

Efeitos de choques tecnológicos na produtividade agrícola e emissões de gases: o caso do Cerrado

RESUMO – O agronegócio brasileiro desempenha papel crucial na economia do País, mas enfrenta desafios de sustentabilidade na produção, como as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e disparidades regionais, uma vez que a produção é concentrada. Para compreender melhor os impactos das mudanças tecnológicas, é essencial considerar as interconexões entre setores e regiões, utilizando, por exemplo, modelos de equilíbrio geral computável (EGC). O presente estudo analisa os efeitos dessas mudanças na economia e nas emissões de GEE no Brasil, utilizando o modelo de EGC PAEG-Cerrado, com foco no Centro-Oeste e na agricultura. Assim, o objetivo foi a construção de um ferramental analítico denominado PAEG-Cerrado, capaz de fornecer informações para embasar decisões de desenvolvimento sustentável do setor agropecuário, examinando os impactos dos ganhos de produtividade em termos econômicos e ambientais. Com o aumento da produtividade da terra, observou-se crescimento positivo no PIB e bem-estar das famílias no Cerrado. Ambientalmente, houve aumento das emissões de CO₂-equivalente, especialmente na agricultura em alguns estados. No Mato Grosso, o aumento da produtividade resultou em redução das emissões em setores específicos, principalmente os relacionados à atividade pecuária. De qualquer forma, destaca-se a necessidade de políticas para produção mais sustentável. Iniciativas como a integração lavoura-pecuária-floresta e incentivos à pesquisa e inovação são algumas das alternativas.

Termos para indexação: agronegócio, choques de produtividade, emissões de gases de efeito estufa, modelos EGC.

Effects of technological shocks on agricultural productivity and gas emissions: the case of Cerrado

ABSTRACT – Brazilian agribusiness plays a crucial role in the country's economy, but faces sustainability challenges in production, such as greenhouse gas (GHG) emissions, and regional disparities due to production concentration. To better understand the impacts of technological changes, it is essential to consider the interconnections between sectors and regions, using, for example, computable general equilibrium (CGE) models. This study analyzes the effects of these changes on the economy and GHG emissions in Brazil, using the CGE model of PAEG-Cerrado, with a focus on the Midwestern region of Brazil and agriculture. Thus, the goal of this study was to build an analytical tool called PAEG-Cerrado to provide information to support decisions for sustainable development in the agricultural sector, examining the impacts of productivity gains in both economic and environmental terms. With increased land productivity, there has been growth in GDP and in the

Marcos Spínola Nazareth 

Centro Universitário de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.

E-mail: marcos.snazareth@univicos.com.br

Rayan Wolf 

Purdue University, Agricultural Economics Department, West Lafayette, IN, United States of America. E-mail: rayanwolf@gmail.com

Cícero Zanetti de Lima 

Fundação Getúlio Vargas, Centro de Estudos do Agronegócio, São Paulo, SP, Brasil.

E-mail: cicero.lima@fgv.br

Angelo Costa Gurgel 

Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, SP, Brasil.

E-mail: angelo.gurgel@fgv.br

Michelle Márcia Viana Martins 

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Economia, Viçosa, MG, Brasil. E-mail: michelle.viana@ufv.br

Geraldo Bueno Martha Junior 

Embrapa Agricultura Digital e PPG-PSE (FEM-Unicamp), Campinas, SP, Brasil. E-mail: geraldo.martha@embrapa.br

 Autor correspondente

Recebido em
25/06/2023

Aprovado em
12/09/2024

Publicado em
29/05/2025

Como citar

NAZARETH, M.S.; WOLF, R.; LIMA, C.Z. de; GURGEL, A.C.; MARTINS, M.M.V.; MARTHA JUNIOR, G.B. Efeitos de choques tecnológicos na produtividade agrícola e emissões de gases: o caso do Cerrado. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v.42, e27557, 2025. DOI: <https://doi.org/10.35977/0104-1096.cct2025.v42.27557>.

well-being of families in the Cerrado area. Regarding the environment, there has been an increase in CO₂-equivalent emissions, especially in agriculture in some states. In the state of Mato Grosso, the productivity increase resulted in lower emissions in specific sectors, particularly those related to livestock activity. In any case, the need for policies to promote more sustainable production is highlighted. Initiatives such as integrated crop-livestock-forestry systems and incentives for research and innovation are some of the alternatives.

Index terms: agribusiness, productivity shocks, greenhouse gas emissions, CGE models.

INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, ocorreram transformações significativas na economia global, impulsionando, em muitos casos, o crescimento da produtividade e da renda, além de proporcionar a redução na intensidade de recursos naturais não renováveis e das emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas à produção e consumo de bens e serviços (Stark et al., 2022; Gianetti & Ferreira Filho, 2023). Essas mudanças, no entanto, não foram uniformes entre países, setores e regiões (Amann et al., 2018). No contexto brasileiro, por exemplo, estudos regionais têm revelado uma notável heterogeneidade no desenvolvimento agrícola do País (Arias et al., 2017; Martinelli et al., 2017; Silva et al., 2017; Trigueiro et al., 2020). A extensa área territorial do Brasil abrange regiões com características climáticas, tipos de solo, relevo e níveis socioeconômicos distintos. Somado a isso, disparidades em infraestrutura e acesso a recursos, tecnologias e serviços relacionados à agricultura também influenciam essa diversidade (Buainain et al., 2019; Silva et al., 2019; Gomes et al., 2022).

Apesar das disparidades regionais, o agronegócio brasileiro, que contempla insumos, produção agropecuária, agroindústria e serviços, representa uma parcela significativa do Produto Interno Bruto (PIB) do País. De 2020 a 2022, o agronegócio brasileiro representou, em média, 26,1% do PIB nacional (Cepea, 2023), com perspectivas positivas de expansão da produção

e das exportações (Brasil, 2021; OECD-FAO, 2021).

Ao longo das últimas décadas, a região do Cerrado se estabeleceu como um dos principais polos de produção agropecuária no Brasil, com reconhecimento mundial (Arias et al., 2017). Até a década de 1970, a agricultura nessa região era limitada pela baixa produtividade e pela falta de tecnologias adequadas às condições locais (Arias et al., 2017). A produção de soja no Cerrado, por exemplo, representava menos de 7% da produção nacional na década de 1970 (Pereira et al., 2012), mas, em 2021, já ultrapassava 51% da produção brasileira (Rudorff & Risso, 2022). Atualmente, o Cerrado se destaca com expressivas porcentagens da produção nacional, sendo responsável por 35% do rebanho bovino, 52% da produção de cana-de-açúcar, 54% do milho e 96% do algodão em 2018 (Bolfe et al., 2020). Também merece destaque o aumento significativo da produção de leite, feijão, sorgo, mandioca e trigo (Pereira et al., 2012; Bolfe et al., 2020).

Paralelamente ao crescimento das cadeias produtivas agropecuárias no Cerrado, houve um aumento considerável das atividades agrícolas e pecuárias no Brasil, com taxas de crescimento da produção de 310,4% e 245,6% respectivamente, no período de 1985 a 2017.

Por um lado, os ganhos de produtividade observados nas últimas décadas na agricultura brasileira proporcionaram um efeito poupa-terra que permitiu que milhões de hectares fossem poupados do cultivo (Martha Jr. & Alves, 2018). Em razão desses ganhos tecnológicos e de políticas públicas setoriais e mais amplas, cerca de 66% da cobertura vegetal nativa do Brasil, em 2021, encontrava-se preservada (Mapbiomas, 2023).

O incremento da produção agrícola a taxas mais elevadas do que as da demanda possibilitou a redução no preço dos alimentos no período de 1975 a 2011, o que beneficiou em especial a população mais pobre (Pereira et al., 2012).

Por outro lado, a expansão da área agrícola representou uma perda de cobertura vegetal no País de 102 milhões de hectares (Mha), dos quais 71 Mha correspondem a vegetação nativa (Souza Jr. et al., 2020). Os biomas Amazônia e Cerrado foram os mais afetados, tendo enfrentado uma pressão significativa sobre sua cobertura vegetal natural (Souza Jr. et al., 2020). Ademais, é importante ressaltar que o desmatamento no Brasil, bem como outras formas de emissões de GEE nos países industrializados e em desenvolvimento, contribui para as mudanças climáticas globais, em virtude do aumento das emissões de GEE (World Bank Group, 2021). O Brasil ocupa a quinta posição entre os maiores emissores de GEE, respondendo por aproximadamente 3,2% das emissões totais mundiais, ficando atrás apenas da China, Estados Unidos, Rússia e Índia. Em 2020, as mudanças no uso da terra e as atividades agropecuárias no País foram responsáveis por 73% das emissões nacionais de GEE (Análise..., 2021).

Diante da extensão e importância do setor agropecuário no Brasil, algumas estratégias têm sido adotadas para promover a sustentabilidade na agricultura, como investimentos no desenvolvimento tecnológico que visam aprimorar as atividades do agronegócio de forma mais eficiente e sustentável (Rocha et al., 2019; Mores et al., 2022). No entanto, identificar os efeitos econômicos dessas iniciativas de maneira regionalizada e seus transbordamentos para outras regiões no País e no mundo têm sido um desafio empírico (Souza et al., 2023). Uma abordagem utilizada para capturar os efeitos das políticas sobre variáveis macroeconômicas, bem-estar e emissões de GEE é o uso de modelos de equilíbrio geral computável (EGC), que permitem considerar explicitamente as interdependências setoriais e regionais.

Considerando a importância do agronegócio para a economia brasileira, com destaque para a produção no Cerrado, é objetivo deste estudo analisar os efeitos da implementação de choques

tecnológicos, medidos em termos de mudanças na produtividade, sobre a dinâmica produtiva do Brasil e as emissões de GEE. Para isso, foi desenvolvido um novo modelo denominado PAEG-Cerrado, por meio de desagregações de matrizes de insumo-produto e dados de pesquisas agrícolas incorporadas ao modelo de EGC típico PAEG/GTAP. Esse modelo permitiu uma análise mais precisa e abrangente dos impactos das tecnologias agrícolas nas diferentes regiões do País, contribuindo para uma tomada de decisão mais detalhada em relação ao desenvolvimento sustentável do setor agropecuário.

Isso posto, a estrutura deste texto está organizada em quatro seções, a partir desta introdução. A próxima seção apresenta o modelo utilizado com os fundamentos teóricos, procedimentos adotados, base de dados e formulação dos cenários para a realização dos choques tecnológicos. Em seguida, a seção três discute os resultados, analisando os impactos econômicos e de emissões para cada setor e região. A última seção conclui o artigo com algumas considerações finais e insights principais.

