

EXTREMOS CLIMÁTICOS SAZONAIS, PAISAGEM E VARIABILIDADE DA PRODUÇÃO DE MEL NO NOROESTE DO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL

Alexandre **Hüller**¹, Hítalo Ruan Ferrazza **Antunes**², Vitor Gabriel **Turcatto**³

1 – Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), alexandre.huller@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-3849-6841>; 2 – Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR), hitaloferrazza@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-6638-9647> – Universidade Norte do Paraná (UNOPAR), vturcatto01@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-0879-5687>

Resumo: A apicultura desempenha papel relevante na produção de alimentos, nos serviços ecossistêmicos e na economia rural, sendo sensível à variabilidade climática sazonal. Este estudo avaliou a influência de extremos climáticos sobre a variabilidade interanual da produção municipal de mel no Noroeste do Rio Grande do Sul, integrando dados da Pesquisa da Pecuária Municipal do IBGE - (2004–2023), índices climáticos da base NASA POWER e informações de uso e cobertura da terra do MapBiomas. As variáveis climáticas médias anuais apresentaram baixo poder explicativo, apesar de associação estatisticamente significativa para a temperatura média anual. Maior precipitação na primavera e temperaturas mais elevadas no verão aumentaram a produção, enquanto temperaturas mais altas no inverno apresentaram efeito negativo. O modelo de extremos apresentou melhor ajuste, indicando que primavera chuvosa, verão quente e inverno frio favoreceram maiores níveis produtivos. A proporção de cobertura florestal não apresentou associação significativa com a produção média municipal, enquanto a área absoluta de floresta mostrou associação positiva, porém com baixo poder explicativo. Os resultados indicam que a produção responde principalmente a extremos sazonais e limiares climáticos específicos, sendo secundariamente influenciada por características da paisagem e pela estrutura territorial da atividade.

Palavras-chave: Apicultura; eventos climáticos; mudanças climáticas; polinização.

SEASONAL CLIMATE EXTREMES, LANDSCAPE, AND VARIABILITY OF HONEY PRODUCTION IN NORTHWESTERN RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL

Artigo recebido para publicação em 30 de abril de 2026
Artigo aprovado para publicação em 30 de junho de 2026

Abstract: Beekeeping plays a relevant role in food production, ecosystem services, and the rural economy, being sensitive to seasonal climate variability. This study evaluated the influence of climate extremes on the interannual variability of municipal honey production in Northwestern Rio Grande do Sul, Brazil, integrating data from the Municipal Livestock Production Survey (IBGE, 2004–2023), climate indices from the NASA POWER database, and land use and land cover information from MapBiomas. Annual mean climate variables showed low explanatory power, despite a statistically significant association for mean annual temperature. Higher spring precipitation and elevated summer temperatures increased production, while higher winter temperatures had a negative effect. The extremes-based model showed better performance, indicating that rainy springs, hot summers, and cold winters favored higher production levels. Forest cover proportion showed no significant association with mean municipal production, whereas absolute forest area showed a positive association with low explanatory power. The results indicate that honey production responds primarily to seasonal extremes and specific climatic thresholds, and is secondarily influenced by landscape characteristics and the territorial structure of the activity.

Keywords: Beekeeping; climate events; climate change; pollination; honey.

EXTREMOS CLIMÁTICOS ESTACIONALES, PAISAJE Y VARIABILIDAD DE LA PRODUCCIÓN DE MIEL EN EL NOROESTE DE RIO GRANDE DO SUL, BRASIL

Resumen: La apicultura desempeña un papel relevante en la producción de alimentos, los servicios ecosistémicos y la economía rural, siendo sensible a la variabilidad climática estacional. Este estudio evaluó la influencia de los extremos climáticos sobre la variabilidad interanual de la producción municipal de miel en el noroeste de Rio Grande do Sul, Brasil, integrando datos de la Pesquisa da Pecuária Municipal (IBGE, 2004–2023), índices climáticos de la base NASA POWER e información de uso y cobertura de la tierra de MapBiomas. Las variables climáticas medias anuales presentaron bajo poder explicativo, pese a asociaciones significativas para la temperatura media anual. Una mayor precipitación en primavera y temperaturas más elevadas en verano incrementaron la producción, mientras que temperaturas más altas en invierno tuvieron efecto negativo. El modelo de extremos mostró mejor ajuste, indicando que primaveras lluviosas, veranos cálidos e inviernos fríos favorecieron mayores niveles productivos. La proporción de cobertura forestal no presentó asociación significativa,

mientras que el área absoluta de bosque mostró asociación positiva con bajo poder explicativo. Los resultados indican que la producción responde principalmente a extremos estacionales y umbrales climáticos, con influencia secundaria de la estructura territorial y características del paisaje.

Palabras clave: Apicultura; eventos climáticos; cambio climático; polinización; miel.

1. Introdução

A apicultura, baseada predominantemente no manejo de *Apis mellifera*, ocupa posição estratégica na interface entre produção de alimentos, serviços ecossistêmicos e economia rural. Além da produção de mel, a atividade está diretamente associada à provisão de serviços de polinização, fundamentais para a produtividade agrícola e para a manutenção da biodiversidade. Estudos globais demonstram que polinizadores contribuem significativamente para a estabilidade da produção agrícola e para a manutenção de funções ecossistêmicas essenciais (Garibaldi et al., 2013; Dainese et al., 2019).

No Brasil, a apicultura constitui importante alternativa de diversificação de renda, especialmente para agricultores familiares, devido ao baixo investimento inicial e à flexibilidade produtiva (Behenck et al. 2024). Contudo, o setor ainda enfrenta desafios estruturais relacionados à produtividade por colmeia, assistência técnica, padronização e organização da cadeia de valor (Moura, 2010; SEBRAE, 2022). No Rio Grande do Sul, um dos principais estados produtores de mel (IBGE, 2023), a atividade apresenta forte heterogeneidade territorial, sendo predominantemente desenvolvida em pequena escala e com elevada dependência de condições ambientais locais.

A produtividade apícola resulta da interação entre fatores climáticos, disponibilidade de recursos florais e manejo das colônias. Temperatura e precipitação influenciam tanto a fenologia das plantas quanto o comportamento de forrageamento das abelhas, afetando a dinâmica das colônias ao longo do ciclo anual (Ostwald et al. 2024). Em regiões subtropicais, variações sazonais no regime climático podem alterar a intensidade e a duração das floradas, condicionando a regularidade da produção de mel.

Paralelamente, a apicultura contemporânea encontra-se inserida em um cenário de intensificação da variabilidade climática. Alterações nos regimes de temperatura e precipitação afetam a fisiologia das colônias, a disponibilidade de recursos florais e a

sincronização entre floração e forrageamento (Neumann; Carreck, 2023; Zapata-Hernández et al. 2024). Nesse contexto, eventos extremos, como secas severas, ondas de calor, chuvas intensas e invernos rigorosos, tendem a exercer efeitos desproporcionais sobre sistemas biológicos e produtivos (IPCC, 2021; Vincze et al. 2025).

A produção de mel constitui um indicador sensível dessa dinâmica, pois depende da convergência temporal entre disponibilidade hídrica, condições térmicas adequadas ao voo e intensidade de floração. Perturbações sazonais em períodos críticos podem gerar efeitos acumulativos ao longo do ciclo produtivo, resultando em elevada variabilidade interanual. Apesar do avanço da literatura internacional sobre impactos climáticos em abelhas e polinização (Zapata-Hernández et al. 2024), ainda são escassos estudos regionais no Brasil que integrem séries históricas municipais de produção com índices climáticos sazonais e modelagem estatística hierárquica capaz de distinguir efeitos estruturais territoriais de efeitos climáticos interanuais.

O Rio Grande do Sul configura um território particularmente relevante para essa investigação. Além de concentrar parcela expressiva da produção nacional, o estado tem sido marcado pela recorrência de extremos climáticos, como estiagens prolongadas, enchentes de grande magnitude e oscilações térmicas atípicas, fenômenos alinhados às projeções do Sexto Relatório de Avaliação do IPCC para a América do Sul (IPCC, 2021).

