



ANAIS

MUDANÇA CLIMÁTICA, RESILIÊNCIA DO SISTEMA ALIMENTAR E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: EVIDÊNCIAS DOS PAÍSES DO MERCOSUL

PABLO MURTA BAIÃO ALBINO

pablo.albino@ufv.br

UFV - UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

RESUMO: A relação entre mudanças climáticas, transição energética e segurança alimentar constitui tema estratégico para a gestão do agronegócio, especialmente em regiões marcadas pela relevância econômica da produção agropecuária e pela exposição crescente a riscos climáticos. Este estudo tem como objetivo analisar a associação entre transição climática e resiliência dos sistemas alimentares em cinco países do MERCOSUL: Argentina, Brasil, Paraguai, Uruguai e Bolívia, no período de 2001 a 2021. Para isso, foram construídos dois índices sintéticos: o Índice de Transição Climática (ITC), composto por emissões de CO₂ per capita, participação de energias renováveis e intensidade energética; e o Índice de Resiliência e Segurança Alimentar (IRSA), formado por indicadores de produção de alimentos, subnutrição, rendimento de cereais, PIB per capita e participação da agropecuária no PIB. Os índices foram estimados por Análise de Componentes Principais e avaliados por modelos de dados em painel com efeitos fixos. Os resultados indicam associação positiva e estatisticamente significativa entre o ITC defasado em três anos e o IRSA, sugerindo que avanços na transição climática podem se relacionar a ganhos de resiliência alimentar no médio prazo. Urbanização e controle da corrupção apresentaram associação positiva com a resiliência, enquanto a abertura comercial apresentou sinal negativo. Conclui-se que políticas climáticas, agrícolas, energéticas e alimentares devem ser coordenadas para fortalecer a sustentabilidade e a segurança alimentar no MERCOSUL.

PALAVRAS CHAVE: Transição climática; Segurança alimentar; Sistemas alimentares; MERCOSUL; Gestão do agronegócio.

ABSTRACT: The relationship between climate change, energy transition, and food security is a strategic issue for agribusiness management, especially in regions where agricultural production plays a major economic role and exposure to climate risks is increasing. This study aims to analyze the association between climate transition and food system resilience in five MERCOSUR countries: Argentina, Brazil, Paraguay, Uruguay, and Bolivia, from 2001 to 2021. To this end, two synthetic indices were constructed: the Climate Transition Index (CTI), composed of CO₂ emissions per capita, the share of renewable energy, and energy intensity; and the Food Resilience and Security Index (FRSI), composed of food production, undernourishment, cereal yield, GDP per capita, and the share of agriculture in GDP. The indices were estimated using Principal Component Analysis and assessed through panel data models with fixed effects. The results indicate a positive and statistically significant association between the three-year lagged CTI and the FRSI, suggesting that progress in climate transition may be related to gains in food resilience in the medium term. Urbanization and control of corruption were positively associated with resilience, while trade openness showed a negative sign. The study concludes that climate, agricultural, energy, and food policies should be coordinated to strengthen sustainability and food security in MERCOSUR.

KEY WORDS: Climate transition; Food security; Food systems; MERCOSUR; Agribusiness management.

1. INTRODUÇÃO

A interseção entre mudanças climáticas e segurança alimentar constitui um dos desafios centrais do desenvolvimento sustentável. O aumento da temperatura média, a intensificação de eventos extremos e as alterações nos regimes de precipitação afetam a produtividade agrícola, a disponibilidade de alimentos, a estabilidade das cadeias de abastecimento e o acesso econômico das populações. Paralelamente, os sistemas alimentares respondem por parcela relevante das emissões antrópicas de gases de efeito estufa, configurando uma relação de retroalimentação entre produção de alimentos e mudança climática (Campbell et al., 2018; Costa Jr. et al., 2022).

A transição climática, compreendida como o processo de descarbonização das economias, expansão das fontes renováveis e redução da intensidade energética, pode contribuir para diminuir a exposição dos sistemas alimentares aos riscos climáticos. Entretanto, seus efeitos não são automáticos. A transformação requer inovação tecnológica, coordenação institucional e capacidade de conciliar mitigação, produção agrícola e meios de subsistência. A implementação fragmentada de políticas pode produzir compensações indesejadas entre objetivos climáticos e alimentares (Dinesh et al., 2021; Zurek, Hebinck e Selomane, 2022).

