

# MEIO AMBIENTE E INSERÇÃO INTERNACIONAL DA AGROPECUÁRIA: UMA ANÁLISE DA REGIÃO NORTE E CENTRO-OESTE DO BRASIL<sup>1</sup>

Augusta Pelinski Raiher<sup>2</sup>  
Alysson Luiz Stege<sup>3</sup>

**RESUMO:** O objetivo deste artigo foi analisar o efeito das exportações da agropecuária sobre as emissões de gases de efeito estufa (EGEE) nos municípios da fronteira agrícola do Brasil (Norte e Centro-Oeste). Para tanto, utilizou-se a técnica *Propensity Score Matching* (PSM) para estimar o efeito médio de “ser município exportador” sobre a EGEE. Os resultados evidenciam crescimento das emissões na fronteira agrícola acima da média nacional, com 75% dos municípios elevando suas EGEE. Além disso, verificou-se difusão das emissões para as áreas de ocupação mais recente no Arco Norte da fronteira. Por fim, as estimativas do PSM indicam que, em média, municípios exportadores apresentam EGEE menor do que os não exportadores. Ademais, quanto mais consolidada a inserção internacional, menor tende a ser o impacto da produção agropecuária sobre as emissões de gases de efeito estufa.

**Palavras-chaves:** Emissões de Gases de Efeito Estufa; meio ambiente; exportações; produção agropecuária; fronteira agrícola.

**ABSTRACT:** The objective of this article was to analyze the effect of agricultural exports on greenhouse gas emissions (GHG) across municipalities in Brazil’s agricultural frontier (North and Center-West). To this end, we applied Propensity Score Matching (PSM) to estimate the average effect of being an exporting municipality on GHG emissions. The results show that emissions in the agricultural frontier grew above the national average, with 75% of municipalities increasing their GHG emissions. In addition, we observe a diffusion of emissions toward more recently occupied areas in the frontier’s Northern Arc. Finally, the PSM estimates indicate that, on average, exporting municipalities exhibit lower GHG emissions than non-exporters. Moreover, the more consolidated a municipality’s integration into international markets, the smaller the impact of agricultural production tends to be on greenhouse gas emissions.

**Keywords:** Greenhouse Gas Emissions; environment; exports; agricultural production; agricultural frontier.

**Área:** Meio ambiente, recursos naturais e sustentabilidade

**Classificação JEL:** Q5 Economia Ambiental

---

<sup>1</sup> Este artigo faz parte do Projeto “EFEITOS DAS EXPORTAÇÕES DA AGROPECUÁRIA NAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA: UMA ANÁLISE PARA OS MUNICÍPIOS BRASILEIROS”, financiado pelo CNPQ.

<sup>2</sup> Professora do Programa de Pós Graduação em Economia, do Programa de Pós Graduação em Ciências Sociais e do curso de Economia da Universidade Estadual de Ponta Grossa. Bolsista Produtividade CNPQ. Email: apelinski@gmail.com

<sup>3</sup> Professor do Programa de Pós Graduação em Economia e do curso de Economia da Universidade Estadual de Ponta Grossa. Email: alyssonstege@uepg.br

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente pressão sobre os ecossistemas brasileiros, resultante principalmente da intensificação do uso da terra pela agropecuária, tem colocado o país entre os principais emissores globais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Ao contrário das economias industriais, cuja principal fonte de CO<sub>2</sub> refere-se à queima de combustíveis fósseis, no Brasil esta emissão está fortemente associada à remoção de cobertura vegetal nativa para a abertura de novas áreas agrícolas e pastagens (Lapola et al., 2014). Esse padrão tem se mantido nas últimas décadas, com especial destaque para as regiões Norte e Centro-Oeste, nas quais observa-se a substituição sistemática da vegetação do Cerrado e da Amazônia pela agropecuária.

Nesse contexto, embora o discurso oficial enfatize o compromisso com práticas sustentáveis de produção, as evidências apontam que o modelo agrícola predominante segue pautado na expansão territorial. Assim, compreender os determinantes espaciais das emissões de CO<sub>2</sub> é fundamental para a formulação de políticas públicas eficazes, voltadas à mitigação dos impactos ambientais e sociais decorrentes da conversão de uso da terra.

Esse modelo de expansão extensiva da agricultura, baseado na incorporação contínua de novas áreas ao processo produtivo, tem sido identificado como um dos principais vetores das emissões brasileiras de gases de efeito estufa. Segundo Sparovek et al. (2019), a maior parte das emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil está relacionada às mudanças no uso da terra induzidas pela agropecuária, especialmente nas regiões de fronteira agrícola. E a crescente demanda internacional por produtos agropecuários pode reforçar essa dinâmica, ao incentivar a conversão de ecossistemas nativos em áreas de produção.

Estudos apontam que a lógica de produção intensiva, aliada à crescente demanda internacional por *commodities*, vem estimulando o desmatamento indireto via conversão de pastagens degradadas em áreas agrícolas, deslocando a pecuária para novas áreas e ampliando a necessidade de desmatamento e, conseqüentemente, intensificando a degradação ambiental (Domingues e Bermann, 2012). Desta forma, embora existam múltiplos fatores que podem afetar o meio ambiente no Brasil, a hipótese da relação entre a expansão da produção agropecuária voltada à exportação e as emissões de gases de efeito estufa não pode ser ignorada.

Concomitantemente, nos últimos anos tem-se intensificado a pressão internacional por padrões mais sustentáveis de produção, e, de certo modo, isso pode estar influenciando a dinâmica da produção agropecuária brasileira (Gibbs et al., 2015). Com efeito, se até os anos 1990 as preocupações ambientais eram secundárias, a partir dos anos 2000 as exigências mais rigorosas dos mercados externos intensificaram a necessidade de adequação para a permanência do setor no mercado internacional (Nepstad et al., 2021). Nesse cenário, a adoção de práticas produtivas ambientalmente responsáveis passa a se configurar não apenas como resposta às pressões internacionais, mas também como estratégia de mitigação das emissões de gases de efeito estufa e de fortalecimento da competitividade dos produtos brasileiros no mercado global.

Diante desse cenário, a dinâmica produtiva da agropecuária brasileira pode estar marcada por tensões entre dois movimentos: de um lado, o avanço da fronteira agrícola, com a conversão de novas áreas para ampliar a produção destinada à exportação; de outro, o fortalecimento das pressões dos mercados internacionais por produtos oriundos de cadeias sustentáveis, que tende a induzir padrões capazes de reduzir impactos ambientais e restringir práticas associadas ao desmatamento e às queimadas.

Isto posto, este estudo tem como objetivo analisar o efeito das exportações da agropecuária sobre as emissões de gases de efeito estufa do setor (EGEE) nos municípios da fronteira agrícola do Brasil (Norte e Centro-Oeste). Para isso, tem-se duas hipóteses: i. a expansão da agropecuária dessas regiões está positivamente associada à intensificação das EGEE, utilizando a conversão de terras como estratégia para atender à demanda internacional por *commodities* agrícolas; ii. As crescentes restrições ambientais e a valorização de práticas

sustentáveis nos mercados internacionais exercem influência significativa sobre as decisões produtivas dos agentes locais, podendo atuar como fator de mitigação das EGEE. Pressupõe-se, ainda, que as dinâmicas produtivas nas regiões de fronteira agrícola sejam caracterizadas pela coexistência de dois modelos: de um lado, práticas expansionistas, baseadas no desmatamento, e, de outro, a adoção de práticas sustentáveis, mobilizadas como estratégia de inserção competitiva no comércio internacional.

