem a erosão do solo, necessitam de menores quantidades de corretivos e fertilizantes e promovem o manejo integrado de pragas, doenças e ervas daninhas (Embrapa, 2022).

Nas regiões do bioma Cerrado, conforme Silva et al. (2022), o SPD começou a desenvolver-se na década de 1990 com a chegada de imigrantes da região Sul do Brasil, no qual possuíam experiência com esse sistema de plantio, além da adaptação da soja nessas

áreas. Porém, o desenvolvimento e estabelecimento desse sistema só foi possível dado o trabalho conjunto de agricultores, pesquisadores, fabricantes de sementes bem como de implementos agrícolas, objetivando reverter o acelerado processo de degradação do solo e da água observado em grandes áreas de produção de alimentos no país. Ademais, tem-se os incentivos governamentais para estimular a adoção dessas práticas sustentáveis, já que o SPD também contribui para a redução da emissão de gases do efeito estufa (Vilas Boas et al., 2007; Silva et al., 2011).

Ao abordar essas dinâmicas produtivas e a capacidade de produção que permita atender as demandas por alimentos, fibras e energia a baixo custo, o setor agropecuário brasileiro destaca-se por convergir interesses e potencialidades. Essas novas tecnologias e investimentos P&D agrícola possibilitam impulsionar a produtividade do setor agropecuário (Alston et al., 2009), mitigando diferenças regionais, bem como possibilitando que benefícios sejam compartilhados entre inovadores, agricultores e consumidores. Dado esse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar o efeito da utilização do plantio direto na produtividade agrícola do bioma Cerrado do Brasil. Para responder a esse objetivo, será utilizado um modelo de fronteira estocástica, e os dados utilizados os Censos Agropecuários de 2006 e 2017, disponibilizado pela Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

O estudo está organizado em quatro seções. Na primeira faz-se a introdução a temática abordada, posteriormente, na segunda seção destaca-se o panorama geral do agronegócio no Brasil. Na terceira seção é demonstrada a metodologia aplicada no estudo e na quarta seção os resultados encontrados no estudo e na última seção abordam-se as considerações finais. Por fim, elencam-se as referências bibliográficas.

2. Panorama Geral do Agronegócio Brasileiro

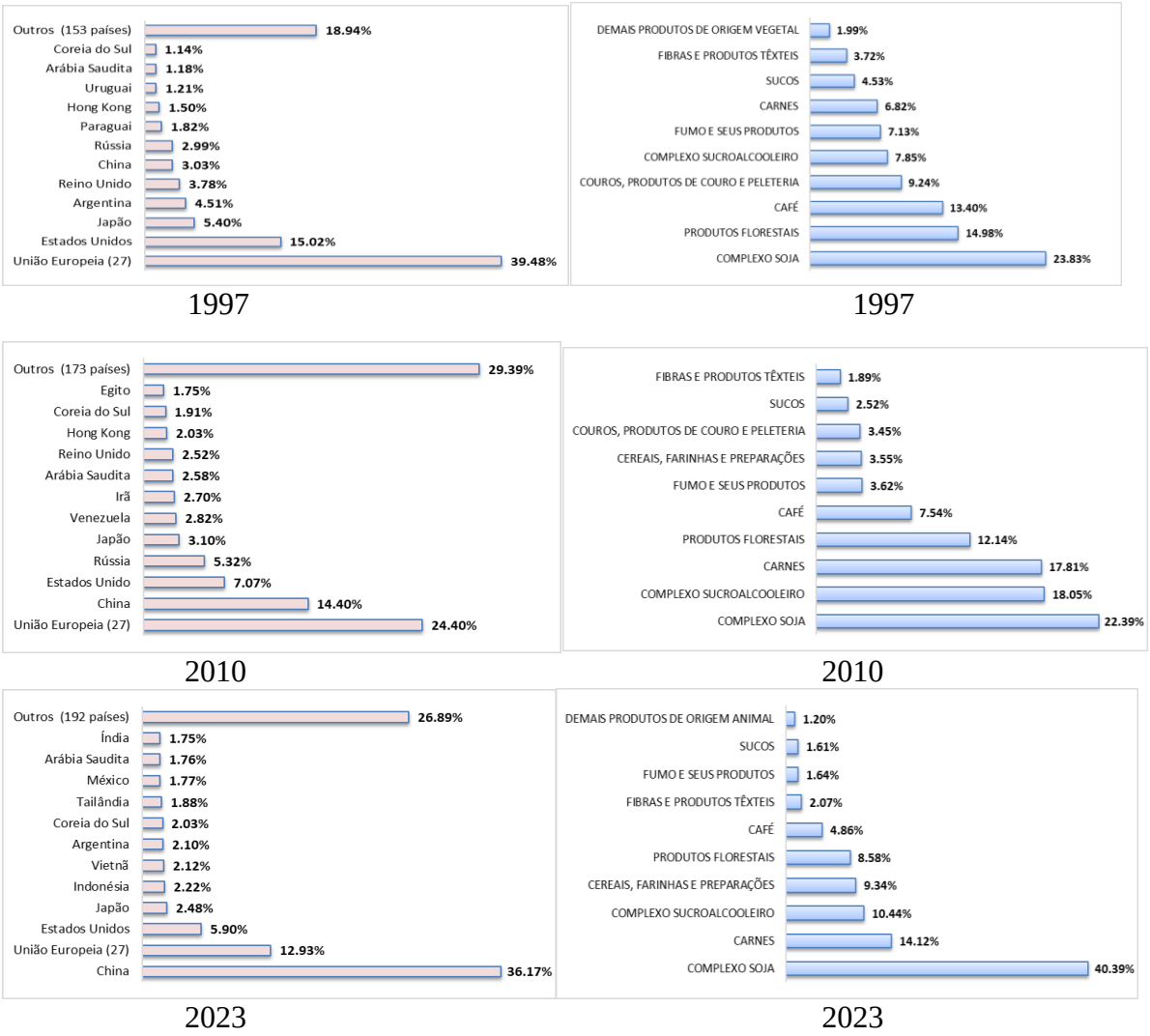
O agronegócio pode ser entendido como uma cadeia produtiva que abrange desde a fabricação de insumos, passando pela produção nas propriedades rurais e pela transformação dos alimentos, até o consumo final, conforme elencam Contini et al., 2006. Essa cadeia inclui todos os serviços de apoio, como pesquisa e assistência técnica, processamento, transporte, transações, crédito, exportação, serviços portuários, distribuidores, bolsas de valores e, por fim, o consumidor. O valor agregado do agronegócio transita por cinco mercados principais: o de insumos, o de produção, o de processamento, o de distribuição e o mercado do consumidor final.

