

Ecoeficiência agropecuária na América Latina e no Caribe de 2000 a 2020

Agricultural eco-efficiency in Latin America and the Caribbean from 2000 to 2020

Maria Avyla Batista da Silva

Universidade Regional do Cariri. Crato, Ceará (CE), Brasil

Eliane Pinheiro de Sousa

Universidade Regional do Cariri. Crato, Ceará (CE), Brasil

Luis Abel da Silva Filho

Universidade Regional do Cariri. Crato, Ceará (CE), Brasil

Renata Benício de Oliveira

Universidade Federal de Rondonópolis. Rondonópolis, Mato Grosso (MT), Brasil

GT4 - Meio ambiente, agroecologia, sustentabilidade e mudanças climáticas

Resumo: A ecoeficiência agropecuária é uma questão relevante a ser considerada em países com forte potencial produtivo do setor agrícola, dada a necessidade de produção com respeito ao meio ambiente. Nesse sentido, o objetivo deste artigo foi analisar a ecoeficiência agropecuária em 18 países da América Latina e do Caribe entre 2000 e 2020. Como abordagem analítica, este estudo aplicou a Análise Envoltória de Dados (DEA), com os modelos CCR e BCC, para a abordagem empírica dada à questão de pesquisa. Consideraram-se outputs indesejáveis, como emissões de metano, e utilizou-se análise de janelas para capturar a dinâmica temporal. Os resultados revelam forte heterogeneidade regional. Países como Guiana e Trindade e Tobago apresentaram altos níveis de ecoeficiência, enquanto o Brasil, apesar de seu peso econômico no setor, apresentou desempenho limitado devido a desafios como uso intensivo de insumos e degradação ambiental. Os achados contribuem para o debate sobre sustentabilidade e subsidiam políticas públicas mais eficazes e alinhadas aos ODS.

Palavras-chave: Ecoeficiência, Análise Envoltória de Dados, América Latina e Caribe, Sustentabilidade agropecuária.

Abstract: Agro-environmental eco-efficiency is a relevant issue to consider in countries with strong productive potential in the agricultural sector, given the need for production that respects environmental constraints. In this context, the objective of this article was to analyze agro-environmental eco-efficiency in 18 countries in Latin America and the Caribbean between 2000 and 2020. As an analytical approach, this study employed Data Envelopment Analysis (DEA), utilizing both the CCR and BCC models, to empirically address the research question. Undesirable outputs, such as methane emissions, were included, and a window analysis was employed to capture the temporal dynamics. The results reveal firm regional heterogeneity. Countries such as Guyana and Trinidad and Tobago demonstrated high levels of eco-efficiency. In contrast, Brazil, despite its significant economic presence in the sector, exhibited limited performance due to challenges including intensive input use and environmental degradation. The findings contribute to the debate on sustainability and support the development of more effective public policies aligned with the Sustainable Development Goals (SDGs).

Keywords: Eco-efficiency, Data Envelopment Analysis, Latin America and the Caribbean, Agricultural sustainability.

1. Introdução

Sob uma perspectiva histórica, o surgimento da agricultura e da pecuária foi determinante para o desenvolvimento da humanidade, promovendo avanços organizacionais, biológicos e tecnológicos, além de transformar a relação do homem com o meio ambiente. Essas atividades possibilitaram o crescimento populacional, a especialização do trabalho e o

surgimento de civilizações, tornando-se fundamentais para o desenvolvimento humano e suas relações com o espaço (Bula, 2020; Pang *et al.*, 2016).

Além de garantir, por meio da produção de alimentos, a segurança alimentar, a agropecuária desempenha papel crucial no desenvolvimento econômico, sobretudo, em países em desenvolvimento (Bula, 2020). Com o tempo, o setor adotou características industriais, substituindo a produção familiar por processos mecanizados e pela utilização intensiva de insumos químicos, como agroquímicos, que impactam diretamente os ecossistemas (Silva *et al.*, 2022; Reis *et al.*, 2020). Essas mudanças demandam mecanismos essenciais à convivência com o meio produtivo agrícola, e com perspectiva de preservação ambiental.

Projeções da FAO e da OCDE (2022) indicam que a produção agrícola e pecuária crescerá cerca de 1% e 1,5%, respectivamente, nas próximas décadas. Contudo, esse aumento está associado à intensificação do uso de insumos e ao crescimento da geração de resíduos e poluentes (Rosa *et al.*, 2011). Parte significativa das mudanças climáticas decorre das práticas do setor, principalmente pela emissão de gases de efeito estufa (GEEs), com destaque para o metano (CH₄). O WRI (2022) projeta que, até 2050, as emissões do setor agropecuário aumentem cerca de 60%. Esse cenário reflete, segundo Pang *et al.* (2016), o uso ineficiente dos recursos naturais e a dependência de combustíveis fósseis.

Diante disso, cresce a necessidade de incorporar a dimensão ambiental no desenvolvimento econômico (Oliveira *et al.*, 2024), sendo o conceito de ecoeficiência central nesse debate. A ecoeficiência integra desempenho econômico e ambiental, oferecendo suporte para decisões e políticas públicas mais sustentáveis (Hupperts; Ishikawa, 2005; Coluccia *et al.*, 2020). Assim, a produção agrícola demanda, cada vez mais, novas formas de desenvolvimento produtivo com uso de tecnologias eficientes.

No contexto da América Latina e do Caribe, cuja economia agropecuária representa cerca de 6% do PIB mundial (Banco Mundial, 2024), a atividade se destaca pela ampla disponibilidade de recursos naturais, mas também por uma produtividade heterogênea. Enquanto países como Brasil, México e Argentina apresentam setores mais desenvolvidos, outros enfrentam gargalos estruturais, especialmente em infraestrutura e tecnologia (Schneider, 2016; Reis *et al.*, 2020).

Apesar da importância econômica, políticas públicas voltadas ao setor agropecuário na região são insuficientes, comprometendo seu desenvolvimento sustentável. Nesse sentido, os indicadores de ecoeficiência se mostram ferramentas essenciais para orientar estratégias de crescimento sustentável (Caiado *et al.*, 2017), alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), notadamente o ODS 8 (trabalho decente e crescimento econômico) e o ODS

13 (ação contra a mudança global do clima). Adicionalmente, persiste uma lacuna na literatura sobre a ecoeficiência do setor agropecuário na América Latina e no Caribe. A região enfrenta desafios ambientais significativos, como desmatamento e emissões de metano, impulsionados pela expansão agropecuária e urbana (FAO, 2020). Mesmo com a redução global nas taxas de desmatamento, a América Latina permanece responsável por grande parte da perda florestal, sobretudo na Amazônia.

Diante do exposto, fica evidente que a análise da ecoeficiência é fundamental para avaliar o desempenho econômico e ambiental, orientar políticas públicas, atrair investimentos e fomentar a inovação em direção a soluções mais sustentáveis. Contudo, esse esforço somente se concretiza se for acompanhado de uma visão integrada da sustentabilidade econômica e ambiental (Zhao *et al.*, 2023). Ante isto, este artigo objetiva analisar a ecoeficiência do setor agropecuário dos países latino-americanos e caribenhos entre 2000 e 2020, considerando sua relevância econômica e a heterogeneidade dos desafios ambientais enfrentados.

2. Referencial Teórico-Empírico

2.1 Embasamento teórico sobre ecoeficiência

Os pensadores clássicos inicialmente demonstraram preocupação com a relação entre economia e natureza, posteriormente abandonada diante da crença na abundância e indestrutibilidade dos recursos naturais. Os neoclássicos retomaram a temática por meio da análise das externalidades e falhas de mercado, defendendo a internalização dos impactos ambientais por meio do avanço tecnológico. Essa dimensão passou a integrar efetivamente a análise econômica somente após os desequilíbrios ecológicos e desastres do século XX.