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar de que maneira extremos climáticos sazonais influenciam a variabilidade interanual da produção municipal de mel na região Noroeste do Rio Grande do Sul, no período de 2004 a 2023. Especificamente, buscou-se: (i) caracterizar a estrutura produtiva e a concentração espacial da apicultura regional; (ii) testar a influência de índices climáticos sazonais e de extremos percentílicos sobre a produção municipal, por meio de modelos lineares mistos; (iii) analisar a ocorrência de anos com múltiplos extremos e seus efeitos na variabilidade produtiva; e (iv) discutir implicações ecológicas e econômicas desses padrões para a resiliência territorial da cadeia apícola.

Ao integrar séries produtivas municipais de longo prazo com modelagem estatística hierárquica e interpretação ecológica, este estudo contribui para o avanço da compreensão sobre os efeitos de extremos climáticos em sistemas produtivos sensíveis, oferecendo

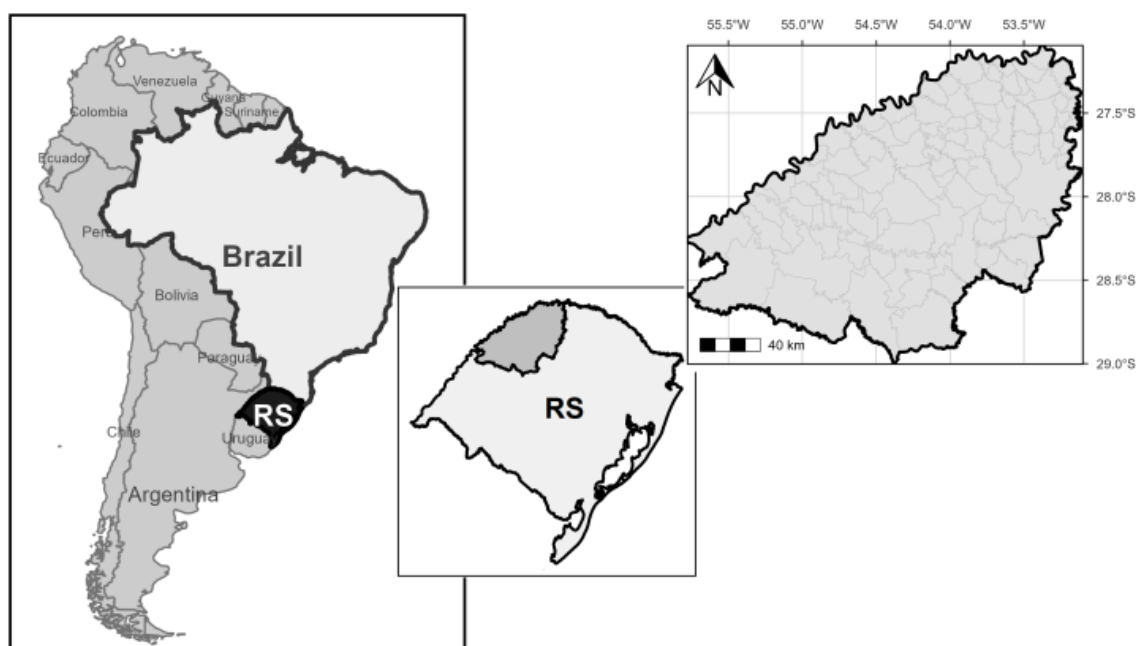
subsídios técnicos para estratégias de adaptação climática e fortalecimento da apicultura no Sul do Brasil.

2. Metodologia

2.1 Área de estudo e fontes de dados

O estudo foi conduzido na região Noroeste do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, abrangendo 98 municípios com registro contínuo de produção apícola entre 2004 e 2023 (figura 1).

Figura 1: Localização das mesorregiões geográficas do estado do Rio Grande do Sul utilizadas na análise.



Fonte: Os autores (2026).

A região apresenta clima subtropical úmido, elevada variabilidade interanual de precipitação e temperatura e paisagem predominantemente agropecuária, com remanescentes dos biomas Pampa e Mata Atlântica (Wolff; Filippini-Alba, 2017). A apicultura é desenvolvida majoritariamente em pequena escala, frequentemente como atividade complementar à produção agrícola (Solera et al. 2025).

A unidade analítica adotada foi município-ano. Os dados anuais de produção de mel (kg) foram obtidos da Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM) do Instituto Brasileiro de

Geografia e Estatística (IBGE), para o período de 2004 a 2023. Os dados climáticos mensais foram obtidos da base Nasa Power (2024), incluindo precipitação total corrigida (PRECTOTCORR) e temperatura média do ar a 2 m (T2M). A escolha dessas variáveis fundamenta-se na literatura que identifica precipitação e temperatura como determinantes primários da disponibilidade de recursos florais e da atividade de forrageamento de *Apis mellifera* (Neumann; Carreck, 2023; Vincze et al. 2025). A integração de séries históricas produtivas e dados climáticos de alta resolução é recomendada em estudos recentes sobre apicultura e mudanças climáticas (Zapata-Hernández et al. 2024).

Os dados de cobertura e uso da terra foram obtidos a partir da plataforma MapBiomas, (2025). Para este estudo, foi considerada a classe “Formação Florestal”, sendo calculada a proporção (%) de área ocupada por cobertura florestal em cada município. Os valores foram agregados em escala municipal e posteriormente resumidos como média para o período de 2004 a 2023.

2.2 Construção dos índices climáticos e hipóteses

Com base na ecologia do ciclo produtivo apícola, foram construídos índices sazonais considerados críticos para a dinâmica das colônias: primavera (setembro–novembro): precipitação média sazonal, classificada em primavera muito seca ($\leq$ percentil 25 regional), normal e primavera muito chuvosa ($\geq$ percentil 75 regional); Verão (janeiro–março): temperatura média sazonal e identificação de verões muito quentes ($\geq$ percentil 75 regional); Inverno (junho–agosto): temperatura média sazonal e identificação de invernos frios ($\leq$ percentil 25 regional); Seca intra-anual: número de meses com precipitação abaixo do percentil 25 municipal, refletindo estresse hídrico distribuído ao longo do ano. A utilização de percentis regionais permitiu caracterizar extremos relativos à climatologia local, em consonância com recomendações do IPCC (2021) para análise de eventos extremos.

Foram testadas quatro hipóteses principais: (H1) médias anuais de precipitação (MAP) e temperatura (MAT) não explicam adequadamente a variabilidade interanual da produção; (H2) extremos sazonais de precipitação na primavera influenciam significativamente a produtividade; (H3) extremos térmicos no verão e no inverno apresentam efeitos relevantes sobre a produção; (H4) a ocorrência de extremos sazonais apresenta maior poder explicativo do que médias anuais contínuas.

2.3 Análises estatísticas

A análise foi conduzida em duas etapas complementares: Primeiramente, foi realizada análise regional agregada para visualização da variabilidade interanual da produção e sua associação com índices climáticos sazonais. Em seguida, foram ajustados modelos lineares mistos (LMM) em escala município-ano, com intercepto aleatório por município, a fim de controlar diferenças estruturais entre unidades produtivas e dependência temporal das observações repetidas.

A variável resposta foi a produção municipal anual de mel transformada em $(\log(x + 1))$. Foram estimados três conjuntos de modelos: (i) Modelo contínuo climático, incluindo precipitação média da primavera, temperatura média do verão, temperatura média do inverno e número médio regional de meses secos (variáveis padronizadas); (ii) Modelo baseado em extremos climáticos, utilizando classificações categóricas derivadas de limiares percentílicos (primavera muito seca/chuvosa, verão muito quente, inverno frio, ano muito seco); (iii) Modelo integrando clima anual e estrutura da paisagem, incluindo cobertura florestal municipal média (%). Os modelos foram ajustados por máxima verossimilhança, e os coeficientes foram apresentados como estimativas β com erro-padrão, valores t , p e intervalos de confiança de 95%. O ajuste e a estrutura hierárquica foram avaliados por meio de estatísticas de informação (AIC) e inspeção de singularidade do efeito aleatório. Todas as análises estatísticas foram realizadas no ambiente R (R Core Team, 2022).

