Quanto o desmatamento custa à produtividade da soja no Brasil?

Marcos Vinícius Vieira, Universidade Federal de Viçosa, marcos.vieira1@ufv.br
Michelle Márcia Viana Martins, Universidade Federal de Viçosa, michelle.viana@ufv.br
Alan Leal, FGV Projetos, alan.leal@thetalab.com.br

Área ANPEC: Área 10 - Economia Regional e Urbana

Resumo: O Brasil deve responder por cerca de 53% das exportações mundiais de soja até 2034, e boa parte dessa liderança apoiou-se na conversão de vegetação nativa, prática hoje penalizada pela regulação europeia antidesmatamento (EUDR) e por esquemas de certificação. Isso levanta uma questão de eficiência, e não apenas ambiental: desmatar para plantar mais compensa em rendimento? A evidência disponível é ambígua e provém, em grande parte, de simulações biofísicas ou de recortes transversais, que não acompanham o mesmo território ao longo do tempo nem conectam o dano à pressão do comércio. Este estudo avança nesses dois pontos ao medir quanto o desmatamento custa à produtividade da soja e ao verificar se a inserção no comércio internacional altera esse custo, a partir de um painel de 2.758 municípios entre 2010 e 2024. A orientação exportadora é imputada por um algoritmo que reancora a demanda externa ao município que de fato produz, e não àquele onde a exportação é apenas registrada, o que corrige um viés recorrente das estatísticas oficiais. O desmatamento reduz a produtividade na safra seguinte: cada 1% de área desmatada diminui o rendimento em cerca de 0,034%, de modo que um município que dobra sua área suprimida perde algo próximo de 3,4% de produtividade, perda que se acumula por pelo menos dois anos e caracteriza um passivo edafoclimático persistente. A orientação exportadora não altera esse quadro, pois o efeito do desmatamento incide de modo semelhante sobre municípios exportadores e não exportadores. Diante de um mercado internacional cada vez mais rigoroso, no qual as exigências ambientais se convertem em barreira de acesso, a competitividade da soja brasileira dependerá de ganhos de produtividade que não decorram da abertura de novas áreas.
Palavras-chave: desmatamento; produtividade da soja; orientação exportadora; dados em painel; uso da terra.

How Much Does Deforestation Cost Soybean Productivity in Brazil?

Abstract: *Brazil is set to supply about 53% of global soybean exports by 2034, and much of that lead has relied on the conversion of native vegetation, a practice now penalized by the European anti-deforestation regulation (EUDR) and by certification schemes. This raises a question of efficiency, not only an environmental one: does clearing land to plant more pay off in yield? The available evidence is ambiguous and comes largely from biophysical simulations or cross-sectional studies, which neither follow the same territory over time nor link the damage to trade pressure. This study advances on both fronts by measuring how much deforestation costs soybean productivity and by testing whether integration into international trade alters that cost, using a panel of 2,758 municipalities between 2010 and 2024. Export orientation is imputed through an algorithm that reanchors foreign demand to the municipality that actually produces, rather than the one where the export is merely registered, correcting a recurring bias in official statistics. Deforestation lowers next-season productivity: each 1% of deforested area reduces yield by about 0.034%, so that a municipality doubling its cleared area loses close to 3.4% of productivity, a loss that accumulates over at least two years and constitutes a persistent soil-climate liability. Export orientation does not change this picture, as the effect of deforestation falls similarly on exporting and non-exporting municipalities. As the international market grows stricter, with environmental requirements turning into barriers to access, the competitiveness of Brazilian soybeans will depend on productivity gains that do not stem from opening new land.*
Keywords: *deforestation; soybean productivity; export orientation; panel data; land use.*

1 Introdução

A cadeia global da soja movimentou cerca de US$ 155 bilhões em produção em 2023 e deve alcançar aproximadamente US$ 278 bilhões em 2031 (Voora et al., 2024), um crescimento que amplia o peso desse complexo nas transações entre países. Em 2024, mais de 40% da produção mundial foi destinada ao comércio internacional, proporção elevada frente a outras culturas agrícolas, e as projeções da OCDE e da FAO (OECD & FAO, 2025) apontam que o Brasil poderá responder por cerca de 53% das exportações globais até 2034, concentrando em um único país mais da metade do volume comercializado no mundo. Essa liderança combina ganhos de produtividade e maior pressão sobre o uso da terra (Chiacchio & Souza, 2024), ao mesmo tempo em que exigências ambientais passaram a integrar as normas de acesso a mercados, caso da regulação europeia sobre produtos associados ao desmatamento (Trevizan et al., 2025) e da difusão de esquemas de certificação de produção livre de desflorestamento (Barbosa et al., 2024). O país que abastecerá metade do mercado mundial de soja é também aquele cujo modelo de expansão está sob escrutínio ambiental, e sob esse problema que se questiona sobre a sustentabilidade produtiva da lavoura.

A alta demanda e os preços internacionais elevados estimulam a expansão da fronteira agrícola, com consequências sobre a área florestal (Quintam et al., 2023). Segundo a plataforma Trase (2024), a cadeia da soja respondeu por 794 mil hectares de perda de cobertura florestal e conversão de terras no Brasil entre 2017 e 2022, o que mostra a persistência do vínculo entre a produção da commodity e o desmatamento. Esse processo é mais visível no Cerrado, onde a expansão das lavouras acompanha o avanço da supressão vegetal, sobretudo no Matopiba (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), região em que os municípios com as maiores áreas desmatadas (São Desidério e Barreiras, na Bahia, e Balsas, no Maranhão) são, também, os maiores produtores do grão (Sauer, 2024).

A séries oficiais mostram a escala dessa transformação: a área destinada à produção de soja saltou de 10 milhões de hectares em 1988 para 46 milhões em 2024, avanço de 360% no período (IBGE, 2025). Esse crescimento apoiou-se na alteração da cobertura do solo, já que, entre 1985 e 2024, o Brasil acumulou perda de cerca de 111 milhões de hectares de vegetação nativa (MapBiomas, 2025). A coexistência espacial entre a expansão da área plantada e a supressão vegetal remete ao questionamento sobre a sustentabilidade de um modelo de crescimento que pode corroer a base biofísica da qual a própria lavoura depende, com efeitos sobre a produtividade.

A magnitude econômica desse efeito já foi dimensionada pela literatura, Flach et al. (2021) calculam que a receita de soja perdida com o aumento do calor extremo, decorrente da perda de vegetação nativa acumulada entre 1985 e 2012, alcançou US$ 99 por hectare a preços de 2005. O valor refere-se à safra 2012-2013 e corresponde à média ponderada para a Amazônia e o Cerrado. Bentley-McKune (2025) converge com esse resultado ao examinar 840 municípios do Cerrado entre 2013 e 2023 e constatar que a conversão de vegetação nativa para a produção de soja reduziu a produtividade regional em magnitude superior aos ganhos obtidos com a expansão da área plantada. Na ausência de desmatamento para a soja no Cerrado desde 2008, o autor estima que a região teria produzido um volume adicional de US$ 9,4 bilhões do grão entre 2013 e 2023, quase 8% da produção total do período.

A direção desse efeito, contudo, não é consensual, Pereira et al. (2025) estimaram uma função de produção para a Amazônia Legal com foco na agricultura familiar e encontraram elasticidades positivas, que associam aumentos no desmatamento a ganhos de produtividade de cerca de 2,8% em 2006 e de 2,9% em 2017. Esse resultado precisa ser examinado com cautela, porque a estrutura dos dados, um corte transversal do censo agropecuário realizado a cada dez anos, não permite controlar efeitos fixos nem capturar o horizonte de longo prazo, apenas variações transversais de curto prazo, de modo que o efeito é mais correlacional do que causal. Grande parte das estimativas disponíveis apoia-se em simulação biofísica ou em recortes regionais de poucas safras, e o estudo econométrico mais próximo em desenho toma o desmatamento como variável a ser explicada, e não a produtividade, o que deixa em aberto o efeito sobre o rendimento observado quando se acompanha o mesmo município ao longo de uma série anual longa. A divergência entre o dano estimado no Cerrado e o ganho transversal na Amazônia Legal não permite determinar o sinal nem a magnitude do efeito quando se acompanha o mesmo município ao longo do tempo, o que uma estrutura de painel está em condições de resolver.

Diante desse quadro e da relevância econômica do setor, este estudo responde a duas perguntas: em que medida o desmatamento afeta a produtividade da soja no Brasil, e qual o papel do comércio internacional nessa dinâmica. A soja é o produto agrícola mais produzido e exportado pelo país e um dos principais vetores da mudança no uso do solo, ao passo que o desmatamento sistêmico gera efeitos ambientais de longo prazo, entre eles a alteração do microclima, a degradação do solo e o aumento das emissões, que podem comprometer a própria lavoura. As duas perguntas, portanto, tratam do mesmo problema por ângulos complementares, o do dano biofísico e o da força econômica que o alimenta.

Para respondê-las, emprega-se um painel municipal construído a partir da Pesquisa Agrícola Municipal (PAM) e do MapBiomas. A base torna explícita a relação entre a produtividade das lavouras de soja e o desmatamento, e permite investigar os canais pelos quais esses efeitos operam. A contribuição do estudo está em relacionar essas duas dimensões sob a hipótese de que a demanda externa condiciona a relação entre desmatamento e produtividade. A exportação pode agravar o dano, ao recompensar a abertura de novas áreas e tornar os municípios mais dependentes da soja também mais expostos às externalidades da supressão vegetal. Entretanto, pode também atenuá-lo, se a inserção no mercado externo estimular a adoção de tecnologias que elevam a produtividade sem expandir a fronteira. Qual das duas forças prevalece é uma questão empírica que este estudo investiga com uma medida de exposição ao comércio que corrige um viés de localização até então incontornável.

A construção dessa medida esbarra em um problema conhecido das bases oficiais: as estatísticas do Comex Stat registram a exportação no município onde a operação é declarada (despacho aduaneiro), e não onde a produção destinada ao mercado externo realmente ocorreu. Esse registro desloca a pressão da demanda internacional dos municípios de fronteira, nos quais a supressão vegetal acontece, para os polos logísticos e portuários que apenas intermediam a saída do grão. Para corrigi-lo, aplica-se o algoritmo de imputação de exportações municipais de Leal e Martins (2025), que redistribui as exportações estaduais entre os municípios produtores com base na contiguidade geográfica e na relevância do emprego setorial. Assim, o estudo reancora a exposição comercial ao território que produz, condição para identificar os determinantes locais do desmatamento associado à expansão agrícola.