Essa discussão é especialmente relevante para o Mercado Comum do Sul (MERCOSUL), bloco caracterizado pela importância econômica do agronegócio, pela presença de ecossistemas estratégicos e por expressiva heterogeneidade nas matrizes energéticas, estruturas produtivas e capacidades institucionais. Argentina, Brasil, Paraguai, Uruguai e Bolívia apresentam elevada participação na produção e no comércio internacional de commodities agropecuárias, ao mesmo tempo em que enfrentam vulnerabilidades climáticas e pressões para adotar padrões ambientais mais rigorosos.

Embora a literatura reconheça os vínculos entre clima e alimentação, são escassas as análises que integram indicadores de transição climática e resiliência alimentar em um quadro quantitativo unificado para o MERCOSUL. O presente estudo busca contribuir para essa lacuna ao construir dois índices sintéticos e testar sua associação em dados de painel. A hipótese é que melhorias na transição climática estão associadas ao fortalecimento da resiliência e da segurança alimentar, mas com defasagem temporal. O objetivo foi analisar essa relação nos cinco países do bloco entre 2001 e 2021, controlando urbanização, abertura comercial, crescimento econômico e governança.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Transição climática e descarbonização

A transição climática envolve transformações estruturais em tecnologias, infraestruturas, políticas, instituições e práticas sociais. Tais mudanças não seguem trajetórias lineares ou homogêneas, pois dependem da dotação de recursos, do desenvolvimento econômico, das escolhas tecnológicas e dos arranjos institucionais de cada país. A literatura sobre transições para a sustentabilidade enfatiza que inovação e aprendizagem institucional precisam estar articuladas a mudanças nos sistemas de produção e consumo (Dinesh et al., 2021).

Nos sistemas alimentares, a descarbonização pode ocorrer por meio da expansão de energias renováveis, eficiência energética, redução do desmatamento, manejo sustentável da terra e adoção de tecnologias de baixo carbono. Costa Jr. et al. (2022) destacam que o alcance de emissões líquidas zero exige mudanças coordenadas ao longo das cadeias produtivas. Para os países do MERCOSUL, medidas baseadas no uso da terra apresentam elevado potencial, mas sua viabilidade depende de condições biofísicas, econômicas e institucionais e da conciliação entre conservação e produção de alimentos (Roe et al., 2021).

2.2. Resiliência dos sistemas alimentares

A segurança alimentar descreve resultados relacionados à disponibilidade, ao acesso, à utilização e à estabilidade dos alimentos. A resiliência, por sua vez, refere-se à capacidade do sistema de antecipar, absorver, adaptar-se e recuperar-se de choques sem perder suas funções essenciais.

Sistemas resilientes tendem a combinar diversificação produtiva e comercial, infraestrutura de transporte e armazenamento, governança eficaz, reservas estratégicas e capacidade flexível de resposta (Davis, Downs e Gephart, 2020).

Os riscos climáticos afetam não apenas a produção, mas também preços, renda rural, logística, comércio e acesso aos alimentos. Muluneh (2021) destaca que mudanças climáticas, biodiversidade e segurança alimentar estão conectadas por múltiplos canais. Tchoukouang, Onyeaka e Nkoutchou (2024) mostram que a vulnerabilidade das cadeias alimentares aumenta quando choques climáticos incidem sobre estruturas pouco diversificadas e dependentes de elos críticos. Nesse contexto, fortalecer a resiliência requer políticas que integrem adaptação, mitigação, proteção social e desenvolvimento institucional.

2.3. Complementaridade entre clima, alimentação e governança

A transição climática pode fortalecer a resiliência alimentar por três mecanismos. Primeiro, a expansão de energias renováveis e a eficiência no uso de recursos podem reduzir a exposição à volatilidade dos combustíveis fósseis e dos insumos. Segundo, inovação e gestão sustentável de solo, água e energia podem elevar a capacidade adaptativa. Terceiro, políticas climáticas demandam coordenação, transparência e qualidade regulatória, capacidades que também favorecem políticas de segurança alimentar. Assim, clima e alimentação podem constituir objetivos complementares, desde que apoiados por governança efetiva e planejamento de médio prazo (Zurek, Hebinck e Selomane, 2022).