MODELO

Os modelos de EGC são considerados uma ferramenta essencial para compreender a economia como um sistema interdependente, no qual mudanças em qualquer componente repercutem em todos os outros (Pearson et al., 2014). Esses modelos fornecem uma estrutura analítica para examinar as interações entre diferentes setores econômicos, agentes e regiões, permitindo a análise dos impactos das mudanças em um componente econômico sobre o sistema como um todo (Odior & Arinze, 2022). Essa classe de modelos tem como objetivo principal fornecer informações aos agentes tomadores de decisão sobre os impactos potenciais de alterações de políticas econômicas de toda ordem (Devarajan & Robinson, 2005).

Diferentemente da análise parcial, que se concentra em bens ou serviços específicos, os modelos EGC utilizam dados agregados para simular como as condições econômicas são afetadas por mudanças de políticas ou outros fatores. Esses modelos descrevem todas as transações entre os diferentes agentes econômicos (setores, governo e famílias) por meio de equações que refletem o comportamento de oferta e demanda desses diferentes agentes, e com base em um banco de dados consistente com essas equações (Matsumoto & Fujimori, 2019), construído com base nas relações estatísticas providas por matrizes de insumo-produto e de contabilidade social.

Quanto a isso, um modelo de EGC flexível e regionalmente desagregado apresenta um potencial promissor como instrumento para formulação e avaliação de políticas e choques tecnológicos (Souza et al., 2023). A capacidade de desagregação regional desses modelos permite investigar os impactos das políticas com um nível de detalhe local, o que é especialmente relevante em um país como o Brasil, que apresenta diversas disparidades regionais em múltiplas dimensões da sustentabilidade.

De modo geral, os modelos EGC assumem a estrutura de uma economia concorrencial *walrasiana*, considerando a interação entre três agentes principais: firmas, famílias e governos, que produzem, consomem bens, serviços e fatores, além de realizarem transações no mercado nacional e internacional. No caso do Projeto de Análise de Equilíbrio Geral da Economia Brasileira (PAEG), o modelo e a base de dados estão acoplados ao modelo GTAPinGAMS.

Características e pressuposições do modelo PAEG

O PAEG, assim como o GTAP, é um modelo econômico global, multirregional e multissetorial. Uma das suas principais características é a sua

capacidade de analisar a economia brasileira de forma regional, diferentemente do GTAP¹, que considera o Brasil como uma única região. O PAEG foi desenvolvido originalmente para individualizar as cinco principais regiões brasileiras (Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul), levando em consideração a estrutura de demanda intermediária e a final, com setores selecionados e despesas públicas e privadas com bens e serviços para cada uma dessas regiões (Teixeira et al., 2013)².

No nível microeconômico, o PAEG adota pressuposições clássicas sobre o comportamento dos agentes econômicos. Os consumidores representativos e o governo buscam maximizar seu bem-estar e estão sujeitos a restrições orçamentárias, enquanto os setores produtivos combinam insumos intermediários e fatores primários de produção para minimizar os custos, dada a tecnologia disponível. As preferências são assumidas como contínuas e convexas, o que resulta em funções de demanda contínuas e homogêneas de grau zero em relação aos preços. Por sua vez, a tecnologia é representada por uma função de produção com rendimentos constantes de escala, o que implica que o lucro econômico das empresas é zero no equilíbrio, considerando mercados perfeitamente competitivos³.

A sintaxe do algoritmo utilizada pelo PAEG é o MPSGE (*modeling programming system for general equilibrium*), desenvolvido por Rutherford (1999). Esse algoritmo representa um modelo de EGC por meio de blocos de equações que descrevem funções de produção, demanda e restrições específicas. Com base nesses blocos, o MPSGE gera equações algébricas que

¹ Para uma descrição completa do GTAP, ver Hertel (1997).

² O PAEG é completamente integrado ao GTAP, que inclui os fluxos de transações econômicas globais por meio da compatibilização de matrizes de insumo-produto (MIPs) nacionais. Isso significa que o PAEG é capaz de capturar os impactos de choques globais na economia brasileira de forma regional e, inversamente, os impactos de choques nas regiões brasileiras sobre outras regiões do mundo.

³ As regras de fechamento microeconômicas e macroeconômicas do modelo PAEG estão bem documentadas em Teixeira et al. (2013).

são processadas pelo software GAMS⁴. Essas equações representam as condições de lucro zero na produção, equilíbrio entre oferta e demanda e definição de renda para os consumidores do modelo, resultando em um problema de complementaridade mista (*mixed complementary problem* – MCP).

Desse modo, estabelecem-se três condições essenciais para a consistência dos dados: equilíbrio nos mercados (oferta igual à demanda para todos os bens e fatores), equilíbrio na renda líquida e equilíbrio na renda exaurida pelas unidades produtivas.

A dotação total de fatores de produção não se altera, mas os fatores podem se movimentar entre os setores dentro de uma mesma região, exceto o fator terra, que é específico para os setores agropecuários e florestais, sendo plenamente empregados na produção de toda a economia. Assim, assume-se ausência de desemprego e flexibilidade nos preços dos fatores.

Como o modelo é estático e propõe-se, então, a análises econômicas de estática comparativa, assume-se que o volume de investimento observado na base de dados inicial permanece fixo, e não há mudanças endógenas na renda líquida de fatores externos na conta financeira do balanço de pagamentos. Isso significa que a taxa de câmbio real no modelo é flexível e que mudanças em PIB desconsideram possíveis alterações em fluxos de investimentos, e logo não podem ser traduzidas em taxas de crescimento em períodos futuros, dada a natureza estática do modelo (Teixeira et al., 2013).

Logo, tais pressupostos macroeconômicos implicam uma economia modelada pelo lado real, com equilíbrio de médio prazo, dado que não há restrição de mobilidade e uso dos fatores, embora não haja aumento de estoque, o que não permite, como dito, inferências sobre trajetória de

crescimento do PIB nem sobre inflação e política monetária. Assim, os choques no sistema alteram preços relativos de todos os bens e serviços considerados e, por consequência, a decisão de alocação de recursos dos agentes para um vetor de produção mais eficiente.

Modelo PAEG-Cerrado

O modelo PAEG oferece flexibilidade para realizar diferentes desagregações setoriais e regionais. Com isso, foi realizada uma modificação no modelo PAEG/GTAPinGAMS, mantendo as premissas citadas acima, a fim de incorporar uma nova desagregação regional, setorial e de fatores de produção por meio da matriz insumo-produto adaptada, chamada MIP-Cerrado. Essa matriz foi compatibilizada com as de outros 16 países/regiões do modelo e com a base de dados do GTAP, mantendo o modelo como um EGC global. Em seguida, estimou-se o equilíbrio de preços e quantidades em todos os mercados representados, preparando-se o modelo para a implementação de choques tecnológicos que medem alterações de produtividade. Esses choques foram utilizados para simular diferentes cenários de políticas públicas e avaliar seus impactos econômicos e nas emissões de GEE.

FONTE E TRATAMENTO DOS DADOS

A base de dados do GTAP é abrangente e inclui matrizes insumo-produto para 140 países/regiões, incluindo o Brasil, e 57 setores econômicos. Essas informações são complementadas com a consideração de cinco fatores produtivos: capital, trabalho qualificado, trabalho não qualificado, terra e recursos naturais. Para o escopo deste estudo, foram destacados quatro estados brasileiros: Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais, agrupados doravante sob a designação de Cerrado, enquanto as demais unidades da

⁴ Nos trabalhos de Rutherford & Paltsev (2000), Gurgel (2002) e Teixeira et al. (2013), tem-se a exposição completa das equações comportamentais e de equilíbrio do modelo base do PAEG.

federação são agrupadas na região denominada Resto do Brasil (RB). Além disso, outras 16 regiões do mundo são contempladas (conforme a Tabela 1). Quanto à desagregação setorial, são considerados 27 setores, juntamente com três agregados de fatores de produção: capital, terra e trabalho. Essa variação do modelo é denominada PAEG-Cerrado.

As estimativas de emissões de GEE utilizadas no modelo foram obtidas com base nos dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) (Iema, 2018) e foram incorporadas na MIP-Cerrado por meio de módulo específico. Na sequência, construiu-se um bloco específico de parâmetros equivalentes no código da modelagem econômica que permitisse rastrear e capturar os impactos dos choques no equilíbrio do modelo, no nível total de emissões setoriais e regionais. As emissões dos cinco gases, medidas em toneladas, incluíram metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), monóxido de carbono (CO) e óxido de nitrogênio (NO_x). Essas emissões foram expressas em termos de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq), uma medida comumente utilizada na mensuração de impactos em modelos aplicados de equilíbrio geral (Gottinger, 1998; Zhang et al., 2017; Feng et al., 2022; Souza et al., 2023).

Para avaliar as variações de bem-estar, utilizou-se a medida de variação equivalente, conforme apresentado na equação abaixo:

$$VE = \frac{(U^f - U^0)}{U^0} C^0$$

em que VE representa a variação equivalente, U^f o nível de utilidade final, U^0 o nível de utilidade inicial, e C^0 descreve a renda das famílias no equilíbrio inicial. A medida de variação equivalente é um indicador que expressa a mudança no consumo necessário, com base em um novo conjunto de preços, para manter o mesmo nível de utilidade das famílias em relação aos preços de equilíbrio inicial. Essencialmente, valores positivos refletem o aumento da utilidade, representando um

Tabela 1. Especificações setoriais, regionais e fatores de produção do PAEG-Cerrado.

Setor	Sigla
Agricultura	AGR
Pecuária bovina	CTL
Outros rebanhos	OAP
Pecuária leiteira	RMK
Produção florestal, pesca e aquicultura	FFW
Extração de minerais não metálicos	OXT
Extração de carvão mineral	COA
Petróleo e serviços de apoio	OIL
Gás natural	GAS
Produtos do petróleo	P_C
Extração de minério de ferro e minerais não ferrosos	I_S
Abate e fabricação de carne (bovinos e ruminantes)	CMT
Abate e fabricação de carne (outras carnes)	OMT
Derivados do leite	MIL
Fabricação e refino de açúcar	SGR
Indústria alimentícia e de bebidas	FOO
Indústria têxtil, vestuário e calçados	TEX
Produtos de madeira, papel e impressão	WPP
Manufaturas	MAN
Energia elétrica, gás natural e outras utilidades	ELY
Água, esgoto e gestão de resíduos	WTR
Construção	CNS
Comércio	TRD
Transporte terrestre	OTP
Transporte aquaviário	WTP
Transporte aéreo	ATP
Serviços	SER
Região	
Goiás	BGO
Mato Grosso	BMT
Mato Grosso do Sul	BMS
Minas Gerais	BMG
Resto do Brasil	BRB
China	CHN
Japão	JPN
Índia	IND
Canadá	CAN
Estados Unidos	USA
México	MEX
Rússia	RUS
Resto do Mercosul	RMS
Resto das Américas	ROA
União Europeia	EUR
Resto da Europa	REU
Austrália e Nova Zelândia	ANZ
Asiáticos de rápido crescimento	ASI
África	AFR
Oriente Médio	MES
Resto da Ásia	RAS
Fatores de produção	
Capital	CAP
Trabalho	LAB
Terra	LND

incremento no consumo, enquanto valores negativos indicam reduções no bem-estar. Dessa forma, qualquer aumento potencial no bem-estar resultante dos choques no modelo se traduz em ganhos diretos para as famílias, como um aumento na renda disponível para o consumo, o que leva a ganhos de utilidade. Em suma, a medida de variação equivalente permite uma análise precisa dos benefícios alcançados pelas famílias em termos de melhoria do bem-estar. Isso proporciona uma compreensão dos impactos econômicos e sociais das políticas e choques considerados no modelo.