Neste contexto, este artigo busca contribuir com a literatura empírica em dois aspectos centrais: no recorte geográfico e na estratégia metodológica adotada. Em primeiro lugar, não foram identificados estudos que avaliem especificamente os efeitos das exportações agropecuárias sobre as emissões de gases de efeito estufa na região de fronteira agrícola do Brasil, o que confere originalidade à delimitação territorial da análise. Em segundo lugar, a diferenciação metodológica decorre da utilização do Propensity Score Matching (PSM). Ainda que o PSM não constitua um modelo econométrico no sentido estrito, trata-se de um método de avaliação de impacto que combina técnicas estatísticas e econométricas. Sua aplicação envolve a estimação de escores de propensão, obtidos por meio de modelos de escolha discreta (como probit), que representam a probabilidade de um município ser exportador agropecuário em função de um conjunto de covariáveis observáveis. Com base nesses escores, realiza-se o pareamento entre municípios exportadores (tratados) e não exportadores (controles) com características semelhantes, o que permite construir um contrafactual plausível e, assim, isolar o efeito médio das exportações sobre as EGEE. Dessa forma, o PSM constitui uma contribuição relevante para a literatura, ao oferecer um desenho quase-experimental capaz de reduzir vieses de seleção e produzir inferências causais mais robustas.

A presente pesquisa está dividida em cinco seções, incluindo esta. Na segunda seção é apresentada a literatura que aborda sobre expansão da fronteira agrícola, inserção internacional e sustentabilidade. Na sequência, tem-se a metodologia. Na quarta seção é apresentado os resultados desta pesquisa, findando com as considerações finais.

## **2. EXPANSÃO DA FRONTEIRA AGRÍCOLA, INSERÇÃO INTERNACIONAL E MEIO AMBIENTE**

A expansão da fronteira agrícola, sobretudo nas regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil, vem se dando especialmente via a incorporação de novas terras, caracterizando um modelo de crescimento extensivo. Ademais, esse padrão está fortemente vinculado à lógica do aumento de produção de *commodities* agrícolas voltadas ao mercado internacional. De forma específica, Gibbs et al (2015) e Garret et al. (2018) evidenciam que essa intensificação da produção privilegia ganhos de escala, com expressivo aumento da produção via ampliação da área plantada.

Segundo Barona et al (2010), boa parte do aumento da produção agrícola, especialmente do Mato Grosso, se deu pela substituição de áreas de pecuária. Ou seja, as reduções nas pastagens decorrentes da expansão agrícola podem ter sido compensadas por aumentos nas pastagens em outras partes da fronteira agrícola brasileira, citando principalmente o norte do Mato Grosso, Pará e Rondônia. Assim, indiretamente tem-se algum desmatamento, o que os autores chamam de “desmatamento por deslocamento”.

Esse processo, caracterizado como “crescimento via fronteira”, pode gerar diversas externalidades negativas. Uma das mais importantes refere-se às queimadas, as quais decorrem da conversão de vegetação nativa em áreas agrícolas ou voltadas à pecuária (Alencar et al., 2020). Estudos apontam que a expansão da produção de soja na Amazônia e Cerrado tem sido o principal vetor de desmatamento, de queimadas e da consequente perda de bens e serviços ecossistêmicos (como regulação climática e conservação de biodiversidade), as quais são

impulsionadas pela valorização internacional das *commodities* (Richards et al., 2014; Barona et al., 2010).

Contudo, há sinais de mudança nesse padrão. As crescentes exigências ambientais de mercados internacionais – principalmente da União Europeia – têm pressionado o setor agroexportador brasileiro a adotar práticas mais sustentáveis (Gibbs et al., 2015). Essa transição é motivada por mecanismos como certificações ambientais, barreiras não tarifárias e acordos multilaterais que impõem rastreabilidade e padrões ambientais mais rigorosos. A preferência por produtos livres de desmatamento, como no caso do Acordo UE-Mercosul, reforça a necessidade de adaptar-se às novas exigências do comércio global (Meyfroidt et al., 2020).

Autores como Tilman et al. (2011) e Pretty et al. (2006) inferem que práticas agrícolas sustentáveis (como a rotação de culturas, uso eficiente de fertilizantes e conservação do solo) não só protegem o meio ambiente, mas também melhoraram a produtividade e a rentabilidade dos agricultores. Tilman et al. (2011), por exemplo, ao examinarem a crescente demanda global por alimentos e a necessidade de intensificação sustentável da agricultura para atender a essa demanda sem causar danos ambientais severos, argumentam que a intensificação agrícola sustentável são cruciais para evitar a expansão das áreas cultivadas. Além disso, destacam que a transferência de tecnologia e práticas agrícolas eficazes podem promover um abastecimento alimentar global mais equitativo e com menor impacto ambiental. Pretty et al. (2006) ratificam essas inferências ao analisar 286 intervenções recentes em 57 países pobres, evidenciando significativos aumentos na produtividade agrícola ao mesmo tempo em que melhoraram os impactos ambientais.

Esses resultados sinalizam que práticas agrícolas que incorporam técnicas de conservação e manejo sustentável não só protegem o meio ambiente, mas também fortalecem a competitividade dos agricultores no mercado internacional.

Com efeito, Antweiler et al. (2001) inferem que a produção agrícola voltada ao mercado internacional pode afetar o meio ambiente de três formas: pelo efeito escala, decorrente do aumento da produção da agropecuária com intensificação da degradação ambiental; pelo efeito composição, com a mudança da produção dos setores mais poluentes para segmentos menos poluentes, fenômeno que geralmente ocorre quando se especializa em segmentos que se tem vantagem comparativa, e/ou; pelo efeito técnico, que envolve a adoção de tecnologias mais limpas e eficientes, geralmente viabilizada pelo crescimento econômico e pela maior abertura comercial.

Dependendo do nível de desenvolvimento da atividade agrícola, pode-se ter impactos díspares. Cole (2004) argumenta que, em países exportadores de *commodities*, o efeito escala tende a prevalecer nos estágios iniciais, resultando em uma piora da qualidade ambiental. No entanto, conforme esses países se desenvolvem e diversificam suas economias, o efeito composição e o efeito técnico podem levar a uma melhoria ambiental. Ou seja, enquanto as exportações podem inicialmente exacerbar a degradação ambiental, elas também podem, eventualmente, facilitar melhorias ambientais através da diversificação econômica e da adoção de tecnologias limpas. No entanto, alcançar esse equilíbrio depende de políticas eficazes e de um contexto favorável que permita que os benefícios do comércio internacional se traduzam em ganhos ambientais.

Antweiler et al. (2001), ao analisar um grupo de países pobres e ricos entre 1976 a 1991, identificou que a maior abertura comercial se apresentou benéfica para o meio ambiente. Concluem que o comércio pode ter um impacto positivo na redução da poluição ao promover a transferência de tecnologias limpas e aumentar a eficiência econômica.

Cole (2004) também investigou grupos de países subdesenvolvidos e desenvolvidos entre 1975 e 1995 e obteve resultados ambíguos, de modo que, o efeito do comércio

internacional no meio ambiente depende da vantagem comparativa que o país detém, a qual pode afetar mais - quando a vantagem é menor - ou menos - quando a vantagem comparativa é maior.

López e Galinato (2005) analisaram a dinâmica da inserção internacional e o impacto no meio ambiente para o Brasil, Indonésia, Malásia e Filipinas, considerando o período de 1970 a 1995. Identificaram que a abertura comercial afetou positivamente a cobertura de florestas do Brasil e Filipinas, enquanto que, para a Malásia e Indonésia o efeito foi negativo. Já Moraes (2019), analisando os estados brasileiros, entre 1991 e 2016, observou impacto positivo do comércio internacional na degradação ambiental, inferindo que intensificação da produção voltada ao mercado internacional pode gerar uma elevação no nível da taxa de poluição.

Diante deste contexto, pode-se inferir a existência de uma tensão entre dois vetores de efeitos ao longo da literatura da área: de um lado, a lógica da competitividade baseada na expansão territorial e escala produtiva, especialmente nas regiões com menor nível de desenvolvimento agrícola, tende a gerar uma relação negativa entre as exportações agrícolas e a preservação ambiental; de outro, a imposição de parâmetros socioambientais por parte dos mercados consumidores e a busca por maior competitividade internacional, tende a mitigar os impactos ambientais decorrentes da inserção internacional.

