

Crédito rural e desmatamento na Amazônia Legal: evidências sobre a heterogeneidade espacial

Rural credit and deforestation in the Legal Amazon: evidence on spatial heterogeneity

Sérgio Alves Daneris

Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, Rio Grande do Sul (RS), Brasil

Miriã Rodrigues Garcia

Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, Rio Grande do Sul (RS), Brasil

Gabrielito Menezes

Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, Rio Grande do Sul (RS), Brasil

Vilmar Antonio Gonçalves Tondolo

Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, Rio Grande do Sul (RS), Brasil

Alain Hernández Santoyo

Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, Rio Grande do Sul (RS), Brasil

GT04. Meio ambiente, agroecologia, sustentabilidade e mudanças climáticas

Resumo: Este estudo analisa a relação entre o crédito rural e o desmatamento nos municípios da Amazônia Legal, incorporando a dimensão espacial na análise econométrica. Utilizam-se dados de 773 municípios para o ano de 2023, incluindo variáveis agropecuárias, de uso da terra e financiamento rural. O Índice Global de Moran evidencia forte autocorrelação espacial do desmatamento. Entre os modelos globais, o modelo de erro espacial (SEM) apresentou melhor ajuste. Em seguida, aplica-se a Regressão Geograficamente Ponderada (GWR) para captar a heterogeneidade espacial. Os resultados indicam que a pecuária é o principal vetor do desmatamento, enquanto o crédito rural apresenta, em média, efeito negativo, sugerindo papel potencial na intensificação produtiva. No entanto, esse efeito varia entre os municípios. Conclui-se que o desmatamento é espacialmente dependente e heterogêneo, demandando políticas públicas territorialmente diferenciadas.

Palavras-chave: Desmatamento; Crédito rural; Econometria espacial; Amazônia Legal.

Abstract: This study examines the relationship between rural credit and deforestation in municipalities of the Brazilian Legal Amazon, incorporating spatial dependence into the econometric analysis. Data from 773 municipalities for 2023 are used, including agricultural, land-use, and credit variables. The Global Moran's I indicates strong spatial autocorrelation. Among global models, the Spatial Error Model (SEM) provides the best fit. A Geographically Weighted Regression (GWR) is then applied to capture spatial heterogeneity. Results show that cattle ranching is the main driver of deforestation, while rural credit is, on average, negatively associated with deforestation, suggesting a role in productive intensification. However, this effect varies across municipalities. The findings indicate that deforestation is spatially dependent and heterogeneous, requiring territorially differentiated public policies.

Keywords: Deforestation; Rural credit; Spatial econometrics; Legal Amazon.

1. Introdução

A Amazônia Legal constitui um recorte político-administrativo brasileiro instituído pela Lei 1.806 de 1953, por meio da qual o Governo Federal buscou estabelecer uma delimitação territorial voltada à promoção do desenvolvimento regional. Essa área corresponde a cerca de 61% do território nacional e abrange aproximadamente 8.514.877 km², englobando os biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal (Júnior; Contini; Navarro, 2011; IPEA, 2008).

Dada sua dimensão territorial, diversidade ecológica e relevância estratégica para o equilíbrio ambiental, a conservação da Amazônia Legal ocupa posição central no debate

econômico e ambiental contemporâneo. Os serviços ecossistêmicos providos por essa região são fundamentais para o bem-estar humano, uma vez que influenciam diretamente a regulação climática, a disponibilidade de recursos naturais e a manutenção da biodiversidade. Nesse sentido, a degradação ambiental da Amazônia Legal suscita preocupações não apenas ecológicas, mas também econômicas e sociais, reforçando a necessidade de compreender o valor efetivo desses ecossistemas e de formular políticas de conservação mais eficientes (Castro; Andrade, 2016).

Entre os principais desafios enfrentados pela região, o desmatamento se consolidou como um problema estrutural e persistente. Ainda que políticas de prevenção e controle tenham sido implementadas ao longo do tempo, observa-se que a pressão exercida pelas atividades econômicas sobre a vegetação nativa permanece significativa. Em especial, a expansão da agricultura e o avanço da pecuária intensificam o debate acerca da compatibilização entre crescimento econômico, uso produtivo da terra e conservação ambiental na Amazônia Legal (Castelo, 2015; Júnior; Contini; Navarro, 2011).

A literatura aponta que parte relevante do desmatamento está associada à ampliação da fronteira agropecuária, sobretudo em contextos nos quais a produção de commodities e a criação de gado encontram incentivos econômicos para sua expansão. Em paralelo, alguns estudos destacam a possibilidade de adoção de métodos produtivos mais sustentáveis, capazes de viabilizar o uso econômico dos recursos naturais sem comprometer, de forma acentuada, o estado de conservação das áreas nativas (Celentano et al., 2017; Ferreira; Coelho, 2015; Oliveira et al., 2011; Ticktin, 2004). Ainda assim, a relação entre atividade produtiva e desmatamento permanece complexa, uma vez que depende de fatores estruturais, institucionais e territoriais que nem sempre são adequadamente considerados nas análises empíricas. Conforme argumenta Wehkamp et al. (2018), a compreensão mais precisa desse fenômeno requer a incorporação dos efeitos econômicos associados à exploração dos recursos naturais.

Nesse debate, o crédito rural assume papel particularmente relevante. No caso brasileiro, a Resolução 3545 do Banco Central do Brasil, implementada em 2008, introduziu critérios para a concessão de crédito rural na região amazônica, buscando restringir o financiamento de atividades associadas ao avanço do desmatamento e, ao mesmo tempo, incentivar práticas produtivas ambientalmente mais adequadas. Sob essa perspectiva, o crédito rural pode operar tanto como vetor de expansão agropecuária quanto como instrumento de indução à sustentabilidade, a depender do desenho institucional das políticas e das condições de acesso aos recursos financeiros (Assunção et al., 2020; Feltran-Barbieri; Féres, 2021).

Diante desse contexto, torna-se relevante investigar de que forma o crédito rural se relaciona com o desmatamento na Amazônia Legal. Mais especificamente, interessa verificar se a maior disponibilidade de crédito contribui para ampliar a pressão sobre os recursos florestais, ao estimular a expansão das atividades agropecuárias, ou se, ao contrário, favorece ganhos de produtividade e adoção de tecnologias capazes de reduzir a necessidade de abertura de novas áreas. A resposta a essa questão possui implicações importantes para o desenho de políticas públicas regionais voltadas ao desenvolvimento econômico e à conservação ambiental.

Além disso, a análise desse fenômeno demanda atenção à dimensão espacial. O desmatamento não se distribui de maneira homogênea entre os municípios da Amazônia Legal, mas tende a se concentrar em determinadas áreas, refletindo diferenças na estrutura produtiva, no acesso à infraestrutura, nas condições institucionais e na dinâmica de ocupação do território. Nesse sentido, métodos econométricos espaciais tornam-se particularmente úteis, pois permitem captar não apenas a existência de dependência espacial entre os municípios, mas também a heterogeneidade territorial dos determinantes do desmatamento.

Com base nisso, o presente estudo busca responder à seguinte questão de pesquisa: a tomada de crédito rural impacta diretamente o desmatamento na Amazônia Legal? Para

responder a essa pergunta, o artigo investiga a influência do crédito rural sobre o desmatamento municipal, controlando por variáveis associadas à produção agropecuária e à cobertura do solo, com o uso da Regressão Geograficamente Ponderada (GWR). Ao fazê-lo, pretende-se oferecer evidências empíricas que contribuam para a compreensão dos condicionantes econômicos e espaciais do desmatamento na região.

Por fim, além desta introdução, o trabalho está estruturado em quatro seções adicionais. A seção 2 apresenta a revisão de literatura. A seção 3 descreve os dados e a metodologia utilizados na pesquisa. A seção 4 expõe os resultados e a discussão. Por fim, a seção 5 reúne as considerações finais.

2. Revisão da Literatura

Entre os fatores que influenciam o desmatamento, a literatura destaca de forma recorrente o papel da agricultura e da pecuária. Leblois, Damette e Wolfersberger (2017) argumentam que a expansão dessas atividades constitui um dos principais vetores de pressão sobre áreas de vegetação nativa, uma vez que tanto a elevada demanda internacional por carne quanto o cultivo de determinadas culturas agrícolas requerem disponibilidade de terra. Nesse contexto, regiões cobertas por mata nativa passam a ser percebidas como áreas potenciais para a expansão da produção, especialmente quando associadas à ampliação das exportações e ao ingresso de divisas na economia nacional.