Conferências globais, como a de 1972 (Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano), impulsionaram o debate sobre governança ambiental e evidenciaram a necessidade de mitigar impactos ecológicos para viabilizar o desenvolvimento econômico e social. Nas décadas seguintes, sobretudo, com o Relatório Brundtland (1987), difundiu-se o conceito de desenvolvimento sustentável, entendido como a satisfação das necessidades atuais sem comprometer as futuras gerações. Nesse contexto, consolidaram-se abordagens como a economia ecológica, que enfatiza a interdependência entre sistemas econômicos e ecológicos, os limites biofísicos ao crescimento e a preservação da biodiversidade como base para o bem-estar humano. Majid *et al.* (2023) destacam que, frente à acelerada transformação tecnológica, os danos ambientais, a desaceleração econômica e a desigualdade social reforçam a centralidade do desenvolvimento sustentável como interseção entre economia, sociedade e ecologia.

Apesar dos avanços, persistem desafios, como a transição para uma economia de baixo carbono que equilibre crescimento, equidade e proteção ambiental. O IPCC (2021) aponta a

urgência de ações coordenadas entre governos, setor privado e sociedade civil. Medidas como mercados de carbono, impostos sobre emissões e subsídios a tecnologias limpas têm sido adotadas com esse objetivo. É nesse cenário que emerge o conceito de ecoeficiência, ampliando o entendimento de sustentabilidade (Maciel; Maciel; Gomes, 2020).

A ecoeficiência alia produtividade à redução de insumos, incorporando a dimensão ambiental e permitindo avaliar os impactos do crescimento sobre os ecossistemas. Trata-se de uma estratégia-chave para a sustentabilidade, ao reduzir resíduos, consumo de energia e emissões poluentes (Martins, 2022). Definida como a relação entre valor econômico e impacto ambiental, a ecoeficiência expressa a capacidade de promover crescimento com uso eficiente de recursos, minimizando poluição e desperdício. Envolve tanto a eficiência no uso de insumos quanto a maximização da produção a partir dos recursos disponíveis.

Liu *et al.* (2020) ressaltam a importância de alinhar decisões microeconômicas a exigências macroeconômicas, e alertam para a carência de práticas consolidadas em ecoeficiência. A literatura evidencia sua aplicação em setores diversos — empresas, políticas públicas, investimentos, produtos e tecnologias — com foco em decisões sustentáveis ligadas à produção, consumo e gestão de resíduos. Diante de sua relevância, a ecoeficiência tem ganhado destaque crescente em pesquisas empíricas, conforme abordada na seção seguinte.

2.2 Evidências empíricas

Como ponto de partida, Caiado *et al.* (2017) destacam que a aplicação da ecoeficiência é ampla e abrange diversos setores econômicos, orientando organizações, projetos e processos rumo ao desenvolvimento sustentável, com melhorias nos desempenhos financeiro, ambiental e social. Os principais setores contemplados pela literatura incluem indústria, agricultura, energia e turismo, com estudos aplicados a países como China (Wang; Ding; Liu, 2019), Egito (Nwani *et al.*, 2023), América Latina (Moutinho *et al.*, 2018), BRICS (Rocha; Rebelatto; Camioto, 2016) e regiões específicas.

No Egito, Nwani *et al.* (2023) ressaltam a ecoeficiência como ferramenta essencial para políticas públicas voltadas ao crescimento sustentável. Na China, Wang, Ding e Liu (2019) e Zhou *et al.* (2020) avaliaram a ecoeficiência industrial, apontando avanços significativos, embora com disparidades regionais que exigem inovação tecnológica e cooperação inter-regional. O consumo energético é um fator central na mensuração da ecoeficiência, tanto internacionalmente quanto na literatura nacional (Caiado *et al.*, 2020), pois possibilita estratégias mais eficazes para reduzir impactos ambientais.

Moutinho *et al.* (2018) analisaram a ecoeficiência no setor energético de 16 países latino-americanos entre 1994 e 2013, observando os efeitos de fatores econômicos, energéticos

e ambientais sobre as emissões de CO₂. Rocha, Rebelatto e Camioto (2015) examinaram os BRICS, concluindo que o Brasil apresentou os melhores índices de transformação de insumos (capital, trabalho e energia) em crescimento econômico com menor impacto ambiental.

No setor agropecuário, foco deste artigo, a ecoeficiência ganha destaque por aliar práticas ambientalmente responsáveis à segurança alimentar e à sustentabilidade econômica. Wang *et al.* (2022) defendem a transição para uma agricultura verde, fundamentada na adoção de práticas sustentáveis e articulação entre instituições e sociedade. A agricultura, setor vulnerável às mudanças climáticas, sofre com perdas de produtividade e maior dependência de insumos químicos (Lal, 2015).

A OCDE passou a incorporar a ecoeficiência no setor agrícola a partir de 1998, com o objetivo de relacionar produção e impactos ambientais (Wang *et al.*, 2024). Coluccia *et al.* (2020) destacam que a ecoeficiência permite avaliar a eficiência no uso de recursos e as pressões ambientais, sendo influenciada pela gestão de resíduos e pelo uso de insumos como fertilizantes e pesticidas. Jovens agricultores e participantes de regimes agroambientais apresentaram melhores indicadores, associados à adoção tecnológica (Wang *et al.*, 2022). Pang *et al.* (2016) demonstram que países em desenvolvimento têm adotado práticas ecoeficientes, conciliando aumento de produtividade com menor impacto ambiental. No Brasil, estudos recentes (Gama, 2022; Martins, 2022; Silva *et al.*, 2022) enfatizam o papel das políticas públicas e dos investimentos em tecnologias sustentáveis para impulsionar a ecoeficiência, embora o predomínio da monocultura e das transformações tecnológicas também tenha acarretado intensificação de impactos ambientais.

Na América Latina, a ecoeficiência agrícola representa uma estratégia para mitigar impactos da expansão agropecuária e fortalecer a resiliência econômica. Silva *et al.* (2022) defendem políticas regionais que estimulem práticas sustentáveis e o uso de tecnologias adaptadas às realidades locais. Ao estudarem sistemas de produção de leite na região, Fariña *et al.* (2024) reforçam a importância de práticas ajustadas às condições biofísicas e socioeconômicas. De modo similar, Yarzabal e Chica (2021) mostram que a economia circular aumenta a eficiência no uso de recursos, ao reduzir perdas e reutilizar insumos.

Outros estudos de caso complementam esse cenário. Castillo, Fuinhas e Marques (2021) evidenciam que governança e investimentos em setores complementares, como turismo sustentável, podem melhorar a ecoeficiência em países como Jamaica e Argentina. Em Trindade e Tobago, Sadeek *et al.* (2023) relatam que políticas de integração de fontes renováveis têm impulsionado práticas produtivas sustentáveis.