### 3. METODOLOGIA

Para analisar o efeito das exportações da agropecuária sobre as emissões de gases de efeito estufa (EGEE) nos municípios da fronteira agrícola do Brasil (Norte e Centro-Oeste) utilizou-se o método *Propensity Score Matching* (PSM). Trata-se de uma técnica de avaliação de impacto de natureza quase-experimental, proposta por Rosenbaum e Rubin (1983), que busca construir um contrafactual plausível para o grupo tratado. O procedimento consiste, em uma primeira etapa, na estimação da probabilidade de cada unidade ser tratada - no caso, de um município ser exportador agropecuário - a partir de um conjunto de covariáveis observáveis, utilizando geralmente modelos de escolha discreta, como logit ou probit. Em seguida, realiza-se o emparelhamento (*matching*) entre municípios exportadores (tratados) e não exportadores (controles) que apresentem escores de propensão semelhantes. Dessa forma, é possível comparar pares similares e isolar o efeito médio do tratamento sobre os tratados (ATT), reduzindo vieses de seleção decorrentes de diferenças estruturais entre os grupos. No presente estudo, esse procedimento permite identificar de forma mais robusta a relação entre inserção internacional via exportações agropecuárias e as emissões de gases de efeito estufa ao longo dos municípios da fronteira agrícola.

Optou-se por analisar os municípios das regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil, uma vez que essas áreas apresentam taxas de crescimento das emissões de gases de efeito estufa acima da média brasileira<sup>4</sup>. Além disso, constituem territórios em que a expansão da produção agropecuária ocorre, em grande medida, pela incorporação de novas áreas, ao mesmo tempo, detém alguns municípios com maior nível de desenvolvimento agrícola (Assunção e Chiavari, 2015), permitindo avaliar a existência, ou não, de diferenças nos efeitos das exportações agropecuárias sobre as emissões, considerando a heterogeneidade estrutural dessas regiões.

Na sequência, são apresentados maiores detalhes sobre os procedimentos metodológicos que foram aplicados nesta pesquisa.

---

<sup>4</sup> Na seção 4, Tabela 1, é apresentado essas informações

### 3.1 Propensity Score Matching (PSM) e Estratégia Empírica

Uma forma eficiente de avaliar o efeito de uma ação específica (neste caso, ser exportador) sobre uma determinada dimensão consiste em observá-la quando a unidade de análise  $i$  (neste caso, os municípios) é afetada por uma determinada ação em contraste com quando não é afetada (Heinrich et al., 2010). A diferença obtida na variável de interesse representa o impacto da ação. Ou seja:

$$\delta_i = Y_{1i} - Y_{0i} \quad (1)$$

Onde:  $\delta_i$  é o efeito da ação – neste caso, ser um município exportador da agropecuária – sobre a variável de interesse (EGEE), em relação à unidade de análise (municípios)  $i$ ;  $Y_{1i}$  é o valor da variável de interesse após ser exportador no município  $i$ ; e  $Y_{0i}$  denota o valor da variável de interesse caso o município  $i$  não seja exportador.

O impacto de qualquer ação específica não deve ser individualizado, mas sim mensurado seu efeito médio sobre o grupo analisado. Para isso, utiliza-se o parâmetro conhecido como Efeito Médio do Tratamento (ATE), descrito por:

$$ATE = E(\delta) = E(Y_1 - Y_0) \quad (2)$$

Onde:  $E$  é o valor esperado;  $Y_1$  é o valor da variável de interesse nos municípios exportadores; e  $Y_0$  denota o valor da variável de interesse caso os municípios não sejam exportadores.

A dificuldade de mensurar (2) está no fato de que esses e outros efeitos não são necessariamente observáveis. Assim, supondo que a diferença entre as médias seja dada pela média das diferenças, então o ATE pode ser representado por:

$$ATE = E(Y_1|T = 1) - E(Y_0|T = 1) \quad (3)$$

O item  $E(Y_1|T = 1)$  representa o resultado médio que os dados tratados teriam obtido na ausência do tratamento, elemento que não é observado. Por isso, esse valor é substituído por  $E(Y_0|T = 1)$ , mensurando o valor da variável de interesse do grupo de municípios que não são exportadores. A partir disso, é possível calcular:

$$\Delta = E(Y_1|T = 1) - E(Y_0|T = 0) \quad (4)$$

Adicionando e subtraindo de (4) o termo  $E(Y_0|T = 1)$ , obtém-se a diferença entre  $\Delta$  e ATE:

$$\Delta = E(Y_1|T = 1) - E(Y_0|T = 1) + E(Y_0|T = 1) - E(Y_0|T = 0) \quad (5a)$$

$$\Delta = ATE + E(Y_0|T = 1) - E(Y_0|T = 0) \quad (5b)$$

$$\Delta = ATE + SB \quad (5c)$$

Onde: SB corresponde à diferença entre a variável  $Y$  do grupo inserido no comércio internacional e os municípios que não estão inseridos. Se SB for igual a zero, o ATE pode ser medido pela diferença entre as médias da variável  $Y$ ; contudo, isso raramente ocorre e, portanto, deve-se utilizar uma metodologia apropriada que assegure que o termo SB seja igual a zero.

Um dos métodos utilizados para minimizar o viés de seleção, especialmente quando a seleção de participantes em determinada ação/política/programa não é aleatória, é o *Propensity Score Matching* (PSM). Para isso, são necessários dois grupos: o de tratamento e o de controle. O primeiro inclui os municípios que são exportadores da agropecuária; o segundo, aqueles que não são exportadores.

A dificuldade em medir os efeitos entre os dois grupos reside nas diferenças de características existentes entre eles (como distância do porto, intensidade de capital físico/tecnologia rural, capital humano, produção agropecuária inicial, etc.). Essas características podem determinar a diferença na variável de interesse. Cavalcanti et al. (2016) apontam que a avaliação ideal seria comparar o mesmo grupo em dois contextos: com e sem participação em uma ação. Como isso não é possível, a alternativa é criar um grupo estatisticamente idêntico, onde o diferencial seja apenas a participação ou não na ação.

O método PSM permite essa comparação, encontrando os semelhantes entre os municípios que são exportadores industriais (tratamento, T=1) e os que não são (controle, T=0). A propensão é gerada a partir das características observáveis dos municípios, tornando a participação aleatória (Heinrich et al., 2010).

É importante destacar o problema da multidimensionalidade: um município pode se assemelhar a diferentes municípios em distintas características. Segundo Rosenbaum e Rubin (1983), o PSM minimiza esse problema ao calcular a probabilidade de tratamento com base nas características observáveis (covariáveis), medida pelo modelo Logit:

$$P(T_i = 1|X_i) = \frac{1}{1+e^{-X_i'\beta}} \quad (6)$$

Em que:  $P(T_i=1|X_i)$  denota-se a probabilidade do município ser exportador, considerando suas covariadas.

A variável dependente de (6) refere-se às emissões de CO<sub>2</sub>e-GWP-AR6 em toneladas emitidos pelo setor agropecuário dividido pela área explorada (em hectares) em 2019<sup>55</sup>. Considerou-se como emissões CO<sub>2</sub>e-GWP-AR6 emitidos pelo setor agropecuário as emissões de metano da fermentação entérica do gado bovino, as emissões diretas de óxido nitroso (por animais em pastagem) e indiretas (por fenômenos de deposição atmosférica e lixiviação de nitrogênio). A área explorada é o somatório das áreas com lavouras permanentes e temporárias, áreas de pastagens naturais e plantada, áreas de matas e florestas naturais e plantadas (em hectares), coletadas junto aos Censos Agropecuários de 2006 e 2017.