Testa-se, primeiro, a hipótese de que o desmatamento, embora permita a expansão da área plantada no curto prazo, gera efeitos ambientais que reduzem a produtividade da soja nos anos seguintes (H0). A partir daí, investiga-se se esse efeito é homogêneo entre os municípios ou se varia com o grau de inserção no mercado externo, o que abre duas possibilidades concorrentes. A orientação exportadora pode atenuar os danos do desmatamento, ao induzir a adoção de tecnologias que elevam a produtividade sem expansão de área (H1), ou pode amplificá-los, ao tornar os municípios mais dependentes da sojicultura também mais expostos às externalidades biofísicas da supressão vegetal (H2). O estudo discrimina entre as duas por meio de um termo de interação entre o desmatamento e a produção destinada ao mercado externo.

As respostas a essas perguntas são relevantes para a alocação de recursos escassos de política agrícola e ambiental. Caso o desmatamento reduza a produtividade da safra seguinte, a expansão da fronteira agrícola implica ampliar a área cultivada em detrimento do rendimento futuro, de modo que o investimento em intensificação, que eleva a produção sem incorporar novas terras, transcende a dimensão ambiental e configura-se como questão de eficiência produtiva. Determinar se a orientação exportadora atenua ou agrava esse passivo permite avaliar se os municípios que abastecem o mercado externo, responsáveis por parcela expressiva da expansão recente, demandam estímulo tecnológico ou medidas de contenção. Os resultados possuem implicações distintas: para o produtor, mostram se a conversão de vegetação nativa constitui um ativo ou um passivo de realização futura; para o formulador de política, quantificam em que medida a meta de redução de emissões associadas ao uso da terra, assumida na Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) mais recente (Brasil, 2024), pode ser atingida por ganhos de produtividade, e não por restrição de área; para o setor exportador, antecipam o custo de competir em mercados que passaram a penalizar o desmatamento. Postergar essa mensuração equivale a prosseguir com a expansão da fronteira sem conhecer o custo produtivo que lhe é inerente, em um momento no qual a regulação europeia e os esquemas de certificação já o convertem em barreira comercial. É a convergência entre o dano local e a pressão internacional que confere urgência, e não apenas pertinência, à questão.

O estudo estrutura-se em cinco seções, incluindo esta introdução. A seção 2 apresenta o referencial teórico e discute a literatura sobre os impactos das alterações ambientais na produtividade das commodities

agrícolas e o papel do comércio internacional. A seção 3 detalha a base de dados e a estratégia metodológica. A seção 4 expõe os resultados econométricos, com discussão; e a seção 5 sintetiza as considerações finais.

2 Revisão de Literatura

2.1 Problemas ambientais causados pelo desmatamento que afetam a produtividade da soja

A CONAB (2025) define a produtividade da soja como o rendimento médio por área colhida, expresso em quilogramas por hectare (kg/ha). Esse rendimento é determinado pela genética da planta, que estabelece o potencial produtivo, e pelas práticas de manejo, que reduzem perdas e ampliam o aproveitamento das condições naturais, entre elas o controle de pragas e doenças, o manejo da fertilidade do solo e a redução das perdas na colheita. A esses fatores soma-se o ambiente biofísico, que responde por cerca de 80% da variação da produtividade e reúne disponibilidade hídrica, temperatura do ar, radiação solar e características do solo (Campagnaro et al., 2025).

A OCDE e a FAO (OECD & FAO, 2023) definem desmatamento como a conversão permanente de áreas florestais para outros usos da terra, em geral associados à agricultura, à pecuária ou à infraestrutura. Convém distinguir o desmatamento bruto, que corresponde à perda total de cobertura florestal em determinado período, do desmatamento líquido, que representa o saldo entre a área desmatada e a área regenerada ou reflorestada. A conversão de uso do solo, conceito central adotado neste estudo, refere-se à alteração definitiva da categoria florestal para outro uso, com remoção completa da vegetação, característica da abertura de novas áreas agrícolas e pecuárias. A degradação florestal, por sua vez, denota a perda de qualidade ecológica da floresta sem que a área deixe de ser assim classificada, e ocorre por exploração seletiva, incêndios frequentes e fragmentação (OECD & FAO, 2023).

Nas regiões agrícolas brasileiras, o desmatamento segue padrões estruturados de ocupação e expansão que variam conforme o bioma e o estágio da fronteira agrícola. Dos Santos et al. (2023) apontam que a agropecuária é a causa da expansão dessa fronteira na Amazônia e que a perda florestal se concentra em imóveis privados, assentamentos e florestas públicas não destinadas. Os mesmos autores observam que o ritmo do desmatamento se acelerou a partir de 2019, quando a média anual de devastação saltou de 1.241 km² entre 2015 e 2018 para 2.596 km² por ano a partir de 2019, aumento de cerca de 109% em relação ao período imediatamente anterior.

As alterações ambientais induzidas pelo desmatamento atuam sobre a produtividade da soja por quatro canais que se reforçam: o hídrico, que combina a queda na evapotranspiração, a redução da umidade do ar e a alteração do ciclo de chuvas; o térmico, que reúne o aquecimento regional e a maior frequência de ondas de calor; o edáfico, ligado à perda de fertilidade do solo; e o biótico, associado à incidência de pragas e doenças. A discussão a seguir percorre cada um desses canais e a magnitude estimada de seus efeitos.

Santos et al. (2023) definem evapotranspiração como a transferência de água para a atmosfera pela evaporação do solo e da vegetação úmida e pela transpiração das plantas. Wang et al. (2021) mostram que a supressão florestal altera essa variável e que a magnitude da resposta depende de como os modelos climáticos representam a cobertura do solo em escala de sub-grade, já que esquemas que ignoram a fração de floresta dentro de cada célula tendem a subestimar a queda da evapotranspiração após o desmatamento. Esse recuo tem consequências produtivas, e Pereira et al. (2024), ao combinarem modelagem agrometeorológica com aprendizado de máquina para 47 municípios do oeste do Paraná no período de setembro a janeiro entre 2008 e 2022, verificaram que a evapotranspiração afeta negativamente os rendimentos da soja. O encolhimento da evapotranspiração propaga-se pelo regime de chuvas, e de Souza Batista et al. (2023) estimam que as alterações de precipitação induzidas pelo desmatamento reduzem os rendimentos de soja e milho no Brasil, resultado convergente com Leite-Filho et al. (2021), que associam a perda de floresta na Amazônia à queda de chuva e da receita agrícola.

Machado et al. (2023) avaliaram os efeitos do desmatamento sobre variáveis micrometeorológicas na transição Cerrado-Amazônia, em Mato Grosso, e observaram que a perda de cobertura florestal altera a magnitude e a sazonalidade da umidade relativa do ar, com médias de 89,4% em 2012 e 89,1% em 2013

nas áreas florestadas, contra 84,1% e 83,1% nas áreas desmatadas nos mesmos anos. Cruz et al. (2025) chegaram a resultado convergente ao analisar dados meteorológicos de queimadas e desmatamento em Belém entre 2015 e 2024. Essas variações têm consequências mensuráveis para a soja, e Ting et al. (2023), ao aplicarem regressão múltipla a dados de condado para milho e soja nos Estados Unidos entre 1979 e 2019, mostraram que o efeito do calor extremo sobre o rendimento depende da umidade que o acompanha, já que os extremos de calor seco reduzem a produtividade da soja em cerca de 0,5 bushel/acre a cada dia adicional de exposição, perda que se acumula em torno de 10% na exposição sazonal média, ao passo que os extremos de calor úmido, com temperaturas igualmente altas, não geram queda equivalente. Gonçalves et al. (2024), com dados de 389 safras no Rio Grande do Sul, Paraná e Mato Grosso do Sul entre 2003 e 2022, trabalharam com o déficit de pressão de vapor, que combina temperatura média e umidade relativa, e obtiveram resultado estatisticamente significativo, com valores baixos do índice associados a produtividades altas e valores altos a rendimentos menores. As duas análises empregam métricas distintas mas convergem para o mesmo mecanismo, o estresse hídrico ligado à demanda atmosférica por água, e diferem no foco, dado que Gonçalves et al. (2024) tratam da aridez atmosférica ao longo da safra enquanto Ting et al. (2023) isolam o contraste entre calor seco e calor úmido.

Butt et al. (2023) combinaram sensoriamento remoto com aprendizado de máquina para quantificar o aquecimento regional causado pelo desmatamento na Amazônia entre 2001 e 2020, e mostraram que a perda de floresta aquece a superfície a até 100 km de distância, com o aquecimento não local ampliando em mais de quatro vezes o efeito local, de 0,16 °C a 0,71 °C a cada 10 pontos percentuais de floresta perdida. Os efeitos das elevações de temperatura sobre a soja estão documentados, e Souza e Smiderle (2024) situam a faixa térmica da germinação entre 25 e 30 °C e a da nodulação entre 27 e 32 °C, com temperaturas acima desses limites comprometendo o desenvolvimento da planta. Em experimentos controlados conduzidos entre 2020 e 2021 na Estação Experimental de Changping, em Pequim, com três variedades de soja e coleta de dados de rendimento, composição de sementes, acúmulo de matéria seca e transcrição de genes, Yang et al. (2023) submeteram as plantas a temperatura noturna alta durante o enchimento de grãos e observaram quedas de produtividade que chegaram a 33,69% em 2020 e a 45,45% em 2021 entre as variedades.

Costa et al. (2022) identificaram que a mudança climática e o desmatamento tornam as ondas de calor na Amazônia mais frequentes, longas e intensas, resultado reforçado por Silva et al. (2022), que registraram tendência linear de aumento no número de ocorrências ao longo de 30 anos (1991-2020) e atribuíram esse comportamento ao uso inadequado do solo e ao desmatamento. Os impactos sobre a soja são diretos, e Junges et al. (2022), ao avaliarem a onda de calor de janeiro de 2022 no Rio Grande do Sul, associada à estiagem, registraram redução de produtividade de 56,2%, atribuída a danos à floração, às vagens e ao tombamento das plantas.