No cenário nacional do agronegócio, de acordo com Brum (2004), a soja se destaca como a principal cultura de produção e exportação do Brasil. Nos últimos anos, essa cultura tem apresentado altos índices de crescimento, impulsionados pela expansão do mercado internacional de produtos derivados do complexo da soja, como o grão, o farelo e o óleo de soja. A introdução da soja foi fundamental para o desenvolvimento do conceito de agronegócio no Brasil, tanto pelo volume físico produzido quanto pelo valor monetário gerado. Graças à sua vasta extensão territorial, o Brasil tem grande potencial para aumentar a produção, melhorar a técnica e promover pesquisas, sempre levando em conta a sustentabilidade nesse processo.

A Figura 1 apresenta os principais destinos das exportações brasileira bem como os principais produtos exportados, nos anos de 1997, 2010 e 2023, respectivamente. Elenca-se a importância do complexo da soja ao longo dos anos na pauta exportadora brasileira do agronegócio onde no final da década de 90, representava aproximadamente 24%, passando para mais de 40% em 2023. Outro ponto importante a salientar é relacionado aos parceiros comerciais, na década de 80/90, os membros da União Europeia (EU) e os Estados Unidos eram os principais destinos das exportações do agro, entretanto com a maior abertura comercial e a entrada da China em 2001 da Organização Mundial do Comércio (OMC), desenha-se um novo

cenário, sendo o principal destino dessas exportações, e em 2023, representando aproximadamente 36%. Destaca-se também a relevância que outros países asiáticos assumem na compra dos produtos oriundos do agronegócio brasileiro.

Figura 1 – Principais destinos e produtos exportados pelo agronegócio brasileiro em 1997, 2010 e 2023



Fonte: Elaboração do autor a partir de dados do Agrostat/Mapa (2024)

De acordo com Gazzoni e Dall'agnol (2018), a soja foi introduzida comercialmente no Brasil na década de 1960, no estado do Rio Grande do Sul, e, ao longo dos últimos cinquenta anos, sua produção se expandiu para todas as regiões do país, com destaque para a região Centro-Oeste, especialmente o estado de Mato Grosso, e mais recentemente para o Norte e Nordeste, na região conhecida como Matopiba, que abrange os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, com a participação de muitos pequenos produtores.

Vários fatores explicam essa expansão no mercado brasileiro, como o aumento da cotação da soja no mercado internacional a partir dos anos 1970; a mecanização total da cultura; o desenvolvimento de uma rede de pesquisa voltada para a soja; a substituição de gorduras animais por óleos vegetais; uma demanda crescente por soja na produção de ração para suínos e aves; políticas agrícolas de incentivo à produção, especialmente em relação ao crédito; uma

rede privada eficiente de fornecimento de insumos, como sementes, corretivos, inoculantes, fertilizantes e agrotóxicos; e a presença de agricultores empreendedores, com alta capacidade gerencial (Gazzoni; Dall'agnol, 2018).

As culturas passaram por melhorias genéticas com o objetivo de aumentar a adaptação, a produtividade e a resistência a pragas e doenças. Novas tecnologias foram desenvolvidas para o manejo da fertilidade do solo, controle fitossanitário, irrigação e maquinários mais eficientes. Na década de 1970, foi introduzido o sistema de plantio direto, cuja adoção cresceu significativamente a partir dos anos 1990, iniciando-se pela Região Sul do Brasil e, posteriormente, se expandindo para o Cerrado. Esse crescimento deve às características do sistema, que combina práticas conservacionistas com baixo consumo de energia, proporcionando maior retorno econômico. O plantio direto dispensa o preparo anual do solo, mantendo o coberto por resíduos culturais e evitando significativamente a erosão. Junto com os avanços da ciência agronômica nesse período, o sistema de plantio direto foi fundamental para aumentar a competitividade do agro no Brasil, conforme elencam De Sá, Santos Junior e Franz (2008).

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (2024), o Cerrado é o segundo maior bioma da América do Sul, abrangendo uma área de 2.036.448 km², o que corresponde a aproximadamente 22% do território brasileiro. Sua área contínua se estende pelos estados de Goiás (GO), Tocantins (TO), Mato Grosso (MT), Mato Grosso do Sul (MS), Minas Gerais (MG), Bahia (BA), Maranhão (MA), Piauí (PI), Rondônia (RO), Paraná (PR), São Paulo (SP) e pelo Distrito Federal (DF), além de possuir pequenas áreas nos estados do Amapá (AP), Roraima (RR) e Amazonas (AM). Nesse território, estão localizadas as nascentes das três maiores bacias hidrográficas da América do Sul — Amazônica/Tocantins, São Francisco e Prata — o que confere ao bioma um grande potencial aquífero, a favor da biodiversidade.

A Tabela 1, apresenta a participação na pauta exportadora do agronegócio brasileiro em 1997, 2010 e 2023 dos principais estados que compõem o bioma do Cerrado. Salienta-se que em 1997, os estados em destaque representavam 43,59% dessas exportações, sendo liderado por SP. Com o passar dos anos, o MT vai aumentando sua participação, saindo da terceira posição no final dos anos 90, para a segunda posição em 2010, e anos depois, assume a liderança.

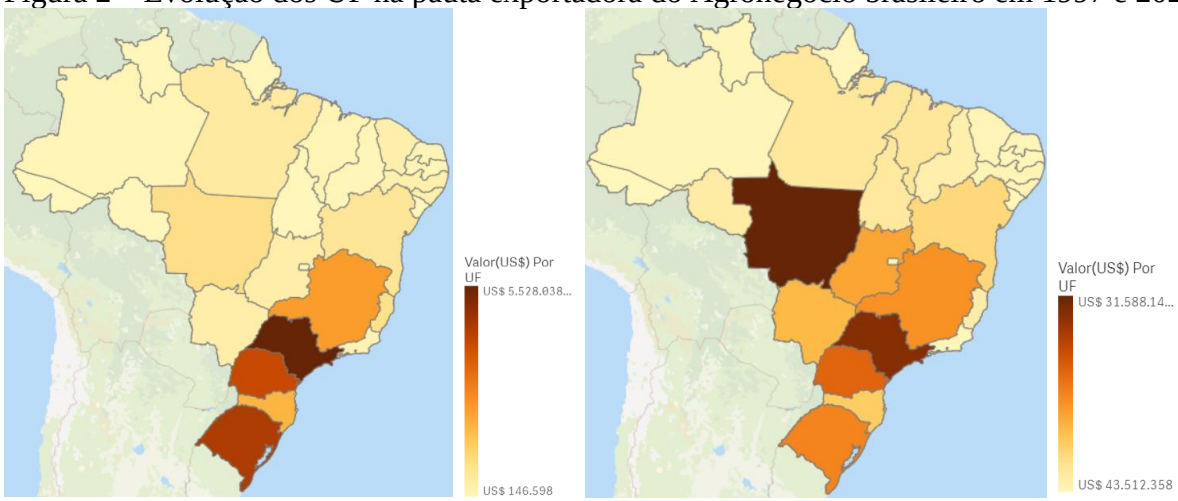
Tabela 1 – Participação de UF selecionados nas Exportações do agronegócio brasileiro em 1997, 2010 e 2023