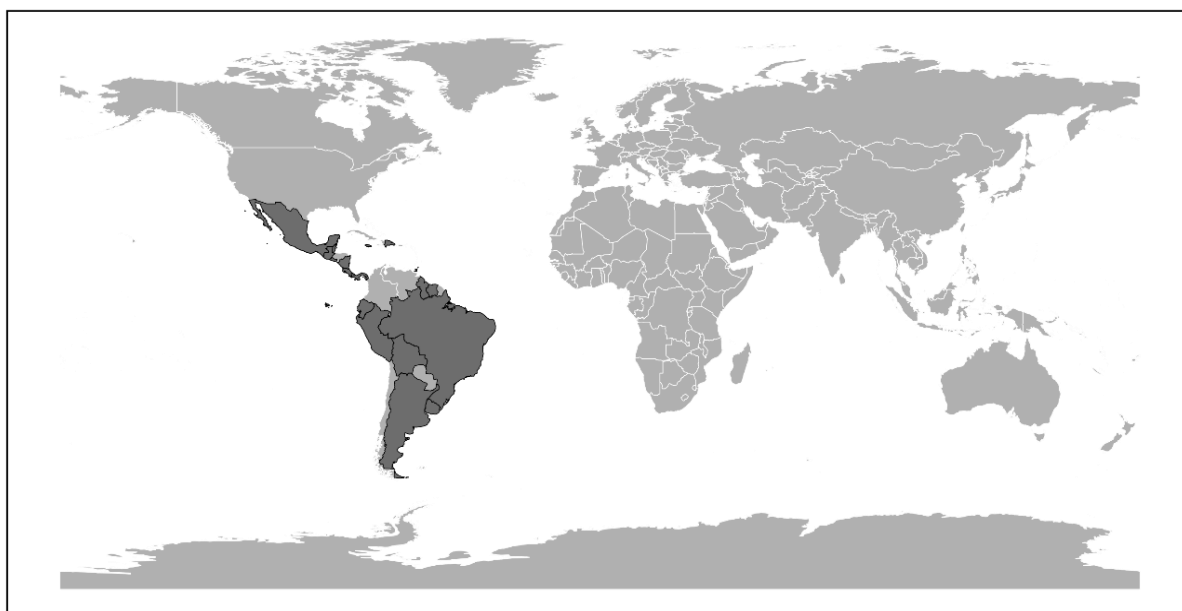
3. Metodologia

Esta seção detalha a técnica aplicada ao conjunto de dados e o percurso metodológico adotados para responder a questão de pesquisa. A abordagem consiste na mensuração dos escores de ecoeficiência, utilizando a Análise Envoltória de Dados (DEA). Ressalta-se que a operacionalização dos modelos, bem como a elaboração das tabelas e gráficos apresentados, foi realizada na linguagem R, por meio do ambiente *RCloud*, utilizando o pacote *Benchmarking*.

3.1 Área de estudo

Zanatta (2017) define a América Latina e o Caribe como uma região não apenas geográfica, mas também histórica, indicando a necessidade de se compreender as dinâmicas históricas que a constituíram, assim como influência da colonização europeia no desenrolar da sua formação econômica, social e cultural. Sendo assim, o critério de escolha para a área de estudo baseou-se na pesquisa feita por Reis *et al.* (2020), que agrupa 18 países da América Latina e do Caribe que possuem setor agropecuário significativamente expressivo em sua atividade econômica, haja vista que a participação do setor fica entre 5% e 18% do PIB (Banco Mundial, 2024), conforme apresentada na Figura 1, e são eles: Argentina, Belize, Bolívia, Brasil, Costa Rica, República Dominicana, Equador, El Salvador, Guatemala, Guiana, Jamaica, México, Nicarágua, Panamá, Peru, Suriname, Trinidad Tobago e Uruguai.

Figura 1: Países latino-americanos e caribenhos com expressivo setor agropecuário



Fonte: Elaboração dos autores (2024).

Ludena (2010) evidencia que a otimização da produtividade do setor agropecuário na região ocorreu essencialmente em função das tecnologias adotadas e da elevação da eficiência. Nessa perspectiva, impactam na promoção da sustentabilidade dos sistemas de produção

agroalimentares (Saini, 2023). Em contrapartida, Graesser *et al.* (2015) sublinham que esse cenário causa demasiadas pressões ambientais, como desmatamento dos biomas nativos, em virtude da ampliação da fronteira agropecuária. Portanto, torna-se claro que o setor agropecuário, na América Latina, é fundamental em âmbitos econômico, social e ambiental, porém se confronta com desafios, como a exigência de políticas governamentais eficientes e a necessidade de conciliar a expansão agrícola com a preservação florestal.

Em consonância com Silva (2024), o setor agropecuário desempenha um papel-chave nas economias dessas nações, dada a sua relevância tanto no fornecimento de produtos para o mercado interno quanto às atividades do comércio externo. Em paralelo, Sabourin e Grisa (2018) ressaltam que, nesses países, os setores agropecuário e ambiental são diversos, pois correspondem ao reflexo das suas características geográficas. Ademais, a literatura tem apontado os desafios climáticos enfrentados por tais países, mas que, apesar disso, apresentam potencial para a transição às práticas sustentáveis, em virtude, fundamentalmente, da gama de recursos naturais que dispõem (Vasconcellos, 2021; Perafán *et al.*, 2018).

3.2. Análise Envoltória de Dados (DEA)

A eficiência diz respeito à otimização do uso de recursos na realização de uma atividade. Na economia, essa eficiência resulta da combinação entre eficiência técnica e alocativa, sendo alcançada quando se minimizam custos operando-se sobre a fronteira tecnológica, ou seja, com a melhor combinação de insumos para maximizar a produção (Farrell, 1957).

Desde os anos 1950, a mensuração da eficiência tem sido objeto de estudos, com avanços significativos a partir dos trabalhos de Charnes, Cooper e Rhodes (1978), que desenvolveram a Análise Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis* – DEA). Essa técnica permite avaliar a eficiência relativa de unidades produtivas (DMUs), sem a necessidade de definir previamente os pesos das variáveis (Muniz *et al.*, 2022). Por meio de modelagem matemática, a DEA constrói fronteiras de produção e identifica quais DMUs operam eficientemente, considerando as melhores práticas observadas (Martins, 2022).

O modelo original da DEA, conhecido como CCR (Charnes, Cooper e Rhodes, 1978), baseia-se na hipótese de retornos constantes de escala (CRS), e mensura a eficiência pela razão entre a produtividade de uma DMU e a da mais eficiente do conjunto (Gama, 2020). Posteriormente, Banker, Charnes e Cooper (1984) propuseram o modelo BCC, que admite retornos variáveis de escala (VRS), apropriado para contextos em que a proporcionalidade entre insumos e produtos não se mantém (Fancello; Carta; Serra, 2020). Ambos os modelos podem ser orientados para insumos (minimizar recursos mantendo produção) ou para produtos (maximizar produção com recursos dados).

Nesta pesquisa, analisa-se a ecoeficiência do setor agropecuário com base nos modelos CCR e BCC, dada a heterogeneidade estrutural e operacional das DMUs. O modelo CCR pressupõe operação em escala ótima, enquanto o modelo BCC flexibiliza essa hipótese, sendo mais adequado às diferentes realidades do setor, como variação em acesso à tecnologia ou estrutura fundiária.

Utiliza-se uma base de dados em painel (2000–2020), composta por séries temporais e corte transversal. Para captar a dinâmica da eficiência, adota-se a técnica da análise por janelas (Charnes; Cooper, 1984), que possibilita a avaliação contínua das DMUs ao longo do tempo. Segundo Nguyen, Roca e Sharma (2014), essa abordagem permite observar tendências, aumenta os graus de liberdade e trata as DMUs como autônomas ao longo dos períodos. A literatura também indica sua aplicação em estudos de eficiência ambiental, permitindo analisar impactos de políticas públicas (Far; Bazaee, 2017).

Neste estudo, foram consideradas 11 janelas móveis de 11 anos cada: de 2000–2010 até 2010–2020. Tal abordagem é útil para monitorar a evolução da ecoeficiência frente ao uso de tecnologias, fertilizantes e práticas agrícolas sustentáveis. Li, Sarwar e Jin (2021) destacam que essa técnica é eficaz para avaliar o efeito das políticas ambientais sobre emissões de carbono e uso de recursos ao longo do tempo.