Xu et al. (2022), usando dados da Bacia Amazônica entre 1951 e 2000 e metodologia que isola o efeito do desmatamento das mudanças climáticas, observaram que a supressão florestal está desencadeando uma transição de difícil reversão no ciclo hidrológico. Hou et al. (2023), a partir de 311 bacias hidrográficas analisadas com regressão linear múltipla e aprendizado de máquina, estimaram sensibilidade média de 0,91% de mudança na vazão anual para cada 1% de área desmatada, valor inferior à sensibilidade associada ao florestamento (1,24%), o que indica que as respostas hidrológicas não são simétricas. Batista et al. (2023), combinando modelagem por inteligência artificial da precipitação com modelo de crescimento de culturas para Mato Grosso, Goiás, Maranhão, Piauí e Tocantins entre 2011 e 2020, estimaram que os rendimentos de soja teriam sido 6,6% maiores ao ano na última década caso os padrões de precipitação não tivessem sido alterados pelo desmatamento ocorrido desde 1982, com dados simulados sob a cobertura florestal desse período nos biomas Amazônia, Cerrado e Caatinga.

Quanto à fertilidade do solo, dos Santos Lopes et al. (2023) demonstraram que o desmatamento e as queimadas degradam a microbiota e alteram as condições abióticas e químicas do solo, comprometendo os processos biológicos que sustentam a ciclagem de nutrientes. Pereira et al. (2025), ao discutirem a agricultura familiar na Amazônia Legal, apontam uma dinâmica distinta no curto prazo, em que o sistema de corte e queima incorpora a biomassa ao solo como fonte de nutrientes e gera ganho inicial de fertilidade, o que explica por que o desmatamento pode ser percebido como fator positivo para a produtividade no período imediato após a conversão. Esse ganho é transitório, porém, dado que os nutrientes liberados pela

queima não se repõem e a fertilidade declina nos anos seguintes, o que recoloca o efeito de longo prazo como negativo (dos Santos Lopes et al., 2023).

Leite Filho (2022) identifica que o desmatamento eleva a suscetibilidade da soja a pragas e doenças por dois mecanismos, já que a remoção da vegetação nativa elimina o habitat de inimigos naturais dos insetos-praga e reduz o controle biológico disponível, ao passo que a elevação das temperaturas nas áreas desmatadas intensifica a atividade metabólica e alimentar desses insetos. Wochner (2025) estima que os ataques podem causar perdas de até 70% na produção agrícola em climas tropicais, ante uma média global de 18% a 25%, com perdas específicas à soja de até 20%.

2.2 Orientação exportadora de soja dos municípios brasileiros, desmatamento e a interação com a produtividade

O relatório da OCDE e da FAO (OECD & FAO, 2025) projeta que o comércio global de soja se manterá em patamar elevado até 2034, com mais de 40% da produção mundial comercializada internacionalmente e Estados Unidos e Brasil no comando das exportações, com o Brasil respondendo por 53% do total mundial do grão. Essa posição vincula o desempenho das lavouras locais às oscilações da demanda internacional e, ao mesmo tempo, expõe a produção brasileira ao aumento da rigidez das normas de comércio e às exigências ambientais de conformidade, uma vez que parte da expansão produtiva está associada ao desmatamento.

Mello e Rosa (2025), com dados de 2001 a 2023, documentaram relação direta entre demanda externa, valorização do preço e expansão da fronteira agrícola, ao mostrar que o crescimento da área colhida acompanhou a valorização do grão no mercado internacional e que, mesmo em anos de menor produção por razões climáticas, a demanda global elevada sustentou os preços, garantiu retorno financeiro e estimulou o aumento da produção por melhoramentos genéticos e ampliação da área cultivada. Abreu Araújo et al. (2023) identificaram correlação entre produção de soja e altas taxas de supressão vegetal na Amazônia Oriental, ao verificar que os municípios líderes de produção na microrregião, como Paragominas, Ulianópolis, Dom Eliseu e Rondon do Pará, são os mesmos que registraram os maiores incrementos de desmatamento.

As exportações de soja também provocam mudança indireta no uso da terra, por duas rotas que deslocam a pressão ambiental para longe da lavoura que se expandiu. Na primeira, a soja avança sobre áreas já desmatadas ocupadas por pastagens em regiões como o Centro-Oeste e o Sul, e a pecuária deslocada migra para a fronteira agrícola (Freitas Junior, 2023). Na segunda, a expansão se dá pelo adensamento com uma segunda safra, em que a soja partilha a área com o milho ou o trigo, e o cultivo deslocado busca novas terras, dinâmica que responde por parte relevante do crescimento da área de soja na América Latina (OECD & FAO, 2025). Em ambos os casos, o efeito sobre o desmatamento aparece em outro cultivo, em outro município ou em outro bioma, o que exige analisar a expansão da soja pela interação entre biomas, e não de forma isolada. Rocha et al. (2022) reforçam essa leitura ao mostrar que o avanço no Matopiba e no Mato Grosso se concentra nas zonas de transição, onde a pressão sobre o Cerrado empurra a fronteira para dentro da Amazônia, o que justifica investigar os canais pelos quais esses efeitos operam localmente e analisar a relação entre desmatamento, produtividade e influência da vizinhança espacial.

Em paralelo à pressão econômica, a incorporação de exigências ambientais nas normas de acesso a mercados redefine a dinâmica competitiva da soja brasileira. O Regulamento Europeu sobre Desmatamento (EUDR) e esquemas de certificação como o da Round Table on Responsible Soy Association (RTRS) funcionam como exigências não tarifárias que pressionam produtores a se adequarem a padrões de sustentabilidade mais rigorosos, em linha com as metas das NDC do Brasil para redução de emissões associadas ao uso da terra. Nesse cenário, municípios com maior orientação exportadora podem ser compelidos a adotar tecnologias que elevem a produtividade sem expansão da área plantada, condição para permanecer em mercados que penalizam a supressão de vegetação nativa (Leite-Filho et al., 2021).

A análise da influência do mercado internacional sobre os municípios brasileiros esbarra, contudo, em uma limitação das bases oficiais, pois as informações de exportação do Comex Stat referem-se ao local de registro da transação, e não ao município onde a produção foi efetivamente realizada. Essa localização burocrática das operações pode ocultar a pressão exercida pela demanda internacional sobre as áreas de

fronteira onde a supressão vegetal de fato ocorre, o que torna necessário o uso de métricas que reflitam a estrutura produtiva municipal. Para contornar esse problema, Leal e Martins (2025) propuseram um algoritmo de imputação das exportações subnacionais que combina uma matriz de pesos espaciais com dados do mercado de trabalho formal (RAIS), redistribuindo as exportações estaduais entre os municípios produtores com base na contiguidade geográfica e na relevância produtiva local medida pelo emprego setorial. Ao privilegiar a estrutura produtiva municipal em detrimento da localização burocrática das operações, a metodologia constrói medidas de exposição à demanda internacional mais fiéis à dinâmica de produção e fornece a base para verificar se a orientação exportadora intensifica os impactos do desmatamento sobre a produtividade agrícola no longo prazo.

A integração ao mercado internacional atua como indutora de ganhos de eficiência na agricultura, dado que a queda estrutural nos preços reais das commodities exige que os produtores aumentem a produtividade para se manterem competitivos (OECD & FAO, 2025). Alcançar essa eficiência requer o aproveitamento máximo do potencial genético das cultivares aliado a técnicas de manejo que reduzam os fatores limitantes impostos pelo ambiente de produção (Campagnaro et al., 2025), como ilustra a rápida adoção de soja geneticamente modificada em áreas com elevada aptidão para o cultivo de exportação (Bustos et al., 2016). Essa relação encerra uma dualidade, porém, porque a inserção no mercado externo promove avanço tecnológico e transformação estrutural, mas também pode intensificar as pressões econômicas sobre o uso da terra e o desmatamento (Carreira et al., 2024), o que coloca a questão de saber se a orientação exportadora atua como catalisador de eficiência técnica ou como agravante dos efeitos adversos da supressão vegetal sobre a produtividade no longo prazo.

O rendimento da soja brasileira resulta, portanto, de um conflito entre o progresso técnico e a integridade dos serviços ecossistêmicos, dado que a inserção no mercado internacional fomenta a adoção de tecnologias e ganhos de eficiência, ao passo que a expansão da fronteira agrícola gera externalidades climáticas que podem comprometer a viabilidade das lavouras no longo prazo. O sentido líquido dessa relação permanece em aberto, uma vez que a orientação exportadora tanto pode atenuar quanto agravar os efeitos do desmatamento sobre a produtividade, e é essa indefinição que o presente trabalho busca esclarecer.

3 Metodologia

3.1 Base de dados e variáveis

O estudo utiliza um painel municipal com cobertura de 2010 a 2024, construído a partir de quatro fontes. Os dados de área colhida e rendimento médio da soja (kg/ha) provêm da PAM (IBGE); as séries anuais de cobertura e uso do solo, que permitem mensurar a vegetação nativa suprimida em cada município, provêm do MapBiomas; as estatísticas de comércio exterior foram extraídas do Comex Stat; e os registros de emprego formal setorial, necessários ao algoritmo de imputação de exportações municipais, provêm da RAIS. A amostra restringe-se aos municípios com registro efetivo de plantio de soja e dados válidos para o cálculo da orientação exportadora, e excluem-se observações com rendimento nulo, faltante ou superior a 10.000 kg/ha, de modo a eliminar distorções provocadas por valores atípicos, a exemplo do registro observado em Água Limpa (GO) em 2013.

A variável dependente é o rendimento médio da soja em kg/ha, transformado em logaritmo natural. Essa transformação acomoda possíveis não linearidades na distribuição dos dados e permite interpretar os coeficientes como elasticidades, de modo que os resultados expressem variações percentuais na produtividade em resposta a variações percentuais nas variáveis explicativas.

O regressor principal é o desmatamento municipal em hectares (MapBiomas), também transformado em logaritmo natural pela função $log(1 + x)$ para acomodar zeros. Adota-se a defasagem de um ano $(t - 1)$ por três razões que se reforçam. No calendário agrícola, o plantio da soja ocorre entre setembro e dezembro e a colheita entre fevereiro e maio, ao passo que o desmatamento se concentra na estação seca, de julho a outubro, ou seja, após a colheita da safra corrente, de modo que o desmatamento de t dificilmente afeta a safra do mesmo ano por mecanismos diretos. Nos canais ambientais, as alterações no regime hídrico, na umidade do solo e no microclima induzidas pelo desmatamento operam com

horizonte superior a um ano, conforme documentado em Leite-Filho et al. (2021), Spera et al. (2016) e Batista et al. (2023). Quanto à endogeneidade, a decisão de desmatar em t pode ser influenciada pela expectativa de produtividade da safra em curso, o que geraria causalidade reversa entre o desmatamento e o rendimento contemporâneos, e o uso da defasagem $t - 1$, predeterminada em relação à safra corrente, mitiga esse problema, em linha com o princípio adotado por Bustos et al. (2016).