Ano	1997		2010			2023		
UF	Valor(US$)	Participação %	UF	Valor(US$)	Participação %	UF	Valor(US$)	Participação %
SAO PAULO	5.528.038.739	23.68%	SAO PAULO	18.923.445.953	24.77%	MATO GROSSO	31.588.144.480	18.97%
MINAS GERAIS	2.304.807.014	9.87%	MATO GROSSO	8.309.923.060	10.88%	SAO PAULO	28.675.592.194	17.22%
MATO GROSSO	877.053.953	3.76%	MINAS GERAIS	7.603.099.770	9.95%	MINAS GERAIS	14.369.388.891	8.63%
BAHIA	645.182.120	2.76%	BAHIA	3.730.206.883	4.88%	GOIAS	12.179.130.391	7.32%
MATO GROSSO DO SUL	338.549.621	1.45%	GOIAS	3.015.172.093	3.95%	MATO GROSSO DO SUL	10.043.660.139	6.03%
GOIAS	334.871.723	1.43%	MATO GROSSO DO SUL	2.559.715.611	3.35%	BAHIA	6.046.132.943	3.63%
MARANHAO	93.605.579	0.40%	MARANHAO	440.960.603	0.58%	MARANHAO	3.578.035.786	2.15%
PIAUI	45.801.473	0.20%	TOCANTINS	343.505.816	0.45%	TOCANTINS	2.978.516.905	1.79%
TOCANTINS	5.419.876	0.02%	DISTRITO FEDERAL	127.192.965	0.17%	PIAUI	1.665.911.864	1.00%
DISTRITO FEDERAL	1.251.048	0.01%	PIAUI	122.473.738	0.16%	DISTRITO FEDERAL	316.272.815	0.19%
Total	10.174.581.146	43.59%		45.175.696.492	59.13%		111.440.786.408	66.94%

Fonte: Elaboração do autor a partir de dados do Agrostat/Mapa (2024)

Os dados de 2023 demonstram que os UF em destaque representaram aproximadamente 67% das exportações do agro no Brasil, sendo que apenas o MT foi responsável por 18,97%. Os mapas a seguir, Figura 2, demonstram essa relevância que o MT assume na pauta exportadora brasileira.

Figura 2 – Evolução dos UF na pauta exportadora do Agronegócio brasileiro em 1997 e 2023



1997 2023

Fonte: Elaboração do autor a partir de dados do Agrostat/Mapa (2024)

Os detalhes dessa evolução podem ser observados nas Tabelas 2, 3 e 4, que trazem a evolução da Área Plantada, da produtividade e da produção, respectivamente, conforme os dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2024). Os primeiros dados que se tem disponível é o da safra 1976/77 que demonstra que o Brasil tinha uma área plantada total de 37.318,9 mil hectares, com destaque para as regiões Sul e Nordeste. Com o passar dos anos, principalmente no início os anos 2000, a região Centro-Oeste, que contemplam os maiores estados do bioma Cerrado ganha maior expressividade. Na última safra encerrada, 2022/2023 o Brasil possuía uma área plantada total de 78.546,6 mil hectares, onde 44,32% dessa área pertence a região Centro-Oeste (21.210,6 mil hectares no MT), 28,55% no Sul, 12,13% no Nordeste (com destaque para a Bahia), 8,90% no Sudeste e 6,10% no Norte.

Tabela 2 - Série Histórica de Área Plantada Total por Unidades da Federação em mil hectares

UF/REGIÃO	1976/77	1986/87	1996/97	2006/07	2010/11	2016/17	2022/23
NORTE	**343.2**	**716.0**	**1.359.8**	**1.661.7**	**1.702.2**	**2.934.9**	**4.791.3**
TO	-	-	217.8	535.9	698.5	1.376.1	2.013.3
NORDESTE	**8.940.8**	**9.036.6**	**7.924.6**	**8.027.9**	**8.750.9**	**7.852.4**	**9.528.5**
MA	1.282.5	1.601.6	1.422.8	1.357.0	1.583.5	1.565.3	1.900.0
PI	626.7	1.181.4	1.024.9	917.2	1.146.2	1.476.8	1.925.6
BA	921.7	1.909.0	2.216.9	2.813.1	3.074.9	3.013.8	3.757.3
CENTRO-OESTE	**4.387.2**	**7.875.4**	**7.239.9**	**14.229.1**	**16.898.1**	**24.963.6**	**34.812.1**
MT	2.238.2	2.267.5	3.200.9	7.712.4	9.638.8	15.119.1	21.210.6
MS	123.5	2.376.5	1.584.4	2.815.2	2.965.4	4.441.3	6.320.4
GO	2.022.6	3.158.5	2.382.0	3.577.6	4.173.4	5.241.5	7.102.6
DF	2.9	72.9	72.6	123.9	120.5	161.7	178.5
SUDESTE	**6.746.1**	**7.060.6**	**5.173.4**	**4.995.8**	**4.797.3**	**5.486.0**	**6.987.2**
MG	3.310.5	3.424.9	2.732.5	2.950.1	2.868.1	3.372.7	4.342.9
SP	2.979.6	3.296.9	2.289.9	1.963.4	1.861.4	2.084.5	2.616.8
SUL	**16.901.6**	**17.373.5**	**14.877.1**	**17.298.1**	**17.724.1**	**19.652.4**	**22.427.5**
BRASIL	**37.318.9**	**42.062.1**	**36.574.8**	**46.212.6**	**49.872.6**	**60.889.3**	**78.546.6**

Fonte: Elaboração do autor a partir de dados da Conab (2024)

Outra informação importante para analisar é o avanço da produtividade geral brasileira, ponto chave de discussão do presente estudo, onde o Brasil passa de 1.258 kg/ha na safra de 1976/77 para 2.851 kg/ha em 2006/07 e atualmente, apresenta em média a produtividade de 4.072 kg/ha. Conforme elencam De Sá, Santos Junior e Franz (2008), embora a área cultivada tenha aumentado nos últimos anos com a inserção de amplas áreas do Cerrado ao processo produtivo, os aumentos em produção (Tabela 3) e produtividade (Tabela 2) seguiram taxas

muito maiores. Esse feito pode ser atribuído ao conhecimento gerado pela pesquisa agropecuária durante esse período e pelas políticas públicas adotadas para a região.