Outro aspecto relevante refere-se às mudanças climáticas e aos efeitos econômicos e sociais decorrentes da degradação ambiental. Conforme Balboni et al. (2023), as transformações na floresta amazônica afetam diretamente a qualidade de vida da população brasileira. No que se refere ao desenvolvimento econômico, Pfaff et al. (2015) associam sua dinâmica à pressão sobre o uso da terra, destacando que áreas protegidas tendem a apresentar menores incentivos ao desmatamento em razão do arcabouço legal que restringe sua exploração. Além disso, os autores ressaltam que localidades mais próximas de centros urbanos e de vias de acesso tendem a estar mais expostas à ocupação econômica, o que intensifica a pressão sobre os recursos naturais.

No tocante à degradação de pastagens, Feltran-Barbieri e Féres (2021) destacam que práticas inadequadas de manejo do solo comprometem a produtividade e ampliam a necessidade de abertura de novas áreas. No caso brasileiro, a recuperação de pastagens degradadas pode favorecer processos de reflorestamento e contribuir para a restauração da cobertura vegetal. Segundo os autores, esse processo se mostra vantajoso tanto para os produtores quanto para os formuladores de políticas públicas, na medida em que promove ganhos produtivos e ambientais simultaneamente, com efeitos potenciais sobre a renda futura e a conservação florestal.

No campo das evidências empíricas, Santos et al. (2021), ao analisarem clusters de desmatamento no bioma Amazônia por meio do modelo GWR, utilizaram variáveis como número de cabeças de gado, Produto Interno Bruto (PIB) per capita, crédito rural e extensão de floresta conservada. Os autores concluíram que a variável de maior impacto sobre o desmatamento foi o número de cabeças de gado, identificando, adicionalmente, a presença de um arco do desmatamento na porção sul do bioma. Esse resultado reforça a relevância da pecuária como vetor central da conversão do uso da terra na Amazônia.

Em estudo voltado à influência do crédito rural sobre a conservação do bioma Amazônia, Fernandes e Parré (2026) também utilizaram o modelo GWR e evidenciaram que o desmatamento não se distribui de forma homogênea entre os municípios da região. Seus resultados indicam que fatores como fluxo de crédito rural, produção de soja e quantidade de cabeças de gado influenciam de maneira diferenciada os níveis de desmatamento. Além disso,

os autores demonstram que localidades com maiores índices de desmatamento apresentam comportamento distinto daquelas com menor pressão sobre a cobertura florestal, sugerindo que políticas públicas voltadas à prevenção do desmatamento devem considerar as especificidades territoriais de cada região.

No que se refere especificamente ao crédito rural, Assunção et al. (2020) investigaram os efeitos das restrições implementadas em 2008 sobre o acesso às linhas de financiamento rural em atividades relacionadas ao desmatamento. Considerando o período de 2003 a 2011 e abrangendo os municípios da Amazônia Legal, os autores verificaram que as exigências impostas ao crédito foram eficazes para reduzir o avanço do desmatamento, ao limitar o financiamento de atividades potencialmente associadas à expansão da fronteira agropecuária. De maneira semelhante, Jusys (2016), ao analisar a Amazônia Legal com o uso do método GWR, encontrou resultados próximos aos de Santos et al. (2021), embora em uma área de estudo mais ampla, que incluiu também o Cerrado brasileiro.

À luz dessa literatura, observa-se que o desmatamento na Amazônia Legal resulta de um conjunto de fatores econômicos, institucionais e espaciais, cuja manifestação não ocorre de forma uniforme no território. Nesse sentido, abordagens empíricas que incorporam a heterogeneidade espacial tornam-se particularmente relevantes, uma vez que permitem captar diferenças locais nos determinantes do desmatamento que tendem a ser obscurecidas em modelos globais.

De forma distinta de parte dos estudos anteriores, a presente pesquisa busca apresentar novas evidências empíricas para a Amazônia Legal, abrangendo, além do bioma Amazônia, áreas dos biomas Cerrado e Pantanal inseridas nesse recorte territorial. Ao enfatizar o papel do crédito rural e utilizar o modelo GWR, o estudo procura captar as heterogeneidades espaciais associadas à relação entre financiamento, atividade agropecuária e desmatamento. Com isso, pretende-se avaliar em que medida o crédito rural pode atuar não apenas como mecanismo de expansão produtiva, mas também como instrumento potencial de conservação do solo e das florestas, contribuindo para a mitigação do desmatamento.

3. Metodologia

A presente seção descreve a base de dados utilizada no estudo e os procedimentos metodológicos adotados para a análise da influência do crédito rural sobre o desmatamento na Amazônia Legal. Inicialmente, apresentam-se as variáveis empregadas na pesquisa e suas respectivas fontes. Em seguida, discute-se o procedimento de análise exploratória espacial, com ênfase na identificação de autocorrelação espacial. Por fim, expõe-se o modelo econométrico utilizado nas estimações, baseado na Regressão Geograficamente Ponderada (GWR), adequada para captar a heterogeneidade espacial das relações entre as variáveis de interesse.

3.1 Base de dados

Para esta análise, foram utilizados os 773 municípios pertencentes à Amazônia Legal, área correspondente à atuação da Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM)¹. Esses municípios estão distribuídos pelos estados de Rondônia, Acre, Amazonas, Roraima, Pará, Amapá, Tocantins, Mato Grosso e Maranhão, conforme ilustrado na Figura 1.

¹ Art. 20 da Lei Complementar n. 124, de 03.01.2007. A Amazônia Legal foi criada com o propósito de estabelecer os limites territoriais da área política de atuação da SUDAM, tendo como objetivo estimular o desenvolvimento inclusivo e sustentável em sua região de abrangência, bem como promover a inserção competitiva da estrutura produtiva regional nas economias nacional e internacional.

A área territorial abrangida totaliza 5.217.423 km², o que corresponde a cerca de 61% do território nacional.

Figura 1 – Municípios da Amazônia Legal



Fonte: Elaborado pelos autores com base em dados do IBGE e Terrabrasilis.

As variáveis relacionadas à agricultura, ao desmatamento e às coberturas do solo foram obtidas a partir do DataZoom Amazônia, que reúne um acervo de bases de dados referentes à Amazônia brasileira. A variável utilizada para mensurar o nível de desmatamento no período analisado foi extraída do sistema PRODES, elaborado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, que utiliza imagens de satélite Landsat para monitorar o desmatamento na Amazônia Legal. A partir dessa variável, foi construída a variação percentual do desmatamento em relação ao ano anterior, conforme a Equação (1):

$$VPD = \left(\frac{Dt - Dt-1}{Dt-1} \right) \times 100 \quad (1)$$

As variáveis de cobertura do solo foram extraídas do projeto MapBiomas, que disponibiliza informações derivadas de sensoriamento remoto. As demais variáveis agrícolas, como produção de milho, soja, número de cabeças de gado e crédito rural, foram obtidas no IPEADATA. A variável monetária foi deflacionada para dezembro de 2023 com base no Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA). Além disso, todas as variáveis contínuas foram transformadas em logaritmo natural, permitindo a interpretação dos coeficientes como elasticidades e contribuindo para a mitigação de possíveis problemas de heterocedasticidade e não linearidade. A Tabela 1 apresenta a descrição das variáveis utilizadas no estudo, bem como suas respectivas fontes.