2.4 Limitações

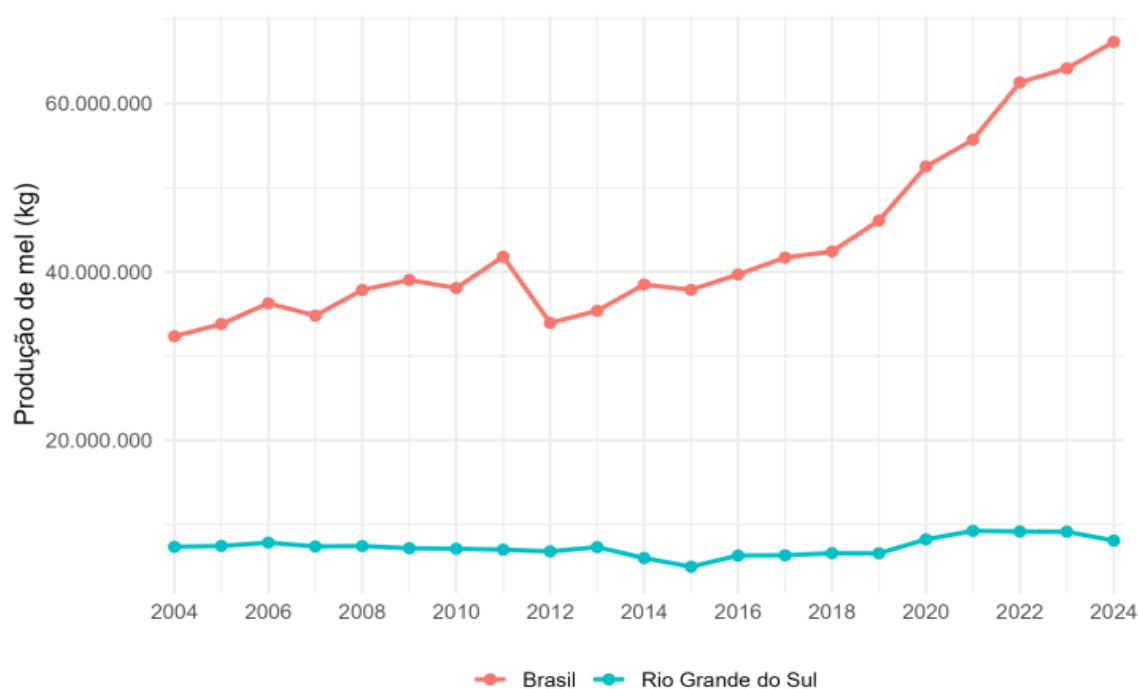
Ressalta-se que a abordagem baseada em dados secundários não incorpora informações detalhadas sobre manejo, sanidade das colônias, uso de pesticidas ou intensidade tecnológica, fatores potencialmente relevantes para a produtividade apícola. Ainda, reconhece-se que a agregação em escala municipal pode mascarar heterogeneidades intra-municipais. Além disso, a produção de mel constitui *proxy* imperfeito da provisão de serviços ecossistêmicos de polinização, devendo as inferências ecológicas ser interpretadas com cautela. Ainda assim, a integração de séries produtivas municipais de longo prazo com modelagem hierárquica permite identificar padrões regionais robustos e testar hipóteses ecológicas relacionadas à influência de extremos climáticos sobre sistemas produtivos sensíveis.

3. Resultados

3.1 Estrutura produtiva regional

Os dados indicam que o Brasil permanece entre os principais produtores e exportadores de mel, com produção estimada em 64,18 mil toneladas em 2023 (IBGE, 2025) (Figura 2). Nesse contexto, o Rio Grande do Sul, em 2023, destacava-se como o maior produtor nacional, com aproximadamente 9,1 mil toneladas, reforçando sua importância na cadeia produtiva (IBGE, 2025). Embora a produção estadual seja heterogênea, observa-se concentração regional consistente, com a região Noroeste respondendo por cerca de 35% da produção gaúcha na média histórica.

Figura 2: Produção de mel no Brasil e no Rio Grande do Sul (2004–2023).



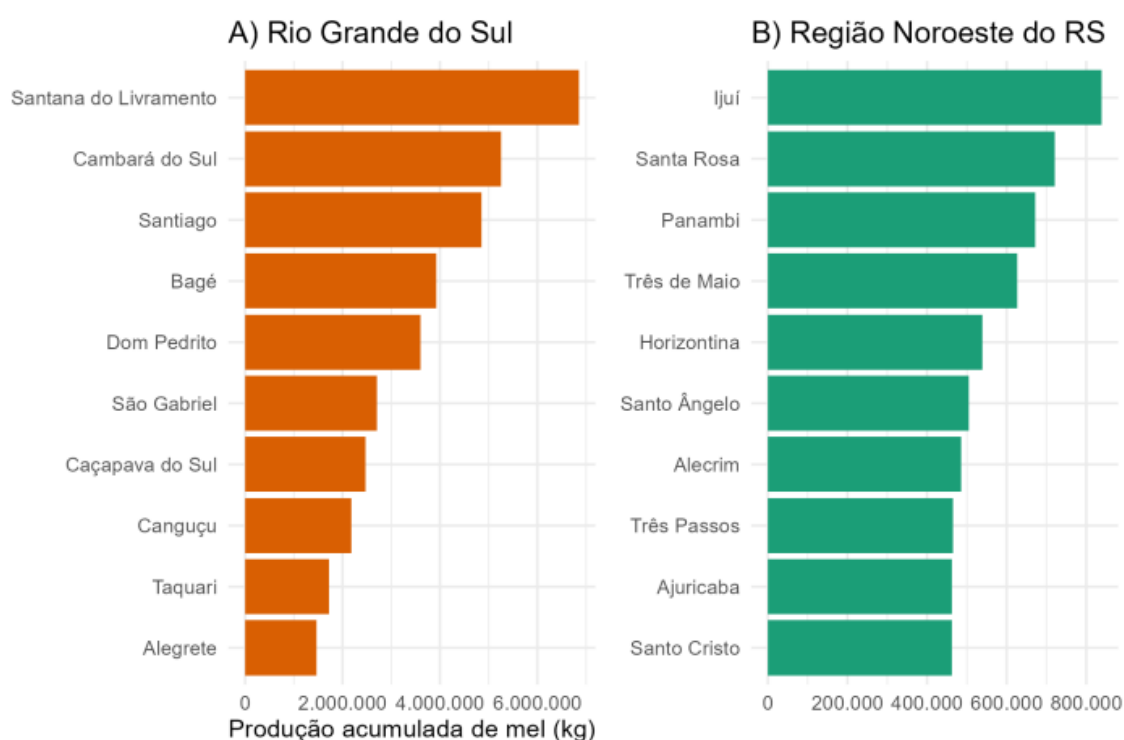
Fonte: Os autores (baseado em IBGE, 2026).

No plano territorial, a região Noroeste do RS apresenta forte presença de atividades agrícolas, com remanescentes de vegetação nativa associados aos biomas Pampa e Mata Atlântica (Wolff; Filippini-Alba, 2017). A apicultura ocorre predominantemente como atividade complementar em propriedades de pequena escala. Dados do Censo Agropecuário de 2017 registram 17.464 estabelecimentos com apicultura na região, totalizando 127.356 colmeias, com média de 7,29 colmeias por produtor e produtividade média de 5,39 kg por

colmeia (IBGE, 2017). Esse valor é inferior às estimativas usuais de produtividade estadual, entre 15 e 18 kg por colmeia ao ano (SEBRAE, 2011; Nichele, 2024).

A distribuição espacial da produção evidencia padrão de concentração municipal. No conjunto do Rio Grande do Sul, os dez municípios líderes responderam por aproximadamente 24,1% da produção acumulada entre 2004 e 2023 (Figura 3). No recorte do Noroeste, essa concentração é ainda mais acentuada: os dez principais municípios responderam por cerca de 29,2% da produção regional acumulada no período.

Figura 3. Principais municípios produtores de mel no Rio Grande do Sul e na região Noroeste (2004–2023).