O termo CO<sub>2</sub>e-GWP-AR6 é uma referência ao uso das métricas de Potencial de Aquecimento Global (GWP) atualizadas pelo Sexto Relatório de Avaliação do IPCC para calcular as emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> de diferentes gases de efeito estufa. O Termo CO<sub>2</sub> significa: "equivalente a CO<sub>2</sub>" o qual é uma forma de expressar a quantidade total de gases de efeito estufa em termos de seu impacto equivalente ao dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Já o termo GWP quer dizer "Global Warming Potential" (Potencial de Aquecimento Global), sendo uma métrica usada para comparar o impacto de diferentes gases de efeito estufa com base enquanto de calor eles retêm na atmosfera em relação ao CO<sub>2</sub>. E o termo AR6 refere-se ao "Sexto Relatório de Avaliação" (Assessment Report 6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). A variável CO<sub>2</sub>e-GWP-AR6 foi coletada pelo Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) para os anos de 2008 e 2019.

As covariadas incluídas em (6) seguiram trabalhos correlatos feitos por Schweizer (2022) e Oliveira et al (2020), considerando:

- ✓ Distância do porto (em Km), medindo à distância do porto mais próximo do município. Essa variável é utilizada como *proxy* logística, pois reflete os custos de transporte e o grau de integração dos municípios ao comércio internacional, afetando diretamente sua capacidade exportadora;
- ✓ Tratores/hectare, corresponde à potência dos tratores de rodas, medida em cavalos-vapor (c.v.), por hectare (Fonte: IBGE, Censo agropecuário de 2017). É empregada como *proxy* de mecanização agrícola, refletindo o nível de capitalização e intensidade

<sup>55</sup> Escolheu-se esse ano por anteceder o período pandêmico.

- tecnológica da produção;
- ✓ Analfabetismos, refere-se ao percentual de produtos rurais analfabetos (Fonte: IBGE, Censo agropecuário de 2017), servindo como indicador do capital humano disponível na atividade agropecuária;
- ✓ PIB inicial, corresponde ao PIB da agropecuária de 2007 (IBGE), sendo utilizada como proxy do nível inicial de desenvolvimento agrícola dos municípios.

Essas variáveis buscam captar os fatores estruturais, tecnológicos, humanos e logísticos que condicionam a inserção dos municípios no comércio agropecuário internacional<sup>6</sup>. A variável dependente do modelo (6) é binária, assumindo valor 1 para municípios exportadores da agropecuária em 2018 e 0, caso contrário. O ano de 2018 foi adotado por anteceder o período no qual se analisará o efeito da exportação sobre a EGEE.

Após estimar os escores de propensão a partir de (6), o PSM fez um pareamento<sup>7</sup> entre os municípios exportadores e não exportadores com escores iguais ou próximos e, em seguida, avaliou se o grupo de tratamento (municípios exportadores) obteve uma EGEE no ano de 2019 estatisticamente superiores aos do grupo de controle.

Ademais, como teste de balanceamento, foram realizados o teste de médias (Apêndice A) e a análise de similitude entre os grupos tratados e controles pareados (Apêndice B), ambos indicando boa qualidade no pareamento e reforçando a robustez das estimativas obtidas.

Inicialmente, aplicou-se o PSM para todos os municípios da fronteira agrícola do Brasil (das regiões Norte e Centro-Oeste), estimando o impacto das exportações agropecuárias sobre a EGEE. Em seguida, a análise foi refinada por meio da segmentação dos municípios tratados em: 1. Municípios que exportaram em 2007 e em 2018; 2. Municípios que exportaram apenas em 2018. No Quadro 1 tem a síntese dos grupos de tratamento e controle que foram utilizadas na análise dessa pesquisa.

Quadro 1: Grupo de controle e de tratamento – PSM

Modelos	Controle	Tratamento
Modelo 1	Municípios não exportadores da agropecuária	Municípios exportadores da agropecuária em 2018
Modelo 2	Municípios não exportadores da agropecuária	Municípios exportadores da agropecuária em 2018 e exportadores em 2007
Modelo 3	Municípios não exportadores da agropecuária	Municípios exportadores da agropecuária em 2018 e que não exportavam em 2007

Fonte: organizado pela pesquisa

#### 4. EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (EGEE) AGROPECUÁRIA: ANÁLISE DO EFEITO DA ÁREA PRODUZIDA E DA EXPORTAÇÃO NAS REGIÕES NORTE E CENTRO-OESTE

O Brasil é um dos países mais importantes no que se refere à produção da agropecuária. Essa relevância se sustenta não apenas em decorrência da sua crescente produtividade, mas

<sup>6</sup> Outras variáveis explicativas foram incluídas em (6), como percentual da área destinada a pecuária, densidade populacional rural, percentual da área de matas e florestas; entretanto, ao realizar o teste t de médias do grupo de controle e de tratamento após o pareamento, essas variáveis não se apresentam estatisticamente iguais para esses dois grupos. Por isso, retirou-as da estimação de (6).

<sup>7</sup> Ressalta-se que o pareamento (*matching*) foi realizado por meio do algoritmo do vizinho mais próximo (dois vizinhos com reposição), com a ratificação dos dados por meio do caliper 0,01, Kernel e 1 vizinho, enfatizando que o primeiro método se apresentou como o mais adequado, dada a similaridade observada para a propensão do grupo de controle e tratado após o pareamento, evidenciado por meio da função de densidade do Propensity Score (Apêndice B).

também pela ampla extensão territorial que é dedicada a atividade. Conforme Araújo et al. (2023), cerca de 30% do território nacional - equivalente a 263 milhões de hectares - estão ocupados pela agropecuária.

Portanto, o Brasil apresenta uma vantagem expressiva quando comparado aos demais países, principalmente em virtude da disponibilidade de terras. Conforme salienta Bezerra e Cleps Junior (2004), nos últimos anos, a expansão da produção em novas terras foi impulsionada principalmente pelos avanços tecnológicos, pelas políticas públicas e por investimentos em infraestrutura logística. Esses fatores permitiram a ampliação da oferta de *commodities*, elevando a produção especialmente nas regiões Centro-Oeste e Norte do país, consolidando sua liderança em mercados internacionais e contribuindo para o *superávit* da balança comercial.

Contudo, paralelamente ao crescimento da produção, a expansão da fronteira agrícola também revelou impactos ambientais significativos. Conforme apresentado na Tabela 1, as emissões médias de CO<sub>2</sub> se intensificaram em 42% entre 2008 e 2019, com 64% dos municípios registrando elevação no período. Nas áreas de fronteira agrícola (Norte e Centro-Oeste), o cenário se mostrou ainda mais crítico, apresentando 100% de crescimento médio das emissões, com 75% dos municípios elevando o montante emitido.

Ressalta-se que, embora a média das emissões da agropecuária por área explorada (EGEE) na fronteira agrícola ainda seja inferior à média nacional, a intensidade do crescimento foi significativamente mais expressiva. No cenário nacional, o indicador manteve-se praticamente estável, ao passo que, na fronteira agrícola, observou-se uma aceleração das emissões médias, possivelmente associada à intensificação da produção agropecuária.

Tabela 1 - Estatísticas descritivas das EGEE da agropecuária por área explorada (ton/ha) – municípios do Brasil e da fronteira agrícola (NO e CO) – 2008 e 2019.