Tabela 1 – Descrição das Variáveis

Variáveis	Descrição	Fonte
Desma	Área total de Desmatamento (km ²)	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Credi	Crédito Contratado para custeio e investimento rural (R\$)	Banco Central do Brasil (BCB)
Soja	Área Colhida de Soja por Município (Ha)	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)
Milho	Área Colhida de Milho por Município (Ha)	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)
Bovin	Cabeças de Gado por Município	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)
areaF	Área Florestal por Município (km ²)	MapBiomias
areaNF	Área Não Florestal por Município (km ²)	MapBiomias
areaNO	Área Não Observada	MapBiomias
areaA	Área Coberta por Água por Município (km ²)	MapBiomias

Fonte: Elaborado pelos autores

A variável *desma* representa a área total desmatada, em quilômetros quadrados, sendo adotada como variável dependente por expressar diretamente o fenômeno de interesse da pesquisa. A variável *credi* corresponde ao crédito contratado para custeio e investimento rural, sendo incluída com o objetivo de avaliar de que maneira o financiamento rural se relaciona com o desmatamento na Amazônia Legal. Sua inclusão encontra respaldo em estudos anteriores, como Santos et al. (2021) e Trigueiro et al. (2020), que discutem o papel do crédito na dinâmica de uso da terra.

As *commodities* soja e milho foram incorporados ao modelo em razão de sua expressiva participação na pauta produtiva e exportadora brasileira. Ambas são representadas pela área colhida em cada município. Como se trata de culturas que demandam espaço físico para expansão, sua inclusão permite captar parte da pressão exercida pelas atividades agrícolas sobre a cobertura vegetal. Trabalhos como os de Trigueiro et al. (2020) e Santos et al. (2021) consideram essas culturas em conjunto; contudo, sua análise separada possibilita identificar efeitos distintos sobre o desmatamento.

A variável *bovin*, por sua vez, representa o número de cabeças de gado por município. Sua inclusão se justifica pela relevância da pecuária bovina na dinâmica de ocupação territorial da Amazônia Legal, sobretudo em contextos de expansão da fronteira agropecuária. Estudos como Assunção et al. (2020), Feltran-Barbieri e Féres (2021) e Trigueiro et al. (2020) destacam a importância dessa atividade como um dos principais vetores do desmatamento na região.

3.2 Autocorrelação Espacial

A existência de autocorrelação espacial global foi verificada por meio do I de Moran Global, condição necessária para justificar a incorporação da dimensão espacial na análise econométrica. Em estudos espaciais, a definição prévia de uma matriz de ponderação espacial é fundamental, uma vez que ela expressa o grau de conectividade entre as unidades geográficas analisadas (Anselin, 1995). No presente estudo, como a unidade de análise é o município, adotou-se uma matriz de contiguidade do tipo rainha, que considera como vizinhos os municípios que compartilham fronteiras ou vértices, conforme Almeida (2012). Após a definição da matriz de ponderação espacial, aplicou-se o I de Moran Global, dado por:

$$I = \frac{z'Wz}{z'z} \quad (2)$$

em que $z'Wz$ representa a autocovariância espacial da variável padronizada de interesse, z denota os valores padronizados dessa variável e Wz corresponde à média espacialmente ponderada dos valores observados nas localidades vizinhas. O índice de Moran varia, em termos aproximados, entre -1 e 1. Valores positivos indicam autocorrelação espacial positiva, isto é, municípios com valores semelhantes tendem a se agrupar no espaço, enquanto valores negativos indicam autocorrelação espacial negativa. Cabe destacar que, em amostras finitas, a ausência de autocorrelação espacial não corresponde exatamente a zero, mas a $-1/(n - 1)$, conforme observado por Chasco e Vallone (2023).

3.3 Modelo de regressão ponderada geograficamente

Com o objetivo de analisar os determinantes do desmatamento na Amazônia Legal em nível municipal, optou-se pela utilização da Regressão Geograficamente Ponderada (GWR). Esse método é particularmente útil quando se pretende capturar heterogeneidades espaciais nos parâmetros estimados, permitindo que a relação entre a variável dependente e seus determinantes varie de acordo com a localização geográfica.

O modelo GWR foi inicialmente proposto por Goodchild e Longley (1987), sendo posteriormente desenvolvido por Brunson et al. (1996) e Fotheringham et al. (2023). Sua principal contribuição consiste em relaxar a hipótese de estacionariedade espacial dos coeficientes, permitindo que cada localidade possua um conjunto próprio de parâmetros. Em sua forma geral, o modelo pode ser representado por:

$$y_i = \beta_{0i} + \sum_{j=1}^p \beta_{ji} x_{ji} + e_i \quad (3)$$

em que y_i representa a variável dependente na localização i , β_{0i} é o intercepto específico da localização, β_{ji} é o coeficiente da variável explicativa j na localidade i , x_{ji} representa o valor da variável explicativa j na localidade i , e e_i é o termo de erro associado à observação.

De acordo com Almeida (2012), o GWR pode ser entendido como uma sequência de regressões locais estimadas a partir de subamostras ponderadas pela distância. Assim, observações geograficamente mais próximas ao ponto de calibração recebem maior peso na estimação dos coeficientes locais. Nessa formulação, o modelo passa a ser expresso como:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{j=1}^p \beta_j(u_i, v_i) x_{ji} + e_i \quad (4)$$

onde (u_i, v_i) representam as coordenadas espaciais da observação i , enquanto $\beta_j(u_i, v_i)$ denota o coeficiente local associado à variável explicativa j . Dessa forma, o modelo permite que os parâmetros variem continuamente no espaço, refletindo diferenças regionais nas relações econômicas analisadas.

Um elemento central do GWR é a largura de banda, responsável por definir a extensão espacial da vizinhança utilizada na estimação local dos coeficientes. Quanto maior a largura de banda, maior a suavização dos coeficientes, uma vez que mais observações são incorporadas ao redor do ponto de calibração. Em contrapartida, larguras de banda menores tendem a produzir maior heterogeneidade espacial nos parâmetros estimados, já que utilizam conjuntos mais restritos de observações em cada regressão local.

A ponderação das observações é realizada por meio de uma função kernel, que atribui pesos decrescentes às observações à medida que a distância em relação ao ponto de calibração

aumenta. Formalmente, o peso atribuído à observação j em relação à localização i pode ser representado por:

$$W_{ij} = K\left(\frac{d_{ij}}{h_i}\right) \quad (5)$$

em que $K(\cdot)$ representa a função kernel, d_{ij} corresponde à distância entre as localizações i e j , e h_i denota a largura de banda associada à localização i .

A literatura distingue, em geral, dois tipos principais de largura de banda: fixa e adaptativa. A banda fixa mantém constante o raio de influência espacial em todas as localidades, sendo mais adequada quando a distribuição das observações no espaço é relativamente homogênea. Já a banda adaptativa ajusta seu alcance de acordo com a densidade das observações, expandindo-se em áreas mais esparsas e contraindo-se em áreas mais densas. Assim, a escolha entre essas especificações depende da configuração espacial dos dados e do desempenho empírico de cada alternativa.

A definição da largura de banda ótima pode ser realizada com base em critérios como o Critério de Informação de Akaike (AIC) e a Validação Cruzada (CV). Esses critérios permitem selecionar a especificação mais adequada em termos de qualidade de ajuste e parcimônia. Apesar de sua utilidade, a GWR apresenta limitações que devem ser consideradas, como a sensibilidade à escolha do kernel e da largura de banda, além da possível influência de observações extremas sobre os coeficientes locais estimados. Ainda assim, trata-se de uma abordagem particularmente útil quando o objetivo consiste em identificar variações espaciais nas relações entre as variáveis analisadas.

3.4 Modelo empírico

Com base na formulação geral da GWR e nas variáveis selecionadas para o estudo, o modelo empírico foi especificado de modo a investigar a influência do crédito rural, da produção agropecuária, da variação do desmatamento e das características de cobertura do solo sobre o desmatamento municipal na Amazônia Legal. A especificação adotada é apresentada na Equação (6):

$$\begin{aligned} \ln desma_i = & \beta_0(u_i, v_i) + \beta_1(u_i, v_i) \ln vpd_i + \beta_2(u_i, v_i) \ln credi_i + \beta_3(u_i, v_i) \ln milho_i \\ & + \beta_4(u_i, v_i) \ln soja_i + \beta_5(u_i, v_i) \ln bovin_i + \beta_6(u_i, v_i) \ln areaf_i \\ & + \beta_7(u_i, v_i) \ln areanf_i + \beta_8(u_i, v_i) \ln areaA_i + \varepsilon_i \end{aligned} \quad (6)$$

ainda que $\ln(desma_i)$ representa o logaritmo natural da área desmatada no município i ; $\ln(vpd_i)$ corresponde ao logaritmo da variação percentual do desmatamento; $\ln(credi_i)$ expressa o volume de crédito rural contratado; $\ln(milho_i)$ e $\ln(soja_i)$ representam as áreas colhidas dessas culturas; $\ln(bovin_i)$ corresponde ao número de cabeças de gado; e $\ln(areaf_i)$, $\ln(areanf_i)$ e $\ln(areaA_i)$ captam, respectivamente, a área florestal, a área não florestal e a área coberta por água. Como os coeficientes variam espacialmente, o modelo permite identificar de que maneira a magnitude e o sinal dessas relações se alteram entre os municípios da Amazônia Legal.