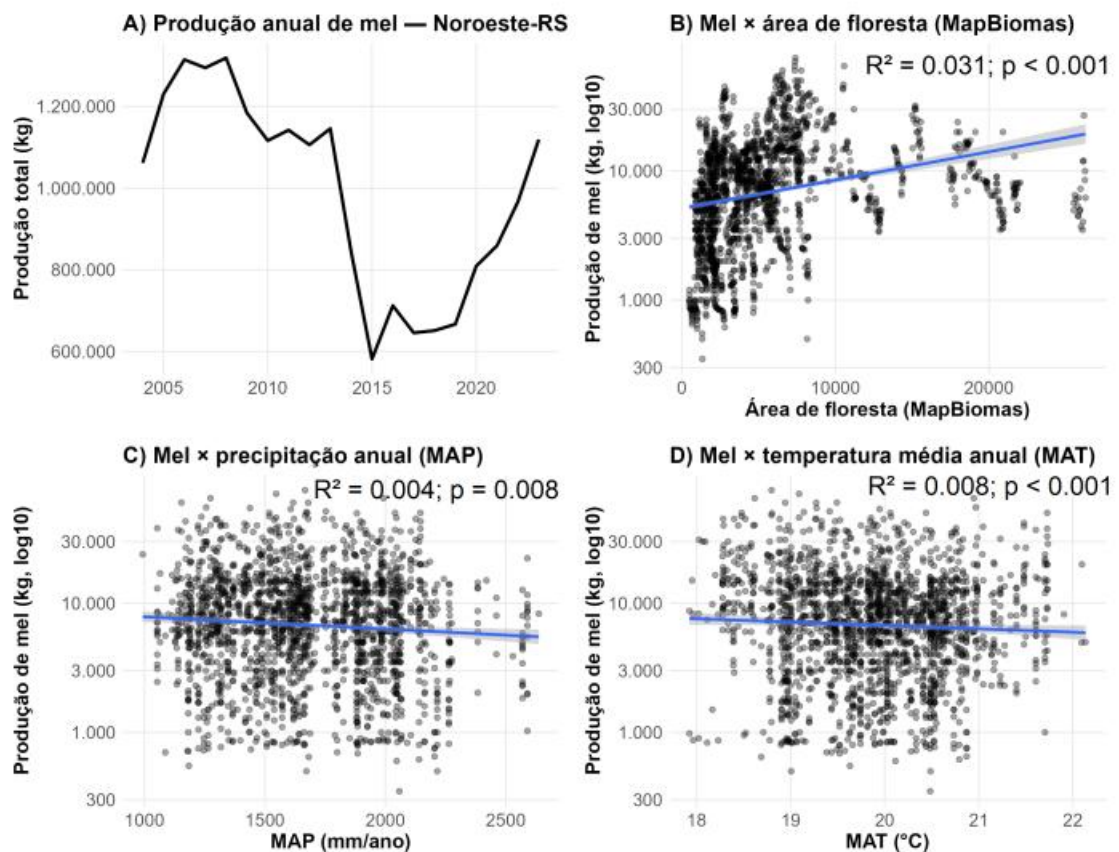


Fonte: Os autores (baseado em IBGE, 2026).

3.2 Variabilidade produtiva e extremos climáticos

A Figura 4 apresenta a relação entre produção municipal de mel, variáveis climáticas médias anuais (MAP e MAT) e área de floresta.

Figura 4. Relação entre produção de mel, variáveis climáticas médias (MAP e MAT) e área de floresta na região Noroeste do RS.



Fonte: Os autores (baseado em IBGE, 2026).

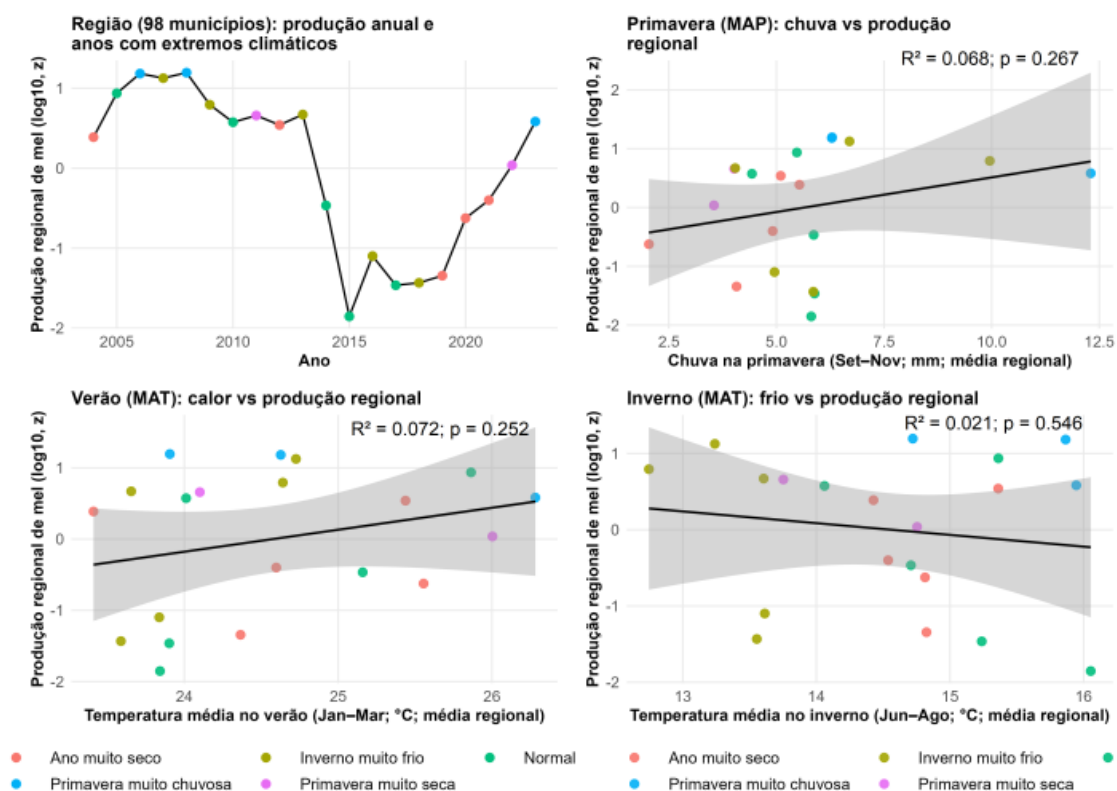
As regressões simples indicaram associações estatisticamente significativas, porém de baixo poder explicativo. A área de floresta apresentou associação positiva com a produção municipal ($R^2 = 0,031$; $p < 0,001$), enquanto a precipitação média anual apresentou associação negativa fraca e não significativa ($R^2 = 0,004$; $p = 0,008$). A temperatura média anual também apresentou associação estatisticamente significativa ($R^2 = 0,008$; $p < 0,001$).

Ao considerar explicitamente a sazonalidade climática, a análise regional evidenciou maior sensibilidade da produção a condições climáticas específicas ao longo do ano. A Figura 5 relaciona a produção regional padronizada aos índices sazonais de precipitação e temperatura.

Os modelos lineares mistos em escala município-ano corroboraram a relevância da variabilidade climática sazonal. No modelo contínuo, maior precipitação na primavera esteve associada ao aumento da produção municipal ($\beta = 0,063 \pm 0,011$; $p < 0,001$), assim como temperaturas mais elevadas no verão ($\beta = 0,059 \pm 0,011$; $p < 0,001$). Em contraste,

temperaturas mais elevadas no inverno apresentaram efeito negativo ($\beta = -0,080 \pm 0,011$; $p < 0,001$). O número de meses secos apresentou associação positiva de menor magnitude ($\beta = 0,032 \pm 0,011$; $p = 0,004$).

Figura 5. Relação entre produção regional de mel e extremos climáticos sazonais na região Noroeste do RS (2004–2023).



Fonte: Os autores (baseado em IBGE, 2026).

O modelo categórico baseado em extremos apresentou melhor ajuste (ΔAIC 10,2). Nesse modelo, primaveras muito chuvosas, verões muito quentes e invernos frios estiveram associados a maiores níveis de produção municipal. O padrão de ajuste manteve R^2 marginal baixo (0,013) e R^2 condicional elevado (0,786), indicando forte contribuição de diferenças estruturais entre municípios (Tabela 1).