CHOQUES DE PRODUTIVIDADE E CENÁRIOS

Os choques no modelo PAEG-Cerrado foram aplicados nos fatores de produção capital, trabalho e terra, em quatro cenários distintos (A, B, C e D). Esses cenários foram criados para representar diferentes alternativas de crescimento na produtividade agrícola no período de 2014 a 2030. Para a implementação desses choques, foram adotados os seguintes procedimentos.

i) Estimativas da variação no capital e trabalho para as regiões brasileiras no período de 2014 a 2019 provenientes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022) para o cenário A e pelas projeções do Banco Central do Brasil (BCB, 2022) no período de 2020 a 2030 para os cenários B, C e D.

ii) Estimativas de variação no capital e trabalho para as demais regiões do mundo para o período 2014–2030 retiradas da base de dados do EconMap (CEPII, 2023) com base no estudo de Fontagné et al. (2022), para realizar os cenários B, C e D.

iii) Essas estimativas de variação de capital e trabalho são as mesmas para todas as regiões do modelo nos três cenários de choques implementados.

iv) Estimativas de variação na produtividade da terra para as regiões brasileiras com

base nos dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2022) (cenário D), em projeções do Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa) (Brasil, 2021b) (cenário C) e no estudo de Fuglie (2018) (cenário B).

v) Uso de proxy para a produtividade do uso da terra para os setores de pecuária e floresta, com base na produtividade das lavouras, calculada pelo Mapa (cenário C) e Conab (cenário D).

vi) Nos três cenários de choque (B, C e D), é usada uma única estimativa da variação na produtividade parcial da terra para as demais regiões do mundo, com base em Fuglie (2018). Essas taxas de variação foram usadas como proxy para os demais setores do modelo que usam terra como fator de produção (pecuária e florestas).

A Tabela 2 apresenta os quatro cenários com as diferentes taxas de variação nos fatores de produção, conforme os procedimentos mencionados acima.

Desse modo, tem-se os seguintes cenários:

a) Cenário A, denominado “Validação”, que representa o equilíbrio do modelo para o PIB durante o período de referência (2014–2019) para todas as regiões, de 2014 a 2019⁵.

b) Cenário B, denominado “Base”, que representa o novo equilíbrio para o horizonte de 2014 a 2030. As projeções de variação acumulada na produtividade da terra de 2020 a 2030⁶ foram obtidas de Fuglie (2018).

c) Cenário C, denominado “Mapa”, que altera somente as variações na produtividade do fator terra para as regiões brasileiras no horizonte de 2014 a 2030, com base em projeções fornecidas pelo Mapa, mantidas as produtividades de capital e trabalho do cenário B.

⁵ Para as demais regiões do mundo, dados do PIB retirados da base de dados do Banco Mundial estão disponíveis em: <<https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD>>. Acesso em: 6 jul. 2023.

⁶ As variações da produtividade da terra para o período de 2014 a 2019 foram retiradas de dados observados da Conab e foram utilizadas nos quatro cenários aqui apresentados, cumulativamente com as três projeções alternativas dos cenários A, B e C.

Tabela 2. Taxas de variação dos fatores capital, trabalho e terra para os cenários Validação (2014–2019) – cenário A; Base (2014–2030) – cenário B; e produtividade da terra – para os cenários C, relacionado ao Mapa (2014–2030), e D, relacionado ao Conab (2014–2030).

Região ⁽¹⁾	Cenário A – Validação (2014–2019)			Cenário B – Base (2014–2030)			Cenário C – Mapa (2014–2030)			Cenário D – Conab (2014–2030)		
	Capital	Trabalho	Terra	Capital	Trabalho	Terra	Capital	Trabalho	Terra	Capital	Trabalho	Terra
BGO	-10,63	3,95	16,27	11,75	23,79	39,87	11,75	23,79	22,29	11,75	23,79	54,99
BMT	4,75	6,78	17,35	30,98	27,17	41,17	30,98	27,17	23,17	30,98	27,17	54,43
BMS	-3,07	10,02	4,38	21,21	31,02	25,57	21,21	31,02	9,33	21,21	31,02	55,38
BMG	-4,98	-3,64	16,74	18,82	14,76	40,44	18,82	14,76	29,62	18,82	14,76	59,72
BRB	-2,85	-2,79	14,07	21,48	15,77	37,23	21,48	15,77	22,66	21,48	15,77	46,27
CHN	50,5	-0,32	33,87	219,93	-5,24	36,57	-	-	-	-	-	-
JPN	4,66	2,74	18,52	19,06	-2,36	20,33	-	-	-	-	-	-
IND	39,13	4,7	20,22	238,29	18,03	22,13	-	-	-	-	-	-
CAN	14,24	4,86	16,09	44,07	11,06	17,14	-	-	-	-	-	-
USA	11,87	3,88	13,85	42,9	7,4	14,75	-	-	-	-	-	-
MEX	17,02	10,08	27,34	64,24	24,84	29,46	-	-	-	-	-	-
RUS	1,73	-3,81	-50,21	12,32	-11,67	-49,8	-	-	-	-	-	-
RMS	4,59	2,73	35,7	21,37	18,38	38,22	-	-	-	-	-	-
ROA	20,16	11,79	-5,06	75,63	30,9	-3,94	-	-	-	-	-	-
EUR	8,15	1,54	-9,31	30,05	-1,65	-8,41	-	-	-	-	-	-
REU	14,53	4,09	-56,6	55,99	3,92	-56,43	-	-	-	-	-	-
ANZ	14,7	7,37	16,49	52,81	18,67	17,56	-	-	-	-	-	-
ASI	26,29	6,14	-13,05	99,37	17,36	-12,12	-	-	-	-	-	-
AFR	24,32	14,23	-16,49	104,28	54,1	-16,1	-	-	-	-	-	-
MES	24,68	13,54	-40,73	96,03	31,78	-40,33	-	-	-	-	-	-
RAS	34,79	11,49	-16,63	147,63	34,22	-16,13	-	-	-	-	-	-

⁽¹⁾ BGO: Goiás; BMT: Mato Grosso; BMS: Mato Grosso do Sul; BMG: Minas Gerais; BRB: restante do Brasil; Cerrado: os 4 estados do PRS-Cerrado agregados; CHN: China; JPN: Japão; IND: Índia; CAN: Canadá; USA: Estados Unidos; MEX: México; RUS: Rússia; RMS: Resto do Mercosul; ROA: Resto das Américas; EUR: União Europeia; REU: Resto da Europa; ANZ: Austrália e Nova Zelândia; ASI: Asiáticos de rápido crescimento; AFR: África; MES: Oriente Médio; RAS: Resto da Ásia.
Fonte: elaborado com base em Fuglie (2018), BCB (2022), Conab (2022), Fontagné et al. (2022) e IBGE (2022).

d) Cenário D, denominado “Conab”, que altera somente as variações na produtividade do fator terra para as regiões brasileiras no horizonte de 2014 a 2030, com base em informações históricas da Conab, projetando a média histórica de variação na produtividade da terra para o mesmo período.

Nos cenários B, C e D, o acumulado para o horizonte relevante de 2014 a 2030 resulta da combinação da variação observada nos valores de 2014 a 2019 (cenário A) com as projeções assumidas para o período subsequente, de 2020 a 2030.

Ademais, deve ser dada atenção ao choque de produtividade da terra observada em cada cenário para as regiões que compõem o Cerrado brasileiro. Como pode ser visto na Tabela 2, o cenário C (Mapa) prevê choques

de produtividade mais baixos que os do cenário B (Base), representando uma possível desaceleração dos ganhos de rendimento na agricultura brasileira por conta, por exemplo, do atingimento do ponto na curva em que a lei dos retornos decrescentes começa a operar. Por outro lado, o cenário D prevê aceleração nos choques de produtividade em relação ao cenário B, incorporando a premissa de que a agricultura brasileira seria capaz de replicar os aumentos historicamente altos de produtividade da terra. Assim, tem-se uma estimativa de intervalo dos possíveis impactos econômicos e ambientais.

RESULTADOS

A Tabela 3, abaixo, destaca as variações acumuladas, em bilhões de reais, para o PIB

Tabela 3. Variação acumulada do PIB (2014–2030), medido em bilhões de reais.

Região ⁽¹⁾	Resultados das simulações			D-C ⁽²⁾	(D-C)/Δ ⁽³⁾	D/C (%)
	Base (B)	Mapa (C)	Conab (D)			
BGO	89,58	88,61	90,28	1,67	0,05	1,9
BMT	133,61	132,31	134,27	1,96	0,06	1,5
BMS	59,60	58,91	60,84	1,94	0,04	3,3
BMG	236,93	236,66	238,19	1,54	0,05	0,6
BRB	2.285,79	2.272,89	2.293,93	21,04	0,89	0,9
Cerrado	519,72	516,48	523,58	7,10	0,21	1,4
BRA	2.805,51	2.789,37	2.817,51	28,14	1,10	1,0

⁽¹⁾BGO: Goiás; BMT: Mato Grosso; BMS: Mato Grosso do Sul; BMG: Minas Gerais; BRB: restante do Brasil; Cerrado: os quatro estados do PRS-Cerrado agregados; e BRA: os 26 estados do Brasil e o Distrito Federal.

⁽²⁾D - C representa a diferença de resultados para o cenário de maior ganho de produtividade da terra em relação ao de menor ganho (Conab versus Mapa).

⁽³⁾Δ representa a diferença de crescimento acumulado (2014–2030) na produtividade da terra, entre cenários, em pontos percentuais.

até 2030, em relação ao equilíbrio inicial do modelo (2014)⁷. Observa-se que o cenário D, com projeções mais otimistas de ganhos de produtividade da terra em decorrência das mudanças tecnológicas, resulta em maiores variações no PIB em comparação aos cenários B e C, que estimam ganhos de produtividade menores relativamente. Esse resultado macroeconômico pode ser atribuído ao aumento da eficiência no uso do capital, pois o ganho de produtividade permite uma melhor alocação dos recursos de produção, possibilitando sua realocação entre diferentes atividades econômicas. Consequentemente, a taxa de retorno do capital também se elevaria, o que estimularia um maior investimento, principalmente em setores que dependem mais intensamente do capital, conforme pontuado por Silva et al. (2017).