Ao mesmo tempo, a inserção internacional pode produzir efeitos ambíguos. O comércio amplia mercados e pode estabilizar a oferta, mas a especialização em commodities pode reduzir a diversidade produtiva e aumentar a exposição a preços e choques externos. A transição verde promovida por parceiros comerciais também pode alterar padrões de investimento e acesso a mercados nos países exportadores do MERCOSUL (Vela Almeida et al., 2023). A direção líquida dessas relações, portanto, constitui questão empírica.

3. METODOLOGIA

3.1. Dados e construção dos índices

A amostra compreendeu Argentina, Brasil, Paraguai, Uruguai e Bolívia no período de 2001 a 2021, totalizando 105 observações potenciais. A Venezuela foi excluída em razão de sua suspensão do bloco e de limitações de disponibilidade de dados. As informações foram obtidas no World Development Indicators, Worldwide Governance Indicators e Our World in Data.

Foram construídos o Índice de Transição Climática (ITC) e o Índice de Resiliência e Segurança Alimentar (IRSA). O ITC incluiu emissões de CO₂ per capita, participação de energias renováveis e intensidade energética. O IRSA reuniu índice de produção de alimentos, prevalência de subnutrição, rendimento de cereais, PIB per capita e participação da agropecuária no PIB. As variáveis foram normalizadas pelo método Min-Max no intervalo de zero a um. Nos indicadores de sentido negativo, aplicou-se a transformação complementar, garantindo que valores elevados representassem melhor desempenho.

A ponderação foi obtida por Análise de Componentes Principais (ACP), técnica adequada à síntese de construtos multidimensionais (Chaudhary, Gustafson e Mathys, 2018). No ITC, o primeiro componente explicou 57,6% da variância, com cargas de 0,693 para emissões de CO₂ per capita, 0,692 para energia renovável e 0,201 para intensidade energética. No IRSA, o componente explicou 62,9%, com cargas de 0,376 para produção de alimentos, 0,444 para subnutrição, 0,512 para rendimento de cereais, 0,490 para PIB per capita e 0,399 para participação agropecuária. Os índices foram reescalados de zero a cem.

3.2. Modelo econométrico

A associação entre ITC e IRSA foi estimada por regressão com dados em painel. O teste de Hausman rejeitou a consistência do estimador de efeitos aleatórios ($\chi^2 = 18,47$; $p = 0,002$), justificando o uso de efeitos fixos de país. O modelo controlou urbanização, abertura comercial, crescimento do PIB e controle da corrupção. Para captar a dinâmica temporal, foram estimadas versões com ITC contemporâneo e defasado em um, três e cinco anos, utilizando erros-padrão robustos à heterocedasticidade.

A robustez foi examinada por pooled OLS, efeitos aleatórios, efeitos fixos de país e tempo, primeiras diferenças, diferentes conjuntos de controles, exclusão sequencial dos países e cinco composições alternativas do IRSA. Essas estratégias reduzem vieses por heterogeneidade invariante e avaliam a estabilidade dos resultados, mas não eliminam integralmente a endogeneidade; por isso, os coeficientes são interpretados como associações, e não como efeitos causais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Trajetórias dos índices

Entre 2001 e 2021, o ITC apresentou trajetória de declínio em todos os países, enquanto o IRSA aumentou em todo o bloco. O Paraguai registrou o maior ITC médio, 93,1 pontos, refletindo a elevada participação hidrelétrica. A Argentina apresentou o menor valor, 7,4. No IRSA, Argentina, Uruguai e Brasil exibiram os maiores níveis médios, enquanto a Bolívia apresentou o menor nível, embora tenha alcançado a maior variação positiva no período.

TABELA 1. Estatísticas descritivas do ITC e do IRSA por país, 2001–2021

País	ITC médio	Variação ITC	IRSA médio	Variação IRSA
Argentina	7,4	−7	74,8	+26
Bolívia	52,8	−27	24,4	+43
Brasil	56,9	−2	73,7	+35
Paraguai	93,1	−12	46,1	+42
Uruguai	76,9	−3	76,7	+41

Fonte: Resultados da pesquisa.