Para capturar o papel do comércio internacional como canal moderador da relação entre desmatamento e produtividade, constrói-se uma medida de orientação exportadora municipal com base no algoritmo de Leal e Martins (2025), que contorna a limitação do Comex Stat, cujas informações municipais registram o local da operação de exportação, e não o município onde a produção foi gerada.

O algoritmo estima a produção municipal destinada ao mercado externo no nível de seis dígitos do Sistema Harmonizado (HS6), e combina um componente espacial, que captura a dependência entre municípios vizinhos, com um componente de ajuste baseado na participação municipal no emprego formal setorial. O algoritmo é formalizado pela equação (1):

$$E_{i,HS6} = \alpha\, W\, E_{i,HS4} + r\, E_{i,H} \quad (1)$$

em que $E_{i,HS6}$ representa as exportações estimadas do município no nível HS6; α é o coeficiente de proporção estadual, definido como a razão entre as exportações estaduais nos níveis HS6 e HS4; W é uma matriz de pesos espaciais normalizada por linha; e r é um vetor que representa a participação de cada município na força de trabalho formal do setor no estado. A matriz de pesos espaciais W pode assumir diferentes especificações e, neste estudo, utiliza-se a matriz de contiguidade do tipo Queen, que atribui peso positivo a todos os municípios que compartilham fronteira ou vértice com o município de referência. A normalização por linha garante que a soma dos pesos de cada linha seja igual a 1, o que permite interpretar os resultados como médias ponderadas das exportações dos municípios vizinhos.

O vetor r é construído a partir dos dados da RAIS, com base na participação do município no emprego formal do setor correspondente ao produto exportado. Essa especificação incorpora a relevância produtiva de cada município, sob a premissa de que municípios com maior participação no emprego setorial tendem a direcionar maior proporção de sua produção ao mercado externo.

O modelo incorpora controles climáticos e agroeconômicos para isolar o efeito do desmatamento. A temperatura média e o déficit hídrico entram na especificação como Z-scores municipais, ou seja, como desvios da observação anual em relação à média histórica do próprio município. Essa padronização é necessária porque os efeitos fixos de município já absorvem o nível climático médio de cada localidade, de modo que o Z-score captura apenas a anomalia do ano, em linha com Schlenker e Roberts (2009), Burke et al. (2015) e Ortiz-Bobea et al. (2021). Usa-se o balanço hídrico em vez da precipitação isolada por ser uma medida agronômica mais direta de estresse hídrico, quando assume valores baixos, e por evitar a multicolinearidade que surgiria ao incluir ambas as variáveis simultaneamente. O modelo controla ainda a disponibilidade hídrica via umidade do solo e inclui as variáveis de crédito de custeio e área colhida defasada, ambas em logaritmo natural, com o intuito de captar o acesso a insumos tecnológicos e os efeitos de escala e aprendizado agrícola, respectivamente.

As variáveis, suas descrições, sinais esperados e fontes de dados são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Descrição das variáveis, fontes e estudos de referência

Variável	Descrição	Efeito esperado	Base de dados	Estudos de referência
Variável dependente				
Produtividade da soja	Rendimento médio da lavoura de soja (kg/ha)		IBGE - PAM	Flach et al. (2021); Bentley-McKune (2025); Pereira et al. (2025)
Variáveis explicativas				
Desmatamento	Área de vegetação nativa suprimida no município (ha)	-	MapBiomas	Flach et al. (2021); Bentley-McKune (2025)
Orientação exportadora	Exportações municipais de soja imputadas, normalizadas pela produção total	+/-	Comex Stat; RAIS; algoritmo Leal e Martins (2025)	Leal e Martins (2025)
Desmatamento × exportação	Termo de interação entre desmatamento e orientação exportadora	+/-	Construída	Costa et al. (2016); Carreira et al. (2024)
Variáveis de controle				
Área colhida defasada	Área em que foi colhida soja no município (ha) no ano anterior	+/-	IBGE - PAM	Bustos et al. (2016)
Anomalia de temperatura	Choques térmicos anuais em relação à média histórica do município	+/-	Brazilian Daily Weather Gridded Data	Schlenker e Roberts (2009); Burke et al. (2015)
Balanço hídrico	Medida de estresse hídrico (ETP - precipitação) em desvios-padrão; valores menores indicam maior indisponibilidade	+	Brazilian Daily Weather Gridded Data	Ortiz-Bobea et al. (2021); Batista et al. (2023)
Crédito rural	Volume de crédito rural concedido no município (R$)	+	Banco Central - SICOR	Assunção et al. (2017)
Umidade do solo	Disponibilidade direta de água na camada radicular da planta	+/-	Copernicus/ECMWF	Batista et al. (2023)

Elaboração própria. Nota: o sinal esperado indica a direção do efeito da variável sobre a produtividade da soja. As exportações municipais são imputadas pelo algoritmo de Leal e Martins (2025), que combina informação espacial e emprego setorial para estimar a produção municipal destinada ao mercado externo.

3.2 Especificação do modelo econométrico

A estratégia empírica apoia-se em regressão com dados em painel e estimador de efeitos fixos, que controla a heterogeneidade não observada capaz de influenciar simultaneamente o uso do solo e o rendimento agrícola. Os efeitos fixos de município absorvem as características locais invariantes no tempo, como condições edafoclimáticas, topografia, infraestrutura logística e atributos institucionais de cada localidade. Os efeitos fixos de ano capturam choques agregados que atingem todos os municípios, e controlam flutuações nos preços internacionais das commodities, mudanças na política agrícola nacional, variações na taxa de câmbio e inovações tecnológicas de larga escala. Ao combinar esses dois níveis de controle, o modelo garante que os coeficientes reflitam as variações intramunicipais e mitiga vieses de variáveis omitidas que comprometeriam a validade das inferências sobre o impacto do desmatamento.

A primeira especificação testa H0, que postula que o desmatamento passado reduz a produtividade média da soja no presente, e é estimada pela equação (2):

$$ln(rend_{i,t}) = \beta_1 ln(desmat_{i,t-1}) + \gamma X_{i,t} + \alpha_i + \delta_t + e_{i,t} \quad (2)$$

$ln(rend_{i,t})$ é o logaritmo natural do rendimento da soja no município i no ano t. O regressor central é $ln(desmat_{i,t-1})$, o logaritmo da área desmatada defasada em um período, cujo coeficiente β_1 é uma elasticidade: um sinal negativo e estatisticamente distinto de zero daria suporte à tese de que a degradação

ambiental compromete os canais biofísicos que sustentam o desempenho da lavoura. O vetor $X_{i,t}$ contém as variáveis de controle agroeconômicas e climáticas, enquanto α_i e δ_t representam os efeitos fixos de município e de ano. As inferências fundamentam-se em erros-padrão agrupados ao nível do município, o que torna a significância dos resultados robusta à presença de autocorrelação serial e heterocedasticidade dentro das unidades espaciais.

A segunda especificação testa se o efeito do desmatamento sobre a produtividade varia com o grau de inserção do município no mercado externo. Para capturar essa heterogeneidade, acrescenta-se um termo de interação entre o desmatamento defasado e a medida de orientação exportadora imputada pelo algoritmo de Leal e Martins (2025), normalizada pela produção municipal total, o que remove o efeito de escala e isola a fração da produção destinada ao mercado externo. Essa participação é fixada na média do período pré-amostral de 2010 a 2012, de modo a torná-la predeterminada em relação aos choques de produtividade analisados, o que reduz a endogeneidade que surgiria caso a orientação exportadora fosse contemporânea à safra. A opção privilegia a identificação ao custo de reduzir a variação disponível para estimar o efeito moderador, o que se reflete na precisão do termo de interação. Por ser fixa no tempo, a orientação exportadora é absorvida em nível pelos efeitos fixos de município e entra apenas na forma interagida com o desmatamento, conforme a equação (3):

$$ln(rend_{i,t}) = \beta_1 ln(desmat_{i,t-1}) + \beta_2(ln(desmat_{i,t-1}) \times Exp_i) + \gamma X_{i,t} + \alpha_i + \delta_t + e_{i,t} \quad (3)$$

O coeficiente β_2 discrimina entre as duas hipóteses concorrentes. Um sinal positivo sustentaria H1, a hipótese de amortecimento via tecnologia, em que a orientação exportadora induziria a adoção de práticas produtivas que atenuam as externalidades ambientais, em linha com o canal tecnológico de Bustos et al. (2016). Um sinal negativo sustentaria H2, a hipótese de amplificação via dependência, em que municípios mais integrados ao mercado externo, por serem mais dependentes da sojicultura, ficariam mais expostos aos danos biofísicos e climáticos do desmatamento (Carreira et al., 2024; Batista et al., 2023). Sob essa formulação, o efeito marginal do desmatamento sobre o rendimento torna-se uma função linear da orientação exportadora municipal, dada por $\beta_1 + \beta_2 Exp_i$, o que permite identificar em que nível de integração ao comércio internacional o efeito do desmatamento se altera.

3.3 Testes de robustez

A validade das estimativas é avaliada por quatro especificações alternativas, que alteram a amostra, a estrutura de efeitos fixos e o horizonte temporal do desmatamento, com o propósito de verificar se o efeito principal do desmatamento defasado e a heterogeneidade associada à orientação exportadora preservam sinal, magnitude e significância quando as escolhas de especificação mudam.

O primeiro exercício restringe a amostra aos municípios com registro de desmatamento ao longo de todo o painel, e exclui as observações às quais o algoritmo de imputação atribuiu valor zero, com o objetivo de verificar se os resultados dependem da qualidade da imputação de Leal e Martins (2025) nesses casos, mediante a própria equação (3) aplicada à subamostra. O segundo exercício substitui os efeitos fixos de ano por efeitos fixos de região-ano, que absorvem tendências macrorregionais diferenciadas e asseguram que as estimativas não sejam guiadas por trajetórias assimétricas de desenvolvimento agrícola entre as regiões brasileiras, conforme a equação (4):

$$ln(rend_{i,t}) = \beta_1 ln(desmat_{i,t-1}) + \beta_2(ln(desmat_{i,t-1}) \times Exp_i) + \gamma X_{i,t} + \alpha_i + \delta_{r,t} + e_{i,t} \quad (4)$$

em que $\delta_{r,t}$ denota o efeito fixo da região r no ano t, no lugar de δ_t.