3.3 Variáveis empregadas

No tocante às variáveis consideradas para mensuração da ecoeficiência dos países da América Latina e do Caribe para os anos de 2000 a 2020, estão apresentadas no Quadro 1. As informações para construção da base de dados foram coletadas no site do Banco Mundial (2024). Como *inputs*, foram usadas as variáveis Terra e Emprego do setor agropecuário, e, para os *outputs*, foram considerados o PIB (como desejável) e as Emissões de CH₄ do setor agropecuário (como indesejável).

No que tange às entradas, a variável Terra representa a porcentagem da área terrestre destinada às atividades agropecuárias. A variável Emprego, por sua vez, remete à fração dos trabalhadores no setor agropecuário. Em outro plano, as saídas configuram-se como aquelas que são provindas das relações entre os insumos e as externalidades. Isto posto, a variável PIB diz respeito à parcela de contribuição do setor agropecuário no produto da atividade econômica. Além disso, a variável Emissões de CH₄ agrupa as emissões do gás na atmosfera em virtude da prática das principais atividades do setor.

Quadro 1: Variáveis consideradas para mensuração da ecoeficiência dos países da América Latina e do Caribe para os anos de 2000 a 2020

Variável	Descrição	Unidade de medida	Estudos que inspiraram o uso da variável
<i>Inputs</i>			
Terra agropecuária	Fração da área terrestre que é empregada para atividades agropecuárias.	Porcentagem da área terrestre	Gama (2022); Martins (2022)
Emprego agropecuário	Percentual dos trabalhadores que estão alocados no setor agropecuário	Porcentagem do emprego total	Gama (2022)
<i>Output indesejável</i>			
Emissão de metano agropecuário	Refere-se às emissões de metano provenientes de animais, resíduos, produção e queima dos biomás	Toneladas por pessoas	Martins (2022)
<i>Output desejável</i>			
PIB agropecuário	Proporção incorporada do PIB pelo setor agropecuário	Porcentagem do PIB total	Gama (2022); Martins (2022)

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Conforme explicado por Liu *et al.* (2021), essas variáveis são utilizadas em conjunto com o intuito de relacionar a teoria econômica por meio do conceito da função de produção, cujos insumos são empregados na constituição de determinados produtos. Contudo, nesse processo, externalidades são geradas, e, em razão disso, considera-se a dimensão ambiental por meio das emissões de gases do efeito estufa, particularmente o gás metano, como uma forma de mensurar os impactos ambientais inerentes a essa produção.

O modelo DEA considerado tem por característica a orientação aos insumos, isto é, busca-se elevar o produto, ao passo que os insumos são mantidos constantes. Especificamente, tratou-se de *outputs* desejável e indesejável. Para modelagem do *output* indesejável, utilizou-se a técnica *Ideal Notional Point* (INP) (Caiado *et al.*, 2020), empregada para tratar saídas indesejadas que são produzidas simultaneamente com os *outputs* desejados, mas carregam efeitos negativos.

Considerando os fatos supracitados, o presente trabalho se propõe a preencher uma lacuna na literatura, haja vista que busca mensurar a ecoeficiência agropecuária de 18 países da América Latina e do Caribe por meio da aplicação do modelo DEA-CCR-WA com retornos constantes à escala e orientação aos *inputs*.

4. Resultados e Discussão

As estatísticas descritivas apresentadas na Tabela 1 remetem às variáveis empregadas para mensurar a ecoeficiência agropecuária dos países latino-americanos e caribenhos no período entre 2000 até 2020. A variável relativa ao emprego agropecuário revelou uma média de 18% dos trabalhadores alocados no setor, evidenciando que a agropecuária ainda representa uma importante fonte de ocupação em boa parte dos países latino-americanos. A amplitude dos

dados, com valores variando de 0,6% a 44,2%, sugere que, enquanto em alguns países, o setor agropecuário permanece central no mercado de trabalho, em outros ele tem papel bastante residual. O coeficiente de variação, superior a 50%, confirma a elevada heterogeneidade regional, associada a distintos graus de desenvolvimento econômico e de modernização produtiva, além de refletir a coexistência de mercados formais e informais como resposta aos diferentes graus (Meza *et al.*, 2019).

Tabela 1: Estatísticas descritivas das variáveis empregadas para mensurar a ecoeficiência agropecuária dos países latino-americanos e caribenhos de 2000 a 2020

Variável	Máximo	Mediana	Mínimo	Média	DP	CV (%)
trabalho	44,2020	16,7416	0,6055	18,1175	9,9525	54,9332
terra	0,4361	35,0707	0,4361	34,0930	20,5360	60,2353
vab_agro	34,0003	6,9874	0,3655	8,4202	5,8309	69,2482
metano	0,00815	0,00068	0,00006	0,00128	0,00159	0,01248

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

No que se refere à utilização da terra para fins agropecuários, observou-se uma média de 34% da área terrestre dedicada à atividade. O desvio-padrão elevado e o coeficiente de variação acima de 60% sugerem que os países da América Latina e Caribe possuem realidades territoriais bastante díspares, ora intensamente marcadas pelo uso agropecuário do solo (Ceddia, 2019), ora por outras formas de ocupação e preservação ambiental (Saini, 2023).

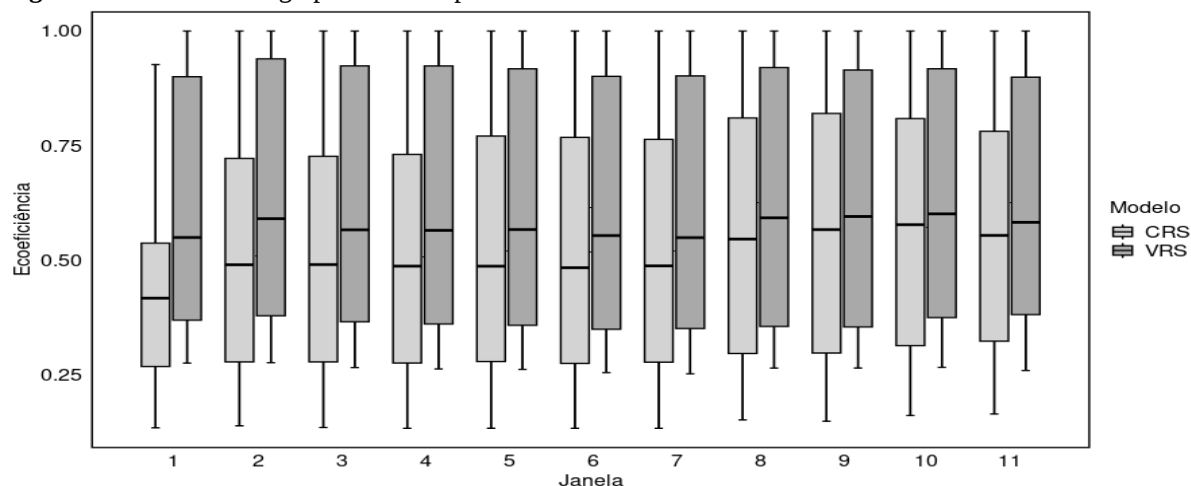
Ademais, a análise do valor adicionado bruto agropecuário, como proporção do PIB, reforça a diversidade econômica da região. A média registrada foi de aproximadamente 8%, mas com ampla dispersão: países com economias ainda fortemente dependentes do setor convivem com outros onde a agropecuária representa menos de 1% da atividade econômica. O coeficiente de variação, próximo a 70%, aponta para essa diferença estrutural. Por um lado, trajetórias de industrialização e urbanização diferenciadas e, por outro, conforme apontado por Reis *et al.* (2020), o peso histórico e cultural que a agricultura possui nessas nações.