Se a economia não alcançar os níveis de produtividade estimados pela replicação dos históricos da Conab, mas sim a produtividade projetada pelo Mapa, espera-se que o país tenha perdas de aproximadamente R\$ 28 bilhões ao

longo de 16 anos, o que equivale a cerca de R\$ 2 bilhões por ano. Isto é, se de fato a produtividade da terra for relativamente menor no horizonte relevante, cada ponto percentual perdido no rendimento agrícola durante esse período está associado a uma redução de aproximadamente R\$ 1,1 bilhão no PIB brasileiro, conforme indicado na penúltima coluna da Tabela 3.

No caso dos estados do Cerrado, estima-se que, se as mudanças tecnológicas não ampliarem a produtividade da terra conforme prevê o Mapa, as perdas decorrentes da desaceleração da produtividade, que seguem as projeções da Conab, seriam em torno de R\$ 7 bilhões, o que representa aproximadamente 25% das perdas totais do País. A cada ponto percentual perdido no rendimento agrícola no Cerrado, ocorreria uma redução de R\$ 210 milhões no PIB regional, o que representa aproximadamente 19% do total nacional.

No entanto, os estados da referida região seriam os menos afetados em decorrência da sua elevada participação na oferta agrícola. Esse resultado implica que o dinamismo agrícola na região do Cerrado pode acentuar as disparidades regionais na produção agrícola do Brasil, o que é corroborado pela taxa de crescimento percentual do PIB no cenário D em relação ao C, que é maior (1,4%) do que a variação observada entre os cenários para o Resto do Brasil – sigla: BRB – (0,9%) e para o Brasil (1%).

⁷ Os resultados para as demais regiões do mundo são bastante semelhantes nos três cenários de choques implementados, com variações mínimas em cada caso em virtude das premissas ii) e vi). Assim, dado que o foco deste estudo está nos impactos na região do Cerrado em cenários alternativos, serão apresentadas apenas as informações para essa região específica. Vale ressaltar que a interdependência comercial global representada no modelo com as demais regiões do mundo é fundamental para os resultados, especialmente quando se trata dos setores agroindustriais dessa região brasileira, o que justifica o uso do modelo PAEG em detrimento de outros modelos de EGC “não globais”.

Por outro lado, esses achados reforçam a ideia de que, após pelo menos três décadas de expressivos aumentos na produtividade da terra, especialmente na região do Cerrado, é natural que sejam observadas taxas de crescimento menores em virtude da lei dos retornos decrescentes. Se o Brasil busca um maior crescimento econômico, é necessário manter progressos tecnológicos substanciais na próxima década para replicar as taxas históricas de variação da produtividade da terra. Isso destaca a importância de fortalecer uma estratégia robusta de investimentos em pesquisa, focada em ganhos de produtividade na agropecuária brasileira. Essa estratégia, baseada no desenvolvimento tecnológico e nos ganhos contínuos e sustentados de produtividade, será particularmente relevante diante das pressões bióticas e abióticas⁸ impostas pelas mudanças climáticas, e também para reduzir as emissões de CO₂eq associadas à atividade agrícola.

Na Tabela 4, são apresentadas as variações acumuladas, em bilhões de reais, para o bem-estar das famílias até 2030, em relação ao equilíbrio inicial do modelo (2014). De maneira geral, os resultados confirmam a expectativa de que o aumento da produtividade

da terra está associado a ganhos no bem-estar das famílias em todas as regiões brasileiras. No entanto, ao analisarem-se as perdas de consumo para as famílias em um cenário de menor crescimento da produtividade da terra, observa-se que o Cerrado desempenha um papel significativo, representando quase 30% do total do Brasil (R\$ 6,4 bilhões de um total de R\$ 22,40 bilhões). Isso ressalta mais uma vez a importância estratégica das cadeias produtivas agropecuárias para o Cerrado. Essas evidências indicam a necessidade de maior atenção dos formuladores de políticas aos indicadores de pobreza em contextos de defasagem tecnológica na agricultura nos próximos anos, embora essa região esteja em uma situação relativamente melhor do que os demais estados do Brasil.

A última coluna das Tabelas 3 e 4 apresenta o aumento percentual no PIB (Tabela 3) e no bem-estar (Tabela 4) do cenário D em relação ao cenário C. Observa-se que o aumento percentual no bem-estar das famílias no cenário D, em relação ao cenário C, apresentou uma melhoria em comparação com as variações relativas ao PIB. Esse resultado destaca a importância de considerar não apenas o crescimento econômico, mas também o impacto direto no bem-estar das famílias.

Por outro lado, as variações para o Resto do Brasil e para o Brasil como um todo permaneceram as mesmas, reforçando a ideia de

⁸ Pressões bióticas referem-se a fatores biológicos que afetam os seres vivos, como doenças e pragas. Pressões abióticas são fatores não biológicos, como condições ambientais, que influenciam os organismos. Ambas as pressões podem impactar negativamente a agricultura.

Tabela 4. Variação acumulada do bem-estar das famílias (2014–2030), medido em bilhões de reais.

Região ⁽¹⁾	Resultados das simulações			D-C ⁽²⁾	(D-C)/Δ ⁽³⁾	D/C (%)
	Base (B)	Mapa (C)	Conab (D)			
BGO	74,20	73,29	74,84	1,55	0,05	2,1
BMT	112,20	111,09	112,75	1,66	0,05	1,5
BMS	49,39	48,72	50,59	1,86	0,04	3,8
BMG	192,48	192,28	193,59	1,31	0,04	0,7
BRB	1.843,12	1.833,12	1.849,14	16,02	0,68	0,9
Cerrado	428,26	425,38	431,77	6,39	0,18	1,5
BRA	2.271,39	2.258,50	2.280,91	22,40	0,86	1,0

⁽¹⁾BGO: Goiás; BMT: Mato Grosso; BMS: Mato Grosso do Sul; BMG: Minas Gerais; BRB: restante do Brasil; Cerrado: os quatro estados do PRS-Cerrado agregados; BRA: os 26 estados do Brasil e o Distrito Federal.

⁽²⁾D - C representa a diferença de resultados para um cenário de maior ganho de produtividade da terra em relação ao de menor ganho (Conab versus Mapa).

⁽³⁾Δ representa a diferença de crescimento acumulado na produtividade da terra, em pontos percentuais, do cenário C para o D (D - C) para o período de 2014 a 2030.

que os ganhos de produtividade agrícola podem ser particularmente mais pronunciados no Cerrado. Isso ressalta a importância estratégica dessa região no contexto da agricultura brasileira. É essencial ressaltar que cada ponto percentual perdido no rendimento agrícola no Cerrado resulta em uma redução de R\$ 180 milhões no bem-estar regional, o que representa aproximadamente 21% do total nacional (R\$ 860 milhões).

Em seguida, foram obtidos os resultados das variações acumuladas até 2030, em relação ao equilíbrio inicial do modelo (2014), para o valor bruto da produção (VBP) dos setores selecionados em cada região brasileira do Cerrado. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Em relação a Goiás, pode-se observar que os setores da agroindústria (AGR, CTL, OAP, RMK, FFW, CMT, OMT, MIL, SGR, FOO, TEX, WPP), utilidades (ELY e WTR), transporte, comércio e serviços apresentam ganhos mais expressivos em relação aos setores extrativos e de energia (OXT, COA, OIL, GAS, I_S, P_C), indústria (MAN) e construção (CNS). Isso indica que, até o final da década, com progresso tecnológico na agricultura, o estado de Goiás se concentrará relativamente mais na agroindústria, impulsionando setores inter-relacionados. No entanto, é importante destacar que, no cenário de maior progresso tecnológico projetado (Conab – D), os setores de agricultura (lavouras), fabricação e refino de açúcar, indústria alimentícia e de bebidas, e energia elétrica e gás natural tendem a obter maiores ganhos no valor bruto da produção, enquanto os demais setores apresentam uma redução em comparação com o cenário do Mapa. Isso indica uma maior competitividade desses setores em relação aos demais na disputa por recursos de produção após um maior choque de produtividade. Nos setores de energia, indústria e construção, que apresentam redução no VBP em ambos os cenários, a perda relativa de dinamismo é maior à medida que a produtividade da terra aumenta.

Ao analisarem-se os resultados para o estado do Mato Grosso, podem ser observadas algumas diferenças setoriais na agroindústria. Os setores de produção florestal, abate e fabricação de outras carnes, indústria têxtil, vestuário e calçados, produtos de madeira, papel e impressão apresentam reduções no VBP em todos os cenários. Esses são setores que tendem a perder competitividade relativa em relação aos demais setores da agroindústria até 2030. Por outro lado, destaca-se o crescimento expressivo da pecuária bovina no Mato Grosso, com ganhos significativos no VBP no cenário de maior produtividade da terra. A agricultura também se destaca, mas em menor magnitude do que em Goiás. Diferentemente de Goiás, no Mato Grosso, o setor de derivados de leite obtém ganhos no cenário D, enquanto a indústria do açúcar e a indústria alimentícia e de bebidas apresentam redução no VBP.

No estado do Mato Grosso do Sul, são observadas algumas variações importantes nos setores em relação ao VBP para os choques implementados. O setor de florestas mostra-se sensível ao progresso tecnológico no uso da terra, apresentando variação positiva nos cenários B e D, e variação negativa no cenário C, de menor crescimento da produtividade. De maneira geral, os ganhos na agroindústria entre os cenários D e C são maiores em comparação aos outros dois estados, mas isso pode ser explicado pela maior diferença de ganhos de produtividade da terra entre esses dois cenários para esse estado (ver Tabela 3).

Destaca-se o setor de pecuária bovina e outros rebanhos, que são muito favorecidos pelas projeções de maior produtividade da terra, com ganhos significativos no VBP no cenário D em relação ao C. Além disso, o setor de produtos de madeira, papel e impressão apresenta variação positiva do VBP no cenário C e variação negativa no cenário D, demonstrando sua sensibilidade ao tamanho do choque, assim como seu principal fornecedor (florestas), conforme mencionado anteriormente.

Tabela 5. Variação acumulada do VBP (2014–2030), medido em bilhões de reais, para os estados do Cerrado.