As trajetórias opostas produziram correlação contemporânea negativa entre os índices ($r = -0,237$), mas essa associação simples não controla diferenças estruturais nem defasagens. O ITC apresentou correlações coerentes com seus componentes: negativa com emissões de CO₂ per capita ($r = -0,909$) e positiva com energia renovável ($r = 0,911$). O IRSA correlacionou-se positivamente com urbanização ($r = 0,752$) e controle da corrupção ($r = 0,528$), e negativamente com abertura comercial ($r = -0,592$).

4.2. Resultados do painel e testes de robustez

O principal resultado foi a associação positiva e estatisticamente significativa entre o ITC defasado em três anos e o IRSA ($\beta = 0,317$; erro-padrão = 0,154; $p = 0,043$). O coeficiente contemporâneo não foi significativo, assim como as defasagens de um e cinco anos. A especificação preferida utilizou 80 observações e alcançou R² within de 0,720. O padrão sugere que mudanças na transição climática precisam de tempo para se relacionar a ganhos na resiliência alimentar.

TABELA 2. Coeficiente do ITC em diferentes especificações

Especificação	Coeficiente	Erro-padrão	p-valor	R ² within
Efeitos fixos contemporâneo	−0,068	0,167	0,686	0,712
Efeitos fixos, defasagem de 1 ano	0,157	0,136	0,251	0,712
Efeitos fixos, defasagem de 3 anos	0,317	0,154	0,043	0,720
Efeitos fixos, defasagem de 5 anos	−0,049	0,166	0,768	0,707
Primeiras diferenças	0,193	0,103	0,062	0,339

Fonte: Resultados da pesquisa. Nota: erros-padrão robustos.

Entre os controles, a urbanização apresentou a associação mais robusta com o IRSA ($\beta = 5,467$; $p < 0,001$). A abertura comercial foi negativa ($\beta = -0,389$; $p < 0,001$), e o controle da corrupção foi positivo ($\beta = 8,377$; $p = 0,044$). O crescimento do PIB não alcançou significância. Esses resultados indicam que infraestrutura, acesso a serviços e governança constituem dimensões importantes da resiliência, enquanto maior exposição comercial pode ampliar vulnerabilidades em economias especializadas em commodities.

A análise sequencial revelou um padrão compatível com o Paradoxo de Simpson. Sem controles, a relação entre ITC e IRSA foi fortemente negativa ($\beta = -0,967$; $p < 0,001$). Com a inclusão da urbanização, o sinal tornou-se positivo ($\beta = 0,281$; $p = 0,062$). Países com matrizes mais limpas tenderam a ser menos urbanizados, enquanto urbanização foi o principal correlato do IRSA. Assim, a correlação agregada negativa refletia, em parte, diferenças de composição entre países.

Os testes de exclusão sequencial mantiveram sinal positivo em cinco das seis especificações, e as cinco versões alternativas do IRSA apresentaram correlação superior a 0,95 com o índice original e reproduziram o mesmo padrão de sinais. A versão restrita aos componentes diretamente alimentares apresentou $\beta = 0,238$ ($p = 0,120$) no modelo completo. Embora nem todas as especificações tenham alcançado significância, a direção predominante reforça a plausibilidade da associação de médio prazo.

4.3. Heterogeneidade e implicações

A heterogeneidade nacional ajuda a interpretar os resultados. O Paraguai combinou o maior ITC com IRSA intermediário, indicando que matriz elétrica renovável não se traduz automaticamente em segurança alimentar. A Bolívia partiu de base reduzida e obteve o maior avanço no IRSA, associado à expansão da produção, renda e produtividade e à redução da subnutrição. Brasil e Argentina alcançaram avanços alimentares apesar de trajetórias climáticas distintas. O Uruguai foi o único país com correlação positiva entre os índices e apresentou melhores indicadores de governança, sugerindo que condições institucionais facilitam complementaridades.

A defasagem de três anos pode refletir canais indiretos. Energias renováveis reduzem a exposição à volatilidade dos combustíveis; políticas de uso eficiente de solo, água e energia podem elevar produtividade; e capacidades institucionais desenvolvidas na transição climática podem beneficiar políticas alimentares. O horizonte encontrado é compatível com a literatura sobre medidas de mitigação baseadas na terra, cujos resultados tendem a se materializar gradualmente (Roe et al., 2021).