Região	Média	Desvio padrão	Coefficiente de Variação	Taxa de cresc. Média EGEE(%)	% de municípios com elevação Das EGEE2019/2008
Brasil 2008	2.22	1.51	67.89	41.90	64.00
Brasil 2019	2.25	1.34	59.62		
NO e CO 2008	1.59	0.79	50.54	100.29	75.00
NO e CO 2019	2.01	1.03	51.38		

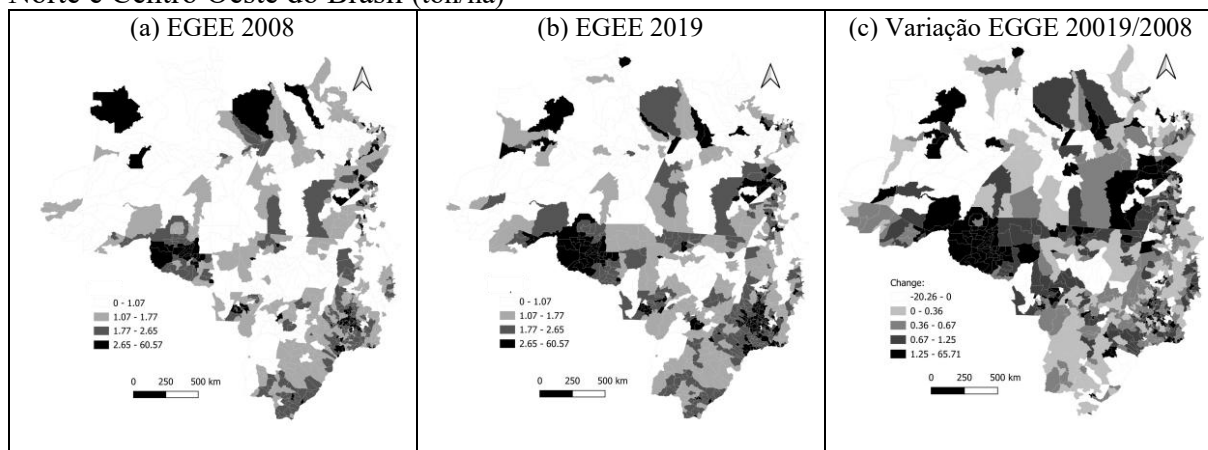
Fonte: Resultado da pesquisa.

Nota: EGEE refere-se às emissões dos gases de efeito estufa da agropecuária (ton.) por área explorada (ha)

A Figura 1 apresenta a distribuição espacial das EGEE nos municípios da fronteira agrícola brasileira entre os anos de 2008 (a) e 2019 (b), além da variação entre os dois períodos (c). Em 2008, observam-se maiores níveis de EGEE em municípios localizados no sul da área de fronteira, especialmente na porção sul do Mato Grosso e em áreas mais consolidadas do Centro-Oeste. Em contrapartida, em 2019, nota-se uma intensificação das emissões também nas porções mais ao norte da fronteira agrícola, com destaque para áreas do sul do Pará, norte do Mato Grosso e partes do Tocantins e do Maranhão.

O mapa de variação (Figura 1c) evidencia esse avanço, com os maiores incrementos de EGEE ocorrendo, na sua maioria, nas áreas mais recentes de ocupação agropecuária. Esse padrão sugere um deslocamento da pressão ambiental rumo ao norte da fronteira agrícola, espaços que apresentavam inicialmente menores emissões, tendendo a refletir um processo de intensificação produtiva sobre novas áreas da região.

Figura 1: EGEE 2008 (a), EGEE 2019 (B) e Variação do EGEE 2008/2019 – Municípios do Norte e Centro Oeste do Brasil (ton/ha)



Fonte: Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG)

Ademais, observa-se a presença de um padrão de distribuição espacial das EGEE ao longo desses municípios (Figura 1). Os resultados da Tabela 2 indicam que, tanto em 2008 quanto em 2019, havia certa proximidade geográfica entre os municípios com níveis semelhantes de emissões, evidenciando a presença de autocorrelação espacial positiva. Somado a isso, a redução do valor do I de Moran ao longo do período evidencia para um enfraquecimento dessa concentração, indicando que as emissões passaram a se distribuir ao longo de toda a região, com novas áreas registrando também níveis elevados de EGEE. Tal resultado aponta para uma expansão espacial do processo emissor, a qual pode ser ratificada por meio da Figura 1c.

Na Tabela 2 também é possível verificar o valor do I de Moran bivariado (0,08), calculado entre os níveis de EGEE de 2008 e a variação das emissões no período de 2008 a 2019. Esse resultado reforça a dinâmica observada *a priori*, indicando que os municípios com maiores níveis iniciais de emissões tenderam a estar cercados por vizinhos que, na média, registraram os maiores crescimentos de EGEE subsequentes. Esse resultado sugere que o avanço das emissões ao longo da fronteira agrícola segue uma lógica espacial cumulativa, com intensificação a partir de áreas ambientalmente mais pressionadas.

Tabela 2: I de Moran – EGEE 2008 (a), EGEE 2019 (B) e Variação do EGEE 2008/2019 – Municípios do Norte e Centro Oeste do Brasil

	EGEE 08	EGEE18	EGEE08 x Variação EGEE08/19 (1)
I de Moran	0.44*	0.11*	0.08*

Fonte: Resultado da pesquisa

Nota: (1) coeficiente I de Moran Bivariado. \* nível de significância de 1%.

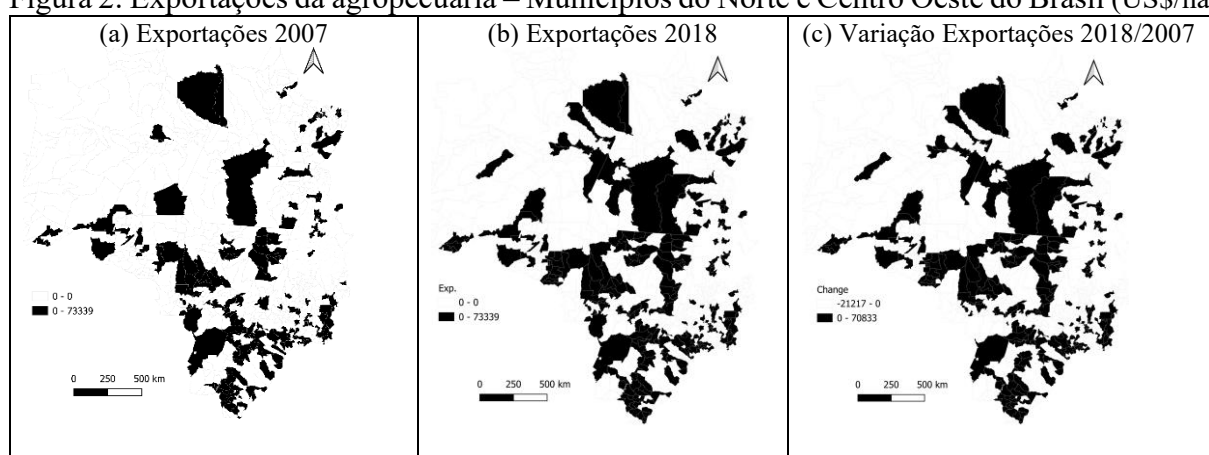
É um dos fatores que poderia estar pressionando a ampliação da produção da agropecuária na fronteira agrícola, contribuindo diretamente para a intensificação das EGEE na região, seria a busca pela inserção internacional do setor. Alguns autores, como Hertel et al. (2010), Peters et al. (2011), Fearnside (2005), relacionam a intensificação das emissões de gases de efeito estufa como um resultado da expansão da produção agropecuária voltada à exportação, via a conversão direta de áreas naturais.

Entretanto, outros autores (Tilman et al., 2011; Pretty et al., 2006) apontam que a inserção internacional da produção agropecuária poderia exercer um efeito contrário, mitigando os impactos ambientais, uma vez que a pressão de mercados externos e os compromissos

assumidos em acordos multilaterais poderiam estimular a adoção de práticas produtivas mais sustentáveis e a limitar o avanço da produção sobre ecossistemas sensíveis.

Neste sentido, analisou-se a distribuição das exportações da agropecuária ao longo da região de fronteira agrícola do Brasil (Figura 2), comparando com a distribuição das EGEE (Figura 1). Observa-se que nem todos os municípios exportadores de produtos da agropecuária registraram as maiores variações de EGEE. Pelo contrário, diversos municípios exportadores, especialmente aqueles que já eram inseridos internacionalmente em 2007, apresentaram variações menores de emissões. Ademais, conforme apresentado na Tabela 3, os municípios que já exportavam em 2007 e mantiveram essa condição em 2018 - totalizando 157 municípios da fronteira agrícola - registraram, em média, os menores valores de EGEE quando comparados tanto aos municípios que passaram a exportar após 2007 quanto àqueles que não exportavam em nenhum dos dois períodos (Tabela 3).