Setor ⁽¹⁾	Resultados das simulações – Goiás				Resultados das simulações – Mato Grosso				Resultados das simulações – Mato Grosso do Sul				Resultados das simulações – Minas Gerais			
	Base (B)	Mapa (C)	Conab (D)	D/C (%)	Base (B)	Mapa (C)	Conab (D)	D/C (%)	Base (B)	Mapa (C)	Conab (D)	D/C (%)	Base (B)	Mapa (C)	Conab (D)	D/C (%)
AGR	332	291,18	363,5	72,31	24,80	349,93	383,61	33,68	9,60	337,59	307,84	389,89	82,05	593,78	635,79	62,23
CTL	125,64	127,4	119,37	-8,02	-6,30	45,67	51,22	19,07	59,30	104,82	76,2	151,03	74,83	181,85	187,32	5,88
OAP	98,96	98,55	98,32	-0,23	-0,20	92,08	91,34	0,66	0,70	121,97	113,84	133,52	19,67	152,54	149,52	9,37
RMK	37,34	42,75	30,28	-12,47	-29,20	37,65	43,2	-11,03	-25,50	98,38	108,72	81,86	-26,86	145,69	133,15	32,95
FFW	21,31	24,23	16,47	-7,76	-32,00	-91,74	-81,62	-17,98	22,00	1,26	-17,27	27,72	45	-260,50	89,87	17,11
OXT	-6,94	-1,12	-11,09	-9,97	891,90	-124,57	-115,42	-14,5	12,60	73,84	79,74	65,03	-14,71	9,83	12,55	-52
COA	-228,74	-221,48	-233,88	-12,4	5,60	-279,52	-270,7	-13,88	5,10	-179,76	-170,05	-194,05	-24,01	-112,26	-108,34	-9,24
OIL	-181,2	-174,6	-186,27	-11,67	6,70	-106,1	-99,61	-10,04	10,10	-233,83	-223,14	-251,58	-28,44	-177,68	-175,67	-4,96
GAS	-433,66	-431,5	-435,41	-3,91	0,90	83,09	68,13	25,6	37,60	-476,39	-471,87	-483,67	-11,8	-397,48	-393,49	-11,56
L_S	-61,36	-56,6	-64,19	-7,58	13,40	-178,21	-170,37	-11,84	6,90	-96	-86,38	-110,89	-24,51	-20,64	-17,96	-7,04
CMT	127,57	129,26	124,82	-4,44	-3,40	102,08	93,77	13,31	14,20	123,16	112,12	136,97	24,85	165,71	164,94	3,61
OMT	263,68	266,44	261,05	-5,39	-2,00	-24,15	-23,01	-1,29	5,60	236,07	230,24	239,74	9,5	225,36	221,58	9,11
MIL	128,29	129,14	125,9	-3,24	-2,50	32,2	24,43	11,73	48,00	121,71	107,37	141,04	33,67	164,99	165,05	2,25
SGR	207,73	200,77	213,27	12,5	6,20	113,94	124,82	-17,86	-14,30	315,28	323,74	303,37	-20,37	289,41	285,63	10,75
FOO	139,31	136,98	140,92	3,94	2,90	72,13	78,52	-10,13	-12,90	164,69	165,85	161,33	-4,53	138,89	136,71	3,72
TEX	63,04	67,41	59,95	-7,45	-11,10	-134,68	-126,44	-13,03	10,30	121,89	128,69	111,66	-17,03	92,00	91,22	0,12
WPP	30,24	34,42	27,62	-6,8	-19,80	-89,82	-82,35	-11,28	13,70	-3,18	6,54	-18,44	-24,98	65,73	66,19	-3
P_C	-113,38	-107,54	-117,57	-10,03	9,30	101,27	102,78	-2,01	-2,00	-76,87	-67,78	-92,37	-24,59	51,49	51,81	-0,4
MAN	-38,99	-36,98	-40,34	-3,36	9,10	-81,76	-77,18	-7,03	9,10	-46,23	-42,34	-54,78	-12,44	13,93	16,05	-5,44
ELY	13,14	13,28	14,36	1,08	8,10	208,22	196,94	19,31	9,80	-19,28	-11,03	-33,85	-22,82	206,90	109,91	6,75
WTR	34,81	38,24	32,57	-5,68	-14,80	185,09	190,06	-7,72	-4,10	116,87	121,32	108,98	-12,34	82,61	82,99	-1,96
CNS	-19,94	-18,59	-20,77	-2,17	11,70	-32,12	-29,43	-4,02	13,70	-8,44	-6,6	-12,07	-5,47	82,80	7,04	0,03
TRD	71,44	72,29	70,95	-1,34	-1,80	92,09	94,98	-4,3	-4,50	123,99	126,54	119,06	-7,47	99,01	98,59	0,23
OTP	78,92	79,69	78,34	-1,34	-1,70	124,39	126,72	-3,67	-2,90	113,62	115,74	109,61	-6,13	85,41	85,78	-1,32
WTP	42,04	46,81	38,65	-8,16	-17,40	-79,36	-71,22	-12,88	18,10	65,82	72,77	56,69	-16,09	47,69	48,48	-2,15
ATP	44,27	47,76	41,79	-5,98	-12,50	114,5	117,92	-5,43	-4,60	112,59	117	105,96	-11,05	65,84	67,35	-3,34
SER	105,33	106,45	104,53	-1,92	-1,80	250,59	251,27	-1,06	-0,40	143,24	145,16	139,87	-5,28	98,06	98,34	-1,23

⁽¹⁾ AGR: agricultura; CTL: pecuária bovina; OAP: outros rebanhos; RMK: pecuária leiteira; FFW: produção florestal, pesca e aquicultura; OXT: extração de minerais não metálicos; COA: extração de carvão mineral; OIL: petróleo e serviços de apoio; GAS: gás natural; L_S: extração de minério de ferro e minerais não ferrosos; CMT: abate e fabricação de carne (bovinos e ruminantes); OMT: abate e fabricação de carne (outras carnes); MIL: derivados do leite; SGR: fabricação e refino de açúcar; FOO: indústria alimentícia e de bebidas; TEX: indústria têxtil, vestuário e calçados; WPP: produtos de madeira, papel e impressão; P_C: produtos do petróleo; MAN: manufaturas; ELY: energia elétrica, gás natural e outras utilidades; WTR: água, esgoto e gestão de resíduos; CNS: construção; TRD: comércio; OTP: transporte terrestre; WTP: transporte aquaviário; ATP: transporte aéreo; SER: serviços.

Em Minas Gerais, observa-se que apenas os setores estritamente extrativos (carvão, petróleo, gás e minerais industriais) apresentam reduções no VBP após os choques de produtividade da terra em todos os cenários. Esse resultado pode indicar uma mudança de matriz energética de longo prazo, com uma transição dos setores extrativos para a produção de bioenergia no agronegócio, à medida que o fator terra se torna mais produtivo. Caso essa tendência seja confirmada, será uma evidência de consequências estruturais positivas decorrentes do contínuo avanço tecnológico no uso da terra.

Outro destaque para o estado é o aumento observado na variação acumulada do VBP em toda a agroindústria do cenário D (maior choque de produtividade) em relação ao cenário C (menor choque de produtividade), com exceção do setor de produtos de madeira, papel e impressão. O setor agrícola (apenas lavouras), como nos demais estados, apresenta um crescimento significativo (R\$ 62,2 bilhões), e a pecuária leiteira registra um aumento expressivo (R\$ 33 bilhões) em relação aos demais setores (em Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, houve uma redução na variação). Os setores de florestas e fabricação e refino de açúcar também demonstram bom desempenho com produtividades projetadas mais elevadas (cenário D), apresentando um aumento de R\$ 17 bilhões e R\$ 11 bilhões, respectivamente, nas diferenças do VBP acumulado.

Na Tabela 6, são apresentados os resultados para o Resto do Brasil. Mais uma vez, os setores extrativos registram redução, exceto o setor de extração de minerais não metálicos. Esse resultado pode ser analisado com base no custo de oportunidade da terra. O aumento da produtividade da terra implica mais recursos e investimentos direcionados para o setor agrícola, que se torna mais lucrativo e competitivo. Como resultado, pode haver um menor interesse pela extração de recursos naturais e consequente redução do seu VBP. Além disso, um aumento

na produtividade da terra na agricultura pode levar a uma maior oferta de alimentos e produtos agrícolas, reduzindo os preços e tornando-os mais acessíveis e competitivos em comparação aos recursos naturais extraídos.

Em termos dos efeitos da aceleração da produtividade (do cenário C para o D), a agricultura é o setor mais beneficiado (R\$ 31,5 bilhões), seguido pelo refino e fabricação de açúcar (R\$ 10,6 bilhões). A pecuária bovina tem perdas no cenário D (-R\$ 4,6 bilhões), mas a pecuária leiteira (R\$ 1 bilhão) e outras categorias de rebanhos (R\$ 5,3 bilhões) têm ganhos. A indústria de processamento também apresenta um desempenho melhor no cenário D (nos setores de CMT, OMT, MIL, SGR e FOO), mas os setores têxtil e de produtos de madeira registram uma redução no desempenho.

Uma análise mais detalhada por setores (Tabela 7) evidencia o dinamismo da agricultura e pecuária de corte (setor agropastoril) nos estados considerados. Esses setores desempenham um papel crucial, representando uma parcela significativa, de 85% a 106%, da diferença no VBP entre os cenários testados, que variam entre projeções pessimistas do Mapa e projeções baseadas em séries históricas otimistas de produtividade. Esses resultados reforçam a importância dos ganhos de produtividade da terra no contexto agrícola.

Valores acima de 100% indicam uma retração na atividade econômica do setor na região Resto do Brasil (RBR), com exceção dos setores de produção leiteira (RMK) e floresta, pesca e aquicultura (FFW). O setor de produção leiteira teve uma retração de R\$ 17,4 bilhões na atividade econômica regional, enquanto Minas Gerais registrou ganhos de cerca de R\$ 32,9 bilhões nesse setor. No setor de floresta, pesca e aquicultura, as diferenças entre estados dentro do bioma Cerrado são mais evidentes, com perdas em alguns estados e ganhos em outros. Esses resultados destacam a heterogeneidade das atividades econômicas nos diferentes estados

e a importância de considerar as particularidades regionais ao analisar os impactos dos choques.

Na Tabela 7, também estão apresentados os valores da diferença entre os cenários (D-C) na variação acumulada do VBP para o setor agroindustrial. Conforme mencionado anteriormente, a agroindústria é sensível aos cenários de ganhos de produtividade de grãos. Se o Cerrado consegue ampliar a produção agropecuária, a agroindústria de outras regiões tem a capacidade de adquirir essas matérias primas por preços mais baixos, competindo com a agroindústria local, que perde espaço. Isso pode

ser observado pelas variações negativas para Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul.

Esses achados sugerem que os ganhos de produtividade da terra, ao aumentarem a oferta agrícola e pressionarem os preços das matérias-primas para baixo no longo prazo, podem contribuir para tornar outros polos regionais da agroindústria mais competitivos e afetar o equilíbrio regional de competitividade dos setores. Esse padrão reflete a dinâmica do modelo de equilíbrio geral, em que os diferentes setores e regiões se ajustam de acordo com os choques e as interações entre eles.

Tabela 6. Variação acumulada do VBP (2014–2030), medido em bilhões de reais – Resto do Brasil.