O terceiro exercício substitui o desmatamento defasado pelo contemporâneo, com o objetivo de investigar se o dano se manifesta no próprio ano do evento e de testar a suposição de que a defasagem é necessária para captar o canal ambiental, conforme a equação (5):

$$ln(rend_{i,t}) = \beta_1 ln(desmat_{i,t}) + \beta_2 (ln(desmat_{i,t}) \times Exp_i) + \gamma X_{i,t} + \alpha_i + \delta_t + e_{i,t} \quad (5)$$

O quarto exercício incorpora de forma conjunta as defasagens de um e de dois períodos do desmatamento, com as respectivas interações, para investigar se o dano se dissipa em um único ciclo ou se acumula ao longo do tempo, conforme a equação (6):

$$ln(rend_{i,t}) = \beta_1 ln(desmat_{i,t-1}) + \beta_2 ln(desmat_{i,t-2}) + \beta_3 (ln(desmat_{i,t-1}) \times Exp_i) + \beta_4 (ln(desmat_{i,t-2}) \times Exp_i) + \gamma X_{i,t} + \alpha_i + \delta_t + e_{i,t} \quad (6)$$

Nesse caso, o efeito acumulado do desmatamento corresponde à soma dos coeficientes das duas defasagens, $\beta_1 + \beta_2$, o que fornece uma medida do dano ao longo de dois anos consecutivos. Como quinto exercício, a inferência é reavaliada sob esquemas de agrupamento dos erros-padrão mais conservadores que o agrupamento por município adotado nas estimações principais. Reestima-se a equação com agrupamento bidimensional por município e ano e com agrupamento por unidade da federação, este último voltado a acomodar a dependência espacial entre municípios vizinhos, que compartilham choques climáticos comuns.

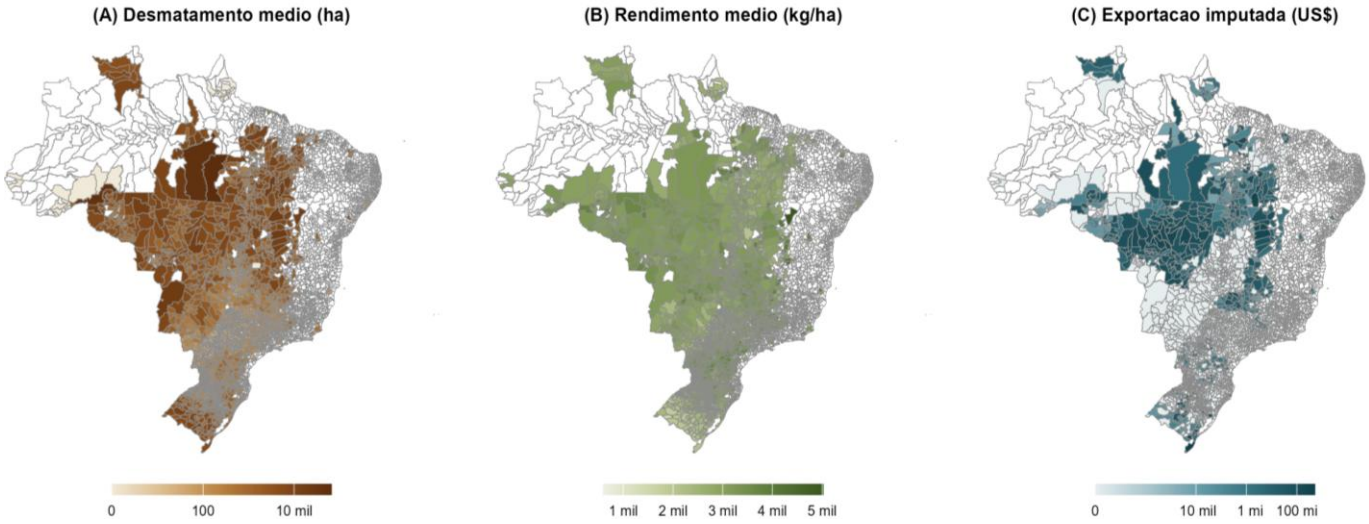
4 Resultados

4.1 Estatística descritiva e visão geral da amostra

A análise fundamenta-se em um painel longitudinal de 2010 a 2024, que integra informações produtivas do IBGE (2025), dinâmicas de uso do solo do MapBiomas (2025) e métricas de orientação exportadora. A amostra final manteve apenas os municípios com registro efetivo de plantio de soja e excluiu valores atípicos, ao considerar somente rendimentos válidos inferiores a 10.000 kg/ha. Dessa estruturação resultou um painel de 33.323 observações, que abrange 2.758 municípios ao longo do período.

A Figura 1 ilustra a organização espacial do fenômeno, o desmatamento concentra-se no arco da fronteira agrícola, no Matopiba e no sul da Amazônia (painel A), ao passo que o rendimento da soja alcança seus maiores valores no Centro-Oeste e no Sul (painel B), o que expõe a sobreposição territorial entre a supressão de vegetação nativa e a produção. O painel C mostra que a exportação de soja se espalha pelos principais polos produtores do Centro-Oeste, do Sul e do Matopiba. Vale notar que esse painel usa a exportação imputada de cada ano, mais ampla do que a orientação exportadora do triênio 2010-2012 empregada no modelo, que alcança menos municípios.

Figura 1 - Distribuição municipal do desmatamento, do rendimento da soja e da exportação imputada



Elaboração própria a partir de dados do IBGE, do MapBiomas e da exportação imputada por Leal e Martins (2025). Painéis A e C em escala logarítmica. O painel C emprega a exportação imputada anual, que descreve a geografia efetiva da exportação, distinta da orientação exportadora pré-amostra usada nas estimações. Municípios sem soja em branco.

No período do estudo, o rendimento médio da soja na amostra foi de 2.986 kg/ha, com desvio-padrão de 682,4 kg/ha, o que reflete a variabilidade entre as condições edafoclimáticas e tecnológicas do país. A área colhida registrou média de 15.249 ha por município ao ano, e o desmatamento médio anual foi de 893,2 ha por município, mas a mediana é de apenas 85,4 hectares, o que indica que o município típico desmata pouco e que a média é puxada por um grupo restrito de municípios de fronteira. O ambiente biofísico típico apresentou temperatura média em torno de 22,95 °C e umidade do solo próxima de 0,36 m^3/m^3.

A orientação exportadora municipal exige atenção antes de qualquer estratificação, porque é nula na maior parte da amostra. Cerca de 80% das observações, e 81,7% dos municípios, registram participação exportadora igual a zero, de modo que o percentil 25, a mediana e o percentil 75 da variável são todos nulos, e apenas acima do percentil 75 ela assume valores positivos. Diante dessa concentração, a divisão em quartis não separa municípios por grau de exportação, uma vez que os três primeiros quartis seriam compostos, na íntegra, por municípios com exportação zero, com fronteiras definidas de forma arbitrária entre observações empatadas. A comparação apropriada contrasta os municípios sem orientação exportadora com aqueles que exportam de fato, e detalha estes últimos por faixa, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Comparação produtiva e ambiental por orientação exportadora (2010-2024)

Faixa de exportação	Observações	Rendimento médio (kg/ha)	Área média colhida (ha)	Desmatamento médio (ha)
Sem orientação (Exp = 0)	26.529	2.974,6	10.897,8	584,3
Com orientação, faixa baixa	2.279	2.940,3	7.721,2	1.520,8
Com orientação, faixa média	2.261	3.091,0	18.752,4	2.156,0
Com orientação, faixa alta	2.254	3.061,6	70.558,0	2.627,5

Elaboração própria a partir de dados do IBGE e do MapBiomas. Nota: o grupo sem orientação reúne cerca de 80% das observações. As faixas baixa, média e alta correspondem aos terços dos municípios com exportação positiva.

Os dados sugerem que a escala e a pressão ambiental crescem com a orientação exportadora. Os municípios sem exportação colhem em média 10.897,8 hectares e desmatam 584,3 hectares, ao passo que, entre os exportadores, a área média sobe de 7.721,2 na faixa baixa para 70.558,0 hectares na faixa alta, e o desmatamento médio acompanha esse avanço, de 1.520,8 para 2.627,5 hectares. O rendimento médio varia pouco entre os grupos, o que já sugere que a maior pressão de desmatamento nos polos exportadores não se traduz em rendimento proporcionalmente maior, questão que a modelagem quantifica a seguir. Registra-se, ainda, que a raridade da orientação exportadora positiva antecipa a fragilidade do termo de interação discutida na Seção 4.3.

4.2 O efeito médio do desmatamento sobre a produtividade

A Tabela 3 apresenta as estimativas do modelo de efeitos fixos. A coluna 1 traz a estimativa sem controles adicionais, condicionada apenas aos efeitos fixos de município e ano, com resultado negativo e significativo (-0,0278). Na coluna 2, com os controles edafoclimáticos e agroeconômicos, o coeficiente do desmatamento defasado é de -0,0342 e mantém a significância. Por se tratar de especificação log-log, o parâmetro é uma elasticidade: um aumento de 1% na área desmatada do ano anterior associa-se a uma queda de cerca de 0,034% no rendimento da safra seguinte. Em termos concretos, um município que dobra sua área desmatada em relação ao ano anterior experimenta redução aproximada de 3,4% no rendimento da safra seguinte. O sinal é estável e ganha intensidade com a inclusão dos controles, ao passar de -0,0278 para -0,0342, o que indica que a omissão das covariáveis climáticas atenua os efeitos negativos estimados do desmatamento defasado.

Tabela 3 - Efeito do desmatamento e da orientação exportadora na produtividade

Variáveis	Base (Eq. 2 sem controles)	Com controles (Eq. 2)	Interativo (Eq. 3 sem controles)	Completo (Eq. 3)
Desmatamento defasado	-0,0278***	-0,0342***	-0,0286***	-0,0355***
	(0,0036)	(0,0043)	(0,0037)	(0,0045)
Temperatura	-	-0,0129***	-	-0,0130***
		(0,0042)		(0,0042)
Balanço hídrico	-	0,0062**	-	0,0062**
		(0,0025)		(0,0025)
Umidade do solo	-	2,0869***	-	2,0817***
		(0,2109)		(0,2107)
Área defasada	-	0,0345***	-	0,0345***
		(0,0045)		(0,0045)
Crédito rural	-	0,0067*	-	0,0067*
		(0,0036)		(0,0036)
Desmatamento × exportação	-	-	0,0426	0,0611*
			(0,0347)	(0,0360)
Efeitos fixos de município	Sim	Sim	Sim	Sim
Efeitos fixos de ano	Sim	Sim	Sim	Sim
Observações	31.431	23.862	31.431	23.862
R^2	0,368	0,364	0,368	0,364

Elaboração própria. Nota: erros-padrão robustos entre parênteses. *** p < 0,01; ** p < 0,05; * p < 0,10.