Tabela 3 - Série Histórica de Produtividade Geral por Unidades da Federação em kg/ha

UF/REGIÃO	1976/77	1986/87	1996/97	2006/07	2010/11	2016/17	2022/23
NORTE	**1.248**	**1.229**	**1.532**	**2.164**	**2.709**	**3.246**	**3.500**
TO	-	-	2.217	2.552	3.164	3.301	3.781
NORDESTE	**494**	**294**	**851**	**1.224**	**1.828**	**2.319**	**3.114**
MA	1.113	530	1.030	1.694	2.089	3.061	3.875
PI	593	291	625	945	1.974	2.469	3.531
BA	499	325	1.277	1.854	2.387	2.681	3.567
CENTRO-OESTE	**1.270**	**1.802**	**2.778**	**3.071**	**3.359**	**4.164**	**4.667**
MT	1.361	1.818	2.617	3.046	3.211	4.113	4.761
MS	684	1.735	2.828	2.987	3.077	4.229	4.438
GO	1.206	1.833	2.948	3.155	3.864	4.229	4.593
DF	1.207	2.133	3.203	4.071	4.640	5.017	4.587
SUDESTE	**1.336**	**1.779**	**2.466**	**3.266**	**3.688**	**4.221**	**4.328**
MG	1.142	1.586	2.430	3.322	3.713	4.175	4.306
SP	1.589	1.986	2.537	3.240	3.715	4.327	4.381
SUL	**1.628**	**1.995**	**2.469**	**3.371**	**3.822**	**4.264**	**3.597**
BRASIL	**1.258**	**1.544**	**2.144**	**2.851**	**3.264**	**3.919**	**4.072**

Fonte: Elaboração do autor a partir de dados da Conab (2024)

Em relação à evolução da produção de grãos, os dados iniciais da série, referentes a 1976/77, indicam que o Brasil produziu aproximadamente 46,9 mil toneladas de grãos. Na safra de 2022/23, esse número saltou para 319.811,7 mil toneladas, o que representa um aumento de aproximadamente 7 vezes em 47 anos. Ademais, cabe salientar que a região Centro-Oeste, representam em torno de 50% da produção brasileira de grãos atualmente, com destaque mais uma vez ao estado do Mato Grosso.

Tabela 4 - Série Histórica de Produção de Grãos por Unidades da Federação em mil toneladas

UF/REGIÃO	1976/77	Part. (%)	1986/87	Part. (%)	1996/97	Part. (%)	2006/07	Part. (%)	2010/11	Part. (%)	2016/17	Part. (%)	2022/23	Part. (%)
NORTE	**428.4**		**880.1**		**2.083.7**		**3.595.4**		**4.610.6**		**9.527.6**		**16.768.0**	
TO	-	-	-	-	482.9	23.18%	1.367.5	38.03%	2.210.0	47.93%	4.543.1	47.68%	7.612.9	45.40%
NORDESTE	**4.419.9**		**2.661.0**		**6.746.6**		**9.828.4**		**15.997.9**		**18.206.1**		**29.673.0**	
MA	1.427.3	32.29%	848.3	31.88%	1.464.8	21.71%	2.298.3	23.38%	3.308.5	20.68%	4.790.7	26.31%	7.361.8	24.81%
PI	371.4	8.40%	343.3	12.90%	640.3	9.49%	867.1	8.82%	2.262.3	14.14%	3.645.5	20.02%	6.799.7	22.92%
BA	460.0	10.41%	621.1	23.34%	2.830.7	41.96%	5.215.8	53.07%	7.340.8	45.89%	8.081.1	44.39%	13.401.9	45.17%
CENTRO-OESTE	**5.572.7**		**14.192.2**		**20.113.0**		**43.698.9**		**56.759.1**		**103.942.5**		**162.468.4**	
MT	3.045.7	54.65%	4.123.4	29.05%	8.377.3	41.65%	23.495.6	53.77%	30.949.1	54.53%	62.182.3	59.82%	100.980.2	62.15%
MS	84.5	1.52%	4.123.7	29.06%	4.480.1	22.27%	8.410.2	19.25%	9.124.9	16.08%	18.784.2	18.07%	28.050.4	17.27%
GO	2.439.0	43.77%	5.789.6	40.79%	7.023.1	34.92%	11.288.8	25.83%	16.126.0	28.41%	22.164.8	21.32%	32.619.1	20.08%
DF	3.5	0.06%	155.5	1.10%	232.5	1.16%	504.3	1.15%	559.1	0.99%	811.2	0.78%	818.7	0.50%
SUDESTE	**9.012.6**		**12.560.9**		**12.755.7**		**16.314.5**		**17.693.1**		**23.157.8**		**30.238.4**	
MG	3.780.5	41.95%	5.433.1	43.25%	6.639.9	52.05%	9.799.4	60.07%	10.650.4	60.20%	14.080.0	60.80%	18.702.4	61.85%
SP	4.733.6	52.52%	6.547.7	120.51%	5.809.0	87.49%	6.361.5	64.92%	6.915.6	64.93%	9.019.1	64.06%	11.465.2	61.30%
SUL	**27.509.5**		**34.655.1**		**36.727.7**		**58.313.4**		**67.742.3**		**83.788.6**		**80.663.9**	
BRASIL	**46.943.1**		**64.949.3**		**78.426.7**		**131.750.6**		**162.803.0**		**238.622.7**		**319.811.7**	

Fonte: Elaboração do autor a partir de dados da Conab (2024)

Conforme destacado por Bacha (2012), o processo de desenvolvimento econômico envolve transformações estruturais diretamente ligadas ao setor agropecuário (agricultura e pecuária). Entre essas transformações, destacam-se o aumento da produtividade do trabalho, a redução das disparidades de produtividade entre os setores econômicos, a reconfiguração da estrutura de produção e renda, além das mudanças no uso da força de trabalho. O autor também sublinha a importância estratégica da agropecuária no desenvolvimento econômico, ao fornecer alimentos à população, gerar capital necessário para expandir o setor não agrícola, disponibilizar mão de obra para a diversificação econômica, fornecer divisões para a aquisição de insumos e bens de capital essencial, e promover a formação de um mercado consumidor para produtos do setor não agrícola.

Outro ponto importante a salientar, quando se trata de evolução agrícola, exportações, e Cerrado no Brasil é o meio ambiente. É notória a preocupação mundial com a conservação dos recursos naturais, num cenário atual, as atenções mundiais têm se voltado para o Brasil, principalmente com relação à preservação da Amazônia. Conforme elencam Manzatto et al. (2020), o sistema de plantio direto é crucial para a criação de uma agricultura sustentável e rentável nos trópicos, além de auxiliar na redução do aquecimento global. A ampliação do uso do plantio direto de 2010 a 2017 resultou em uma captura de carbono equivalente a aproximadamente 155% do objetivo definido pelo Plano ABC, estratégia também denominada como Agricultura de Baixa Emissão de Carbono. Ela possui como princípios básicos a adoção de tecnologias agropecuárias que aumentem a resiliência, os ganhos econômicos e ainda contribuam com uma baixa emissão e/ou a mitigação de gases de efeito estufa.