Setor ⁽¹⁾	Resultados das simulações			D-C	D/C (%)
	Base (B)	Mapa (C)	Conab (D)		
AGR	426,72	405,29	436,80	31,51	8
CTL	189,61	190,07	185,45	-4,63	-2
OAP	175,29	171,85	177,15	5,30	3
RMK	158,69	156,83	157,77	0,94	1
FFW	125,09	124,66	124,19	-0,47	0
OXT	23,17	26,50	20,98	-5,52	-21
COA	-30,74	-27,89	-32,56	-4,66	17
OIL	-83,92	-80,99	-85,69	-4,69	6
GAS	-287,57	-281,71	-291,07	-9,36	3
I_S	10,19	13,38	8,73	-4,65	-35
CMT	183,06	180,54	184,77	4,23	2
OMT	333,28	328,81	337,04	8,23	3
MIL	168,17	166,37	169,11	2,74	2
SGR	247,30	240,80	251,37	10,57	4
FOO	147,40	145,14	149,00	3,86	3
TEX	110,54	111,58	110,11	-1,46	-1
WPP	91,88	92,98	91,36	-1,63	-2
P_C	97,63	97,56	97,80	0,24	0
MAN	43,28	44,64	42,52	-2,12	-5
ELY	126,85	125,21	128,07	2,86	2
WTR	117,08	117,06	117,23	0,16	0
CNS	7,99	7,99	8,05	0,06	1
TRD	104,48	104,32	104,70	0,38	0
OTP	107,30	107,38	107,36	-0,02	0
WTP	64,14	66,60	62,53	-4,07	-6
ATP	81,55	82,71	80,80	-1,91	-2
SER	113,66	113,76	113,70	-0,07	0

⁽¹⁾AGR: agricultura; CTL: pecuária bovina; OAP: outros rebanhos; RMK: pecuária leiteira; FFW: produção florestal, pesca e aquicultura; OXT: extração de minerais não metálicos; COA: extração de carvão mineral; OIL: petróleo e serviços de apoio; GAS: gás natural; I_S: extração de minério de ferro e minerais não ferrosos; CMT: abate e fabricação de carne (bovinos e ruminantes); OMT: abate e fabricação de carne (outras carnes); MIL: derivados do leite; SGR: fabricação e refino de açúcar; FOO: indústria alimentícia e de bebidas; TEX: indústria têxtil, vestuário e calçados; WPP: produtos de madeira, papel e impressão; P_C: produtos do petróleo; MAN: manufaturas; ELY: energia elétrica, gás natural e outras utilidades; WTR: água, esgoto e gestão de resíduos; CNS: construção; TRD: comércio; OTP: transporte terrestre; WTP: transporte aquaviário; ATP: transporte aéreo; SER: serviços.

Do mesmo modo, os cenários de choques na produtividade agrícola têm implicações significativas nas emissões de gases de efeito estufa. A Tabela 8 apresenta as variações percentuais nas emissões de CO₂eq para os diferentes cenários. O objetivo foi detectar a variação relativa nas emissões em cenários com diferentes ganhos de produtividade tecnológica que otimizam o uso da terra. No cenário D, que prevê um maior ganho de produtividade, o aumento percentual nas emissões é maior em comparação aos demais cenários.

Quanto a isso, observa-se que a agricultura foi o setor com maiores emissões em relação ao equilíbrio inicial. Na região do bioma Cerrado, Minas Gerais foi o estado mais impactado, seguido pelo Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás. Além disso, outros setores que dependem direta ou indiretamente dos insumos intensivos no fator terra, como pecuária bovina (CTL), outros rebanhos (OAP), pecuária leiteira (RMK), produção florestal (FFW), refino de açúcar (SGR), abate e fabricação de carnes (OMT), pecuária bovina (CTL) e leiteira (RMK), também apresentaram aumento substancial nas emissões na maior parte da região do Cerrado, indicando o fato que o aumento da produtividade do uso da terra ao longo do tempo inevitavelmente expande produção, induzindo, por sua vez, a elevação de emissões associadas às atividades agropecuárias.

Isso pode ser explicado pelo efeito *Jevons*, discutido por Gianetti & Ferreira Filho (2023), que

associa o aumento da produtividade ao aumento da lucratividade, estimulando a produção de alguns setores e, consequentemente, as emissões.

No Mato Grosso, o comportamento das emissões setoriais foi ligeiramente diferente daquele dos demais estados. O aumento da produtividade resultou em uma redução das emissões nos setores de abate e fabricação de outras carnes (OMT) e na produção florestal, pesca e aquicultura (FFW). No cenário D, em que o aumento da produtividade é maior, a redução das emissões nesses setores também foi maior. Desse modo, a Hipótese de Borlaug, que sustenta que os ganhos de produtividade na agricultura podem ampliar a área de cultivo sem pressionar a demanda por novas terras, contribuindo, assim, para evitar o desmatamento, pode ocorrer em situações específicas.

Outro ponto de destaque é a redução percentual das emissões nos segmentos de gás natural (GAS) e petróleo e serviços de apoio (OIL) tanto nas regiões do Cerrado quanto no Resto do Brasil. Isso parece indicar um efeito indireto positivo do crescimento do setor agrícola de poupar insumos energéticos ao demandar fatores e tecnologias para sua própria produção, liberando esses insumos para atender outras demandas da economia.

A coluna C–D, na Tabela 8, mostra a diferença, em pontos percentuais, nas emissões entre os cenários de menor produtividade (C) e o de maior produtividade (D). Valores negativos

Tabela 7. Diferença entre cenários (D–C) da variação acumulada do VBP (2014–2030), medido em bilhões de reais, somente para os setores agropastoril e agroindustrial.

Região	Setor agropastoril ⁽¹⁾						Setor agroindustrial ⁽²⁾					
	AGR	CTL	OAP	RMK	FFW	Total	CMT	OMT	MIL	SGR	FOO	Total
GO	72,31	-8,02	-0,23	-12,47	-7,76	43,82	-4,44	-5,39	-3,24	12,5	3,94	3,37
MT	33,68	19,07	0,66	-11,03	-17,98	24,4	13,31	-1,29	11,73	-17,86	-10,13	-4,24
MS	82,05	74,83	19,67	-26,86	45	194,69	24,85	9,5	33,67	-20,37	-4,53	43,12
MG	62,23	5,88	9,37	32,95	17,11	127,54	3,61	9,11	2,25	10,75	3,72	29,45
RBR	31,51	-4,63	5,3	0,94	-0,47	32,65	4,23	8,23	2,74	10,57	3,86	29,64
PRS-Cerrado	250,28	91,75	29,47	-17,41	36,36	390,45	37,33	11,93	44,41	-14,97	-7	71,69
PRS-BRA	89%	105%	85%	106%	101%	92,30%	90%	59%	94%	340%	223%	70,80%

⁽¹⁾ AGR: agricultura; CTL: pecuária bovina; OAP: outros rebanhos; RMK: pecuária leiteira; FFW: produção florestal, pesca e aquicultura.

⁽²⁾ CMT: abate e fabricação de carne (bovinos e ruminantes); OMT: abate e fabricação de carne (outras carnes); MIL: derivados do leite; SGR: fabricação e refino de açúcar; FOO: indústria alimentícia e de bebidas.

Tabela 8. Variação das emissões em pontos percentuais para todos os cenários e diferença entre os cenários D e C das variações em emissões totais de CO₂eq no período (2014–2030).

Setor ⁽¹⁾	Cenário Base (B)						Cenário Mapa (C)						Cenário Conab (D)						C-D (em pontos percentuais)						
	BGO	BMT	BMS	BMG	BRB	BGO	BMT	BMS	BMG	BRB	BGO	BMT	BMS	BMG	BRB	BGO	BMT	BMS	BMG	BRB	BGO	BMT	BMS	BMG	BRB
AGR	76,0	89,9	77,2	123,6	89,8	69,7	86,8	72,9	121,0	87,2	80,7	91,7	85,5	130,0	90,9	-11,0	-5,0	-12,6	-9,0	-3,7					
CTL	31,9	18,8	28,8	40,0	41,1	33,2	17,8	25,4	40,9	42,0	29,9	18,8	34,6	39,7	39,9	3,2	-1,0	-9,2	1,2	2,1					
OAP	27,1	24,4	29,2	33,4	38,0	27,5	24,5	28,4	33,4	38,0	26,6	24,3	30,5	33,8	38,0	0,9	0,3	-2,1	-0,4	0					
RMK	14,5	14,0	24,3	32,7	34,5	15,8	15,1	26,4	31,1	34,5	13,0	12,9	21,3	35,7	34,1	2,8	2,2	5,1	-4,6	0,4					
FFW	10,5	-5,4	8,0	21,6	27,6	11,3	-3,6	5,5	21,0	27,8	9,4	-7,0	11,6	22,7	27,3	1,9	3,4	-6,1	-1,8	0,5					
OXT	0,2	-19,4	16,1	1,9	5,2	1,2	-17,7	17,0	2,4	5,8	-0,6	-20,3	14,7	1,2	4,8	1,8	2,6	2,4	1,2	1,0					
COA	-41,0	-49,4	-31,9	-19,9	-5,8	-39,7	-47,8	-30,2	-19,1	-5,2	-42,0	-50,3	-34,5	-20,8	-6,1	2,3	2,6	4,3	1,7	0,9					
OIL	-32,0	-17,8	-43,3	-31,4	-11,7	-30,8	-16,6	-41,3	-31,1	-11,3	-33,0	-18,4	-46,5	-31,9	-12,0	2,1	1,8	5,2	0,9	0,7					
GAS	-81,5	16,4	-89,8	-73,9	-51,9	-81,1	13,6	-89,0	-73,2	-50,8	-81,8	18,5	-91,2	-75,4	-52,5	0,7	-4,9	2,2	2,2	1,7					
L_S	-10,5	-31,4	-16,6	-2,7	3,5	-9,7	-29,9	-14,9	-2,2	4,0	-11,0	-32,1	-19,3	-3,5	3,2	1,4	2,2	4,4	1,3	0,8					
CMT	26,3	22,8	25,4	33,1	36,9	26,7	21,4	23,5	33,1	36,6	25,7	23,7	27,9	33,5	37,1	1,0	-2,3	-4,3	-0,4	-0,6					
OMT	52,3	-1,2	47,0	44,5	65,8	52,9	-0,9	46,0	43,9	65,0	51,8	-1,3	47,6	45,4	66,4	1,2	0,3	-1,6	-1,5	-1,4					
MIL	26,3	9,0	25,1	33,1	34,4	26,6	7,7	22,6	33,2	34,1	25,8	9,7	28,5	33,4	34,4	0,9	-1,9	-5,9	-0,1	-0,3					
SGR	42,4	26,7	62,8	57,1	49,8	41,3	28,8	64,5	56,6	48,8	43,3	25,3	60,5	58,2	50,5	-2,0	3,5	4,0	-1,7	-1,6					
FOO	28,3	17,4	33,2	28,4	30,8	28,0	18,5	33,5	28,1	30,4	28,5	16,6	32,6	28,6	31,0	-0,6	1,9	0,9	-0,6	-0,6					
TEX	13,4	-22,9	24,4	19,4	23,8	14,2	-21,3	25,6	19,2	24,0	12,8	-23,8	22,6	19,3	23,7	1,4	2,4	3,0	0	0,2					
WPP	7,2	-14,2	0,9	14,1	19,9	8,0	-12,9	2,7	14,2	20,0	6,7	-14,9	-1,9	13,8	19,8	1,2	2,1	4,6	0,4	0,2					
P_C	-18,6	21,0	-13,6	10,3	19,5	-17,6	21,2	-11,9	10,3	19,4	-19,3	20,9	-16,4	10,3	19,5	1,8	0,2	4,5	0,1	-0,1					
MAN	-5,3	-12,3	-6,7	4,4	10,2	-4,9	-11,5	-6,0	4,8	10,4	-5,5	-12,7	-8,3	3,9	10,1	0,6	1,2	2,3	1,0	0,3					
ELY	2,5	39,3	-3,6	21,3	25,8	2,5	37,2	-2,1	20,6	25,4	2,7	40,8	-6,4	21,9	26,0	-0,2	-3,6	4,3	-1,3	-0,6					
WTR	9,2	40,8	25,4	16,8	23,9	9,8	41,6	26,0	16,9	23,8	8,9	40,4	24,4	16,6	23,9	0,9	1,1	1,7	0,3	-0,1					
CNS	-1,6	-2,1	0,4	2,4	3,0	-1,4	-1,8	0,6	2,4	3,0	-1,7	-2,3	-0,1	2,4	3,0	0,3	0,5	0,7	-0,1	-0,1					
TRD	16,2	22,5	26,3	20,0	21,5	16,3	22,9	26,5	19,9	21,4	16,2	22,4	25,7	20,0	21,6	0,1	0,5	0,9	-0,1	-0,1					
OTP	17,0	27,4	23,4	17,1	21,6	17,0	27,7	23,7	17,2	21,6	16,9	27,3	22,9	17,0	21,7	0,1	0,4	0,8	0,2	-0,1					
WTP	9,5	-11,7	13,3	9,8	13,8	10,3	-10,3	14,5	9,9	14,2	8,9	-12,6	11,7	9,6	13,5	1,5	2,3	2,8	0,4	0,7					
ATP	9,2	24,9	22,3	13,1	17,1	9,9	25,4	23,1	13,4	17,3	8,8	24,6	21,2	12,8	17,0	1,1	0,9	1,9	0,6	0,3					
SER	22,5	54,4	29,6	20,1	23,5	22,6	54,2	29,8	20,1	23,5	22,4	54,5	29,3	19,9	23,6	0,2	-0,2	0,5	0,2	-0,1					