A magnitude e a direção desse efeito negativo refletem os canais de transmissão biofísicos documentados na literatura. A substituição da vegetação nativa por áreas de cultivo altera o balanço de energia da superfície e reduz as taxas de evapotranspiração, o que compromete a reciclagem de água na fronteira agrícola (Spera et al., 2016). O recuo hídrico propaga-se pelo regime de chuvas, como mostram Leite-Filho et al. (2021), que associam a perda de floresta à queda da precipitação na Amazônia, e de Souza Batista et al. (2023), que estimam perdas de rendimento de soja e milho decorrentes dessas alterações. Esse mecanismo fundamenta a escolha analítica pela defasagem temporal, pois o desmatamento ocorre predominantemente na estação seca, após a colheita da safra corrente, e a alteração do microclima afeta o regime de precipitação, a temperatura e a umidade do solo da safra subsequente (Batista et al., 2023). O efeito observado de 0,034% corrobora, assim, os achados de Leite-Filho et al. (2021), sob a premissa de que a degradação dos ecossistemas locais se traduz em um choque climático endógeno que atua contra a própria produtividade da soja.

Os controles admitem interpretações complementares. O coeficiente de -0,0130 da temperatura padronizada lê-se como semielasticidade, de modo que um desvio-padrão acima da média histórica de temperatura do município associa-se a uma queda de cerca de 1,3% no rendimento, em linha com Schlenker e Roberts (2009) e Ortiz-Bobea et al. (2021). O balanço hídrico padronizado, que mede a disponibilidade de água, apresenta coeficiente positivo de 0,0062, o que indica que mais água se associa a maior rendimento, com um desvio-padrão adicional elevando o rendimento em cerca de 0,6%. A umidade do solo, medida em nível, tem coeficiente de 2,08, o que implica que um acréscimo de 0,1 m^3/m^3 na disponibilidade hídrica da camada radicular se associa a um rendimento cerca de 21% maior, o controle de maior magnitude e coerente com o papel da água como fator limitante (Batista et al., 2023).

Entre os controles agroeconômicos, a área colhida defasada tem coeficiente de 0,0344, de modo que 1% de área adicional no ano anterior associa-se a 0,034% de rendimento a mais no ano seguinte, o que capta ganhos de escala e aprendizado acumulado (Bustos et al., 2016). O crédito rural tem coeficiente de 0,0067, e um aumento de 1% no crédito de custeio à soja associa-se a uma variação de cerca de 0,0066% no rendimento, contribuição pequena, porém positiva e coerente com o papel do financiamento na cobertura dos custos da safra e na adoção de tecnologia.

4.3 O papel da orientação exportadora

A análise concentra-se no modelo completo, na coluna 4 da Tabela 3, em que o efeito médio da supressão vegetal permanece negativo e significativo (-0,0355) e o termo de interação entre o desmatamento defasado e a orientação exportadora tem sinal positivo e significativo (0,0612). Esse sinal

positivo é sugestivo da hipótese de amortecimento (H1), segundo a qual a orientação exportadora atenuaria a penalidade do desmatamento. Para dimensionar esse amortecimento, calcula-se o efeito marginal do desmatamento sobre o rendimento somando ao coeficiente principal o produto do coeficiente de interação pela orientação exportadora do município, conforme a equação (7), aplicando os graus de exportação que a Tabela 2 documenta na amostra.

$$\frac{\partial\, ln(rendimento)}{\partial\, ln(desmatamento_{t-1})} = \beta_1 + \beta_2\, Exp \qquad (7)$$

Como cerca de 80% dos municípios não exportam (Tabela 2), para a maior parte da amostra o efeito é o coeficiente principal cheio, de -3,55%, e mesmo no percentil 90 da orientação exportadora, de apenas 2,1%, a penalidade passa a -3,42%, diferença de 0,013 ponto percentual. O amortecimento só se torna perceptível nos raros municípios de exportação elevada, como detalha a Tabela 4, de modo que, na faixa efetivamente observada, o efeito é desprezível. A leitura deve ser cautelosa também porque a interação não resiste à maioria dos testes de robustez, como mostra a Seção 4.4.

Tabela 4 - Efeito marginal do desmatamento sobre o rendimento ao longo da orientação exportadora

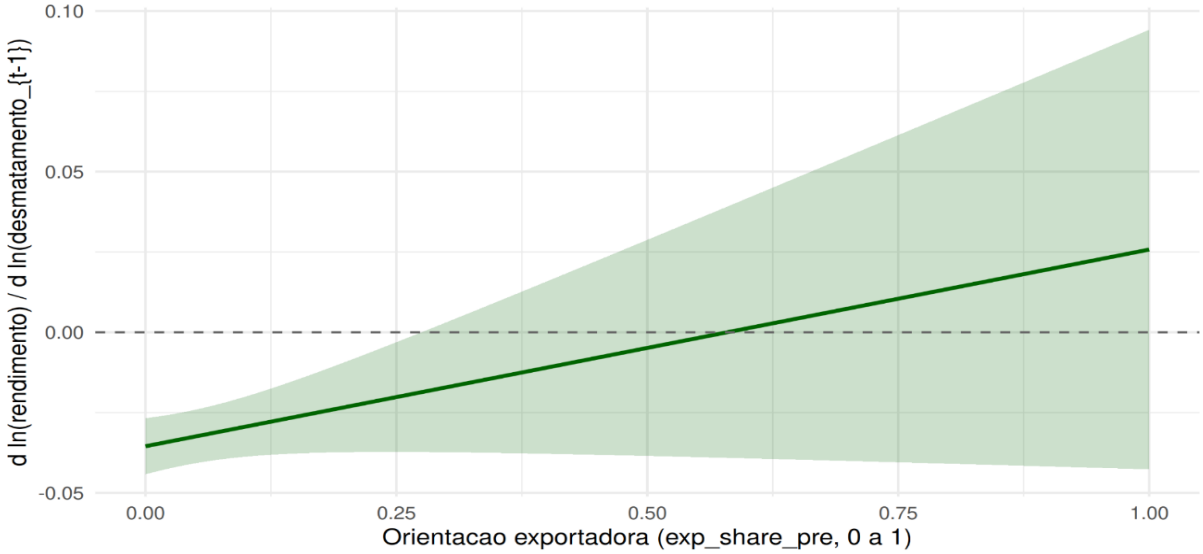
Percentil da orientação exportadora	Orientação exportadora (Exp)	Efeito marginal do desmatamento
P10 a P75	0%	-3,55%
P90	2,1%	-3,42%
P95	9,7%	-2,95%
P99	38,1%	-1,22%
Ponto de neutralização (fora da amostra)	58,0%	0,00%

Elaboração própria. Nota: o efeito marginal resulta de somar ao coeficiente principal do desmatamento (-0,0355) o produto do coeficiente de interação (0,0612) pela orientação exportadora. Os percentis referem-se à distribuição de Exp na amostra; o ponto de neutralização situa-se fora do domínio observado.

A orientação exportadora não entra isolada na equação porque não varia ao longo do tempo, já que foi medida uma única vez, no período pré-amostral, e vale como valor fixo para cada município. Os efeitos fixos de município absorvem tudo o que é constante dentro de cada município, de modo que a orientação exportadora já está contida neles, e incluí-la de novo separadamente repetiria uma informação que o modelo já detém, o que a descartaria por colinearidade. Por isso a variável entra apenas multiplicada pelo desmatamento, no termo de interação. Há uma consequência dessa escolha: como a orientação exportadora é um retrato estático de cada município, o modelo compara municípios diferentes entre si, uns mais voltados à exportação, outros menos, e não acompanha o que ocorreria se um mesmo município passasse a exportar mais ao longo do tempo. Para esse tipo de análise, seria preciso uma medida de exportação que variasse ano a ano, como a exportação imputada anual, que permitiria incluir o termo isolado e observar o efeito de aumentos simultâneos de exportação e desmatamento, ao custo de reintroduzir a endogeneidade que a fixação no período pré-amostral evita, já que a exportação do próprio ano responde às condições da safra.

A Figura 2 projeta o efeito marginal do desmatamento defasado sobre o rendimento, dado pela equação (7), ao longo de toda a distribuição da orientação exportadora, de 0 a 1 no eixo horizontal, em que a reta representa o efeito estimado e a faixa sombreada é o intervalo de confiança de 95%. No extremo esquerdo, onde a orientação exportadora é nula, o efeito é negativo, de cerca de -0,037, e o intervalo de confiança situa-se inteiramente abaixo de zero, o que indica um efeito negativo distinto de zero. A reta tem inclinação positiva, coerente com o sinal do termo de interação, e cruza o eixo zero perto de 0,58, o ponto de neutralização.

Figura 2 - Efeito marginal do desmatamento defasado sobre o rendimento da soja



Elaboração própria. Nota: intervalo de confiança de 95%. Erros-padrão agrupados por município.

Deve-se considerar, além da inclinação, a largura do intervalo de confiança, que se alarga à medida que a orientação exportadora aumenta, de modo que já a partir de cerca de 0,25 a faixa passa a incluir o zero, e o cruzamento em 0,58 ocorre dentro dessa região de incerteza, e não em um ponto onde o efeito seja positivo de forma clara. O segundo ponto de atenção é a densidade dos dados, pois, como o percentil 90 da orientação exportadora é de apenas 2,1%, quase todas as observações concentram-se na faixa estreita à esquerda, onde o efeito é negativo, ao passo que toda a metade direita, incluindo o ponto de neutralização, corresponde a valores de exportação que praticamente não existem na amostra.

A análise gráfica, portanto, não mostra que a penalidade do desmatamento seja neutralizada nos municípios exportadores, mas sugere que o efeito é negativo onde há dados e que a atenuação sugerida pela inclinação positiva ocorre em uma faixa de exportação alta que é, ao mesmo tempo, vazia de observações e cercada de incerteza. A hipótese de amortecimento tecnológico de Bustos et al. (2016) permanece plausível como mecanismo, mas o gráfico e a Tabela 5 indicam que a amostra não reúne variação exportadora suficiente para confirmá-la, o que é uma limitação, e não um resultado a afirmar.

4.4 Testes de robustez

Para atestar a validade e a estabilidade das estimativas, esta etapa verifica se o efeito negativo principal do desmatamento defasado e a heterogeneidade associada à orientação exportadora preservam sinal, magnitude e significância quando as escolhas de especificação mudam. Conforme a Tabela 5, o modelo foi estimado sob quatro cenários: a exclusão dos municípios sem alertas de desmatamento; a inclusão de efeitos fixos de região-ano; a adoção do desmatamento contemporâneo; e a incorporação conjunta de duas defasagens. A leitura conjunta revela que a penalidade média imposta pela supressão vegetal (H0) é robusta, ao passo que o termo de interação (H1) se mostra frágil, e perde significância ou troca de sinal na maior parte dos testes.