Por fim, em virtude da importância dos impactos sobre as mudanças climáticas, a variável de emissão de gases do efeito estufa torna-se fundamental para análise, pois mais de 40% das emissões da região são provenientes de atividades agropecuárias (Wang; Rondinone; Salvo, 2023). Pelo conjunto de dados, a grande variação relativa indica diferenças expressivas na produção agropecuária e nos padrões tecnológicos empregados.

Uma vez conhecida a natureza dos dados, a operacionalização do modelo DEA torna-se possível. A ecoeficiência agropecuária dos países latino-americanos e caribenhos entre os anos de 2000 a 2020 é apresentada na Figura 2. A análise foi realizada a partir de dois modelos DEA, o modelo de retornos constantes de escala e o modelo de retornos variáveis de escala, ambos os modelos são representados por diagramas de caixa que mostram a distribuição dos

escores de ecoeficiência entre os países em cada janela.

Figura 2: Ecoeficiência agropecuária dos países latino-americanos e caribenhos entre os anos de 2000 a 2020



Nota: janela 1 (2000-2010); janela 2 (2001-2011); janela 3 (2002-2012); janela 4 (2003-2013); janela 5 (2004-2014); janela 6 (2005-2015); janela 7 (2006-2016); janela 8 (2007-2017); janela 9 (2008-2018); janela 10 (2009-2019); janela 11 (2010-2020).

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A comparação entre os dois modelos evidencia diferenças sistemáticas e relevantes. Os escores sob o modelo VRS são consistentemente mais elevados do que os observados no modelo CRS, o que está de acordo com a literatura teórica da DEA, segundo a qual o modelo VRS oferece uma abordagem mais flexível ao relaxar a hipótese de retornos constantes (Xiao *et al.*, 2024). Em outras palavras, em contextos heterogêneos como o latino-americano, onde coexistem grandes produtores exportadores e pequenas unidades familiares de subsistência, o uso do modelo VRS respeita essas diferenças estruturais.

Do ponto de vista temporal, não se observa uma tendência clara de melhoria ou deterioração dos escores de ecoeficiência ao longo das janelas. Essa estabilidade pode ser interpretada de duas formas. Por um lado, pode indicar uma estagnação nos avanços tecnológicos e institucionais capazes de aumentar a eficiência no uso de recursos naturais e na redução de impactos ambientais na agropecuária (Saini, 2023). Por outro, pode refletir limitações estruturais persistentes, como baixa difusão de inovações sustentáveis, ausência de políticas públicas integradas ou insuficiência de financiamento para práticas produtivas mais limpas, como explicam Wang *et al.* (2022a). Ademais, a persistência de altos níveis de dispersão entre as janelas, sobretudo, no modelo CRS, revela ampla heterogeneidade regional.

Além disso, a concentração de escores abaixo da mediana, especialmente no modelo CRS, sugere que a maioria dos países está operando aquém de seu potencial ecoeficiente, o que reforça a urgência de estratégias que promovam a intensificação sustentável da produção agropecuária, aliando produtividade à conservação ambiental, em consonância com as inferências de Moutinho *et al.* (2018). Sinteticamente, a estabilidade das medianas, a diferença

entre os modelos e a alta dispersão dos escores apontam para a necessidade de abordagens políticas diferenciadas, que reconheçam as especificidades de escala e contexto de cada país, e que incentivem trajetórias de desenvolvimento rural mais sustentáveis e resilientes.

Além dos fatos supracitados, a Tabela 2 apresenta a distribuição dos países latino-americanos e caribenhos por faixas de ecoeficiência média ao longo das janelas temporais. As classes de ecoeficiência foram definidas em quatro categorias: baixa ecoeficiência ($0 < \theta < 0,25$), ecoeficiência moderada-baixa ($0,25 < \theta < 0,5$), ecoeficiência moderada-alta ($0,5 < \theta < 0,75$), alta ecoeficiência ($0,75 < \theta < 1$) e ecoeficiência plena ($\theta = 1$), permitindo analisar a distribuição dos países segundo diferentes níveis de desempenho.

Inicialmente, no modelo CRS, observa-se uma concentração expressiva de países nas categorias de baixa ecoeficiência e ecoeficiência moderada-baixa ao longo de todas as janelas. Esse padrão é especialmente evidente nas janelas iniciais, o que reflete o distanciamento significativo da fronteira de eficiência quando considerada a hipótese de retornos constantes de escala. Todavia, ressalvada uma leve redução no número de países na categoria de baixa ecoeficiência, com quatro na janela 1 convertendo-se para dois na janela 11, a maior parte dos países permanece restrita às faixas inferiores de desempenho, indicando limitações persistentes na adoção de práticas produtivas mais eficientes e sustentáveis.

Tabela 2: Distribuição de países latino-americanos e caribenhos por faixas de ecoeficiência média, 2000-2020

Modelo	Classes	Janela										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CRS	$0 < \theta < 0,25$	4	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2
	$0,25 < \theta < 0,5$	8	7	7	7	7	7	6	5	5	6	5
	$0,5 < \theta < 0,75$	3	4	4	3	3	3	4	5	5	4	6
	$0,75 < \theta < 1$	3	4	4	5	5	5	5	5	5	6	5
	$\theta = 1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VRS	$0 < \theta < 0,25$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$0,25 < \theta < 0,5$	6	6	6	7	7	8	8	8	8	6	6
	$0,5 < \theta < 0,75$	7	5	5	4	4	3	3	3	3	5	5
	$0,75 < \theta < 1$	5	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	$\theta = 1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: janela 1 (2000-2010); janela 2 (2001-2011); janela 3 (2002-2012); janela 4 (2003-2013); janela 5 (2004-2014); janela 6 (2005-2015); janela 7 (2006-2016); janela 8 (2007-2017); janela 9 (2008-2018); janela 10 (2009-2019); janela 11 (2010-2020).

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Por outro lado, observa-se um movimento tímido de migração para as categorias de ecoeficiência moderada-alta e, em menor escala, para alta ecoeficiência a partir das janelas intermediárias. Ainda assim, esse avanço não foi suficiente para que qualquer país atingisse a condição de eficiência plena ao longo de todo o período analisado no modelo CRS, isto é, sob a ótica dos retornos constantes de escala, os países da região enfrentam desafios estruturais significativos para aprimorar seu desempenho ambiental e produtivo.

Ao se considerar o modelo VRS, o cenário se apresenta significativamente distinto.

Nenhum país foi classificado na categoria de baixa ecoeficiência em qualquer uma das janelas, o que indica que parte considerável da ineficiência observada no modelo CRS está associada a deseconomias de escala, e não necessariamente à má alocação ou uso ineficiente dos recursos, em concordância com Coluccia *et al.* (2019). Além disso, há uma predominância de países nas categorias superiores, especialmente na de alta ecoeficiência, que concentra entre sete e oito países de forma consistente ao longo de quase todas as janelas temporais. Esse resultado evidencia, em consonância com Nwani *et al.* (2023), que ao controlar as diferenças de escala produtiva, os países da região apresentam níveis mais satisfatórios de ecoeficiência.

Contudo, destaca-se que, mesmo sob retornos variáveis de escala, nenhum país atingiu eficiência plena, o que demonstra que as barreiras à ecoeficiência não se limitam apenas às condições de escala, mas também estão relacionadas a deficiências tecnológicas, institucionais e de gestão ambiental, mesmo em virtude do notável potencial produtivo da região (Coluccia *et al.*, 2020). Esse contraste entre os modelos revela que, embora as limitações de escala sejam relevantes, persistem desafios estruturais comuns à região que penalizam a transição para modelos produtivos mais sustentáveis e ambientalmente eficientes.