Tabela 1. Modelos lineares mistos (LMM) associados às Figuras 3, 4 e 5 (2004–2023).

Modelo	Variável	B	SE	p
Clima sazonal	Precipitação primavera	0.063	0.011	<0.001
	Temperatura verão	0.059	0.011	<0.001
	Temperatura inverno	-0.080	0.011	<0.001
Extremos climáticos	Períodos secos regionais	0.032	0.011	0.004
	Primavera muito seca	-0.010	0.026	0.693
	Primavera muito úmida	0.211	0.025	<0.001
	Verão quente	0.118	0.026	<0.001
	Inverno frio	0.094	0.026	<0.001
Clima + vegetação	Ano muito seco	0.000	0.027	0.988
	Cobertura florestal (%)	-0.038	0.004	<0.001
	Temperatura média anual	-0.040	0.007	<0.001
	Precipitação média anual	-0.000	0.000	<0.001

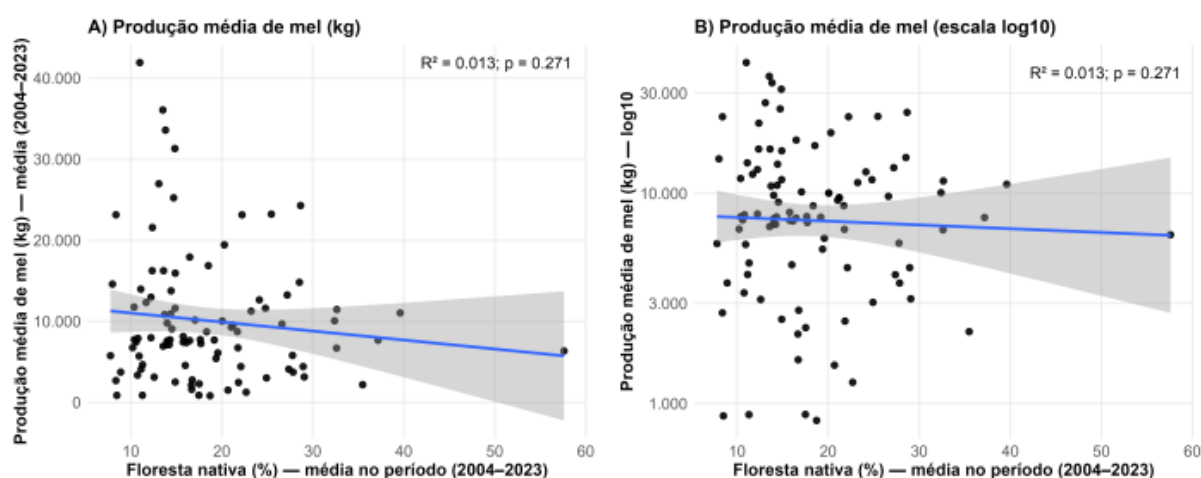
Nota: β = coeficiente estimado; SE = erro padrão; p = nível de significância. Variáveis climáticas contínuas padronizadas. Município incluído como efeito aleatório nos modelos lineares mistos (LMM).

3.3 Paisagem e produção municipal de mel

A relação entre cobertura de floresta nativa e produção média municipal de mel foi analisada para os 98 municípios da região Noroeste do Rio Grande do Sul no período de 2004 a 2023. A Figura 6 apresenta a associação entre a porcentagem média de floresta nativa municipal e a produção média de mel no período.

Figura 6. Relação entre cobertura média de floresta nativa (%) e produção média municipal de mel (2004–2023) no Noroeste do Rio Grande do Sul.

Municípios (N = 98): floresta nativa e produção média de mel



Fonte: Os autores (baseado em IBGE, 2025; MapBiomass, 2025).

A análise exploratória evidenciou alta dispersão dos dados e ausência de relação linear forte entre as variáveis. A regressão simples indicou associação estatisticamente não significativa entre cobertura florestal e produção média municipal ($R^2 = 0,013$; $p = 0,271$), tanto na escala linear quanto na representação logarítmica da produção.

Esses resultados indicam que a variação da produção municipal de mel não é explicada diretamente pela proporção de floresta nativa na escala municipal considerada. A elevada dispersão e a ausência de associação significativa sugerem que a cobertura florestal, isoladamente, não captura os fatores que condicionam a produção apícola. Essa interpretação é reforçada pelos resultados dos modelos ajustados (figura 4), nos quais a cobertura florestal apresentou associação significativa quando analisada em conjunto com variáveis climáticas e efeitos estruturais, indicando que seu papel está mais relacionado à organização territorial da atividade do que a um efeito ecológico direto sobre a produção de mel.

4. Discussão

4.1 Sazonalidade climática e dinâmica produtiva

A evolução temporal da produção de mel evidencia padrões distintos entre as escalas nacional e regional, com tendência de crescimento no Brasil e maior variabilidade interanual no Rio Grande do Sul (Figura 2). Isso sugere que, embora a apicultura brasileira tenha apresentado expansão recente, a produção regional permanece mais sensível a flutuações ambientais, indicando maior vulnerabilidade a condições climáticas variáveis.

Nesse contexto, análises baseadas exclusivamente em médias anuais de temperatura e precipitação apresentam capacidade limitada de explicar a variabilidade da produção de mel, apesar de associações estatisticamente significativas em alguns casos, como observado para a temperatura média anual ($R^2 = 0,008$; $p < 0,001$; Figura 4). Esse padrão indica que métricas agregadas capturam apenas parte da influência climática, não sendo suficientes para representar a complexidade dos processos que estruturam a atividade apícola. A produção de mel depende de processos fortemente sazonais, incluindo floração, disponibilidade hídrica, atividade de voo das abelhas e sincronização entre oferta floral e forrageamento (Zapata-Hernández et al., 2024; Neumann; Carreck, 2023). Nesse sentido, mudanças climáticas e extremos meteorológicos podem alterar significativamente o comportamento social, o sucesso

reprodutivo e a estabilidade das colônias, ampliando sua vulnerabilidade ecológica (Ostwald et al., 2024).

A primavera configura uma janela crítica para a reorganização trófica das colônias e para o estabelecimento da oferta floral regional. A associação positiva entre maior precipitação primaveril e produção municipal, evidenciada pelos coeficientes significativos dos modelos sazonais, sugere que a disponibilidade hídrica pode favorecer a intensidade da floração e a produção de néctar, influenciando a disponibilidade de recursos para as abelhas (Zapata-Hernández et al., 2024; Vincze et al., 2024). Contudo, episódios de excesso hídrico em períodos específicos podem gerar efeitos negativos, como restrição de voo e aumento da umidade nas colmeias, afetando o comportamento de forrageamento e a estabilidade das colônias (Neumann; Carreck, 2023; Ostwald et al., 2024).

No componente térmico, os resultados indicam que invernos relativamente mais quentes estiveram associados a menor produção, enquanto a classificação de “inverno frio” apresentou associação positiva. Esse padrão sugere que a resposta positiva observada em anos classificados como “invernos frios” pode estar associada a efeitos indiretos da temperatura sobre a fenologia da vegetação utilizada pelas abelhas. Na Metade Sul do Rio Grande do Sul, Wolff et al. (2009) identificaram forte sazonalidade na floração de espécies arbóreas de interesse apícola, com maior oferta de néctar e pólen entre a primavera e o verão e redução acentuada da disponibilidade de recursos durante o inverno. Alterações no regime térmico podem modificar a sincronização e a intensidade dessas floradas, afetando a disponibilidade de recursos alimentares para as colônias nas estações subsequentes. Assim, parte do efeito positivo associado aos invernos mais frios pode refletir mecanismos indiretos relacionados à dinâmica fenológica da vegetação e à oferta regional de recursos florais. Além disso, a análise temporal regional evidencia que anos com sobreposição de múltiplos estresses climáticos tendem a concentrar os maiores desvios negativos de produção, padrão coerente com a literatura sobre eventos climáticos compostos (IPCC, 2021).