Após a estimação do modelo, a análise dos resultados será conduzida com base em diferentes critérios complementares. Inicialmente, serão considerados os indicadores de ajuste global e os testes de diagnóstico espacial, de modo a verificar a adequação da abordagem adotada em relação às alternativas globais. Em seguida, a escolha da melhor especificação do GWR será fundamentada nos critérios de AIC, AICc e erro médio de previsão, além do teste de Monte Carlo para averiguar a presença de não estacionariedade espacial nos coeficientes.

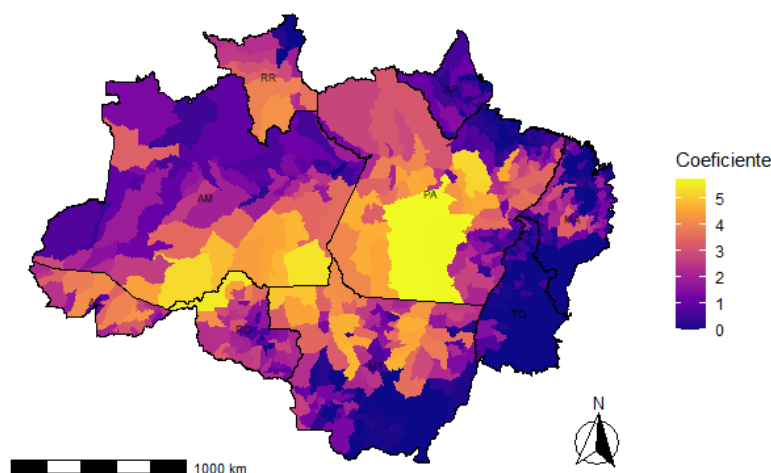
Por fim, a interpretação dos resultados será complementada pela análise dos coeficientes locais e de seus respectivos mapas de significância, permitindo identificar padrões territoriais diferenciados na relação entre crédito rural, atividade agropecuária e desmatamento na Amazônia Legal.

4. Análise e Discussão dos Resultados

A Figura 2 apresenta a distribuição espacial do desmatamento nos municípios da Amazônia Legal em 2023. Observa-se forte heterogeneidade espacial na intensidade do fenômeno, com maior concentração do desmatamento na porção sul e sudeste da região, especialmente nos estados do Mato Grosso, Pará e Rondônia. Esse padrão espacial corresponde ao chamado “arco do desmatamento”, historicamente associado à expansão da fronteira agropecuária e à conversão de áreas florestais em usos produtivos. Esse resultado é consistente com a literatura, que destaca a agricultura, a pecuária e a maior acessibilidade territorial como fatores centrais para a intensificação da pressão sobre a cobertura vegetal nativa (Leblois, Damette e Wolfersberger, 2017; Pfaff et al., 2015; Souza-Rodrigues, 2019).

Por outro lado, municípios situados em porções mais centrais e setentrionais da Amazônia Legal tendem a apresentar níveis relativamente menores de desmatamento, o que pode estar associado à menor densidade econômica, à menor integração logística e à maior presença de áreas protegidas. Assim, a distribuição observada na Figura 2 já fornece evidência preliminar de que o desmatamento não se manifesta de forma uniforme no território, mas segue uma lógica espacial associada às diferentes formas de ocupação econômica da região.

Figura 2 – Desmatamento Amazônia Legal 2023



Fonte: Elaborado pelos autores.

A configuração espacial evidenciada na Figura 2 sugere a existência de agrupamentos territoriais no processo de desmatamento. Em outras palavras, municípios com elevados níveis de desmatamento tendem a estar localizados próximos a outros municípios com características semelhantes, indicando a presença de dependência espacial. Essa evidência visual é compatível com a interpretação de que o avanço do desmatamento resulta de processos regionais interdependentes, relacionados à difusão da atividade agropecuária, à infraestrutura de transporte e à expansão da fronteira econômica. Tal interpretação está em linha com a literatura empírica sobre a Amazônia, que enfatiza o caráter espacialmente concentrado do desmatamento e sua associação com vetores produtivos específicos (Santos et al., 2021; Fernandes e Parré,

2026). Na sequência, a Tabela 2 apresenta as estatísticas descritivas das variáveis utilizadas no estudo.

Tabela 2 – Estatísticas Descritivas

Variável	N	Média	Desv.Padrão	Mín	Máx
desma (km ²)	773	10.373	30.927	0	318.100
vpd (%)	773	44.760	300.841	-100.000	4000.000
areaNO (km ²)	773	0.004	0.030	0	0.460
areaA (km ²)	773	151.645	420.689	0	5491.810
areaF (km ²)	773	4759.876	12524.410	0	145678.700
areanF (km ²)	773	1592.291	2053.448	0	22007.030
soja (ha)	773	20856.100	60217.790	0	598500
milho (ha)	773	12111.100	39925.580	0	535000
bovin (Uni)	773	138096.700	210743.800	0	2452095
credi (R\$)	773	3398437792.000	3530041082.000	0	10703460849.000
Variáveis em Logaritmo Natural					
ln(desma)	773	1.095	1.365	0	5.766
ln(soja)	773	4.528	4.778	0	13.302
ln(milho)	773	6.301	2.988	0	13.190
ln(bovin)	773	10.705	1.960	0	14.712
ln(credi)	773	21.269	1.643	0	23.094
ln(vpd)	773	1.183	2.103	-0.365	8.294
ln(areaA)	773	2.961	2.042	0	8.611
ln(areaF)	773	6.951	1.771	0	11.889
ln(areaNF)	773	6.700	1.258	0	9.999

Fonte: Elaborado pelos autores:

Os dados indicam elevada dispersão na variável de desmatamento, cuja média foi de 10,373 km² por município, com desvio-padrão de 30,927 km² e valor máximo de 318,100 km². Esse resultado evidencia a forte heterogeneidade existente entre os municípios da Amazônia Legal, sugerindo que o desmatamento assume magnitudes bastante distintas no território analisado. A variável de variação percentual do desmatamento também apresentou elevada dispersão, com média de 44,760% e desvio-padrão de 300,841, revelando que a dinâmica recente do desmatamento não ocorre de forma homogênea entre os municípios.

As estatísticas descritivas das variáveis agropecuárias também reforçam essa heterogeneidade. A área colhida de soja apresentou média de 20.856,100 hectares, enquanto a área colhida de milho registrou média de 12.111,100 hectares. O número médio de cabeças de gado foi de 138.096,700 por município, ao passo que o volume médio de crédito rural alcançou R\$ 3.398.437.792,000. Esses valores, acompanhados de elevados desvios-padrão, mostram que a estrutura produtiva da Amazônia Legal é bastante desigual entre os municípios, o que reforça a importância de métodos capazes de captar heterogeneidades espaciais nos efeitos das variáveis explicativas sobre o desmatamento.

As estatísticas em logaritmo natural indicam, ainda, dispersão expressiva entre as variáveis transformadas, especialmente para soja, crédito, área florestal e área não florestal. Esse resultado sugere que a relação entre atividade agropecuária, características de uso da terra e desmatamento tende a variar de maneira significativa entre os municípios, reforçando a pertinência da modelagem espacial adotada no estudo. Do ponto de vista econômico, tal heterogeneidade é compatível com a literatura que associa o desmatamento a diferentes combinações de especialização produtiva, acesso à terra, infraestrutura e condições institucionais (Balboni et al., 2023; Pfaff et al., 2015).