O estudo de Manzatto et al. (2020), trazem resultados importantes no que se refere ao SPD e meio ambiente. A Tabela 4 traz os resultados, onde considerando as áreas de adoção estimadas pelo Censo Agropecuário do IBGE de 2006 e 2017 referente ao plantio direto na palha, bem como um conjunto de metodologias de estimação baseada na literatura, os autores estimam que a expansão do SPD observada no período de 2010 a 2017 totalizou 12,72 milhões de hectares, com isso, superando em 59% a meta de 8,0 milhões de hectares que consta no Plano ABC para 2020. Ademais, a estimativa de mitigação para o SPD foi de 23,28 milhões de $Mg\ CO_2$eq, que corresponde a 114% da meta do Plano ABC, que é de 16 a 20 milhões de $Mg\ CO_2$.

Tabela 4 - Área de expansão de SPD e estimativa de mitigação de emissões

Ano	Área de plantio com soja (em milhões de ha)	Área de SPD relativizada (em milhões de ha)	Área de adoção (em milhões de ha)	Expansão acumulada (em milhões de ha)	Mitigação de emissões (milhões Mg CO_2eq)
2010	23.34	20.16	-	-	-
2011	24.03	21.09	0.94	0.94	1.72
2012	25.09	22.38	1.29	2.23	4.08
2013	27.95	25.34	2.96	5.19	9.49
2014	30.31	27.93	2.59	7.78	14.23
2015	32.21	30.17	2.24	10.01	18.32
2016	33.31	31.74	1.57	11.58	21.20
2017	33.98	32.88	1.14	12.72	23.28
Total			**12.72**		**23.28**

Fonte: Adaptado a partir de Manzatto et al. (2020)

Para Carvalho e Freitas (2008), o SPD representa um marco importante na trajetória da agricultura tropical, oferecendo uma alternativa mais sustentável e eficiente para os produtores. Ao minimizar a degradação do solo e otimizar o uso de recursos naturais, essa prática contribui para a segurança alimentar e a preservação do meio ambiente. Além disso, o PD tem promovido o desenvolvimento de comunidades rurais e a geração de renda, demonstrando seu potencial para impulsionar o desenvolvimento socioeconômico de regiões inteiras.

Além disso, os autores destacam os benefícios indiretos da adoção do SPD para a sociedade, tais como: i) Intensificação da agricultura dentro da fronteira atual reduz a pressão sobre a abertura de novas áreas; ii) Substancial redução nas cargas de sedimentos e da poluição por defensivos e fertilizantes agrícolas nas águas superficiais; iii) Maior recarregamento de aquíferos e redução de enchentes; iv) Maior fornecimento invernal de alimentos e abrigo para a fauna; v) Incremento na biodiversidade na agricultura comparada com o plantio convencional e vi) Sequestro de carbono e redução das emissões de dióxido de carbono.

3. Metodologia

A busca pela previsão de produtividade e de eficiência é ampla na literatura, de modo a terem modelos paramétricos e não paramétricos que permitem a estabelecer, de forma empírica, os índices (O'Donnell, 2018). Uma das maneiras pelas quais pode-se realizar essa estimação, tendo como referência a Teoria de Produção, ocorre por meio da identificação das distintas possibilidades de produção e as razões que ocasionam os déficits produtivos (Farrell, 1957).

Dentre as modelagens paramétricas, tem-se a Fronteira Estocástica, uma derivação da Fronteira Determinística e que incorpora ao modelo, além de uma variação não observada no termo de erro, também contempla choques e erros de mensuração (O'Donnell, 2018). Por meio deste modelo, faz-se possível controlar a heterocedasticadade do termo de erro, inserindo um componente estocástico neste (Kumbhakar, et al., 2015).

De acordo com Battese e Coelli (1995) para uma determinada tecnologia, a função de fronteira de produção define o menor conjunto de insumos necessário para gerar quantidades fixas de diversos produtos (ótica dos insumos). Alternativamente, a fronteira de produção pode representar o nível máximo de produção possível dado um conjunto fixo de insumos (ótica dos produtos). Desvios em relação a essa fronteira podem ocorrer devido a ineficiências produtivas, assim como a fatores que afetam a produção de forma indireta, não necessariamente pelos insumos, mas por outros meios. Salienta-se que a explicação detalhada do modelo pode ser encontrada no estudo de Scherer (2014).

A estimação da função de produção a ser estabelecida deve seguir uma forma funcional adequada, tendo como uma das opções amplamente utilizadas na literatura a Função Cobb-Douglas. Essa forma funcional, além de cumprir os pressupostos de monotonicidade e quasiconcavidade, também tem um indicativo direto das elasticidades, além de ser parcimonioso (O'Donnell, 2018).

$$y_{it} = f(X_{it}; \beta) e^{v_{it} - u_{it}} \quad (1)$$

Deste modo, X_{it} caracterizam os insumos de produção da fronteira na $i-ésima$ unidade de análise no tempo t; $v_{it} \sim i.i.d$ é uma variação aleatória do termo de erro, onde obtém potencial efeitos dos erros de medida e choques exógenos sobre as unidades de análise, bem como com qualquer outro tipo de ruído; u_{it} é um termo de erro aleatório associado com efeitos relacionados a ineficiência técnica na produção. A agregação das densidades dos termos de erro u e v são definidos por ε, sendo $v \sim N(0, \sigma_v^2)$ e $u \sim N^+(0, \sigma_u^2)$ e independentes.

A análise de fronteira estocástica pode principalmente ser direcionada para previsão dos efeitos de ineficiência. Aigner, Lovell e Schimidt (1977) afirmam que a lógica por trás dessa especificação é de que o processo de produção é sujeito a dois distúrbios economicamente aleatórios e distintos, com diferentes características. A medida mais comum orientada para a essa previsão é baseada na razão do produto observado em relação ao produto potencial, aquele que fica sobre a fronteira (Coelli et al., 2005).

Para estabelecer o processo de estimação em um modelo de Fronteira Estocástica, é fundamental especificar as distribuições dos termos de erro (Aigner, Lovell e Schmidt, 1977). Comumente, assume-se uma distribuição half-normal para o termo de erro u_{it}, de forma que a unidade produtiva apresente uma ineficiência que é positiva ou nula, refletindo o limite da fronteira de produção.