Figura 2: Exportações da agropecuária – Municípios do Norte e Centro Oeste do Brasil (US\$/ha)



Fonte: ComexStat.

Nota: em negrito são municípios que apresentaram alguma exportação da agropecuária; em branco, são municípios não exportadores.

Tabela 3: Valor médio de EGEE por grupos de municípios específicos - ton/ha - 2019

Municípios	2019
Exportadores em 2018 e 2007	1.88
Exportadores apenas em 2018 e não exportadores em 2007	1.99
Não exportadores	2.03

Fonte: SEE

Portanto, esses resultados não necessariamente indicam que municípios exportadores de produtos da agropecuária tendem a ter maior média de emissão de CO<sub>2</sub>. Para validar essas inferências, controlaram-se as características específicas de cada município e estimou-se, por meio do método *Propensity Score Matching* (PSM), o efeito médio de ser exportador de produtos agropecuários sobre as EGEE, conforme apresentado na subseção seguinte.

#### 4.1 Efeito de “ser Exportador” na EGEE

Antes de estimar o impacto da exportação sobre as emissões, é necessário compreender quais fatores explicam a inserção internacional da agropecuária dos municípios da fronteira agrícola do Brasil. Em 2017, apenas 25% dos municípios dessa região eram exportadores, evidenciando que a inserção internacional não é uma característica generalizada, mas restrita a localidades com combinações específicas de dotação de fatores, estrutura produtiva e inserção logística.

De forma mais específica, por meio do modelo Probit (Tabela 4), identificou-se que, na média, a probabilidade de ser um município exportador está positivamente associada à intensidade de capital e tecnologia (medida pela potência de tratores por hectare), e ao PIB agropecuário inicial. Esses resultados indicaram que a inserção internacional tendeu a ocorrer em municípios com maior capacidade produtiva e infraestrutura consolidada, o que corrobora evidências de Helfand et al. (2015) e Gasques et al. (2019) sobre a importância da mecanização e do acúmulo prévio de capital físico para a competitividade externa. Em contrapartida, a predominância da produção da pecuária apresentou relação negativa com a exportação, refletindo sistemas produtivos extensivos e menos integrados às cadeias globais, como apontado por Arima et al. (2011) e Garrett *et al.* (2013).

A distância ao porto não se mostrou estatisticamente significativa. Isso é justificado, em parte, dado que todos os municípios pertencem às duas regiões (Norte e Centro-Oeste) indicando que, no contexto amazônico e do Centro-Oeste, a logística de exportação é mediada por rotas multimodais e por corredores de transporte específicos que reduzem a dependência da proximidade física com portos marítimos (Barona et al., 2010). Já o analfabetismo rural teve associação negativa e significativa, reforçando o papel do capital humano na inserção internacional, conforme previsto pela teoria do capital humano (Becker, 1964) e evidenciado em estudos sobre a difusão tecnológica no meio rural brasileiro.

Tabela 4: Modelo Probit - Variável dependente: Município exportador (valor 1) ou Município não exportador (0) – municípios das regiões Norte e Nordeste

Variável Explicativa	Coeficiente		
	Todos os municípios	Municípios exportadores de 2007 e 2018 e municípios não exportadores em ambos os anos	Municípios exportadores apenas em 2018 e não exportadores em ambos os anos
Tratores/ha	1,20*	3,22*	1,01
Pecuária	-0,93*	-0,45*	-0,21
PIB inicial	0,003*	0,32*	0,24
Distância do porto	0,00001	0,00001	-0,00002
Analfabetismo	-2,89*	-3,62*	-1,74*

Fonte: Resultado da pesquisa

Nota: \* Estatisticamente significativo a um nível de significância de 5; Distância do porto (em Km), refere-se à distância do porto mais próximo do município; Tratores/ha corresponde à potência dos tratores de rodas, medida em cavalos-vapor (c.v.), por hectare. Analfabetismos, refere-se ao percentual de produtos rurais analfabetos; PIB inicial, corresponde ao PIB da agropecuária de 2007.

Ressalta-se que, por meio da estimação do modelo Probit (Tabela 4) foi possível identificar os fatores associados à probabilidade de um município ser exportador; ademais, também permitiu construir escore de propensão para cada município, visando compor os grupos de tratamento e de controle. Esse procedimento assegura que a análise do efeito médio da exportação sobre as emissões de gases de efeito estufa não decorra apenas de diferenças estruturais pré-existentes entre os municípios, mas sim da condição de inserção internacional propriamente dita.

Neste contexto, uma vez realizado o pareamento entre os municípios não exportadores da agropecuária e os inseridos internacionalmente, investigou-se a condição de “ser exportador” está associada a maiores ou a menores níveis de EGEE quando comparada aos municípios não exportadores (Tabela 5). Como resultado, infere-se a existência de diferença média negativa e estatisticamente significativa para o conjunto de exportadores, com EGEE, em média, 0,26 t/ha menor do que o observado nos municípios não inseridos internacionalmente.

Tabela 5: Diferença média da EGEE (ton/ha) em 2019 - municípios exportadores (tratados) e não exportadores (controle), após o pareamento

Municípios exportadores - Tratados	Número de municípios		Média do IDI		Diferença
	Controle	Tratamento	Controle	Tratamento	
Todos os municípios exportadores em 2018	618	175	2,17	1,91	-0,26**
Municípios exportadores em 2018 e que não eram exportadores em 2007	597	70	2,14	1,88	0,25
Municípios exportadores em 2007 e 2018	597	157	2,28	1,99	-0,28*

Fonte: Resultado da pesquisa

Nota: \* p < 0.01. \*\*p<0.10

Importa destacar que autores como Antweiler et al. (2001), Tilman et al. (2011) e Pretty et al. (2006) apontam que a produção agrícola voltada ao mercado internacional pode afetar o meio ambiente de maneiras distintas, conforme o estágio de desenvolvimento do setor: quando a inserção externa decorre de expansão de área (efeito escala), tende a prevalecer um impacto negativo, ampliando a degradação ambiental; quando a elevação da produção resulta da adoção de tecnologias mais limpas e eficientes (efeito técnico) e/ou de mudanças na composição para atividades relativamente menos poluentes (efeito composição), o efeito esperado é positivo. No caso da fronteira agrícola brasileira, esse enquadramento ajuda a interpretar os resultados: entre os municípios que já exportavam desde 2007, a diferença média de EGEE em relação aos não exportadores se apresentou negativa e estatisticamente significativa (-0,28 t/ha); entre aqueles que passaram a exportar apenas após 2007, não se verifica diferença média estatisticamente significativas (Tabela 5).

Esses resultados corroboram as inferências de autores como Berringer e Granato (2024), Gibbs et al. (2015) e Meyfroidt et al. (2020), segundo os quais compradores internacionais impõem exigências ambientais, pressionando fornecedores mais expostos à degradação ambiental a adequar práticas e tecnologias com potencial de reduzir as emissões por hectare. Em outras palavras, quanto mais intensa a inserção externa do município, maior tende a ser o cumprimento desses padrões, seja para preservar e/ou para ampliar mercados. Esse padrão é coerente com a maior intensidade exportadora observada entre os exportadores já inseridos desde 2007 - que passaram de US\$ 268,27/ha em 2007 para US\$ 962,79/ha em 2018 - em comparação aos entrantes de 2018, os quais apresentaram uma exportação média igual a US\$ 124,05/ha (Tabela 6).