Tabela 5 - Testes de robustez para o efeito do desmatamento na produtividade

Variável	Principal	Exclusão sem alertas	Efeitos região-ano	Desmat. contemporâneo	Lags t-1, t-2	Cluster UF
Desmat. defasado (t-1)	-0,0355***	-0,0297***	-0,0127***	-	-0,0327***	-0,0355***
	(0,0045)	(0,0051)	(0,0040)		(0,0045)	(0,0079)
Temperatura	-0,0130***	-0,0077*	-0,0072	-0,0128***	-0,0129***	-0,0130
	(0,0042)	(0,0045)	(0,0044)	(0,0042)	(0,0042)	(0,0151)
Balanço hídrico	0,0062**	0,0087***	-0,0078***	0,0070***	0,0061**	0,0062
	(0,0025)	(0,0027)	(0,0026)	(0,0024)	(0,0025)	(0,0156)
Umidade do solo	2,0817***	1,8124***	3,3675***	2,1669***	2,0790***	2,0817
	(0,2107)	(0,2299)	(0,2209)	(0,2101)	(0,2102)	(1,9974)
Área defasada	0,0345***	0,0278***	0,0102**	0,0343***	0,0346***	0,0345***
	(0,0045)	(0,0047)	(0,0040)	(0,0045)	(0,0045)	(0,0110)
Crédito rural	0,0066*	0,0054	-0,0001	0,0053	0,0066*	0,0067
	(0,0036)	(0,0037)	(0,0031)	(0,0036)	(0,0036)	(0,0067)
Desmat.(t-1) × Exp.	0,0611*	0,0386	-0,0057	-	0,0446	0,0611
	(0,0360)	(0,0373)	(0,0249)		(0,0359)	(0,0432)
Desmatamento (t)	-	-	-	0,0041	-	-
				(0,0038)		
Desmat.(t) × Exp.	-	-	-	0,1230***	-	-
				(0,0402)		
Desmat. defasado (t-2)	-	-	-	-	-0,0106**	-
					(0,0045)	
Desmat.(t-2) × Exp.	-	-	-	-	0,0559	-
					(0,0463)	
Efeitos fixos de município	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Efeitos fixos de ano	Sim	Sim	-	Sim	Sim	Sim
Efeitos fixos de região × ano	-	-	Sim	-	-	-
Observações	23.862	17.852	23.862	23.862	23.862	23.862
R^2	0,364	0,361	0,488	0,362	0,364	0,364

Elaboração própria. Nota: erros-padrão agrupados por município entre parênteses. *** p < 0,01; ** p < 0,05; * p < 0,10.

O primeiro exercício exclui os municípios sem registro de alerta, e o desmatamento defasado mantém-se com sinal negativo e significativo (-0,0297), enquanto a interação reduz-se a 0,0387 e deixa de ser significativa, o que indica que parte da heterogeneidade do modelo base decorre do contraste com os municípios imputados em zero. O segundo exercício substitui os efeitos fixos de ano por região-ano, e o desmatamento defasado reduz-se, mas permanece significativo (-0,0127), ao passo que a interação, além de perder significância, troca de sinal, para -0,0051, o que pesa contra a estabilidade do amortecimento. O terceiro exercício adota o desmatamento contemporâneo, cujo coeficiente direto não é significativo (0,0042), ao passo que a interação contemporânea é positiva e significativa (0,1230), resultado que não indica amortecimento, porque a interação se torna forte exatamente onde o efeito principal desaparece, padrão mais compatível com simultaneidade reversa. O quarto exercício incorpora duas defasagens, e o desmatamento em $t-1$ e em $t-2$ preserva sinal e significância (-0,0327 e -0,0106), o que aponta um efeito que se acumula por dois anos, enquanto as duas interações são não significativas (0,0446 e 0,0559), o que reforça a leitura de um efeito principal robusto ao lado de uma interação frágil.

Os testes de robustez sustentam a hipótese principal e delimitam o alcance da hipótese secundária. O desmatamento defasado impõe uma penalidade produtiva à soja cujo sinal, magnitude e significância se preservam em todas as especificações que mantêm a defasagem, e a inclusão da segunda defasagem revela ainda que o dano se acumula ao longo de dois anos, o que reforça a interpretação de um passivo edafoclimático persistente. A interação com a orientação exportadora, por sua vez, não é um achado estável, e essa instabilidade não decorre de uma falha do modelo, mas da própria estrutura dos dados, uma vez que a orientação exportadora é nula em cerca de 80% da amostra e concentra-se em valores baixos entre os demais municípios, de modo que o resultado adequado a extrair não é a confirmação nem a rejeição da hipótese, e sim a constatação de que o efeito do desmatamento é aproximadamente homogêneo na faixa de inserção comercial efetivamente observada. Essa conclusão preserva a contribuição da pesquisa e situa a

moderação pelo comércio internacional como uma questão em aberto, a ser retomada com bases de dados que ofereçam maior variabilidade na orientação exportadora dos municípios.

A robustez da inferência à dependência espacial é examinada na última coluna da Tabela 5. Sob agrupamento dos erros-padrão por unidade da federação, que acomoda a correlação entre municípios vizinhos, o efeito do desmatamento defasado preserva sinal, magnitude e significância a 1%, com coeficiente de -0,0355 e erro-padrão de 0,0079. Sob agrupamento bidimensional por município e ano, o coeficiente mantém sinal e magnitude, mas perde precisão, resultado esperado dado o número reduzido de anos do painel, que limita o poder do agrupamento na dimensão temporal. A penalidade média do desmatamento sobre a produtividade, portanto, resiste ao tratamento espacialmente mais exigente dos erros-padrão. O termo de interação com a orientação exportadora, por sua vez, perde significância sob ambos os esquemas, o que reforça a leitura de que a moderação pelo comércio não se sustenta.

5 Conclusão

Este estudo mensurou quanto o desmatamento custa à produtividade da soja no Brasil e verificou se a inserção no comércio internacional altera esse custo, a partir de um painel de 2.758 municípios entre 2010 e 2024 e de uma medida de orientação exportadora imputada ao território que efetivamente produz, e não ao ponto de registro da operação. A distinção não é acessória, pois recoloca a pressão da demanda externa sobre os municípios de fronteira, onde a supressão vegetal ocorre, e viabiliza uma interpretação da relação entre comércio, desmatamento e produtividade que as estatísticas oficiais, por construção, não fornecem.

O resultado central é robusto e qualifica um ponto em que a literatura ainda não convergia. Estudos anteriores estimam a perda de produtividade por simulação biofísica ou em recortes transversais, e a evidência econométrica direta era ambígua, a ponto de Pereira et al. (2025) identificarem, em corte transversal do censo agropecuário, associação positiva entre desmatamento e produtividade. Ao acompanhar os mesmos municípios entre 2010 e 2024 com efeitos fixos e desmatamento defasado, este estudo reverte esse sinal: o desmatamento do ano anterior reduz a produtividade da safra seguinte, com efeito negativo e estatisticamente significativo que resiste à inclusão de controles climáticos e agroeconômicos e a quatro mudanças de especificação. A incorporação de duas defasagens acrescenta um resultado que os desenhos anteriores não alcançavam: o dano não se dissipa em um ciclo, mas se acumula por pelo menos dois anos, o que caracteriza um passivo edafoclimático persistente, coerente com os canais de redução da evapotranspiração e alteração do regime de chuvas descritos na literatura. Essa conclusão qualifica a lógica que orienta a expansão da fronteira, ao evidenciar que a supressão vegetal, embora amplie a área disponível, compromete o rendimento das áreas já cultivadas nos anos subsequentes.

A hipótese de que a orientação exportadora moderaria esse efeito não encontrou sustentação, uma vez que o termo de interação apresentou sinal positivo, na direção do amortecimento tecnológico, mas não resistiu aos testes de robustez, e a atenuação só se manifestaria em graus de exportação que praticamente inexistem na amostra, na qual a orientação exportadora é nula em cerca de 80% dos casos. Na faixa efetivamente observada, a penalidade do desmatamento recai de modo semelhante sobre municípios exportadores e não exportadores. Esse resultado é, ele próprio, informativo, pois aponta que o dano é homogêneo no intervalo de inserção comercial que existe no país, e que a moderação pelo comércio, se operante, exigiria níveis de exportação ainda não alcançados pela maioria dos municípios produtores.

Para além do exercício econométrico, os resultados têm consequência direta para a política agrícola e para a posição competitiva do país. Demonstram que a expansão sobre a vegetação nativa gera um passivo produtivo que se realiza nas safras seguintes, de modo que a intensificação, entendida como o aumento da produtividade sem incorporação de novas terras, deixa de ser uma agenda estritamente ambiental e passa a constituir condição de eficiência e de competitividade. Essa conclusão adquire peso adicional no contexto em que a regulação europeia e os esquemas de certificação convertem o desmatamento em barreira de acesso a mercados, o que faz coincidir o interesse ambiental e o interesse comercial do Brasil em um mesmo objetivo: sustentar a liderança exportadora da soja por meio de ganhos de produtividade, e não da continuidade da fronteira. Ao quantificar esse custo com uma medida de exposição comercial ancorada no território produtor, o trabalho oferece uma base para dimensionar o quanto das metas ambientais assumidas

pelo país pode ser alcançado pela via da eficiência, tema que a agenda de comércio e clima tende a tornar cada vez mais central.

As conclusões devem ser lidas à luz de suas limitações, e a principal é a escassez de variação na variável moderadora, que restringe o alcance das inferências sobre o canal comercial. A heterogeneidade associada à exportação confunde-se, ademais, com vantagens macroestruturais preexistentes, ligadas ao acesso desigual à infraestrutura de escoamento, o que a saturação com efeitos fixos de região-ano tornou aparente.

Referências

Abreu Araújo, R. de, Barbosa Júnior, I. de O., & Santos, G. G. dos. (2023). O avanço da fronteira agrícola na Amazônia Oriental: uma análise do uso e cobertura do solo nos municípios produtores da soja da microrregião de Paragominas-PA. Caderno de Geografia, 33(73), 658.

Assunção, J., Gandour, C., & Rocha, R. (2017). DETERring deforestation in the Amazon: environmental monitoring and law enforcement. Climate Policy Initiative.