A estimação do modelo em questão é realizada via Máxima Verossimilhança, que busca maximizar a densidade conjunta dos termos u e v sobre os dados observados (O'Donnell, 2018)

$$\ln L = \sum_{k=1}^{n} \ln \left(\sum \frac{1}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} e^{-0{,}5\left(\frac{y_i - x_i'\beta + \sigma_u |U_{ir}|}{\sigma_v}\right)^2} \right) \quad (2)$$

Com a estimação dos parâmetros, é possível calcular a eficiência técnica das unidades produtivas representativas. De acordo com a definição dada pela fronteira de produção, a eficiência técnica é expressa como a razão entre o produto observado e o produto potencial. Conforme equação 3, temos a captura da ineficiência técnica, que é inversamente proporcional ao termo u_{it}:

$$TE_i = \frac{q_{it}}{e(x_{it};\beta)e(v_{it})} = e(-u_{it}) \quad (3)$$

Para o modelo em questão no presente estudo, será definida, via forma funcional Cobb-Douglas:

$$Y_{i,t} = \beta_0 + \sum_{k=1}^{4} \beta_k X_{i,k} + \alpha_0 t + \sum_{h=1}^{9} \gamma_i FS_i + v_i - u_i \quad (4)$$

Onde $Y_{i,t}$ representa o logaritmo natural do valor bruto de produção do $i-$ésimo município no tempo t; X_k *e* X_j representam o logaritmo natural dos fatores de produção k,j (Terra; Trabalho; Capital e Plantio Direto (razão entre Área Plantada com a tecnologia de Plantio Direto pela Área Total Plantada)); FS_i representa as dummies para os estados federais pertencentes ao bioma do cerrado. Ademais, o v_i é o termo de erro normal e o u_i é o termo de erro normal-truncado entendido como medida de ineficiência técnica no modelo, ou seja, é incluído para captar fatores não relacionados diretamente aqueles que seriam insumos de produção, mas que mesmo assim exercem efeito sobre a eficiência desses estados. Assume-se uma distribuição half-normal para o termo de ineficiência ($u \sim i.i.d\ N^{+}(0, \sigma_u)$). A estimação dos parâmetros foram via Máxima Verossimilhança.

Para os insumos e produtos, serão utilizados os dados consolidados do Censo Agropecuário de 2006 e 2017 para cada município da região do cerrado no Brasil, a fim de criar uma fronteira única para toda a área.

No termo de eficiência técnica (u_{it}), busca-se captar os efeitos de eficiência, ao controlar a heterocedasticidade, inclui-se variáveis de Escolaridade e Assistência Técnica (ATER). A primeira variável é definida como sendo o número de propriedades que tem o gestor com uma formação de bacharel. Em relação à ATER, é definido como sendo o percentual de área agricultável do município que é assistida pela Assistência Técnica:

$$u_{i,t} = \delta_0 + \delta_1 EscolaridadeSuperior_{i,t} + \delta_1 AssistênciaTécnica_{i,t} + w_{i,t} \quad (5)$$

Cabe salientar que a medida proposta pelo modelo se refere à (in)eficiência, a qual está diretamente vinculada à função de produção especificada. Isso significa que, mesmo que uma determinada região/município seja considerada altamente produtiva com base em indicadores como a relação entre toneladas colhidas por área, essa mesma região pode não estar utilizando os recursos disponíveis da melhor maneira possível, caracterizando, assim, uma unidade ineficiente.

4. Resultados e Discussão

Conforme destacado pela literatura, o termo de inovação tecnológica é inserido na fronteira por ser este um deslocador da fronteira de possibilidade de produção, conforme destacado por Chambers e Sheng (2022), ao trabalharem com a tecnologia de sementes geneticamente modificadas. A fronteira estocástica, definida pela equação, como os dados empilhados foi estimado para todos os municípios do Cerrado. A Tabela 5 mostra todos os parâmetros estimados por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), conforme Modelo 1, e os parâmetros estimados pelo Método de Máxima Verossimilhança (MLE), sendo o Modelo 2 sem o controle de ineficiência, enquanto o Modelo 3 possui o controle de ineficiência. Todos os três modelos possuem a presença das dummies estaduais, para que haja um controle da heterogeneidade espacial.

A especificação do controle de heterocedasticidade do termo de erro faz-se necessário por meio de um teste com os valores de *Log-Likelihood* dos modelos estimados via MQO e os estimados por MLE, cuja hipótese nula é a ausência de ineficiência técnica. Desta forma, estima-se os modelos sem controle e os modelos de fronteira, de modo que a realização do teste provê a modelagem de maior aderência. Com isso, conclui-se, após a realização do teste, que o Modelo III é o que melhor apresenta os resultados. O teste de Wald mostra que o Modelo III se ajusta melhor que os Modelos I e II, rejeitando assim a hipótese nula, a 1%, de insignificância das variáveis.

A Tabela 5 mostra os coeficientes da fronteira estocástica, destacando na presente análise o Modelo III. Neste modelo, inicialmente destaca-se a significância estatística dos coeficientes de insumos da fronteira e da Mudança Técnica (*Technical Change*, (t)). Nesta modelagem, conforme esperado, observamos um retorno constante de escala ($\beta_{terra} + \beta_{trabalho} + \beta_{capital} = 1$), contudo cabe destacar que além de deslocador da fronteira estocástica, o coeficiente do Plantio Direto também é uma composição do β_{terra}.

Este valor positivo e significativo dos coeficientes indicam uma relação crescente do produto maior do que a dos insumos ao longo dos 11 anos. Dado que há uma queda no número de trabalhadores e no montante de capital nesse intervalo, então esse é um ponto que corrobora com a análise.

O modelo III mostra que um aumento em 10% do trabalho expandirá, na média, o produto em 2,3%. Essa mesma expansão de 10% caso fosse realizado com capital geraria uma elevação do produto em 5,44%, mostrando que a mecanização é relevante para a agricultura do Cerrado, seja pela facilidade por conta da geografia, seja pelas principais lavouras do bioma, soja, milho e algodão, que somam aproximadamente três-quartos de toda a área plantada (IBGE, 2017).

Ao analisar os insumos Terra, uma elevação de 10% na área plantada, na média, eleva a produção em aproximadamente 1,48%. Contudo é importante destacar a questão da expansão da área agricultável e suas restrições. Esse ponto requer uma discussão seja do ponto de vista ambiental, seja pela restrição de áreas. Guimarães (2021) destaca a questão da recuperação de pastagens para que seja possível estabelecer uma elevação da fronteira agropecuária, visando com isso aumentar a área produtiva, minimizar eventuais expansões sobre matas nativas e beneficiar a captura de carbono.