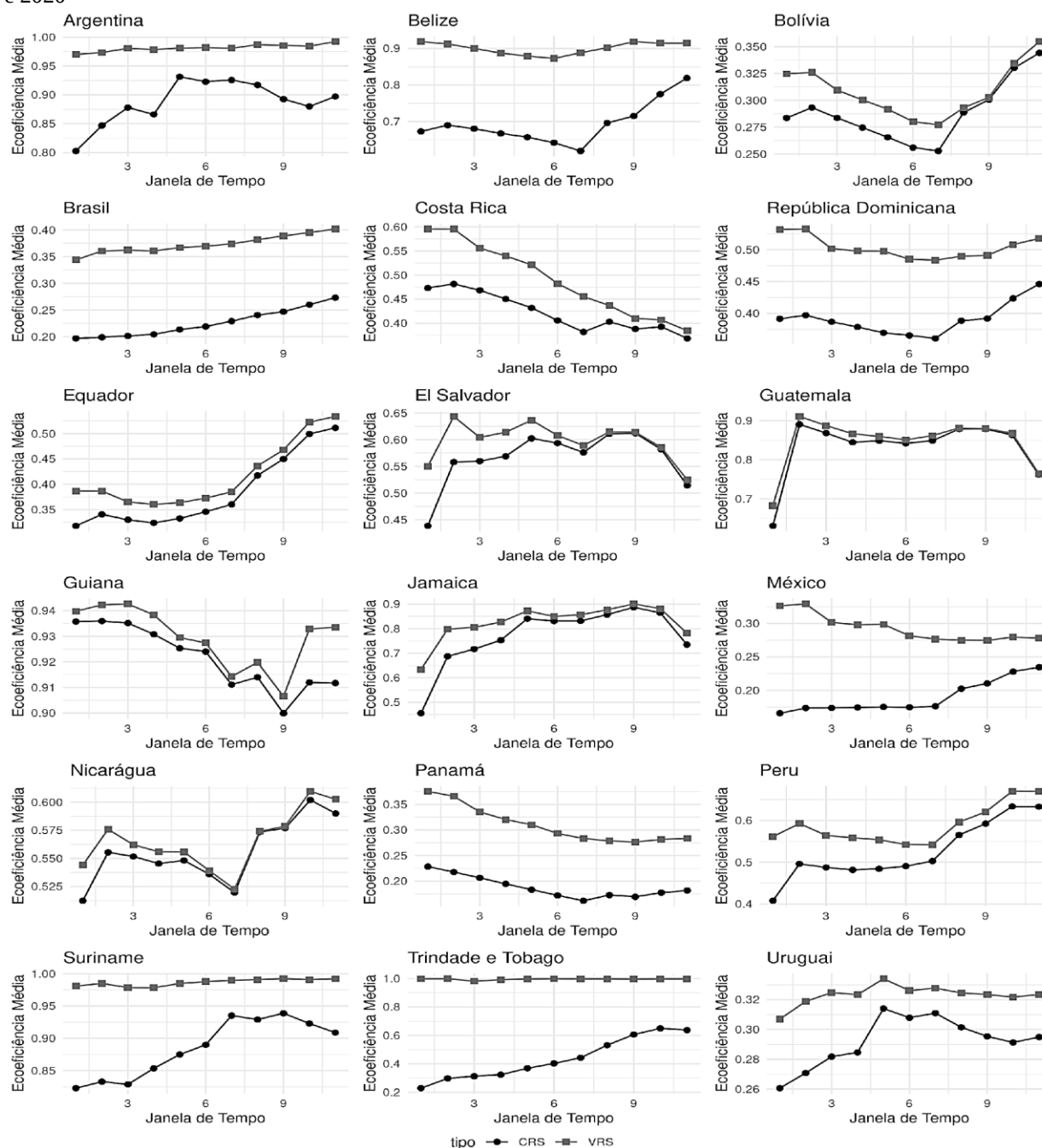
Complementando essa análise, a Figura 3 revela a trajetória da ecoeficiência agropecuária média para cada país da amostra ao longo do recorte de tempo elencado no presente estudo, permitindo uma avaliação longitudinal e comparativa dos modelos DEA empregados. A análise desagregada evidencia heterogeneidades expressivas tanto entre países quanto entre os modelos de avaliação, indicando distintos graus de sensibilidade à estrutura produtiva e à escala de operação dos países.

Observa-se que países como Argentina, Guiana, Jamaica, Suriname e Trindade e Tobago apresentaram consistentemente altos níveis de ecoeficiência, especialmente sob o modelo VRS, com escores próximos ou iguais a 1 ao longo de praticamente todas as janelas. Esta estabilidade sugere uma performance consolidada em termos de uso eficiente de recursos agropecuários e redução de impactos ambientais, além de uma operação próxima à fronteira eficiente, mesmo quando consideradas diferenças de escala.

Em Trindade e Tobago, destacam-se os avanços em eficiência energética, as reformas políticas e a integração de fontes renováveis, que contribuem diretamente para a sustentabilidade produtiva (Sadeek *et al.*, 2023). Segundo Castillo, Fuinha e Marques (2021), tanto Jamaica quanto Argentina mantêm desempenhos consistentes, sustentados por investimentos no turismo, com foco no turismo sustentável, no caso da Jamaica, e na geração de emprego produtivo, embora, para a Argentina, as evidências estejam mais concentradas em dados regionais. Guiana e Suriname, por sua vez, combinam políticas sustentáveis, gestão

florestal eficiente e valorização da biodiversidade, elementos que favorecem práticas produtivas de menor impacto ambiental e sustentam seus desempenhos superiores.

Figura 3: Trajetória temporal da ecoeficiência agropecuária média por país da América Latina e Caribe entre 2000 e 2020



Nota: janela 1 (2000-2010); janela 2 (2001-2011); janela 3 (2002-2012); janela 4 (2003-2013); janela 5 (2004-2014); janela 6 (2005-2015); janela 7 (2006-2016); janela 8 (2007-2017); janela 9 (2008-2018); janela 10 (2009-2019); janela 11 (2010-2020).

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Por outro lado, países como Bolívia, Brasil, República Dominicana, Panamá e Peru, além de apresentarem escores médios e baixos no modelo CRS, enfrentam também desafios estruturais específicos que limitam sua eficiência. No caso do Brasil, embora o potencial de melhoria seja elevado, obstáculos relacionados às práticas agrícolas, às políticas públicas e às

condições climáticas comprometem seu desempenho, conforme apontam Silva *et al.* (2022). Já Bolívia, Panamá e Peru apresentam potencial moderado, mas lidam com barreiras como insegurança fundiária, baixa inovação, dificuldades regulatórias, escassez de água e acesso limitado a insumos — fatores que acentuam as ineficiências técnicas e as deseconomias de escala observadas (Torrecillas *et al.*, 2023).

Em contrapartida, observa-se uma trajetória ascendente em países como Equador, Trindade e Tobago, Uruguai e Nicarágua, cujas curvas, especialmente no modelo VRS, indicam um processo de convergência à fronteira eficiente ao longo do tempo. Esse avanço na ecoeficiência resulta da combinação de práticas agroflorestais, inovação tecnológica e estratégias de economia circular (Yarzabal; Chica, 2021), além de uma expansão agrícola mais adaptada e da busca contínua por maior eficiência produtiva e econômica (Fariña *et al.*, 2024). Em linha com a literatura recente, infere-se que essas abordagens permitem aumentar a produção agropecuária, reduzindo, simultaneamente, os impactos ambientais e promovendo a sustentabilidade social, o que impulsiona a disseminação da ecoeficiência.