Tabela 6: Valor exportado por grupos de municípios específicos – US\$/ha - 2007 e 2017

Municípios	2017	2007
Exportadores depois de 2007*	124,05	-
Exportadores desde 2007**	962,79	268,27

Fonte: Comex, com dados trabalhados pela pesquisa.

Nota: \* municípios que não exportavam em 2007 e registraram exportação em 2017. \*\* municípios que registraram exportação tanto em 2007 como também em 2017.

Portanto, pode-se afirmar que, em média, as exportações agropecuárias tendem a mitigar os impactos ambientais na fronteira agrícola. Ademais, quanto mais consolidada a inserção internacional do município, menor é o impacto da produção agropecuária sobre as emissões de gases de efeito estufa. A análise exploratória inicial corrobora essas conclusões: entre 2008 e 2019, as emissões cresceram e se disseminaram no Norte/Centro-Oeste (Tabela 1; Figura 1), porém os municípios que já exportavam desde 2007 apresentaram, em média, EGEE inferiores aos dos entrantes e dos não exportadores (Tabela 3; Figura 2). Ou seja, onde a inserção externa é mais consolidada, prevalecem ganhos técnicos e de composição que, em parte, mitigam as

emissões, ao passo que, nas frentes mais recentes, tende a predominar o efeito escala associado à incorporação de novas áreas.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste artigo consistiu em analisar o efeito das exportações da agropecuária sobre as emissões de gases de efeito estufa (EGEE) nas regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil, consideradas como fronteira agrícola. A combinação de análise exploratória (2008–2019) e estimação por *Propensity Score Matching* (PSM) permitiu qualificar o padrão espacial das emissões e identificar o efeito médio associado à condição de exportar.

A análise exploratória mostrou um crescimento das EGEE substancialmente superior ao observado no país: cerca de 42% no Brasil versus 100% na fronteira entre 2008 e 2019, com 75% dos municípios da fronteira registrando aumento. Os maiores incrementos ocorreram, em geral, nas áreas mais recentes de ocupação agropecuária, indicando deslocamento da pressão ambiental para o norte da fronteira e um processo de intensificação produtiva sobre novas áreas. Observou-se, ainda, autocorrelação espacial positiva e um padrão cumulativo: municípios próximos de áreas já altamente emissoras em 2008 tenderam a apresentar maiores variações subsequentes, sugerindo difusão territorial do processo emissor.

Comparando municípios de perfil semelhante, a condição de ser um exportador se associa, na média, a uma menor emissão de CO<sub>2</sub>, especialmente entre os exportadores mais consolidados. Já entre os municípios que se inseriram mais recentemente no comércio internacional, não se observa diferença estatisticamente significativa em relação aos não exportadores. Isso indica que, nos municípios onde a inserção externa é consolidada, prevalecem ganhos de eficiência e mudanças de composição que tendem a conter as emissões; nas frentes recentes, predomina o efeito escala da incorporação de novas áreas, elevando a pressão ambiental.

Diante destes resultados, algumas políticas podem mitigar o impacto ambiental da produção agropecuária na região. Dentre elas, a focalização de ações de comando e controle, crédito e assistência técnica nas novas frentes de expansão se torna relevante, especialmente naqueles municípios em que o efeito escala se apresenta como mais intenso. Aprofundar a difusão de tecnologias de baixa emissão e critérios de sustentabilidade atrelados ao comércio exterior também podem mitigar o impacto ambiental, aproveitando o papel disciplinador dos mercados para consolidar ganhos técnicos.

Como limitações desta pesquisa, reconhece-se que o PSM mitiga vieses de composição observáveis, mas não elimina inteiramente a possibilidade de confundimento não observado; avanços futuros podem explorar outras estratégias quase-experimentais e desagregação por produto (soja, bovinos), além de integrar sensoriamento remoto para distinguir, com maior precisão, mudança de uso da terra decorrente da intensificação tecnológica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, A. A. C. et al. (2020). Amazônia em chamas: o fogo e o desmatamento em 2019 e o que vem em 2020. Nota Técnica nº 3. *IPAM*.

ANTWEILER, W.; COPELAND, B. R.; TAYLOR, M. S. (2001). Is free trade good for the environment? *American Economic Review*, 91 (4): 877–908.

ARIMA, E. Y., RICHARDS, P., WALKER, R., & CALDAS, M. M. (2011). Statistical confirmation of indirect land use change in the Brazilian Amazon. *Environmental Research Letters*, 6(2).

ASSUNÇÃO, J.; CHIAVARI, J. 2015. *Towards efficient land use in Brazil*. Climate Policy Initiative, Set. 2015.

BARONA, E. et al. (2010). The role of pasture and soybean in deforestation of the Brazilian Amazon. *Environmental Research Letters*, 5 (2).

BECKER, G. (1964). *Human Capital: A Theoretical and Empirical Analysis*. University of Chicago Press.

BERRINGER, T., GRANATO, L. (2024). O acordo de princípio Mercosul-União Europeia e os conflitos sociais em torno do seu avanço e ratificação. *Caderno CRH*, 37(1).

BEZERRA, T. L.; CLEPS JUNIOR, J. F. (2004). *A consolidação da agroindústria e a modernização agrícola no Centro-Oeste brasileiro*. Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 11(1): 34-45.

COLE, M. A. (2004). Trade, the pollution haven hypothesis and the environmental Kuznets curve: examining the linkages. *Ecological Economics*, 48(1): 71-81.

DOMINGUES, Maria Suely de Moura; BERMANN, Célio. (2012). O Brasil no contexto das mudanças climáticas: a governança das políticas de mitigação. *Revista Ambiente e Sociedade*, 1:1-20.

FEARNSIDE, P. M. (2005). Deforestation in Brazilian Amazonia: History, Rates, and Consequences. *Conservation Biology*, 19(3), 680-688

GABARDO, Eduardo; et al. (2020). Expansão da fronteira agrícola e impactos ambientais no Brasil. *Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos*, 2: 45–68.

GARRETT, R. D. et al. (2018). Intensification in agriculture-forest frontiers: land use responses to development and conservation policies in Brazil. *Global Environmental Change*, 53: 233–243.

GARRETT, R. D., LAMBIN, E. F., & NAYLOR, R. L. (2013). The new economic geography of land use change: Supply chain configurations and land use in the Brazilian Amazon. *Land Use Policy*, 34:265–275.

GASQUES, J. G., BACHI, M., BASTOS, E. T., BACCHI, M. R. P. (2019). Produtividade da agropecuária brasileira. *Revista de Política Agrícola*, 28(1).

GIBBS, H. K. et al. (2015). Brazil's soy moratorium. *Science*, 347 (6220): 377–378.

HEINRICH, C.; MAFFIOLI, A.; VÁZQUEZ, GONZALO. 2010. *A Primer for Applying Propensity-Score Matching: Impact-Evaluation Guidelines*. Inter-american Development Bank.