Quanto ao coeficiente de Plantio Direto, observou-se um ganho positivo na adoção da tecnologia, porém um ganho pequeno. Uma elevação em 10% na área plantada com a tecnologia de Plantio Direto aumenta a produção em 0,657%. Esse baixo coeficiente pode ser favorecido pela baixa adesão de produtores nessa tecnologia que, na média, representa cerca de 10% da área plantada. Essa tecnologia é uma tecnologia poupadora de insumo, ao dispensar um maior emprego de capital e trabalho, conforme destacado por Assunção, Bragança e Hemsley (2019).

Tabela 5 – Resultados das estimações

Variáveis	*Modelo I*	*Modelo II*	*Modelo III*
Terra	0.107***	0.107***	0.148***
	(0.0202)	(0.0201)	(0.0197)
Capital	0.626***	0.626***	0.544***
	(0.0170)	(0.0169)	(0.0177)
Trabalho	0.182***	0.182***	0.230***
	(0.0188)	(0.0188)	(0.0186)
PD	0.0712***	0.0712***	0.0657***
	(0.00431)	(0.00430)	(0.00416)
t	0.193***	0.193***	0.179***
	(0.0265)	(0.0264)	(0.0276)
MA	-0.145	-0.145	-0.0365
	(0.128)	(0.128)	(0.123)
GO	-0.157	-0.157	-0.147
	(0.122)	(0.122)	(0.115)
MG	-0.242**	-0.242**	-0.210*
	(0.121)	(0.121)	(0.113)
TO	-0.545***	-0.545***	-0.468***
	(0.127)	(0.127)	(0.120)
SP	0.179	0.179	0.112
	(0.125)	(0.124)	(0.117)
PI	-0.380***	-0.380***	-0.258**
	(0.134)	(0.134)	(0.130)
BA	-0.454***	-0.454***	-0.329**
	(0.138)	(0.137)	(0.134)
MS	-0.0797	-0.0797	-0.182
	(0.133)	(0.133)	(0.124)
MT	0.00599	0.00599	-0.00230
	(0.128)	(0.128)	(0.120)

	Ineficiência					
p$EscolaridadeSuperior$						-9.811***
						(2.145)
p$AssistênciaTécnica$						-3.236***
						(0.406)
$Constante$	4.890***	4.891***	-12.61	-0.960***	4.800***	0.359**
	(0.213)	(0.269)	(225.7)	(0.0281)	(0.203)	(0.149)
$Observações$	2,528	2,528	2,528	2,528	2,528	2,528

Fonte: dados da pesquisa
Erros padrões robustos entre parênteses; *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

A Technical Change (t) entre 2006 e 2017 mostra um ganho médio de produtividade de aproximadamente 1,5%[1] Isso mostra que a produção de 2017 foi cerca de 17,9% mais eficiente do que a de 2006. Ou seja, ao afirmar maior eficiência, destaca-se que é possível ter um ganho de produção de 17,9% sem a necessidade de uma elevação da quantidade de insumos.

Quando são realizadas as análises de eficiência técnica (TE), na média do bioma, observa-se uma pequena elevação entre 2006 e 2017, sendo em 2006 $TE_{2006} = 0{,}7401$, enquanto em 2017 o indicador foi $TE_{2017} = 0{,}7825$.

Quanto aos resultados do controle de heterocedasticidade de termo de ineficiência técnica, observa-se o modelo III da Tabela 5. As variáveis de controle da ineficiência apresentaram significância estatística e seus sinais esperado de acordo a literatura.

Cabe destacar que essas variáveis são referentes ao número de propriedades cujo gestor possui ensino superior e a variável de Assistência Técnica é o percentual da área do município que é assistida pelo serviço. Ou seja, em ambos os casos uma elevação destas levam a uma diminuição do termo de ineficiência, ou seja, uma elevação dessas variáveis torna a unidade produtiva representativa mais eficiente.

Quanto a seus efeitos marginais, os valores negativos obtidos ($E(u)_{Sup} = -1{,}5853$ e $E(u)_{ATER} = -0{,}5229$) mostram o impacto marginal do aumento dessas variáveis em relação à diminuição da média do termo de ineficiência.

Nesse sentido, conforme elenca Guimarães (2021), o desenvolvimento e a consolidação do bioma Cerrado como uma região produtora principalmente de milho e soja, pode ser caracterizado por três momentos distintos. Primeiramente a disponibilidade de terras, a migração de mão de obra que foi para aqueles estados, e políticas públicas bem elaboradas. Posterior a isso, elucida-se a importância dos avanços na mecanização e demais contribuições tecnológicas, e finalmente, pesquisas que permitiram melhoria nas técnicas de manejo bem como no avanço genético permitindo a melhoria da produtividade agrícola brasileira.

Considerações Finais

O presente estudo teve como objetivo analisar o efeito da utilização do plantio direto na produtividade agrícola do bioma Cerrado no Brasil. Para responder a esse objetivo, foi utilizado

[1] $\sqrt[11]{1+t}$

um modelo de fronteira estocástica bem como os dados dos Censos Agropecuários de 2006 e 2017, disponibilizado pelo IBGE. Os resultados demonstraram que Sistema de Plantio Direto tem um efeito positivo, embora moderado, sobre a produtividade agrícola no bioma Cerrado, onde o aumento de 10% na área plantada com SPD resultou em um crescimento de 0,657% na produção. Esse coeficiente relativamente baixo pode ser explicado pela ainda limitada adesão dos produtores ao SPD, que, em média, representa apenas 10% da área plantada.

Cabe salientar que o SPD se destaca como uma tecnologia poupadora de insumos, dispensando a necessidade de maior emprego de capital e trabalho, o que aponta para seu grande potencial de expansão e ganhos de sustentabilidade. Além disso, os resultados deste estudo reforçam a importância da mecanização para a agricultura no Cerrado, com um aumento de 10% no capital gerando um aumento de 5,44% na produção. O bioma, por suas características geográficas, favorece a mecanização, especialmente em culturas predominantes como soja, milho e algodão, que representam três quartos da área plantada. Isso indica que a modernização tecnológica, com foco no uso de máquinas e insumos adequados, continua a ser um pilar central para o aumento da produtividade.

Em relação às limitações, o estudo se restringe aos dados dos Censos Agropecuários de 2006 e 2017, que, embora sejam fontes específicas, apresentam uma defasagem temporal. Isso limita a capacidade de captar mudanças mais recentes na adoção de tecnologias como o SPD. Para pesquisas futuras, sugere-se a aplicação deste modelo a outros biomas e regiões do Brasil, a fim de verificar se os resultados se mantêm em diferentes contextos. Por fim, os resultados deste estudo evidenciam a importância da continuidade dos investimentos em tecnologias agrícolas, como o SPD, e em práticas que aliam a sustentabilidade ao aumento de produtividade. A modernização da agricultura, com apoio da mecanização e da recuperação de áreas degradadas, será fundamental para o futuro da agricultura no Cerrado, garantindo ganhos de eficiência e minimizando os impactos ambientais.