A Tabela 3 apresenta o resultado do teste de autocorrelação espacial global de Moran para a variável de desmatamento. O valor estimado do Índice Global de Moran foi de 0,7182, estatisticamente significativo ao nível de 1%, o que indica forte autocorrelação espacial positiva entre os municípios da Amazônia Legal. Em termos analíticos, esse resultado demonstra que municípios com elevados níveis de desmatamento tendem a estar geograficamente próximos de outros municípios também caracterizados por altos níveis de supressão florestal. De forma análoga, municípios com baixos níveis de desmatamento tendem a formar agrupamentos espaciais semelhantes.

Tabela 3 – Resultado do teste Global I de Moran

	I de Moran Global	Valor Esperado	Variância
Valores	0.7182***	-0.0013	0.0005

Fonte: Elaborado pelos autores.

Esse achado reforça que o desmatamento constitui um fenômeno espacialmente dependente, não podendo ser adequadamente compreendido por modelos que desconsiderem a interação entre as unidades geográficas. Em termos econômicos, a presença de autocorrelação espacial sugere que a expansão do desmatamento em um município está associada a dinâmicas regionais mais amplas, como avanço da fronteira agrícola, proximidade a corredores logísticos, difusão de práticas produtivas e encadeamentos territoriais entre municípios vizinhos. Esse resultado converge com a literatura que aponta que a dinâmica do desmatamento na Amazônia Legal se organiza em padrões espaciais persistentes, especialmente em áreas de maior dinamismo agropecuário (Santos et al., 2021; Assunção et al., 2020).

Dessa forma, tanto a evidência visual apresentada na Figura 2 quanto o resultado formal do Índice Global de Moran indicam a necessidade de incorporar explicitamente a dimensão espacial na análise econométrica do desmatamento. A forte dependência espacial identificada justifica a adoção de modelos espaciais, uma vez que especificações tradicionais poderiam gerar estimativas viesadas ou insuficientes para captar a complexidade territorial do fenômeno analisado.

Diante da evidência de forte dependência espacial no desmatamento, a utilização de modelos econométricos espaciais torna-se necessária, uma vez que especificações tradicionais de regressão poderiam produzir estimativas viesadas ou inconsistentes ao desconsiderar a estrutura de interação espacial existente entre os municípios. Nesse contexto, a Tabela 4 apresenta os resultados das estimações para diferentes especificações de modelos espaciais globais, incluindo SAR, SEM, SDM, SAC, SLX e SDEM. Essas abordagens permitem captar distintas formas de dependência espacial, seja por meio da variável dependente, dos termos de erro ou das variáveis explicativas defasadas espacialmente.

Tabela 4 – Modelos de Defasagens Espaciais

Variável	OLS	SAR	SEM	SDM	SAC	SLX	SDEM
constante	-2.847***	-2.265	-0.579	-1.713***	-0.450	-6.33***	-3.355**
lcredi2023	-0.101***	-0.031	-0.135***	-0.142***	-0.136***	-0.150***	-0.125***
Isoja2023	-0.061***	-0.034***	-0.016	-0.015	-0.015	-0.009	-0.017
lmilho2023	0.071***	0.026*	0.010	0.010	0.010	0.022	0.008
lbovin2023	0.322***	0.141***	0.173***	0.166***	0.170***	0.190***	0.188***

XVI World Congress of Rural Sociology
64th Congress of the Brazilian Society of Rural
Economics, Management and Sociology

JULY 19 - 23, 2026 | PORTO ALEGRE/RS | BRAZIL | UFRGS

lareaF2023	0.381***	0.205***	0.305***	0.307***	0.306***	0.330***	0.313***
lareaNF2023	-0.082	0.026	0.069	0.077	0.069	0.054	0.052
lareaNO2023	-0.104	-0.716	-0.556	-0.423	-0.555	-0.213	-0.797
lareaA2023	0.090***	0.027	0.002	-0.003	0.000	-0.007	0.007
lVarPe2023	0.097***	0.068***	0.064***	0.0685***	0.063***	0.091***	0.070***
lag.lcredi2023	—	—	—	0.1503***	—	0.144***	0.071
lag.lsoja2023	—	—	—	-0.006	—	-0.109***	0.005
lag.lmilho2023	—	—	—	0.007	—	0.130***	-0.014
lag.lbovin2023	—	—	—	-0.040	—	0.296***	0.131*
lag.lareaF2023	—	—	—	-0.185***	—	0.114*	0.111*
lag.lareaNF2023	—	—	—	-0.161**	—	-0.368***	-0.188
lag.lareaNO2023	—	—	—	0.551	—	4.342*	-1.325
lag.lareaA2023	—	—	—	0.045	—	0.216***	0.020
lag.lVarPe2023	—	—	—	-0.028	—	0.101***	0.022
ρ	—	0.627***	—	0.733***	-0.0566	—	—
λ	—	—	0.776***	—	0.800***	—	0.759***

Teste de homoscedasticidade (a,b) e Normalidade dos Resíduos

Teste	OLS	SAR	SEM	SDM	SAC	SLX	SDEM
a. Breusch-Pagan	111.7***	—	—	—	—	131.65** *	—
b. Koenker-Bassett	111.7***	—	—	—	—	131.65** *	—
c. Jarque-Bera	42.36***	42.76***	34.32***	27.181***	35.36***	34.73***	31.06***

Autocorrelação Espacial dos Resíduos

Variável	OLS	SAR	SEM	SDM	SAC	SLX	SDEM
Queen	0,5521	0,0660	-0,0262	-0,0208	-0,0238	0,5066	-0,0235
Torre	0,5527	0,0680	-0,0237	-0,0183	-0,0211	0,5077	-0,0211
K10	0,4267	0,0771	0,0010	0,0061	0,0000	0,3808	0,0055
Dist	-0,0013	-0,0013	-0,0013	-0,0013	-0,0013	-0,0013	-0,0013
Média	0,3826	0,0525	-0,0126	-0,0086	-0,0116	0,3485	-0,0101

Teste de Multiplicador de Lagrange

Defasagem ρ	53.51***	
Erro λ	105.92***	
Modelo	AIC	BIC
SAR	1683.57	1739.37
SEM	1623.32	1679.12
SDM	1626.19	1723.84
SAC	1625.03	1685.49

Fonte: Elaborado pelos autores

A comparação entre os modelos evidencia que a especificação SEM apresentou o melhor desempenho em termos de critérios de informação, com AIC de 1623,32 e BIC de 1679,12, valores inferiores aos observados para SAR, SDM e SAC. Esse resultado sugere que a dependência espacial do desmatamento, ao menos no contexto dos modelos globais estimados, manifesta-se predominantemente nos termos de erro. Em termos analíticos, isso indica a existência de fatores não observados, espacialmente correlacionados entre os municípios, que influenciam o desmatamento. Entre esses fatores, podem ser destacados elementos como qualidade institucional, capacidade de fiscalização, infraestrutura logística, proximidade de mercados e características históricas da ocupação territorial.

Esse resultado é coerente com a literatura que enfatiza a importância de fatores estruturais e institucionais na determinação do desmatamento na Amazônia Legal. Pfaff et al. (2015), por exemplo, destacam o papel do acesso territorial e das restrições institucionais sobre o uso da terra, ao passo que Assunção et al. (2020) mostram que a política de crédito rural e seus mecanismos regulatórios influenciam a dinâmica do desmatamento para além das características puramente produtivas dos municípios. Assim, o desempenho superior do modelo SEM sugere que parte relevante da dinâmica espacial do desmatamento decorre de fatores não totalmente captados pelas variáveis observáveis incluídas na especificação.

Ainda que o modelo SEM apresente o melhor ajuste global, a análise dos demais modelos espaciais também oferece evidências importantes. O parâmetro de defasagem espacial da variável dependente no modelo SAR ($\rho = 0,627$) mostrou-se positivo e estatisticamente significativo, indicando que aumentos no desmatamento em determinado município tendem a estar associados a maiores níveis de desmatamento nos municípios vizinhos. Resultado semelhante foi encontrado no SDM, cujo parâmetro $\rho = 0,733$ também foi significativo. Esses achados sugerem a existência de efeitos de transbordamento espacial, compatíveis com a ideia de que a expansão da fronteira agropecuária, da pecuária extensiva e das atividades agrícolas se dissemina territorialmente de forma contígua.