- HELFAND, S. M., LEVINE, E. S. (2004). Farm size and the determinants of productive efficiency in the Brazilian Center-West. *Agricultural Economics*, 31(2-3), 241–249.
- HERTEL, T. W., GOLUB, A. A., JONES, A. D., O’HARE, M., PLEVIN, R. J., & KAMMEN, D. M. (2010). Effects of US Maize Ethanol on Global Land Use and Greenhouse Gas Emissions: Estimating Market-mediated Responses. *BioScience*, 60(3), 223–231
- LAPOLA, D. M.; MARTINELLI, L. A.; PERES, C. A.; OMETTO, J. P. H. B.; FERREIRA, M. E.; NOBRE, C. A.; AGUIAR, A. P. D.; BUSTAMANTE, M. M. da C.; CARDOSO, M. F.; COSTA, M. H.; JOLY, C. A.; LEITE, C. C.; MOUTINHO, P.; SAMPAIO, G.; STRASSBURG, B. B. N.; VIEIRA, I. (2014). Pervasive transition of the Brazilian land-use system. *Nature Climate Change*, 4: 27–35.
- LÓPEZ, R., & GALINATO, G. I. (2005). Deforestation and Forest-Induced Carbon Dioxide Emissions in Tropical Countries: How Do Governance and Trade Openness Affect the Forest-Income Relationship? *The Journal of Environment & Development*, 14(1), 73–100.
- MEYFROIDT, P. et al. (2020). Ten facts about land systems for sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117 (46): 27767–27777.
- NEPSTAD, Daniel; SCHWARTZMAN, Stephan; BAMBERGER, Bruce; SANTILLI, Mauro; RAY, David; SCHLESINGER, Penelope et al. (2021). Slowing Amazon deforestation through public policy and supply-chain interventions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(29).
- OLIVEIRA, HEDER CARLOS DE; JEGU, ELODIE; SANTOS, VENUSSIA ELIANE. (2020). Dynamics and determinants of export diversification in Brazil from 2003 to 2013. *Economia e Sociedade (Campinas)*, 29(68): 29–51.
- PETERS, G. P., MINX, J. C., WEBER, C. L., & EDENHOFER, O. (2011). Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(21), 8903–8908.
- PRETTY, J. N., NOBLE, A. D., BOSSIO, D., DIXON, J., HINE, R. E., PENNING DE VRIES, F. W. T., & MORISON, J. I. L. (2006). Resource-Conserving Agriculture Increases Yields in Developing Countries. *Environmental Science & Technology*, 40(4), 1114–1119.
- RIBEIRO, C. et al. (2005). Impactos da escolaridade dos produtores rurais sobre a adoção de práticas agrícolas sustentáveis. *Revista Brasileira de Economia Agrícola*, 2: 45–70.
- RICHARDS, P. et al. (2014). Soybean development: the impact of a decade of agricultural change on urban and economic growth in Mato Grosso, Brazil. *PLOS ONE*, 9 (12).
- ROSENBAUM, PAUL R.; RUBIN, DONALD B. 1983. The central role of the propensity score in observational studies for causal effects. *Biometrika*, 70 (1): 41-55.
- SCHIELEIN, Johannes; BÖRNER, Jan. (2018). Recent transformations of land use and land cover dynamics across different deforestation frontiers in the Brazilian Amazon. *Land Use Policy*, 76: 81–94.

SCHWEIZER, H. *Investigating the growth of Brazilian agricultural exports*. AgeconSearch, 2022. Trabalho disponível em: [https://ageconsearch.umn.edu/record/329731/files/WEFFall2022Issue20\\_InvestigatingtheGrowthofBrazilianAgriculturalExports.pdf](https://ageconsearch.umn.edu/record/329731/files/WEFFall2022Issue20_InvestigatingtheGrowthofBrazilianAgriculturalExports.pdf). Acesso em: 6 ago. 2025

SEEG. (2023). *Análise das emissões brasileiras de Gases Efeito Estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2021*.

SPAROVEK, G.; REYDON, B. P.; GUEDES PINTO, L. F.; FARIA, V.; DE FREITAS, F. L. M.; AZEVEDO-RAMOS, C.; GARDNER, T.; HAMAMURA, C.; RAJÃO, R.; CERIGNONI, F.; SIQUEIRA, G. P.; CARVALHO, T.; ALENCAR, A.; RIBEIRO, V. (2019). Who owns Brazilian lands? *Land Use Policy*, 87: 104062.

TILMAN, D.; BALZER, C.; HILL, J.; BEFORT, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108 (50): 20260–20264.

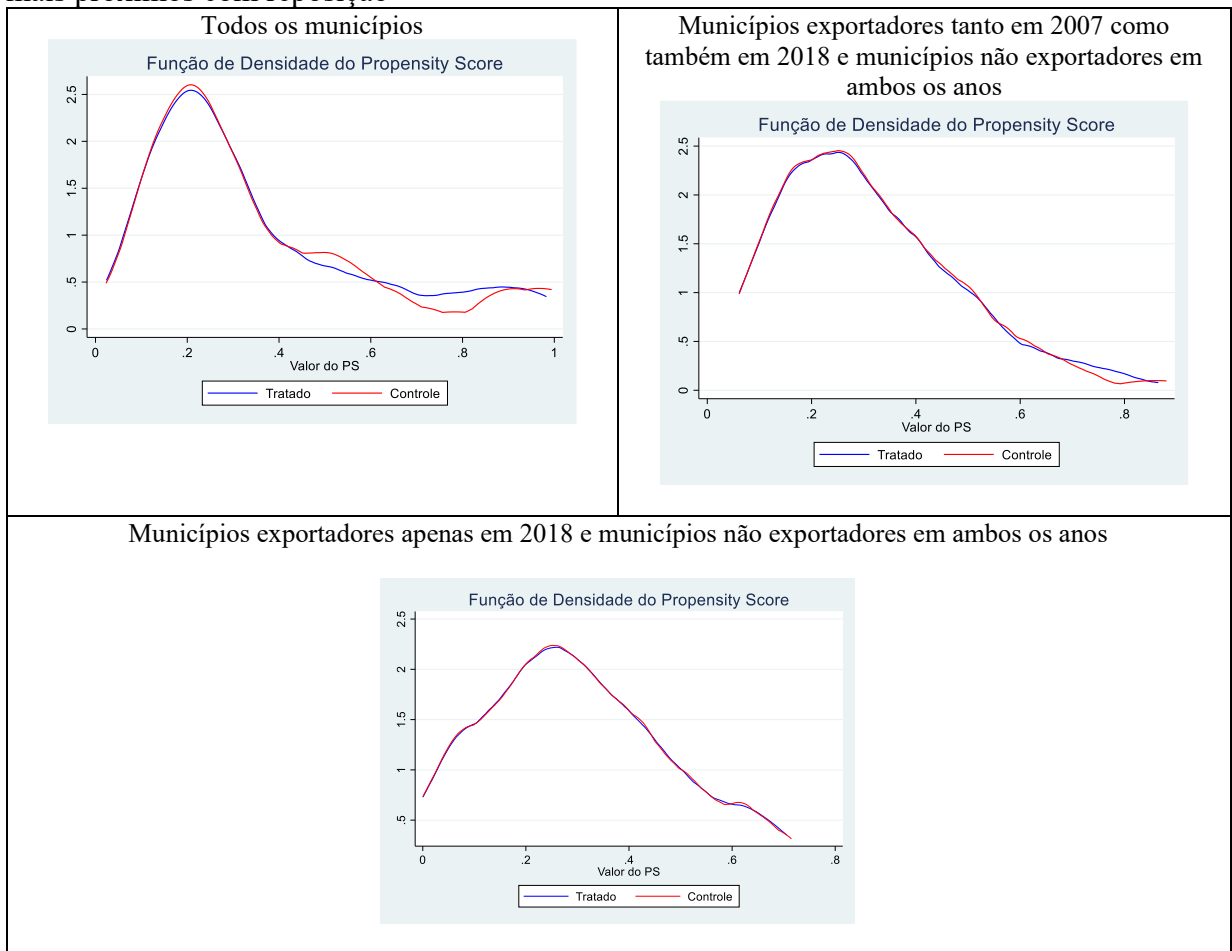
## APÊNDICES

Apêndice A: P-valor do Teste t para a diferença de médias entre as covariadas após o pareamento – IDI – Municípios da fronteira agrícola

Modelo	Tratores/ha	Pecuária	PIB inicial	Distância do Porto	Analfabetismo
Todos os municípios	0,08	0,61	0,79	0,78	0,84
Municípios exportadores tanto em 2007 como também em 2018 e municípios não exportadores em ambos os anos	0,86	0,60	0,71	0,79	0,77
Municípios exportadores apenas em 2018 e não exportadores em ambos os anos	0,87	0,45	0,76	0,66	0,85

Fonte: Resultado da Pesquisa.

Apêndice B: Função Densidade do Propensity Score – Método de pareamento “dois vizinhos mais próximos com reposição”



Fonte: Resultado da Pesquisa