Para as políticas públicas, os resultados recomendam coordenação entre agendas climática, energética, agrícola e alimentar; planejamento para além de ciclos eleitorais; fortalecimento da governança; e equilíbrio entre inserção comercial e proteção da resiliência doméstica. Estoques reguladores, diversificação produtiva, infraestrutura logística e apoio à agricultura familiar podem reduzir a vulnerabilidade associada à especialização exportadora. As conclusões devem considerar a amostra reduzida, a ausência de dados desagregados e a possível endogeneidade residual.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo analisou a relação entre transição climática e resiliência dos sistemas alimentares em cinco países do MERCOSUL, entre 2001 e 2021. A construção do ITC e do IRSA por ACP permitiu sintetizar dimensões climáticas, energéticas, produtivas, alimentares e econômicas em indicadores comparáveis. Os resultados mostraram deterioração do ITC e avanço do IRSA em todos os países, revelando trajetórias contemporâneas contrastantes.

A especificação de efeitos fixos indicou associação positiva entre o ITC defasado em três anos e o IRSA, com coeficiente de 0,317 e p-valor de 0,043. Urbanização e controle da corrupção foram positivamente associados à resiliência, enquanto abertura comercial apresentou sinal negativo. A heterogeneidade entre países e a inversão do sinal após controlar a urbanização demonstram que análises bivariadas podem produzir interpretações inadequadas.

As evidências sugerem que transição climática e segurança alimentar podem ser tratadas como agendas complementares no médio prazo, desde que acompanhadas por governança, infraestrutura e políticas domésticas de resiliência. O resultado não deve ser interpretado como causal, dadas as limitações amostrais e de identificação. Estudos futuros podem ampliar o período e o conjunto de países, incorporar emissões agrícolas, uso da terra e práticas sustentáveis e empregar variáveis instrumentais, GMM em sistema e testes de cointegração em painel.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento e Assistência Social, Família e Combate à Fome. Marco de referência de sistemas alimentares e clima para políticas públicas. Brasília: MDS, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mds/>. Acesso em: 7 jul. 2026.
- CAMPBELL, B. M.; HANSEN, J.; RIOUX, J.; STIRLING, C. M.; TWOMLOW, S.; WOLLENBERG, E. Urgent action to combat climate change and its impacts (SDG 13): transforming agriculture and food systems. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 34, p. 13-20, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.06.005>.
- CHAUDHARY, A.; GUSTAFSON, D.; MATHYS, A. Multi-indicator sustainability assessment of global food systems. *Nature Communications*, v. 9, n. 1, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03308-7>.
- COSTA JR., C. et al. Roadmap for achieving net-zero emissions in global food systems by 2050. *Scientific Reports*, v. 12, 15064, p. 1-13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18601-1>.
- DAVIS, K. F.; DOWNS, S.; GEPHART, J. A. Towards food supply chain resilience to environmental shocks. *Nature Food*, v. 2, n. 1, p. 54-65, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00196-3>.
- DINESH, D.; HEGGER, D. L. T.; KLERKX, L.; VERVOORT, J.; CAMPBELL, B. M.; DRIESSEN, P. P. J. Enacting theories of change for food systems transformation under climate change. *Global Food Security*, v. 31, 100583, p. 1-14, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100583>.
- MULUNEH, M. G. Impact of climate change on biodiversity and food security: a global perspective - a review article. *Agriculture & Food Security*, v. 10, n. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40066-021-00318-5>.
- ROE, S. et al. Land-based measures to mitigate climate change: potential and feasibility by country. *Global Change Biology*, v. 27, n. 23, p. 6025-6058, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15873>.
- TCHONKOUANG, R. D.; ONYEAKA, H.; NKOUTCHOU, H. Assessing the vulnerability of food supply chains to climate change-induced disruptions. *Science of the Total Environment*, v. 920, 171047, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171047>.
- VELA ALMEIDA, D. et al. The “greening” of empire: the European Green Deal as the EU first agenda. *Political Geography*, v. 105, 102925, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2023.102925>.
- ZUREK, M.; HEBINCK, A.; SELOMANE, O. Climate change and the urgency to transform food systems. *Science*, v. 376, n. 6600, p. 1416-1421, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abo2364>.