No caso do modelo SAC, embora o parâmetro $\lambda = 0,800$ tenha sido significativo, o coeficiente ρ não apresentou significância estatística, o que reduz a evidência de dependência espacial simultânea na variável dependente e no erro. Por essa razão, apesar de o SAC combinar dois mecanismos espaciais, seu desempenho empírico ficou ligeiramente inferior ao do SEM em termos de AIC e BIC. Assim, os resultados sugerem que a principal fonte de dependência espacial no desmatamento municipal está associada aos componentes não observados espacialmente correlacionados, mais do que a um processo puro de interação direta entre os níveis de desmatamento dos municípios.

No que se refere às variáveis explicativas, alguns resultados mostram estabilidade relativa entre os diferentes modelos espaciais. A variável crédito rural apresentou coeficiente negativo e estatisticamente significativo nas principais especificações espaciais, especialmente no SEM ($-0,135$), SDM ($-0,142$), SAC ($-0,136$) e SDEM

($-0,125$). Esse resultado sugere que o crédito rural, ao menos em termos médios, esteve associado à redução do desmatamento, indicando que o financiamento pode contribuir para a intensificação produtiva e para a adoção de tecnologias que reduzam a necessidade de incorporação de novas áreas ao processo produtivo. Essa evidência converge com a interpretação de Assunção et al. (2020), segundo a qual instrumentos financeiros e regulatórios podem alterar os incentivos econômicos relacionados ao uso da terra.

A variável soja apresentou coeficiente negativo e significativo apenas em algumas especificações, como OLS e SAR, perdendo significância nos demais modelos espaciais. Isso sugere que seu efeito médio global sobre o desmatamento é menos robusto quando a dependência espacial é explicitamente incorporada. Esse resultado pode refletir a

heterogeneidade territorial da expansão da soja, já que, em algumas regiões, essa atividade pode estar associada à intensificação produtiva em áreas já abertas, enquanto em outras pode exercer pressão indireta sobre novas áreas. Tal interpretação é compatível com a literatura que aponta que os impactos da agricultura comercial sobre o desmatamento não são homogêneos no território amazônico (Leblois; Damette; Wolfersberger, 2017; Fernandes; Parré, 2026).

A variável milho apresentou coeficiente positivo e significativo no modelo OLS (0,071), mas seu efeito tornou-se menos robusto nos modelos espaciais, permanecendo significativo apenas no SAR, ao nível de 10%. Isso sugere que parte da associação entre milho e desmatamento observada em modelos não espaciais pode estar captando efeitos territoriais correlacionados, e não necessariamente um impacto direto e uniforme da cultura sobre o desmatamento. Ainda assim, o sinal positivo permanece consistente com a interpretação de que a expansão agrícola pode contribuir para maior pressão sobre a cobertura vegetal, sobretudo em áreas de fronteira produtiva.

A variável pecuária bovina apresentou coeficiente positivo e estatisticamente significativo em todas as especificações estimadas, o que reforça a robustez desse resultado. No modelo SEM, por exemplo, o coeficiente estimado foi de 0,173, enquanto no SAC foi de 0,170. Esse achado confirma a centralidade da pecuária como vetor estrutural do desmatamento, em linha com Santos et al. (2021), que identificam o número de cabeças de gado como um dos principais determinantes espaciais da supressão florestal no bioma Amazônia. Do ponto de vista econômico, esse resultado é compatível com a lógica de expansão extensiva da pecuária, frequentemente associada à conversão de áreas florestais em pastagens.

A variável área florestal também apresentou coeficiente positivo e significativo em todos os modelos espaciais. No modelo SEM, por exemplo, seu coeficiente foi de 0,305. Esse resultado sugere que municípios com maior estoque de área florestal apresentam maior potencial de desmatamento, o que é coerente com a ideia de que a disponibilidade de cobertura vegetal constitui condição prévia para sua conversão futura. Em termos econômicos, trata-se de um resultado esperado: onde há maior disponibilidade de floresta, maior é a possibilidade material de expansão do desmatamento, especialmente em contextos de pressão agropecuária.

Por outro lado, as variáveis área não florestal, área não observada e área coberta por água apresentaram menor robustez estatística entre as diferentes especificações. Isso sugere que seus efeitos médios globais sobre o desmatamento são mais limitados ou dependem de condições regionais específicas, reforçando a hipótese de heterogeneidade espacial a ser posteriormente explorada pelo modelo GWR. De modo semelhante, a variável variação percentual do desmatamento apresentou coeficiente positivo e significativo em praticamente todas as especificações, sugerindo persistência temporal na dinâmica recente do desmatamento municipal.

Além da comparação dos coeficientes, os resultados de diagnóstico reforçam a superioridade dos modelos espaciais em relação ao OLS. A autocorrelação espacial dos resíduos, bastante elevada no modelo OLS, foi substancialmente reduzida nos modelos SEM, SDM, SAC e SDEM, indicando que essas especificações foram capazes de absorver a estrutura de dependência espacial presente nos dados. Esse resultado reforça a adequação da modelagem espacial para o estudo do desmatamento na Amazônia Legal, uma vez que o fenômeno se organiza territorialmente de forma interdependente e não pode ser plenamente compreendido por modelos que assumem independência entre as observações. Com o objetivo de avaliar a qualidade do conjunto de regressores empregado no modelo, foi calculado o Fator de Inflação da Variância (VIF), cujos resultados são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 3 – Teste de VIF

Variável	VIF
lcredi2023	1.5756
Isoja2023	2.6599
lmilho2023	3.2295
lBovin2023	3.7695
lareaF2023	2.2004
lareaNF2023	4.5473
lareaNO2023	1.0600
lareaA2023	2.1847
lVarPe2023	1.0325

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados indicam que nenhuma das variáveis explicativas apresentou problemas severos de multicolinearidade, uma vez que todos os valores de VIF permaneceram abaixo do limiar usualmente adotado na literatura. Os maiores valores foram observados para lareaNF2023 (4,5473), lBovin2023 (3,7695) e lmilho2023 (3,2295), mas ainda assim em níveis considerados aceitáveis. Isso sugere que o conjunto de variáveis utilizado apresenta adequada qualidade estatística para fins de estimação, não havendo evidência de colinearidade elevada capaz de comprometer a estabilidade dos coeficientes estimados.

Após a estimação dos modelos espaciais globais, aplicou-se a metodologia de Regressão Geograficamente Ponderada (GWR) com o objetivo de captar possíveis heterogeneidades espaciais nas relações entre o desmatamento e seus determinantes. A escolha da largura de banda foi realizada com base nos critérios de Validação Cruzada (CV) e Critério de Informação de Akaike (AIC), considerando diferentes funções kernel e especificações de banda (fixa e adaptativa).

Tabela 4 – Teste de Escolha de Banda (GWR)

Método	Kernel	Tipo	RSME
CV	Gaussiano	Adaptativo	432.9972
CV	Bisquare	Adaptativo	—
CV	Gaussiano	Fixo	292.3355
CV	Bisquare	Fixo	529.3746
Método	Kernel	Tipo	AIC
AIC	Gaussiano	Adaptativo	1434.749
AIC	Bisquare	Adaptativo	1767.42
AIC	Gaussiano	Fixo	1383.655
AIC	Bisquare	Fixo	1712.561

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados indicam que o modelo com kernel gaussiano e banda fixa apresentou o melhor desempenho, evidenciado pelos menores valores de AIC (1383,655) e RMSE (292,3355). Dessa forma, essa especificação foi selecionada como a mais adequada para a análise empírica, uma vez que apresenta maior capacidade de ajuste e melhor desempenho preditivo em relação às demais alternativas.

Cabe destacar que, embora a literatura frequentemente recomende o uso de banda adaptativa em contextos de elevada heterogeneidade espacial, como é o caso da Amazônia Legal, os resultados empíricos indicaram que a banda fixa proporcionou melhor ajuste aos dados. Esse resultado sugere que, apesar da heterogeneidade territorial, a estrutura espacial das relações analisadas apresenta certo grau de regularidade, permitindo a utilização de uma

vizinhança com raio constante. A Tabela 8 apresenta os resultados do modelo GWR com kernel gaussiano e banda fixa.