A análise temporal regional evidencia que anos com sobreposição de múltiplos estresses climáticos tendem a concentrar os maiores desvios negativos de produção, padrão coerente com a literatura sobre eventos climáticos compostos (IPCC, 2021). Esse resultado indica que a variabilidade produtiva não é apenas função de condições médias, mas da ocorrência de eventos extremos em momentos ecologicamente sensíveis ao longo do ciclo

anual. Essa leitura é coerente com abordagens regionais, nas quais a identificação de extremos climáticos por séries temporais tem sido utilizada para compreender a variabilidade ambiental e subsidiar análises em territórios com lacunas de monitoramento climático (Santos & Quaresma et al., 2023). Esse comportamento também pode ser observado na relação entre produção e variáveis climáticas sazonais (Figura 5), na qual, apesar da elevada dispersão, observa-se tendência de associação positiva com precipitação primaveril e temperatura de verão, e negativa com temperaturas de inverno, reforçando a importância de janelas climáticas específicas no ciclo produtivo. Ressalta-se que o recorte do presente estudo compreende até o ano de 2023, que foi o último ano com informações reportadas e disponíveis. Dessa forma, o mesmo não contempla os efeitos das enchentes históricas que ocorreram no estado em 2024.

4.2 Estrutura territorial, heterogeneidade espacial e implicações para a resiliência da apicultura

A concentração da produção observada em um número reduzido de municípios sugere que fatores estruturais também desempenham papel relevante na organização espacial da apicultura regional. Embora as variáveis climáticas expliquem parte da variação observada, diferenças na produção podem estar associadas à trajetória histórica de desenvolvimento da atividade, à presença de organizações de produtores, à disponibilidade de assistência técnica, à estrutura fundiária predominante e ao grau de inserção dos apicultores em cadeias de comercialização. Estudos sobre a apicultura brasileira indicam que regiões com maior tradição produtiva e maior organização social tendem a apresentar maior estabilidade e capacidade de expansão da atividade, independentemente das condições ambientais locais (Moura, 2010; SEBRAE, 2022; Solera et al., 2025).

Nesse contexto, a heterogeneidade espacial identificada neste estudo provavelmente reflete a interação entre fatores ambientais e elementos estruturais da cadeia produtiva. A concentração da produção em determinados municípios pode estar associada não apenas à disponibilidade de recursos florais ou a condições climáticas favoráveis, mas também à presença de organizações de produtores, assistência técnica, infraestrutura de beneficiamento e comercialização, além do acúmulo histórico de conhecimento associado à atividade apícola. Estudos realizados no Rio Grande do Sul indicam que a estrutura fundiária, a organização coletiva dos apicultores e a inserção em arranjos produtivos locais influenciam diretamente a

capacidade de expansão e qualificação da produção de mel, contribuindo para diferenças regionais no desempenho da atividade (Wolff et al., 2017). Assim, parte da variabilidade espacial observada pode refletir diferenças na estrutura socioeconômica e organizacional dos territórios, além dos fatores ambientais analisados neste estudo.

Isso amplifica a vulnerabilidade sistêmica, uma vez que eventos climáticos extremos que afetem esses núcleos podem gerar impactos desproporcionais na escala regional, especialmente em cenários de eventos climáticos compostos, nos quais múltiplos estresses ambientais se combinam no tempo e no espaço (Zscheischler et al., 2020). Além disso, indica que a distribuição da atividade depende não apenas de condições ambientais, mas também da organização produtiva e da inserção em cadeias de valor.

As diferenças na distribuição espacial da produção também podem estar associadas à heterogeneidade espacial provavelmente decorre da combinação de clima + fatores socioeconômicos e organizacionais não medidos. No caso do Rio Grande do Sul, o contraste entre áreas associadas ao bioma Pampa e regiões sob maior influência da Mata Atlântica e de sistemas agropecuários pode contribuir para padrões distintos de organização e desempenho da apicultura, ainda que tais relações não tenham sido diretamente modeladas neste estudo.

A alta dispersão e ausência de tendência linear forte entre cobertura florestal e produção média municipal (Figura 6), reforça a limitação de métricas simplificadas de paisagem. Uma hipótese complementar é que a cobertura florestal esteja refletindo características estruturais dos territórios rurais e não apenas a disponibilidade direta de recursos florais. Em diversas regiões do sul do Brasil, a apicultura encontra-se fortemente associada à agricultura familiar e a sistemas produtivos mais diversificados, frequentemente caracterizados pela presença de remanescentes florestais, áreas de preservação e mosaicos de uso da terra (Wolff et al., 2017). Nesse contexto, a associação observada entre cobertura florestal e produção pode representar, ao menos parcialmente, um efeito indireto da estrutura fundiária, da organização produtiva local e da maior inserção da apicultura em propriedades de menor escala. Como essas variáveis não foram incorporadas aos modelos, sua contribuição potencial permanece como uma hipótese a ser investigada em estudos futuros.

Pois, a proporção de vegetação nativa constitui um indicador simplificado da paisagem, que não captura adequadamente a diversidade de recursos florais, a heterogeneidade espacial nem a conectividade entre áreas de forrageamento. Em sistemas

apícolas, a disponibilidade de recursos depende mais da composição e da distribuição temporal da oferta floral do que da quantidade total de vegetação nativa, sendo influenciada por interações entre uso da terra e dinâmica climática (Dicks et al., 2021).

Os resultados também indicam que a produção responde de forma desproporcional a períodos específicos do ciclo anual, evidenciando a existência de janelas ecológicas críticas que condicionam o desempenho produtivo. Primavera, verão e inverno configuram períodos-chave nos quais variações climáticas produzem efeitos acumulativos ao longo do ciclo produtivo, reforçando que a variabilidade emerge da interação entre clima e território em momentos ecologicamente sensíveis. Evidências recentes indicam que variações climáticas de curto prazo podem influenciar diretamente a produção de mel, afetando tanto a disponibilidade de recursos quanto o comportamento das colônias (Vincze et al., 2024).

No plano territorial, a variabilidade interanual associada a extremos climáticos representa um fator de risco para a estabilidade da cadeia produtiva, especialmente em contextos de crescente integração a mercados mais exigentes. Esse risco se insere em um cenário mais amplo de mudanças globais que afetam serviços ecossistêmicos de polinização e sistemas produtivos dependentes desses serviços (Klein et al., 2023). Nesse contexto, a resiliência da apicultura regional dependerá da incorporação do risco climático à organização da produção, por meio de estratégias como diversificação espacial, fortalecimento da organização coletiva e uso de informações climáticas no planejamento produtivo.

4.3 Paisagem, território e dinâmica da produção apícola

Além do clima, a estrutura territorial e a paisagem influenciam a estabilidade da produção apícola ao modular a oferta contínua de recursos florais e a conectividade ecológica (Kennedy et al., 2013). No entanto, a relação entre cobertura de vegetação nativa e produção de mel não é direta. A análise exploratória indicou alta dispersão e ausência de padrão linear forte entre a porcentagem de floresta nativa e a produção média municipal (Figura 6). No modelo que integrou cobertura florestal e clima anual, a proporção de floresta apresentou associação negativa com a produção ($\beta = -0,038$; $p < 0,001$). Esse resultado deve ser interpretado como uma associação estrutural territorial, possivelmente refletindo diferenças na intensidade produtiva, organização dos apiários e infraestrutura regional.

Do ponto de vista ecológico, a apicultura está diretamente relacionada aos serviços ecossistêmicos de polinização, fundamentais para a produtividade agrícola e para a manutenção da biodiversidade (Ferenczi; Szűcs; Gáthy, 2023). Extremos climáticos que reduzem a oferta floral ou comprometem a saúde das colônias podem afetar simultaneamente a produção de mel e a estabilidade das interações planta–polinizador (Gebremedhn et al. 2024; Rahimi; Jung, 2024).

Além da dimensão ecológica, a apicultura regional insere-se em uma cadeia econômica orientada à exportação, sujeita a exigências crescentes de regularidade produtiva, qualidade e rastreabilidade (Trevisol et al. 2022; ONU, 2021). A instalação recente de infraestrutura de beneficiamento e exportação na região, com destaque para o município de Porto Mauá (RS), introduz novas dinâmicas territoriais e amplia a relevância estratégica da estabilidade produtiva. No entanto, para que esse potencial se traduza em benefícios duradouros, será essencial integrar adaptação climática ao planejamento produtivo, ampliar a assistência técnica, fortalecer a organização coletiva e incorporar estratégias de manejo e diversificação floral que reduzam a exposição a extremos sazonais.