⁽¹⁾ AGR: agricultura; CTL: pecuária bovina; OAP: outros rebanhos; RMK: pecuária leiteira; FFW: produção florestal, pesca e aquicultura; OXT: extração de minerais não metálicos; COA: extração de carvão mineral; OIL: petróleo e serviços de apoio; GAS: gás natural; I_S: extração de minério de ferro e minerais não ferrosos; CMT: abate e fabricação de carne (bovinos e ruminantes); OMT: abate e fabricação de carne (outras carnes); MIL: derivados do leite; SGR: fabricação e refino de açúcar; FOO: indústria alimentícia e de bebidas; TEX: indústria têxtil, vestuário e calçados; WPP: produtos de madeira, papel e impressão; P_C: produtos do petróleo; MAN: manufaturas; ELY: energia elétrica; gás natural e outras utilidades; WTR: água, esgoto e gestão de resíduos; CNS: construção; TRD: comércio; OTP: transporte terrestre; WTP: transporte aquaviário; ATP: transporte aéreo; SER: serviços. Na escala de cores, valores coloridos em vermelho apresentaram menor emissão de CO₂eq, e coloridos em azul, maior emissão.

indicam que o aumento na produtividade resultou em maiores emissões nos respectivos setores. O setor agrícola e a região do Mato Grosso do Sul se destacam nesse aspecto. A região apresenta a maior variação nas emissões na agricultura com o aumento da produtividade. Nota-se que Goiás tem mais setores que se beneficiam da redução das emissões no cenário de maior produtividade.

Silva et al. (2017) explicam que o Cerrado apresenta menor potencial de emissão de carbono em relação a outros biomas por causa das raízes e solos da vegetação da região. Para os autores, para um resultado mais efetivo, em termos de redução nas emissões, seria necessário proteger uma área maior de vegetação nativa e promover o reflorestamento de áreas degradadas.

Apesar desse apontamento, o aumento da produtividade resulta em uma redução das emissões em uma ampla gama de setores no Resto do Brasil. No entanto, atenção deve ser dada ao aumento relativo nas emissões na pecuária bovina (CTL) e leiteira (RMK) e na produção de outros rebanhos (OAP) em outras regiões quando há um aumento na produtividade no uso da terra no Cerrado. Como mencionado anteriormente, o aumento da produtividade da terra pode ter estimulado a produção de grãos e outras culturas agrícolas no Cerrado e também deslocado a produção pecuária para outras regiões. Isso implica que a redução das emissões que poderia ser alcançada pela interrupção do desmatamento na região pode ser compensada pelas emissões da pecuária, comprometendo os resultados das políticas ambientais para esse fim.

CONCLUSÕES

A agropecuária no Brasil, e no Cerrado em particular, é amplamente reconhecida no mundo, uma vez que o Brasil é um dos principais ofertantes mundiais de bens agroalimentares

e insumos agrícolas. Diante disso, este estudo propôs avaliar os efeitos de choques na produtividade dos fatores de produção, com foco no fator terra. Para isso, foi construída uma matriz insumo-produto para os estados que ocupam a maior área do Cerrado, a saber: Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Essa matriz foi inserida na estrutura de modelagem por EGC do PAEG. Uma das contribuições deste estudo foi a construção do ferramental analítico PAEG-Cerrado.

Com base no modelo desenvolvido, foi relevante considerar os efeitos de diferentes projeções de produtividade agrícola, levando em consideração as interdependências setoriais e regionais explicitamente consideradas pelo modelo de EGC. Os principais resultados são discutidos em termos econômicos, quanto a variações no PIB, ao bem-estar social e VBP, e ao aspecto ambiental, com resultados em termos de emissão de CO₂ eq.

Os principais resultados indicam que o cenário D, que apresenta maiores valores projetados de ganhos de produtividade da terra, apresenta consistentemente maiores variações no PIB e no bem-estar das famílias nos estados do Cerrado, em relação aos demais cenários, de menor crescimento de produtividade. Isso confirma o dinamismo agrícola da região com relação ao fato que, quando há aumentos de produtividade que otimizam o uso da terra, isso tende a ampliar as diferenças regionais na produção agrícola nacional, com a região Cerrado ganhando mais vis-à-vis do que o Restante do Brasil; no entanto, com efeitos de transbordamentos significativos para toda a economia.

De qualquer modo, os achados reforçaram a intuição comum de que, grosso modo, o Brasil terá que manter progressos tecnológicos substanciais que permitam replicar as taxas históricas de variação na produtividade da terra a fim de obter resultados econômicos satisfatórios nos próximos anos.

Esse é um aspecto que reforça o papel crucial dos investimentos em P&D para, por exemplo, ampliar a disponibilidade de novos conhecimentos e tecnologias capazes de evitar uma desaceleração nos ganhos de produtividade, fato que pode ser potencializado pelas mudanças climáticas, que têm potencial de reduzir a produção por afetarem a temperatura e o clima que favorecem a produção agrícola. Essa estratégia, baseada no desenvolvimento tecnológico e em ganhos contínuos e sustentáveis de produtividade, será particularmente relevante diante das pressões bióticas e abióticas impostas pelas mudanças climáticas. Essa questão fica ainda mais evidente quando analisados os resultados de aumento das emissões decorrentes do aumento da produtividade.

De forma geral, em termos de VBP, apenas os setores estritamente extrativos (carvão, petróleo, gás e minerais industriais) apresentam reduções após os choques de produtividade em todos os cenários. Essa mudança pode indicar uma transição de longo prazo dos setores extrativos para os setores de bioenergia no agronegócio, à medida que a produtividade da terra se torna mais eficiente. Essa evidência reforça a importância das consequências estruturais positivas decorrentes do contínuo avanço das políticas de transição energética.

No aspecto ambiental, os principais resultados em termos de emissão de CO₂eq revelam que o cenário com maior ganho de produtividade no uso da terra (cenário D) apresenta um aumento percentual mais significativo nas emissões em comparação aos demais cenários que comportam um nível de produtividade menor. A agricultura foi o setor mais afetado pelo aumento das emissões, especialmente nos estados da região analisada. Minas Gerais foi o estado que apresentou maiores taxas percentuais de aumento nas emissões, seguido pelo Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás.

No entanto, no Mato Grosso, o aumento da produtividade resultou em uma redução nas

emissões nos setores de abate e fabricação de outras carnes e na produção florestal, pesca e aquicultura, indicando que a Hipótese de Borlaug pode ocorrer em situações específicas.

Tais resultados sugerem a necessidade de políticas adicionais para promover uma produção mais sustentável nesses setores. Alguns exemplos incluem melhoria na eficiência alimentar animal, manejo adequado dos dejetos, uso de tecnologias de baixa emissão, como biodigestores e sistemas de ventilação eficientes, pastejo rotacionado para melhor manejo e recuperação das pastagens, e incentivo de programas de certificação para estimular práticas sustentáveis na pecuária, além da adoção dos sistemas de integração pecuária-lavoura-floresta, em que a produção agropastoril compensaria as emissões provocadas pela produção animal.

No Brasil, algumas iniciativas já visam alcançar esse objetivo, entre as estratégias de intensificação sustentável apoiadas pelas esferas pública e privada, como os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. No entanto, é necessário pensar em abordagens mais amplas, que envolvam um número maior de setores que se associam, ainda que indiretamente, com as atividades intensivas no fator terra.

Desse modo, os resultados obtidos podem fornecer algumas reflexões para a transição de uma economia de baixo carbono. A formulação de estratégias eficazes para conciliar o desenvolvimento econômico sustentável com a preservação ambiental envolve os já mencionados incentivos em ações de P&D e inovação, até a adoção de práticas agrícolas sustentáveis e que promovam manejo adequado do solo e aumento da captura de carbono.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem o apoio financeiro do Projeto Rural Sustentável – Cerrado (Cooperação Técnica BID#BR-T1409).