Tabela 8 – Gaussiano Fixo

Variável	Mínimo	1º quartil	Mediana	3º quartil	Máximo
Constante	-220.1600	-7.1996	-3.2296	0.1960	8.2530
lcredi2023	-0.4575	-0.1447	-0.0706	0.1830	12.0933
lsoja2023	-0.3721	-0.0329	-0.0078	0.0406	0.7286
lmilho2023	-0.2862	-0.0102	0.0250	0.0706	0.5134
lbovin2023	-0.4922	0.0099	0.0725	0.2066	0.9001
lareaF2023	-0.1758	0.1707	0.2660	0.4155	1.3477
lareaNF2023	-1.8856	0.0171	0.1150	0.2423	1.2124
lareaNO2023	-223.1700	-14.9450	-2.8640	0.4890	13.2328
lareaA2023	-0.8876	-0.0374	0.0006	0.0525	2.0089
lVarPe2023	-0.1099	0.0617	0.1102	0.1383	0.2938
R ²			0.8789		
R ² Ajustado			0.8388		
RSS			174.220		
AIC			1191.703		
AICc			1417.124		
BIC			1264.899		
ENP			191.9598		
Banda Fixa			184.947,9		

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados evidenciam elevada heterogeneidade espacial nos coeficientes estimados, conforme indicado pela amplitude entre os valores mínimos e máximos, bem como pelas diferenças entre os quartis. O modelo apresentou elevado poder explicativo ($R^2 = 0,8789$) e melhora significativa em relação aos modelos globais, evidenciada pela redução do AIC (1191,703).

No que se refere à variável crédito rural, observa-se que, em termos medianos, seu efeito é negativo (-0,0706), indicando que o aumento do crédito está associado à redução do desmatamento. Esse resultado sugere que o crédito rural pode atuar como instrumento de intensificação produtiva, viabilizando a adoção de tecnologias mais eficientes e reduzindo a necessidade de expansão da fronteira agrícola. Esse achado é consistente com Assunção et al. (2020), que evidenciam o papel do crédito na mitigação do desmatamento por meio de mecanismos regulatórios e de financiamento.

Por outro lado, esse resultado contrasta com Fernandes e Parré (2026), que identificam associação positiva entre crédito e desmatamento. Essa divergência pode ser explicada pela presença de heterogeneidade espacial, indicando que o efeito do crédito depende das condições institucionais, produtivas e territoriais de cada região.

No caso das variáveis agrícolas, observa-se comportamento distinto entre milho e soja. A variável milho apresenta coeficiente positivo na mediana (0,0250), sugerindo associação com o aumento do desmatamento, possivelmente devido à sua expansão em áreas de fronteira agrícola. Já a soja apresenta coeficiente negativo na mediana (-0,0078), indicando que, em determinadas regiões, sua produção pode estar associada à intensificação produtiva em áreas já consolidadas. Esse resultado reforça a ideia de que os efeitos das commodities agrícolas sobre o desmatamento não são homogêneos, conforme destacado por Leblois, Damette e Wolfersberger (2017).

A variável pecuária bovina apresenta coeficiente positivo na mediana (0,0725), além de valores máximos elevados, indicando forte associação com o desmatamento em diversas

regiões. Esse resultado confirma a literatura, que identifica a pecuária como um dos principais vetores estruturais do desmatamento na Amazônia (Santos et al., 2021; Assunção et al., 2020). Já a variável área florestal apresenta coeficiente positivo (mediana de 0,2660), indicando que municípios com maior estoque de floresta apresentam maior potencial de desmatamento. Esse resultado é consistente com a interpretação econômica de que a disponibilidade de recursos naturais constitui condição necessária para sua exploração futura. A Tabela 9 apresenta os resultados do teste de Monte Carlo.

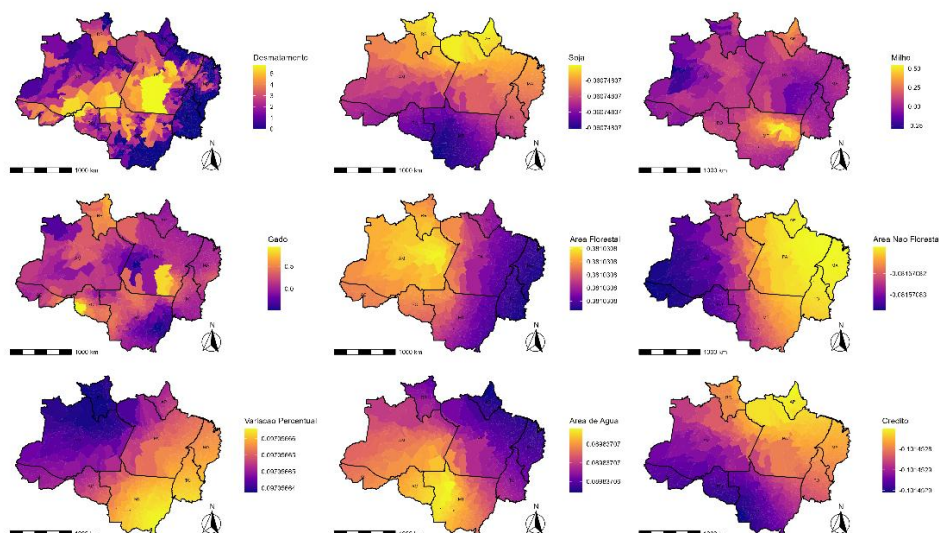
Tabela 9 – Teste de Monte Carlo Gaussiano Fixo

Variável	p-valor
(Intercept)	0,000 ***
lcredi_2023	0,000 ***
lsoja_2023	0,001 ***
lmilho_2023	0,138
lBovin_2023	0,117
lareaF2023	0,000 ***
lareNF2023	0,010 **
lareNO2023	0,182
lareaA2023	0,001 ***
lVarPe_2023	0,296

Fonte: Elaborado pelos autores. Notas: *** $p < 0,01$; ** $p < 0,05$; * $p < 0,1$.

Os resultados indicam rejeição da hipótese nula de estacionariedade espacial para variáveis como crédito rural, soja, área florestal e área não florestal, ao nível de significância de 1% e 5%. Isso indica que os efeitos dessas variáveis sobre o desmatamento variam significativamente entre os municípios, reforçando a adequação do modelo GWR. Por outro lado, variáveis como milho, pecuária e variação percentual do desmatamento não apresentaram evidência de não estacionariedade, sugerindo que seus efeitos são mais homogêneos no espaço.

Figura 3 – Mapas de coeficientes locais



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 3 apresenta os mapas dos coeficientes locais estimados pelo modelo GWR. Os resultados evidenciam padrões espaciais distintos na influência das variáveis explicativas. A variável pecuária apresenta efeitos positivos mais intensos na região do arco do desmatamento,

reforçando sua centralidade no processo de conversão do uso da terra. Esse resultado está diretamente alinhado com Santos et al. (2021). A variável crédito rural apresenta efeitos negativos mais pronunciados em regiões com maior desenvolvimento institucional e maior acesso a tecnologias produtivas, sugerindo que o crédito pode atuar como instrumento de mitigação do desmatamento nessas áreas.

No caso da soja, observa-se heterogeneidade espacial, com efeitos negativos em regiões consolidadas e efeitos menos expressivos em áreas de expansão, indicando diferenças na forma de organização produtiva. Os mapas de significância estatística, apresentados na Figura 4 (em anexo), confirmam que os coeficientes são estatisticamente relevantes apenas em determinadas regiões, reforçando a presença de heterogeneidade espacial. Em conjunto, os resultados indicam que o desmatamento na Amazônia Legal é um fenômeno espacialmente dependente e heterogêneo, no qual a pecuária desempenha papel central, enquanto o crédito rural pode atuar como instrumento de mitigação, dependendo das condições regionais.

5. Considerações finais

O presente estudo teve como objetivo investigar a relação entre o crédito rural e o desmatamento nos municípios da Amazônia Legal, incorporando explicitamente a dimensão espacial por meio de modelos de econometria espacial e da Regressão Geograficamente Ponderada (GWR). Partindo da evidência de forte autocorrelação espacial do desmatamento, confirmada pelo Índice Global de Moran, o trabalho buscou compreender de que forma os determinantes econômicos e produtivos se manifestam no território de forma heterogênea.