Por sua vez, países como Costa Rica, México e Panamá exibiram uma tendência de queda ao longo do período analisado, especialmente no modelo CRS, sugerindo uma possível deterioração da eficiência relativa ou um aumento nas ineficiências produtivas e ambientais. Segundo Benites *et al.* (2021), esse comportamento pode estar relacionado a mudanças nas políticas agrícolas, pressões ambientais ou transformações estruturais no setor agropecuário. Adicionalmente, nações como Belize, El Salvador e Guatemala apresentam trajetórias mais estáveis, com flutuações pontuais, porém sem tendências claras de melhora ou piora, especialmente no modelo VRS. De modo geral, observa-se um padrão recorrente entre os países dessa região, marcado por gargalos estruturais que dificultam seu desenvolvimento ao longo do tempo (Saini, 2023).

Em síntese, os resultados evidenciam que a ecoeficiência agropecuária na América Latina e no Caribe é altamente heterogênea entre os países e ao longo dos anos. A incorporação da dimensão da escala de operação, revela-se fundamental para uma avaliação mais realista das capacidades nacionais, mostrando que boa parte das ineficiências observadas está mais associada às deseconomias de escala do que, propriamente, a deficiências técnicas.

5. Considerações Finais

No âmbito do debate sobre desenvolvimento sustentável, a análise da ecoeficiência na agropecuária dos países latino-americanos e do Caribe, de 2000 a 2020, evidenciou avanços importantes, embora ainda imperfeitos. A busca por práticas que conciliem produtividade e sustentabilidade tem despertado o interesse de pesquisadores, formuladores de políticas e

produtores, motivando a adoção de tecnologias sustentáveis e a implementação de políticas públicas voltadas à melhoria da eficiência no uso dos recursos naturais. Nesse contexto, percebe-se que alguns países da região vêm avançando na adoção dessas práticas, mas ainda há um caminho a percorrer para que o setor seja realmente mais eficiente e sustentável.

A análise dos dados mostrou que a modernização tecnológica, associada ao apoio institucional e à diversificação de práticas agrícolas, contribuiu para melhorias na ecoeficiência. Países como o Brasil, México e Argentina apresentaram melhores índices nesse sentido, embora os desafios permaneçam, sobretudo relacionados à degradação ambiental, às mudanças climáticas e à insuficiência de incentivos econômicos para adoção de práticas sustentáveis em países com menor capacidade de investimento. Além disso, a heterogeneidade da região evidencia a necessidade de estratégias específicas para diferentes contextos, principalmente nas áreas mais vulneráveis ou de menor desenvolvimento.

Entretanto, há limitações relevantes na adoção de práticas sustentáveis que afetam a eficiência do setor. As externalidades ambientais, como o desmatamento e as emissões de gases de efeito estufa, continuam a ser uma preocupação central, sobretudo na região da Amazônia. Além disso, a dependência de insumos químicos, o uso excessivo de fertilizantes e pesticidas, e os efeitos das mudanças climáticas sobre as safras impactam negativamente o desempenho do setor agropecuário na região. Assim, sem uma intervenção contínua e eficaz, o progresso alcançado pode ser fragilizado em médio e longo prazo.

Para estudos futuros, recomenda-se aprofundar as análises sobre as causas específicas de baixa ecoeficiência em determinados países e regiões, considerando variáveis socioeconômicas, ambientais e institucionais. Investigações que avaliem o impacto de políticas públicas, incentivos econômicos e inovação tecnológica poderão fornecer insights capazes de orientar ações mais direcionadas e eficazes. Além disso, explorar as possibilidades de cooperação internacional e financiamento voltado à sustentabilidade pode ser fundamental para superar obstáculos financeiros e tecnológicos enfrentados na transição para uma agropecuária mais sustentável na América Latina e Caribe.

Referências

BANKER, R.D.; CHARNES, A.; COOPER, W.W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. **Manage. Sci.** v. 30, n.9, p. 1078–1092. 1984.

BULA, A. Importancia de la Agricultura en el Desarrollo Socio-Económico; Observatorio Económico Social. **Puente Académico**, n. 16; Informes del Observatorio. Universidad Nacional del Rosario: Santa Fe, Argentina. pp. 3–28. 2020.

CAIADO, R. *et al.* Towards sustainable development through the perspective of eco-efficiency: a systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 890-904. 2017.

CAIADO, R. G. G. *et al.* Measuring the Eco-efficiency of Brazilian Energy Companies using DEA and Directional Distance Function. **IEEE Latin America Transactions**, v. 18, n. 11, p. 1844-1852. 2020.

CEDDIA, M. The impact of income, land, and wealth inequality on agricultural expansion in Latin America. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 116, p. 2527 - 2532. 2019.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision making units. **European Journal Of Operational Research**, v. 2, n. 6, p. 429-444. 1978.

CHARNES, A.; COOPER, W. W. Preface to topics in data envelopment analysis. **Annals of Operations Research**, v. 2, p. 59-94. 1984.

COLUCCIA, B. *et al.* Assessing agricultural eco-efficiency in Italian Regions. **Ecological Indicators**, v. 116. 2020.

FANCELLO, G.; CARTA, M.; SERRA, P. Data Envelopment Analysis for the assessment of road safety in urban road networks: A comparative study using CCR and BCC models. **Case studies on transport policy**, v. 8, n. 3, p. 736-744, 2020.

FAO/OCDE - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION; ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT. OECD-FAO. **Agricultural Outlook 2022-2031**, OECD Publishing, Paris, 2022.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **State of the World's Forests 2020: Forests, biodiversity and people**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020.

FAR, H. T.; BAZAEE, A. Evaluating Efficiency of Nina Distribution Company Using Window Data Envelopment Analysis and Malmquist Index. **World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering**, v. 10, p. 2575-2584. 2017.

FARIÑA, S. *et al.* Milk production systems in Latin America and the Caribbean: Biophysical, socio-economic, and environmental performance. **Agricultural Systems**, v. 218, p. 103987, 2024.

FARREL, M. J. The measurement of productive efficiency. **J. Royal Statistical Society**, v. 120, p. 253-290, 1957.

GAMA, T. G. V. **Ensaio sobre ecoeficiência agropecuária no Brasil e na Amazônia Legal**. 2022. 77 f. Dissertação (Mestrado em Economia Rural) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

GRAESSER, J. *et al.* Cropland/pastureland dynamics and the slowdown of deforestation in Latin America. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 3, p. 034017, 2015.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. 2021.

LAL, R. A system approach to conservation agriculture. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 70, n. 4, p. 82A-88A, 2015.