REFERÊNCIAS

- AMANN, E.; AZZONI, C.; BAER, W. **The Oxford Handbook of the Brazilian Economy**. New York: Oxford University Press, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780190499983.001.0001>.
- ANÁLISE das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2020. São Paulo: SEEG, 2021.
- ARIAS, D.; VIEIRA, P.A.; CONTINI, E.; FARINELLI, B.; MORRIS, M. **Agriculture productivity growth in Brazil: recent trends and future prospects**. Washington: World Bank, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1596/29437>.
- BCB. Banco Central do Brasil. **Focus - Relatório de Mercado**. 2022. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/publicacoes/focus>>. Acesso em: 6 jul. 2023.
- BOLFE, E.L.; SANO, E.E.; CAMPOS, S.K. (Ed.). **Dinâmica agrícola no Cerrado: análises e projeções**. Brasília: Embrapa, 2020.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do Agronegócio: Brasil 2020/21 a 2030/31**. Brasília, 2021a.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Tabelas Gerais Projeções do Agronegócio 2020-2021 a 2030-2031**. 2021b. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/tabelas-gerais-projecoes-do-agronegocio-2020-2021-a-2030-2031-1.xlsx/view>>. Acesso em: 6 jul. 2023.
- BUAINAIN, A.M.; LANNA, R.; NAVARRO, Z. (Ed.). **Agricultural Development in Brazil**. London: Routledge, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781351029742>.
- CEPEA. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **PIB-AGRO/CEPEA: após recordes em 2020 e 2021, PIB do agro cai 4,22% em 2022**. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/PIB-DO-AGRONEGOCIO-2022.17MAR2023.pdf>>. Acesso em: 11 jun. 2023.
- CEPII. Centre d'Etudes Prospectives et d'Informations Internationales. **ECONMAP**. Disponível em: <http://www.cepii.fr/cepii/en/bdd_modele/bdd_modele_item.asp?id=11>. Acesso em: 6 jul. 2023.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Grãos - por Unidades da Federação**. 2022. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/907-graos-por-unidades-da-federacao>>. Acesso em: 6 jul. 2023.
- DEVARAJAN, S.; ROBINSON, S. The influence of computable general equilibrium models on policy. In: KEHOE, T.J.; SRINIVASAN, T.N.; WHALLEY, K. (Ed.). **Frontiers in Applied General Equilibrium Modelling**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. p.402-428. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511614330.016>.
- FENG, C.-C.; CHANG, K.-F.; LIN, J.-X.; LEE, T.-C.; LIN, S.-M. Toward green transition in the post Paris Agreement era: The case of Taiwan. **Energy Policy**, v.165, art.112996, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112996>.
- FONTAGNÉ, L.; PEREGO, E.; SANTONI, G. MaGE 3.1: Long-term macroeconomic projections of the World economy. **International Economics**, v.172, p.168-189, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inteco.2022.08.002>.
- FUGLIE, K. R&D capital, R&D spillovers, and productivity growth in world agriculture. **Applied Economic Perspectives and Policy**, v.40, p.421-444, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1093/aep/ppx045>.
- GIANETTI, G.W.; FERREIRA FILHO, J.B. de S. Socioeconomic and environmental impacts of degraded pasture recovery in Brazil: contribution to the NDC. In: ANNUAL CONFERENCE ON GLOBAL ECONOMIC ANALYSIS, 26., 2023, Bourdeaux. [Proceedings]. Bordeaux: Université de Bordeaux, 2023. p.1-21. (Conference Paper. GTAP Resource, 6850).
- GOMES, L.A. de V.; SAES, M.S.M.; NUNES, R.; VILPOUX, O.F. Heuristics and farm heterogeneity: Evidence from small-scale farmers in Brazil. **Journal of Rural Studies**, v.92, p.328-341, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2022.04.010>.
- GOTTINGER, H.W. Greenhouse gas economics and computable general equilibrium. **Journal of Policy Modeling**, v.20, p.537-580, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0161-8938\(97\)00074-4](https://doi.org/10.1016/S0161-8938(97)00074-4).
- GURGEL, A.C. **Impactos econômicos e distributivos de mudanças nas relações comerciais da economia brasileira na presença de economias de escala**. 2002. 198p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- HERTEL, T.W. (Ed.). **Global trade analysis: modeling and applications**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **SCR - Sistema de Contas Regionais**. 2022. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9054-contas-regionais-do-brasil>>. Acesso em: 6 jul. 2023.
- IEMA. Instituto de Energia e Meio Ambiente. **SEEG: Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa**. 2018. Disponível em: <<http://energiaambiente.org.br/produto/seeg>>. Acesso em: 6 jul. 2023.
- MAPBIOMAS. **Infográficos**. Disponível em: <https://mapbiomas.org/infograficos-1?cama_set_language=pt-BR>. Acesso em: 11 jul. 2023.
- MARTHA JR., G.B.; ALVES, E. Brazil's agricultural modernization and Embrapa. In: AMANN, E.; AZZONI, C.; BAER, W. (Org.). **The Oxford handbook of the**

- Brazilian economy.** New York: Oxford University Press, 2018. p.310-337. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780190499983.013.15>.
- MARTINELLI, L.A.; BATISTELLA, M.; SILVA, R.F.B.; MORAN, E. Soy expansion and socioeconomic development in municipalities of Brazil. **Land**, v.6, art.62, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/land6030062>.
- MATSUMOTO, K.; FUJIMORI, S. CGE models in energy economics. In: SOYTAŞ, U.; SARI, R. (Ed.); **Routledge Handbook of Energy Economics**. London: Routledge, 2019. p.433-445. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315459653-31>.
- MORES, G. de V.; DEWES, H.; TALAMINI, E.; VIEIRA-FILHO, J.E.R.; CASAGRANDA, Y.G.; MALAFAIA, G.C.; COSTA, C.; SPANHOL-FINOCCHIO, C.P.; ZHANG, D. A longitudinal study of Brazilian food production dynamics. **Agriculture**, v.12, art.1811, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12111811>.
- ODIOR, E.S.O.; ARINZE, S. The concept of Computable General Equilibrium Models. **International Journal of Research in Commerce and Management Studies**, v.4, p.1-18, 2022. DOI: <https://doi.org/10.38193/IJRCMS.2022.4201>.
- OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030. Paris: OECD, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1787/19428846-en>.
- PEARSON, K.R.; PARMENTER, B.R.; POWELL, A.A.; WILCOXEN, P.J.; DIXON, P.B. **Notes and problems in applied general equilibrium economics**. Amsterdam: Elsevier, 2014.
- PEREIRA, P.A.A.; MARTHA JR, G.B.; SANTANA, C.A.M.; ALVES, E. The development of Brazilian agriculture: future technological challenges and opportunities. **Agriculture & Food Security**, v.1, art.4, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1186/2048-7010-1-4>.
- ROCHA, A.; GONÇALVES, E.; ALMEIDA, E. Agricultural technology adoption and land use: evidence for Brazilian municipalities. **Journal of Land Use Science**, v.14, p.320-346, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/1747423X.2019.1707312>.
- RUDORFF, B.; RISSO, J. (Coord.). **Análise geoespacial da expansão da soja no bioma Cerrado: 2000/01 a 2021/22**. Florianópolis: Agrosatélite Geotecnologia Aplicada, 2022.
- RUTHERFORD, T.F. Applied general equilibrium modeling with MPSGE as a GAMS subsystem: an overview of the modeling framework and syntax. **Computational Economics**, v.14, p.1-46, 1999.
- RUTHERFORD, T.F.; PALTSEV, S.V. **GTAPinGAMS and GTAP-EG: global datasets for economic research and illustrative models**. 2000. Disponível em: <https://www.mpsge.org/papers/gtaptext.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2023.
- SILVA, F.P. da; ARAUJO, J.A.; COSTA, E.M.; VIEIRA FILHO, J.E.R. Eficiência técnica e heterogeneidade tecnológica na agropecuária das regiões semiárida e não semiárida do Nordeste brasileiro. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v.57, p.379-395, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2019.177355>.
- SILVA, J.G. da; RUVIARO, C.F.; FERREIRA FILHO, J.B. de S. Livestock intensification as a climate policy: lessons from the Brazilian case. **Land Use Policy**, v.62, p.232-245, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.12.025>.
- SOUZA, G.C.P.; DOMINGUES, E.P.; MAGALHÃES, A. Impacts of economic growth with forest preservation in the Amazon and Cerrado biomes in Brazil. In: ANNUAL CONFERENCE ON GLOBAL ECONOMIC ANALYSIS, 26., 2023, Bourdeaux. [Proceedings]. Bourdeaux: Université de Bourdeaux, 2023. p.1-33. (Conference Paper. GTAP Resource, 7015). DOI: <https://doi.org/10.1142/S2010007824500088>.
- SOUZA JR., C.M.; SHIMBO, J.Z.; ROSA, M.R.; PARENTE, L.L.; ALENCAR, A.A.; RUDORFF, B.F.T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; FERREIRA, L.G.; SOUZA-FILHO, P.W.M.; OLIVEIRA, S.W. de; ROCHA, W.; FONSECA, A.V.; MARQUES, C.B.; DINIZ, C.G.; COSTA, D.P.; MONTEIRO, D.; ROSA, E.R.; VÉLEZ MARTIN, E.; WEBER, E.J.; LENTI, F.E.B.; PATERNOST, F.F.; PAREYN, F.G.C.; SIQUEIRA, J.; VIERA, J.L.; FERREIRA NETO, L.C.; SARAIVA, M.M.; SALES, M.H.; SALGADO, M.P.G.; VASCONCELOS, R.; GALANO, S.; MESQUITA, V.V.; AZEVEDO, T. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v.12, art.2735, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12172735>.
- STARK, S.; BIBER-FREUDENBERGER, L.; DIETZ, T.; ESCOBAR, N.; FÖRSTER, J.J.; HENDERSON, J.; LAIBACH, N.; BÖRNER, J. Sustainability implications of transformation pathways for the bioeconomy. **Sustainable Production and Consumption**, v.29, p.215-227, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.10.011>.
- TEIXEIRA, E.C.; MATHEUS, W.G.P.; GURGEL, A.C. (Org.). **A Estrutura do PAEG**. Campo Grande: Life, 2013.
- TRIGUEIRO, W.R.; NABOUT, J.C.; TESSAROLO, G. Uncovering the spatial variability of recent deforestation drivers in the Brazilian Cerrado. **Journal of Environmental Management**, v.275, art.111243, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111243>.
- WORLD BANK GROUP. **World Bank Group Climate Change Action Plan 2021–2025: supporting green, resilient, and inclusive development**. Washington, 2021.
- ZHANG, X.; QI, T.; OU, X.; ZHANG, X. The role of multi-region integrated emissions trading scheme: a computable general equilibrium analysis. **Applied Energy**, v.185, p.1860-1868, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.092>.