Os resultados obtidos a partir dos modelos espaciais globais indicaram que a dependência espacial do desmatamento se manifesta predominantemente nos termos de erro, conforme evidenciado pelo melhor desempenho do modelo SEM. Esse achado sugere que fatores não observados, como características institucionais, infraestrutura, capacidade de fiscalização e dinâmicas regionais de ocupação, desempenham papel relevante na explicação do desmatamento, corroborando a literatura que enfatiza a importância desses elementos na Amazônia Legal (Pfaff et al., 2015; Assunção et al., 2020).

No que se refere às variáveis explicativas, a pecuária bovina se destacou como o principal vetor associado ao aumento do desmatamento, apresentando coeficientes positivos e robustos em todas as especificações estimadas. Esse resultado está em linha com evidências empíricas consolidadas que apontam a expansão da pecuária extensiva como elemento central na conversão de áreas florestais em pastagens (Santos et al., 2021). Por outro lado, os efeitos das culturas agrícolas, especialmente soja e milho, mostraram-se menos uniformes, indicando que seu impacto sobre o desmatamento depende do contexto regional e do estágio de consolidação das atividades produtivas.

A principal contribuição do estudo, no entanto, reside na evidência de heterogeneidade espacial capturada pelo modelo GWR. Os resultados indicaram que os efeitos das variáveis explicativas variam significativamente entre os municípios, sendo essa não estacionariedade espacial confirmada pelo teste de Monte Carlo para variáveis como crédito rural, soja e área florestal. Nesse sentido, o modelo GWR mostrou-se superior às especificações globais ao permitir a identificação de padrões territoriais diferenciados na relação entre atividade econômica e desmatamento.

Especificamente, a variável crédito rural apresentou, em termos médios, associação negativa com o desmatamento, sugerindo que o acesso ao financiamento pode contribuir para a intensificação produtiva e para a adoção de tecnologias que reduzam a necessidade de expansão da área agrícola. Esse resultado converge com Assunção et al. (2020), ao indicar que instrumentos financeiros podem alterar os incentivos econômicos associados ao uso da terra. Contudo, a análise espacial revelou que esse efeito não é homogêneo, variando conforme as

características locais, o que ajuda a explicar divergências encontradas na literatura, como em Fernandes e Parré (2026).

Do ponto de vista de políticas públicas, os resultados sugerem que estratégias uniformes de combate ao desmatamento tendem a ser menos eficazes do que abordagens territorialmente diferenciadas. A heterogeneidade espacial identificada indica que políticas de crédito, regulação ambiental e incentivo à produção sustentável devem ser adaptadas às especificidades regionais, considerando fatores como estrutura produtiva, acesso à infraestrutura e capacidade institucional. Nesse contexto, instrumentos como o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm) e mecanismos de monitoramento, como o sistema DETER, desempenham papel fundamental no fortalecimento da governança ambiental.

Apesar das contribuições apresentadas, o estudo possui algumas limitações que devem ser consideradas. Em primeiro lugar, a análise baseia-se em um recorte temporal relativamente curto, o que pode limitar a captura de dinâmicas de longo prazo no desmatamento. Em segundo lugar, a utilização de dados agregados em nível municipal pode ocultar heterogeneidades intraespaciais relevantes. Além disso, a ausência de variáveis institucionais e de governança ambiental mais detalhadas pode restringir a capacidade explicativa dos modelos globais.

Diante dessas limitações, futuras pesquisas podem avançar na incorporação de dimensões temporais mais amplas, utilizando modelos espaciais dinâmicos, bem como explorar bases de dados em maior nível de desagregação espacial. Adicionalmente, a inclusão de variáveis institucionais, como intensidade de fiscalização, presença de áreas protegidas e indicadores de governança local, pode contribuir para uma compreensão mais abrangente dos determinantes do desmatamento.

Em síntese, os resultados evidenciam que o desmatamento na Amazônia Legal é um fenômeno complexo, espacialmente dependente e heterogêneo, no qual a pecuária desempenha papel central, enquanto o crédito rural pode atuar como instrumento potencial de mitigação, dependendo das condições regionais. Assim, a incorporação da dimensão espacial mostra-se fundamental para o avanço das análises empíricas e para o desenho de políticas públicas mais eficazes no enfrentamento do desmatamento.

Referências

ASSUNÇÃO, Juliano *et al.* The Effect of Rural Credit on Deforestation: Evidence from the Brazilian Amazon. **The Economic Journal**, v. 130, n. 626, p. 290–330, 1 fev. 2020.

BALBONI, Clare *et al.* The Economics of Tropical Deforestation. **Annual Review of Economics**, v. 15, n. Volume 15, 2023, p. 723–754, 13 set. 2023.

CASTELO, Thiago Bandeira. LEGISLAÇÃO FLORESTAL BRASILEIRA E POLÍTICAS DO GOVERNO DE COMBATE AO DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA LEGAL. **Ambiente & Sociedade**, v. 18, p. 221–242, 2015.

CASTRO, Alisson Silva de; ANDRADE, Daniel Caixeta. O custo econômico do desmatamento da Floresta Amazônica brasileira (1988-2014). **Perspectiva Econômica**, v. 12, n. 1, p. 1–15, 10 fev. 2016.

CELENTANO, Danielle *et al.* Desmatamento, degradação e violência no “Mosaico Gurupi” – A região mais ameaçada da Amazônia. **Estudos Avançados**, v. 32, n. 92, 2017.

FELTRAN-BARBIERI, Rafael; FÉRES, José Gustavo. Degraded pastures in Brazil: improving livestock production and forest restoration. **Royal Society Open Science**, v. 8, n. 7, p. 201854, jul. 2021.

FERNANDES, Paulo Guilherme Alarcon; PARRE, José Luiz. The influence of rural credit on the conservation of the Amazon biome. **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos**, v. 20, n. 1, p. 56–78, 9 jan. 2026.

FERREIRA, Marcelo Dias Paes; COELHO, Alexandre Bragança. Desmatamento Recente nos Estados da Amazônia Legal: uma análise da contribuição dos preços agrícolas e das políticas governamentais. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 53, n. 1, p. 91–108, mar. 2015.

JÚNIOR, Geraldo Bueno Martha; CONTINI, Elisio; NAVARRO, Zander. Caracterização da Amazônia Legal e macro tendências do ambiente externo. *[S.d.]*.

JUSYS, Tomas. Fundamental causes and spatial heterogeneity of deforestation in Legal Amazon. **Applied Geography**, v. 75, p. 188–199, out. 2016.

LEBLOIS, Antoine; DAMETTE, Olivier; WOLFERSBERGER, Julien. What has Driven Deforestation in Developing Countries Since the 2000s? Evidence from New Remote-Sensing Data. **World Development**, v. 92, p. 82–102, abr. 2017.

MELLO, Natália Girão Rodrigues De; ARTAXO, Paulo. Evolução do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal. **Revista do Instituto de Estudos Brasileiros**, n. 66, p. 108, 1 abr. 2017.

O que é? Amazônia Legal. Disponível em:

<https://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?option=com_content&id=2154:catid=28>.

Acesso em: 31 mar. 2026.

OLIVEIRA, Rejane Corrêa De *et al.* Desmatamento e crescimento econômico no Brasil: uma análise da curva de Kuznets ambiental para a Amazônia legal. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 49, n. 3, p. 709–739, set. 2011.

PFAFF, Alexander *et al.* Protected Areas' Impacts on Brazilian Amazon Deforestation: Examining Conservation – Development Interactions to Inform Planning. **PLOS ONE**, v. 10, n. 7, p. e0129460, 30 jul. 2015.

SANTOS, Alex Mota Dos *et al.* Deforestation drivers in the Brazilian Amazon: assessing new spatial predictors. **Journal of Environmental Management**, v. 294, p. 113020, set. 2021.

SOUZA-RODRIGUES, Eduardo. Deforestation in the Amazon: A Unified Framework for Estimation and Policy Analysis. **The Review of Economic Studies**, v. 86, n. 6, p. 2713–2744, 1 nov. 2019.

TICKTIN, T. The ecological implications of harvesting non-timber forest products. **Journal of Applied Ecology**, v. 41, n. 1, p. 11–21, 2004.

WEHKAMP, Johanna *et al.* Governance and deforestation — a meta-analysis in economics. **Ecological Economics**, v. 144, p. 214–227, fev. 2018.