O aumento das exigências de qualidade, regularidade e padronização tende, contudo, a tensionar sistemas baseados em pequena escala, especialmente quando não acompanhado por suporte técnico e organizacional adequado (Trevisol et al. 2022). Em um cenário de intensificação de extremos climáticos, a resiliência da cadeia dependerá da capacidade de integrar manejo adaptativo, diversificação floral, monitoramento climático e governança produtiva. Assim, a sustentabilidade futura da apicultura regional dependerá menos de ganhos pontuais e mais da incorporação explícita do risco climático na gestão territorial e na estruturação da cadeia de valor.

Do ponto de vista do manejo apícola, o monitoramento de condições climáticas sazonais pode auxiliar na antecipação de anos com maior risco produtivo, permitindo planejamento mais adequado da localização de apiários, manejo das colônias e estratégias de suplementação alimentar. Nesse contexto, a compreensão da variabilidade produtiva exige não apenas a análise de fatores climáticos e ecológicos, mas também a consideração explícita da estrutura territorial que condiciona a distribuição e a resposta da atividade no espaço.

Por fim, a ausência de dados detalhados sobre o número de colmeias em escala municipal no presente estudo limita a interpretação da produção como indicador direto de

produtividade apícola. Como a produção total resulta da interação entre desempenho por colmeia e tamanho do plantel, parte da variabilidade observada pode refletir diferenças no esforço produtivo entre municípios, e não apenas efeitos ambientais ou climáticos. Assim, como etapa suplementar ao presente estudo, sugere-se a busca e inserção dos dados de número de colmeias por município, e ações de manejo, que impliquem numa realidade mais aproximada dos fatores aqui estudados na produtividade de mel.

5. Conclusões

- Este estudo demonstrou que a variabilidade interanual da produção de mel no Noroeste do Rio Grande do Sul é mais bem explicada por condições climáticas sazonais, especialmente por anos caracterizados por extremos, enquanto variáveis climáticas médias anuais apresentam baixo poder explicativo, apesar de associações estatisticamente significativas.
- Os modelos lineares mistos indicaram associações robustas entre produção municipal e índices climáticos sazonais: maior precipitação na primavera e temperaturas mais elevadas no verão estiveram associadas ao aumento da produção, enquanto temperaturas mais elevadas no inverno estiveram associadas à sua redução. A análise de extremos revelou que primaveras muito chuvosas, verões muito quentes e invernos frios favoreceram maiores níveis produtivos, enquanto condições como primavera muito seca e ano muito seco não apresentaram efeito significativo.
- A análise temporal também evidenciou que anos marcados por combinações de estresses climáticos tendem a concentrar os maiores desvios negativos de produção, indicando vulnerabilidade sistêmica quando extremos ocorrem de forma sequencial ou simultânea. Esses resultados indicam que a resposta da apicultura aos extremos depende de limiares e do contexto anual, sendo fortemente influenciada pelo *timing* dos eventos e sua interação com a dinâmica de floração e manejo.
- Para além da dimensão produtiva, a instabilidade observada possui implicações para os serviços ecossistêmicos de polinização. Embora a produção de mel seja um *proxy* imperfeito desse serviço, oscilações recorrentes sugerem pressões sobre a estabilidade das interações planta–polinizador, especialmente em paisagens agrícolas. A concentração espacial da produção em poucos municípios intensifica essa

vulnerabilidade, uma vez que choques climáticos em polos produtivos podem gerar impactos desproporcionais na escala regional.

- Diante da intensificação de extremos climáticos no sul do Brasil, compreender a resposta da apicultura à variabilidade sazonal torna-se fundamental para orientar estratégias de adaptação e fortalecer a estabilidade da cadeia produtiva. Nesse contexto, a sustentabilidade da atividade dependerá menos do aumento da produção média e mais da capacidade de aumentar sua resiliência, por meio da incorporação do risco climático ao planejamento produtivo. Monitoramento climático aplicado, manejo adaptativo, diversificação funcional das paisagens e fortalecimento da governança da cadeia emergem como eixos centrais para reduzir vulnerabilidades e estabilizar a produção em cenários de crescente variabilidade climática.

6. Referências

- Behenck, M. F., Nejar, F. F., Belisário, D. L., Barreto, L. M. R. C., & Scalia, M. A. L. (2024). Quality and labeling of honey sold at markets in the Northern Coast of Rio Grande do Sul. *Research, Society and Development*, 13(10), e74131047094. <https://doi.org/10.33448/rsd-v13i10.47094>
- Dainese, M., Martin, E. A., Aizen, M. A., Albrecht, M., Bartomeus, I., Bommarco, R., Carvalheiro, L. G., Chaplin-Kramer, R., Gagic, V., Garibaldi, L. A., Ghazoul, J., Grab, H., Jonsson, M., Karp, D. S., Kennedy, C. M., Kleijn, D., Kremen, C., Landis, D. A., Letourneau, D. K., Marini, L., Poveda, K., Rader, R., Smith, H. G., Tscharntke, T., Andersson, G. K. S., Badenhauer, I., Baensch, S., Bezerra, A. D. M., Bianchi, F. J. J. A., Boreux, V., Bretagnolle, V., Caballero-López, B., Cavigliasso, P., Četković, A., Chacoff, N. P., Classen, A., Cusser, S., da Silva e Silva, F. D., de Groot, G. A., Dudenhöffer, J. H., Ekroos, J., Fijen, T., Franck, P., Freitas, B. M., Garratt, M. P. D., Gratton, C., Hipólito, J., Holzschuh, A., Hunt, L., Iverson, A. L., Jha, S., Keasar, T., Kim, T. N., Kishinevsky, M., Klatt, B. K., Klein, A.-M., Krewenka, K. M., Krishnan, S., Larsen, A. E., Lavigne, C., Liere, H., Maas, B., Mallinger, R. E., Martinez Pachon, E., Martínez-Salinas, A., Meehan, T. D., Mitchell, M. G. E., Molina, G. A. R., Nesper, M., Nilsson, L., O'Rourke, M. E., Peters, M. K., Plečáš, M., Potts, S. G., Ramos, D. de L., Rosenheim, J. A., Rundlöf, M., Rusch, A., Sáez, A., Scheper, J., Schleuning, M., Schmack, J. M., Sciligo, A. R., Seymour,

- C., Stanley, D. A., Stewart, R., Stout, J. C., Sutter, L., Takada, M. B., Taki, H., Tamburini, G., Tschumi, M., Viana, B. F., Westphal, C., Willcox, B. K., Wratten, S. D., Yoshioka, A., Zaragoza-Trello, C., Zhang, W., Zou, Y., & Steffan-Dewenter, I. (2019). A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Science Advances*, 5(10), eaax0121. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0121>
- Dicks, L. V., Breeze, T. D., Ngo, H. T., Senapathi, D., An, J., Aizen, M. A., Basu, P., Dicks, D., Galetto, L., Garibaldi, L. A., Gemmill-Herren, B., Howlett, B. G., Imperatriz-Fonseca, V. L., Johnson, S. D., Kovács-Hostyánszki, A., Kwon, Y. J., Lattoff, H. M. G., Lungharwo, T., Seymour, C. L., Vanbergen, A. J., & Potts, S. G. (2021). A global-scale expert assessment of drivers and risks associated with pollinator decline. *Nature Ecology & Evolution*, 5, 1453–1461. <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01534-9>
- Garibaldi, L. A., Steffan-Dewenter, I., Winfree, R., Aizen, M. A., Bommarco, R., Cunningham, S. A., Kremen, C., Carvalheiro, L. G., Harder, L. D., Afik, O., Bartomeus, I., Benjamin, F., Boreux, V., Cariveau, D., Chacoff, N. P., Dudenhöffer, J. H., Freitas, B. M., Ghazoul, J., Greenleaf, S., Hipólito, J., Holzschuh, A., Howlett, B., Isaacs, R., Javorek, S. K., Kennedy, C. M., Krewenka, K. M., Krishnan, S., Mandelik, Y., Mayfield, M. M., Motzke, I., Munyuli, T., Nault, B. A., Otieno, M., Petersen, J., Pisanty, G., Potts, S. G., Rader, R., Ricketts, T. H., Rundlöf, M., Seymour, C. L., Schüepp, C., Szentgyörgyi, H., Taki, H., Tscharntke, T., Vergara, C. H., Viana, B. F., Wanger, T. C., Westphal, C., Williams, N., & Klein, A. M. (2013). Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey bee abundance. *Science*, 339(6127), 1608–1611. <https://doi.org/10.1126/science.1230200>
- Gebremedhn, H., Gebrewahid, Y., Haile, G. G., Gebreslasie, M., Gebreyohannes, T., & Abrha, B. (2024). Projecting the impact of climate change on honey bee plant habitat distribution in Northern Ethiopia. *Scientific Reports*, 14, 15866. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66949-3>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2017). *Censo agropecuário 2017*. IBGE. <https://www.ibge.gov.br/>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2025). *Produção de mel de abelha*. IBGE. <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/mel-de-abelha/rs>

- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Kennedy, C. M., Lonsdorf, E., Neel, M. C., Williams, N. M., Ricketts, T. H., Winfree, R., Bommarco, R., Brittain, C., Burley, A. L., Cariveau, D., Carvalheiro, L. G., Chacoff, N. P., Cunningham, S. A., Danforth, B. N., Dudenhöffer, J. H., Elle, E., Gaines, H. R., Garibaldi, L. A., Gratton, C., Holzschuh, A., Isaacs, R., Javorek, S. K., Jha, S., Klein, A.-M., Krewenka, K., Mandelik, Y., Mayfield, M. M., Morandin, L., Neame, L. A., Otieno, M., Park, M., Potts, S. G., Rundlöf, M., Steffan-Dewenter, I., Taki, H., Viana, B. F., Westphal, C., Wilson, J. K., Greenleaf, S. S., & Kremen, C. (2013). A global quantitative synthesis of local and landscape effects on wild bee pollinators in agroecosystems. *Ecology Letters*, 16(5), 584–599. <https://doi.org/10.1111/ele.12082>
- Klein, A. M., Boreux, V., Fornoff, F., Mupepele, A. C., & Pufal, G. (2023). Relevance of wild and managed bees for human well-being. *Current Opinion in Insect Science*, 56, 101047. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2018.02.011>
- MapBiomass. (2023). *Projeto MapBiomass: coleção de mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil*. <https://mapbiomas.org>
- Moura, S. G. de. (2010). *Boas práticas apícolas e a qualidade do mel das abelhas Apis mellifera Linnaeus, 1758*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Piauí.
- NASA POWER Project. (2024). *NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) Data Access Viewer*. NASA Langley Research Center. <https://power.larc.nasa.gov>
- Neumann, P., & Carreck, N. L. (2023). Beekeeping under climate change. *International Journal of Biometeorology*, 67, 1–11. <https://doi.org/10.1080/00218839.2023.2247115>
- Nichele, F. (2024). *Apicultura em transformação: Superando os impactos no Rio Grande do Sul*. SEBRAE-RS. <https://digital.sebraers.com.br/blog/mercado/apicultura-em-transformacao-superando-os-impactos-no-rio-grande-do-sul/>
- Organização das Nações Unidas. (2021). *Estudo de viabilidade da cadeia de valor do mel de abelha*. ONU Brasil. <https://brasil.un.org/sites/default/files/2021-12/Estudo-de-viabilidade-da-cadeia-de-valor-de-mel-de-abelha.pdf>
- Ostwald, M. M., da Silva, C. R. B., Seltsmann, K. C. (2024). How does climate change impact social bees and bee sociality? *Journal of Animal Ecology*, 93(11), 1610–1621. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.14160>

- Potts, S. G., Imperatriz-Fonseca, V., Ngo, H. T., Aizen, M. A., Biesmeijer, J. C., Breeze, T. D., & Viana, B. F. (2016). Safeguarding pollinators and their values to human well-being. *Nature*, 540, 220–229. <https://doi.org/10.1038/nature20588>
- R Core Team. (2022). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Rahimi, E., & Jung, C. (2024). Global trends in climate suitability of bees: Ups and downs in a warming world. *Insects*, 15(2), 127. <https://doi.org/10.3390/insects15020127>
- Santos Quaresma, M. de N., Nunes da Silva, C., Brito da Cruz, M. L., & da Silva Santos, M. R. (2023). Análise climática e a identificação de extremos de precipitação na Ilha do Marajó/Pará. *Geoambiente On-line*, (47).
- Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. (2022). *Exportação de mel e acesso a mercados: Panorama do mercado de mel*. SEBRAE. <https://polosebraeagro.sebrae.com.br/>
- Trevisol, G., Bueno, M. P., Oliveira, J. P. L., & Macedo, K. G. (2022). Panorama econômico da produção e exportação de mel de abelha produzidos no Brasil. *Revista de Gestão e Secretariado*, 13(3), 352–368. <https://doi.org/10.7769/gesec.v13i3.1321>
- Vincze, C., Leelőssy, Á., Zajác, E., & Mészáros, R. (2025). A review of short-term weather impacts on honey production. *International Journal of Biometeorology*, 69, 303–317. <https://doi.org/10.1007/s00484-024-02824-0>
- Wolff, L. F., Gomes, G. C., & Rodrigues, V. F. (2009). Fenologia da vegetação arbórea nativa visando a apicultura sustentável para a agricultura familiar da Metade Sul do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agroecologia*, 4(2), 554–558.
- Wolff, L. F., Aquini, D. M., Maciel, R. C., Sattler, A., Ferreira, N. R., & Saalfeld, M. H. (2017). Diagnóstico sobre a base da cadeia produtiva do mel na região Sul do Rio Grande do Sul (*Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, 276). Embrapa Clima Temperado.
- Wolff, L. F., & Filippini-Alba, J. M. (2017). *Zoneamento agroecológico florístico para a apicultura e meliponicultura no Bioma Mata Atlântica/RS*. Embrapa. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1085190/1/Doc452ZoneamAgroecFloristBiomaMataAltantRsWolffFilippini2017.pdf>
- Zapata-Hernández, G., Gajardo-Rojas, M., Calderón-Seguel, M., Muñoz, A. A., Yáñez, K. P., Requier, F., & Arrieta, H. (2024). Advances and knowledge gaps on climate change

impacts on honey bees and beekeeping: A systematic review. *Global Change Biology*, 30, e17219. <https://doi.org/10.1111/gcb.17219>

Ferenczi, A. F., Szűcs, I., & Gáthy, A. B. (2023). Evaluation of the pollination ecosystem service of the honey bee (*Apis mellifera*) based on a beekeeping model in Hungary. *Sustainability*, 15(13), 9906. <https://doi.org/10.3390/su15139906>

Zscheischler, J., Westra, S., van den Hurk, B. J. J. M., Seneviratne, S. I., Ward, P. J., Pitman, A., & Zhang, X. (2020). Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*, 10(7), 666–673. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3>

Publisher: Universidade Federal de Jataí. Instituto de Geografia. Programa de Pós-graduação em Geografia. Publicação no Portal de Periódicos UFJ. As ideias expressadas neste artigo são de responsabilidade de suas autoras, não representando, necessariamente, a opinião dos editores ou da universidade.

Contribuições dos autores: Todos os autores contribuíram de forma semelhante para a construção do manuscrito.

Financiamento: Esta pesquisa é resultado de um Trabalho de Conclusão de Curso do Bacharelado em Agronomia da Universidade Norte do Paraná (UNOPAR). O estudo foi realizado sem financiamento.

Conflito de interesse: Os autores declaram que não possuem interesses financeiros ou não financeiros relevantes relacionados a este trabalho. Portanto, sem conflitos de interesses.

Declaração de uso de IA: Os autores utilizaram o ChatGPT-5.2 (Open AI) para auxiliar na melhoria da clareza da linguagem, refinamento linguístico e correção gramatical. O conteúdo foi revisado e editado pelos autores para garantir precisão e adequação.