- LI, Z.; SARWAR, S.; JIN, T. Spatiotemporal evolution and improvement potential of agricultural eco-efficiency in Jiangsu Province. **Frontiers in Energy Research**, v. 9, p. 746405, 2021.
- LIU, C. *et al.* Data driven eco-efficiency evaluation and optimization in industrial production. **Energy**, v. 224, p. 120170. 2021.
- LU, C. *et al.* The effect of forestry on energy efficiency in EU countries: A non-oriented dynamic slack-based data envelopment analysis. **Energy Science & Engineering**, v. 9, p. 1148 - 1159. 2021.
- MACIEL, H. M.; MACIEL, W. M.; GOMES, M. A. Brasil e a ecoeficiência: uma análise através do método envoltória com livre disposição. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 6, n. 10, p. 82049–82061, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n10-583.
- LIU, J. *et al.* A new framework of land use efficiency for the coordination among food, economy and ecology in regional development. **Science of the Total Environment**, v. 710, p. 135670, 2020.
- LUDENA, C. E. Agricultural Productivity Growth, Efficiency Change and Technical Progress in Latin America and the Caribbean. **IDB Working Paper**, n. 61. 2010. DOI: 10.2139/ssrn.1817296
- MAJID, S. *et al.* Eco-efficiency, environmental and sustainable innovation in recycling energy and their effect on business performance: evidence from European SMEs. **Sustainability**, v. 15, n. 12, p. 9465, 2023.
- MARTINS, M. A. **Ensaio de eficiência econômica e ambiental agrícola dos países componentes do BRICS**. 2022. 64 f. Dissertação (Mestrado em Economia Rural) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.
- MEZA, L. *et al.* A multiobjective DEA model to assess the eco-efficiency of agricultural practices within the CF + DEA method. **Comput. Electron. Agric.**, v. 161, p. 151-161. 2019. DOI: 10.1016/J.COMPAG.2018.05.037.
- MOUTINHO, V. *et al.* Assessing eco-efficiency through the DEA analysis and decoupling index in the Latin America countries. **Journal of Cleaner Production**. v. 205. p.512-524. 2018.
- MUNIZ, R. F. *et al.* Emprego do Data Envelopment Analysis (DEA) para estimar a eficiência escolar. **Ensaio: Avaliação e Políticas Públicas em Educação**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 114, p. 116-140, 2022.
- NGUYEN, T. P. T.; ROCA, E.; SHARMA, P. How efficient is the banking system of Asia's next economic dragon? Evidence from rolling DEA windows. **Applied Economics**, v. 46, n. 22, p. 2665–2684. 2014.
- NWANI, C. *et al.* Natural resources, technological innovation, and eco-efficiency: striking a balance between sustainability and growth in Egypt. **Environment, Development and Sustainability**, p. 1-32, 2023.
- OLIVEIRA, R. B. *et al.* Índice de Desenvolvimento Humano Sustentável: uma abordagem para blocos econômicos a partir de países selecionados. **Gestão & Regionalidade**, [S. l.], v. 40, p. e20248321, 2024.
- PANG, J. *et al.* Measuring Eco-Efficiency of Agriculture in China. **Sustainability**, v. 8, p. 1-15. 2016.

PERAFÁN, V. M. E. *et al.* O programa de desenvolvimento sustentável de territórios rurais. In: E. SABOURIN & C. GRISA (Orgs.). **A difusão de políticas brasileira para agricultura familiar na América Latina e Caribe**. Porto Alegre: Ed. Escritos, p. 89-114, 2018.

REIS, L. D. R. *et al.* Eficiência técnica da produção agrícola dos países da América Latina e do Caribe. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 58, p. e219416, 2020.

ROCHA, R. T.; REBELATTO, D. A. N.; CAMIOTO, F. C. Análise da eficiência de fatores nos países do BRICS a partir da aplicação da Análise por Envoltória de Dados. **Revista de Administração, Contabilidade e Economia da Fundace**, v. 6, n. 1, p. 68-128. 2015.

ROSA, M. F. *et al.* Valorização de resíduos da agroindústria. In: II Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais. Foz do Iguaçu-PR: SIGERA, v. 1, p. 98-105, 2011.

SABOURIN, E.; GRISA, C. **A difusão de políticas brasileiras para a agricultura familiar na América Latina e Caribe**. Porto Alegre: Escritos. 2018.

SADEEK, S. *et al.* Optimizing the sustainable energy transition: a case study on Trinidad and Tobago. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 192, p. 194-207, 2023.

SAIN, E. Accelerating agricultural innovation in Latin America and the Caribbean: The crucial role of public investment data in science. *Science*, v. 384, p. eadq4989. 2024.

SAINI, E. Leveraging investment in agricultural science, technology, and innovation in Latin America and the Caribbean. *Science*, v. 382, p. eadl0654 . 2023.

SCHNEIDER, S. A presença e as potencialidades da agricultura familiar na América Latina e no Caribe. **Redes: Revista do Desenvolvimento Regional**. Santa Cruz do Sul, RS, v. 21, n. 3, p. 11-43, 2016.

SIATKOWSKI, A *et al.* Uso de biodigestores em propriedades rurais para sustentabilidade e como ferramenta mitigadora de gases de efeito estufa (GEE). **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 51-71, 2022.

SILVA, É. N. Histórias entrelaçadas na América Latina: análise das conexões da resistência do MST e do EZLN à globalização da agricultura (1970-1990). **Revista Mosaico-Revista de História**, v. 17, n. 1, p. 237-253, 2024.

SILVA, J. V. B. *et al.* Ecoeficiência da produção agropecuária na Amazônia brasileira: fatores determinantes e dependência espacial. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 60, p. 1-21, 2022.

SILVA, L. C.; JUSTO, W. R.; CAVALCANTE, W. V. Eficiência na agropecuária das regiões intermediárias nordestinas em 2017: uma análise em dois estágios (com uso de DEA e Tobit). **Revista Brasileira de Economia de Empresas**, v. 22, n. 2, 2022.

SISTLA, S. *et al.* Agroforestry practices promote biodiversity and natural resource diversity in Atlantic Nicaragua. **PloS One**, v. 11, n. 9, p. e0162529, 2016.

TORRECILLAS, C.; FERNÁNDEZ, S.; GARCÍA-GARCÍA, C. Drivers to increase eco-efficiencies in Uruguay, Peru, and Panama. **Energy Policy**, v. 183, p. 113832, 2023.

VASCONCELLOS, F. C. F. As organizações internacionais e a evolução dos referenciais de segurança alimentar na América Latina e no Caribe. In: LE COQ, J. F. *et al.* (Orgs.). **Políticas públicas y sistemas alimentarios en América Latina**, 1. ed., Rio de Janeiro: E-papers, 2021. p. 115-140.

WANG, J. *et al.* Impacts of the integral development of agriculture and tourism on agricultural eco-efficiency: A case study of two river basins in China. **Environment, Development and Sustainability**, v. 26, n. 1, p. 1701-1730, 2024.

WANG, G. *et al.* Spatial analysis of agricultural eco-efficiency and high-quality development in China. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, p. 847719, 2022a.

WANG, X.; DING, H.; LIU, L. Eco-efficiency measurement of industrial sectors in China: A hybrid super-efficiency DEA analysis. **Journal of Cleaner Production**, v.229, p. 53-64. 2019.

WRI -WORLD RESOURCES INSTITUTE. **Historical GHG Emissions**. 2022.

Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=sector&chartType=percentage&end_year=2019§ors=total-excluding-lucf&start_year=1990> Acesso em: 29 mai., 2024.

XIAO, S. *et al.* Variable RTS in hierarchical network DEA: Enhancing efficiency in higher education systems. *Socio-Economic Planning Science*, v. 96, p. 102112. 2024.

YANG, L. *et al.* Estimating the regional eco-efficiency in China based on bootstrapping by-production technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 243, p. 118550. 2020.

YARZÁBAL, L. A.; CHICA, E. J. Microbial-based technologies for improving smallholder agriculture in the Ecuadorian Andes: Current situation, challenges, and prospects. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, p. 617444, 2021.

ZANATTA, L. **Uma breve história da América Latina**. Tradução Euclides Luiz Calloni. São Paulo: Cultrix, 2017.

ZHAO, Z. *et al.* Development strategy, technological progress, and regional environmental performance: empirical evidence from China. **Econ Change Restruct**, v. 56, p. 3701–3732. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10644-023-09548-y>.

ZHOU, Z. *et al.* China's urban air quality evaluation with streaming data: A DEA window analysis. **Science of the Total Environment**, v. 727, p. 138213, 2020.