Referências

Assunção, J.; Bragança, A.; Hemsley, P. Geographic heterogeneity and technology adoption: evidence from Brazil. Land Economics, v. 95, n. 4, p. 599-616, 2019.

Aigner, D.; Lovell, C.; Schmidt, P. Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. Journal of econometrics, v. 6, n. 1, p. 21-37, 1977.

Alston, J. M; Beddow, J. M.; Pardey, P. G. (2009). Agricultural research, productivity, and food prices in the long run. Science, 325 (5945), 1209–1210.

Alves, A. F.; Araújo, P. F. C. Investimentos na agricultura brasileira: estimações alternativas de 1980 a 1998. Revista de Economia e Sociologia Rural, Brasília, v. 40, n. 4, p. 755-768, 2002.

Bacha, C. J. C. Economia e política agrícola no Brasil. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2012.

Barros, J. R. M. Política e desenvolvimento agrícola no Brasil. São Paulo: Instituto de Pesquisas Econômicas da Universidade de São Paulo, 1982, 36p. (IPE/USP, Texto para discussão, 16/82).

Battese, G.; Coelli, T. (1995). A model for technical inefficiency effects in a stochastic frontier production function for panel data. Empir. Econ.(20), 325–332.

Bragagnolo, C.; Barros, G.S.C. Impactos dinâmicos dos fatores de produção e da produtividade sobre a função de produção agrícola. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 53, p. 31-50, 2015.

Brandão, A.S.P; Rezende, G. C.; Marques, R.W. Crescimento agrícola no período 1999/2004: a explosão da soja e da pecuária bovina e seu impacto sobre o meio ambiente. Economia Aplicada, v. 10, p. 249-266, 2006.

Brum, A. L. Economia da soja: história e futuro – uma visão desde o Rio Grande do Sul. Ijuí: Ceema, 2004.

Carvalho, E.J.M; De Freitas, P. L. Plantio direto: caminho para a agricultura sustentável. 2008.

Censo agropecuário 2006. Brasília. IBGE. (2006).

Censo agropecuário 2017. Brasília. IBGE. (2017).

Chambers, R. G.; Sheng, Y. Genetically Modified Organisms and Agricultural Productivity. 2022.

Coelli, T. J.; Rao, D. S. P.; O'Donnell, C. J.; Battese, G. E. (2005). An introduction to efficiency and productivity analysis. Springer Science & Business Media.

Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). Série Histórica das Safras. Disponível em:<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: 05 de out. de 2024.

Contini, E. et al. Evolução recente e tendências do agronegócio. Revista de Política Agrícola, v. 15, n. 1, p. 5-28, 2006.

Cruz, J. et. Al. Plantio Direto, 2021. Disponível em: < https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/manejo-do-solo-e-adubacao/sistema-de-manejo-do-solo/plantio-direto>. Acesso em: 20 de março de 2024.

De Sá, M. A. C.; Santos Junior, J.; Franz, C.A.B. Manejo e conservação do solo e da água em sistema de plantio direto no Cerrado. Embrapa Cerrados. Documentos, v. 258, 2009.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Sistema Plantio Direto, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/sistema-plantio-direto>. Acesso em: 20 de março de 2024.

Estatísticas de Comercio Exterior do Agronegócio Brasileiro – AGROSTAT. Exportação/Importação. Disponível em:< https://mapa-indicadores.agricultura.gov.br/publico/extensions/Agrostat/Agrostat.html>. Acesso em: 01 de out. de 2024.

Farrell, M. J. The measurement of productive efficiency. Journal of the royal statistical society: series A (General), v. 120, n. 3, p. 253-281, 1957.

Fuglie, K.O.; Wang, S. L. New evidence points to robust but uneven productivity growth in global agriculture. Amber Waves, v. 10, n. 3, p. 1, 2012.

Gazzoni, D. L.; Dall'Agnol, A. A saga da soja: de 1050 a.C. a 2050 d.C. Brasília: Embrapa, 2018.

Giannakas, K. (Ed.). (2014). Innovation and policy against hunger in a water-constrained world. Washington, DC: Food Safety, Security, and Defense: Focus on Food and Water. IBGE. (2006).

Guimarães, P. M. Two Essays About Agriculture Production in the Brazilian Cerrado. 2021.

Jorgenson, D. W. The development of a dual economy. Economic Journal, London, v. 71, n. 282, p. 309-334, 1961.

Kumbhakar, S. C.; Wang, H.; Horncastle, A.P. A practitioner's guide to stochastic frontier analysis using Stata. Cambridge University Press, 2015.

Manzatto, C. V. et al. Mitigação das emissões de gases de efeitos estufa pela adoção das tecnologias do Plano ABC: estimativas parciais. 2020.

Ministério do Meio Ambiente. Cerrado. Disponível em:< https://antigo.mma.gov.br/biomas/cerrado.html>. Acesso em: 09 de out. de 2024.

Motter, P; Almeida, H. G. Plantio direto: a tecnologia que revolucionou a agricultura brasileira. Foz do Iguaçu: Parque Itaipu, 2015.

O'Donnell, C. J. et al. Productivity and efficiency analysis. Singapore: Springer Singapore, 2018.

Rezende, G. C. Políticas trabalhista, fundiária e de crédito agrícola no Brasil: uma avaliação crítica. Revista de Economia e Sociologia Rural, Piracicaba, v. 44, n.1, p. 47-78, 2006.

SANO, E. E. et al. Características gerais da paisagem do Cerrado. 2020.

Silva, Mariana Aguiar et al. Sistema de plantio direto e rotação de culturas no Cerrado. Research, Society and Development, v. 11, n. 13, p. e376111335568-e376111335568, 2022.

Silva, J. C.; Wendling, B.; Camargo, R.; Mendonça, L.; Freitas, M. (2011). Análise comparativa entre os sistemas de preparo do solo: aspectos técnicos e econômicos. Enciclopédia Biosfera,7(12)

Scherer, C. Eficiência Produtiva Regional da Agricultura Brasileira: Uma Análise de Fronteira Estocástica. Dissertação de Mestrado (Desenvolvimento Econômico) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Sociais Aplicadas, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Econômico. Curitiba, p.62, 2014.

Zilberman, D.; Lu, L.; Reardon, T. (2019). Innovation-induced food supply chain design. Food Policy, 83 , 289–297.

Vilas Boas, A. A.; Garcia, D. F. B. (2007). Plantio direto nas culturas de milho e soja no município do chapadão do céu-go e os impactos para o meio ambiente.