Barbosa, A. M., Muradian, R., Sant'Anna, A. A., & Silgueiro, V. F. (2024). Exposição ao desmatamento ilegal de soja entre as empresas exportadoras do Cerrado mato-grossense para a China e União Europeia.

Bentley-McKune, J. (2025). Deforestation in Brazil's Cerrado reduces soy production and threatens supply chains. Zero Carbon Analytics. https://zerocarbon-analytics.org/insights/briefings/deforestation-in-brazils-cerrado-reduces-soy-production-and-threatens-supply-chains/

Burke, M., Hsiang, S. M., & Miguel, E. (2015). Global non-linear effect of temperature on economic production. Nature, 527(7577), 235-239. https://doi.org/10.1038/nature15725

Bustos, P., Caprettini, B., & Ponticelli, J. (2016). Agricultural productivity and structural transformation: evidence from Brazil. American Economic Review, 106(6), 1320-1365. https://doi.org/10.1257/aer.20131061

Butt, E. W., Baker, J. C., Bezerra, F. G. S., von Randow, C., Aguiar, A. P., & Spracklen, D. V. (2023). Amazon deforestation causes strong regional warming. Proceedings of the National Academy of Sciences, 120(45), e2309123120. https://doi.org/10.1073/pnas.2309123120

Campagnaro, N., das Neves, E., Brum, E. V. P., Dipple, F. L., & Barcelos, A. I. H. (2025). A produtividade da soja e seu resultado associado às condições ambientais: revisão de literatura. Observatorio de la Economía Latinoamericana, 23(1), 209.

Carreira, I., Costa, F., & Pessoa, J. P. (2024). The deforestation effects of trade and agricultural productivity in Brazil. Journal of Development Economics, 167, 103217. https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2023.103217

Chiacchio, M. A., & de Sousa, A. L. (2024). A expansão da soja e os efeitos no mercado de terras na Amazônia. Geografia em Questão, 17(02).

Companhia Nacional de Abastecimento. (2025). Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2025/26 - 2º levantamento. Conab. http://www.conab.gov.br

Costa, D. F., Gomes, H. B., Silva, M. C. L., & Zhou, L. (2022). The most extreme heat waves in Amazonia happened under extreme dryness. Climate Dynamics, 59(1), 281-295. https://doi.org/10.1007/s00382-021-06127-7

Costa, F., Garred, J., & Pessoa, J. P. (2016). Winners and losers from a commodities-for-manufactures trade boom. Journal of International Economics, 102, 50-69. https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2016.04.005

Cruz, S. L., Avelino, M. B., Melo Leal, G. de, & Andrade Filho, V. S. de. (2025). Dados meteorológicos de queimadas e desmatamentos em Belém: uma análise 2015 a 2024. Revista Geopolítica Transfronteiriça, 9(3), 1-10.

de Souza Batista, F., Duku, C., & Hein, L. (2023). Deforestation-induced changes in rainfall decrease soybean-maize yields in Brazil. Ecological Modelling, 486, 110533. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110533

dos Santos, B. N., de Souza Ferreira, R. F. P., & do Socorro Athaide, M. (2023). Dinâmica do desmatamento na região AMACRO com o sistema de alerta de desmatamento (SAD). Anais do XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2399-2401.

dos Santos Lopes, M. J., Santiago, B. S., & da Silva, I. N. B. (2023). Impact of deforestation and burning on the invisible biodiversity of the Amazon. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, 16, 1-14.

Flach, R., Abrahão, G., Bryant, B., Scarabello, M., Soterroni, A. C., Ramos, F. M., ... & Cohn, A. S. (2021). Conserving the Cerrado and Amazon biomes of Brazil protects the soy economy from damaging warming. World Development, 146, 105582. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105582

Freitas Junior, A. M. D. (2023). A regionalização da produtividade de soja e do crédito pecuário no Brasil [Tese de doutorado, Universidade de São Paulo].

Gomes Machado, N., Sacardi Biudes, M., Morgana de Souza Mützenberg, D., & Peres Angelini, L. (2023). Effects of deforestation on microclimate in a Cerrado-Amazonia transition area. Ciência Florestal, 33(2).

Gonçalves, S. L., Farias, J. R. B., Crusiol, L. G. T., Sibaldelli, R. N. R., & Neumaier, N. (2024). Déficit de pressão de vapor (DPV) como referência de produtividade em soja: primeira aproximação (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 31). Embrapa Soja. https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1162715

Hou, Y., Wei, X., Zhang, M., Creed, I. F., McNulty, S. G., & Ferraz, S. F. (2023). A global synthesis of hydrological sensitivities to deforestation and forestation. Forest Ecology and Management, 529, 120718. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120718

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2025). SIDRA - Tabela 5457: área plantada, área colhida, quantidade produzida e valor da produção da lavoura temporária (PAM), por produto e município. https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457

Junges, A. H., Tazzo, I. F., Cardoso, L. S., & Cera, J. C. (2022). Avaliação da onda de calor ocorrida em janeiro de 2022 no Rio Grande do Sul. Agrometeoros, 30.

Leal, A., & Martins, M. M. V. (2025). Brazilian exports imputation: a new algorithm for estimating the municipal production directed at the foreign market. Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos, 19(2), 266-288.

Leite Filho, A. T. (2022). Interações entre desmatamento, mudanças climáticas e produção agrícola no Cerrado e na Amazônia brasileira.

Leite-Filho, A. T., Soares-Filho, B. S., Davis, J. L., Abrahão, G. M., & Börner, J. (2021). Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. Nature Communications, 12(1), 2591. https://doi.org/10.1038/s41467-021-22840-7

MapBiomas. (2025). Coleção 10 da série anual de mapas de cobertura e uso de solo do Brasil. https://brasil.mapbiomas.org/

Mello, C., & Rosa, C. (2025). Soja como pilar estratégico do agronegócio brasileiro: uma análise econômica do século XXI. Anais da Feira de Iniciação Científica e Extensão (FICE), Campus Camboriú.

Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. (2024). Nationally Determined Contribution of Brazil to the Paris Agreement. Governo do Brasil. https://unfccc.int/NDCREG

OECD, & Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). OECD-FAO agricultural outlook 2023-2032. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/08801ab7-en

OECD, & FAO. (2025). OECD-FAO agricultural outlook 2025-2034. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/601276cd-en

Ortiz-Bobea, A., Ault, T. R., Carrillo, C. M., Chambers, R. G., & Lobell, D. B. (2021). Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. Nature Climate Change, 11(4), 306-312. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01000-1

Pereira, E. M., Beker, J. P. S., & Schmoeller, R. (2024). Aplicação de machine learning na previsão da produtividade da soja. Pleiade, 18(45), 25-38.

Pereira, J. D. de S., Leão, L., Prado, J., Baptista, C. H. M. S., & Faria, W. R. (2025). Effects of deforestation on agricultural productivity in the Brazilian Legal Amazon: evidence from family farming. Estudos Econômicos (São Paulo), 55, e53575532.

Quintam, C. P. R., & de Assunção, G. M. (2023). Perspectivas e desafios do agronegócio brasileiro frente ao mercado internacional. RECIMA21, 4(7), e473641.

Rocha, C. B., De Majo, C., & Dutra, S. (2022). A geo-historical analysis of expanding soybean frontiers in the Brazilian Cerrado. Historia Ambiental Latinoamericana y Caribeña (HALAC), 12(2), 217-252.

Santos, P. S. B. D., Siqueira, J. D. M., Leite, A. R., Imada, R. N., Neves, F. P., Mantovani, J. P., ... & Silva, C. D. (2023). Evapotranspiração automatizada: uma revisão sistemática e meta-análise.

Sauer, S. (2024). Questão eco-agrária: extrativismo agrário, mudanças climáticas e desmatamento no Brasil. Revista NERA, 27(2), e10185.

Schlenker, W., & Roberts, M. J. (2009). Nonlinear temperature effects indicate severe damages to US crop yields under climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences, 106(37), 15594-15598. https://doi.org/10.1073/pnas.0906865106

Silva, N. D. S., Alves, J. M. B., Silva, E. M. D., & Sousa, G. M. D. (2022). Occurrence of heat waves with reanalysis data in areas of the Northeast, Amazon and Central-Southeast of Brazil. Revista Brasileira de Meteorologia, 37, 441-451.

Souza, A. G., & Smiderle, O. J. (2024). Cultura da soja: radiação solar, acúmulo de matéria seca e suas interações para alta produtividade. In Ciências agrárias: tecnologia, sustentabilidade e inovação (Vol. 1, pp. 84-107). Editora Científica Digital.

Spera, S. A., Galford, G. L., Coe, M. T., Macedo, M. N., & Mustard, J. F. (2016). Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. Global Change Biology, 22(10), 3405-3413. https://doi.org/10.1111/gcb.13298

Ting, M., Lesk, C., Liu, C., Li, C., Horton, R. M., Coffel, E. D., ... & Singh, D. (2023). Contrasting impacts of dry versus humid heat on US corn and soybean yields. Scientific Reports, 13(1), 710. https://doi.org/10.1038/s41598-023-27931-7

Trase. (2024). Brazilian soy exports and deforestation. Trase Insights. https://trase.earth/insights/brazilian-soy-exports-and-deforestation

Trevizan, A. F., Leal, A. M. M., & Valle, V. E. N. (2025). Forest trade on the Amazon frontier and its interaction with the EUDR. International Journal for the Semiotics of Law, 38, 1639-1662. https://doi.org/10.1007/s11196-025-10250-7

Voora, V., Bermúdez, J., Le, H., Larrea, C., & Luna, E. (2024). Soybean prices and sustainability. IISD Market Report, 2(5).

Wang, D., Wu, J., Huang, M., Li, L. Z., Wang, D., Lin, T., ... & Zeng, Z. (2021). The critical effect of subgrid-scale scheme on simulating the climate impacts of deforestation. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 126(17), e2021JD035133. https://doi.org/10.1029/2021JD035133

Wochner, D. (2025). Custo-benefício do controle biológico on farm para o manejo das principais pragas e doenças na cultura da soja.

Xu, X., Zhang, X., Riley, W. J., Xue, Y., Nobre, C. A., Lovejoy, T. E., & Jia, G. (2022). Deforestation triggering irreversible transition in Amazon hydrological cycle. Environmental Research Letters, 17(3), 034037. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4c1d

Yang, L., Song, W., Xu, C., Sapey, E., Jiang, D., & Wu, C. (2023). Effects of high night temperature on soybean yield and compositions. Frontiers in Plant Science, 14, 1065604. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1065604