



Agronegócio e sustentabilidade: uma análise comparativa multidimensional da eficiência brasileira no contexto internacional

"Agribusiness and Sustainability: A Multidimensional Comparative Analysis of Brazil's Efficiency in The Global Context"

Luís Eduardo Pacifici Rangel

Ministério da Agricultura e Pecuária/Universidade de Brasília, Distrito Federal (DF), Brasil

Armando Fornazier

Universidade de Brasília, Distrito Federal (DF), Brasil

Jorge Madeira Nogueira

Universidade de Brasília, Distrito Federal (DF), Brasil

Ricardo Carmona

Universidade de Brasília, Distrito Federal (DF), Brasil

GT4 – Meio ambiente, agroecologia, sustentabilidade e mudanças climáticas

Resumo: O artigo analisa a evolução do agronegócio brasileiro sob uma perspectiva multidimensional da sustentabilidade, combinando indicadores produtivos, ambientais e sociais em comparação internacional entre 1990 e 2021. Utiliza-se o índice Global Malmquist-Luenberger (GML), que ajusta a produtividade total dos fatores (PTF) às emissões de gases de efeito estufa (GEE). Após o Acordo de Paris, o Brasil apresentou desacoplamento entre produtividade e emissões (β caiu de 1,474 para 0,740) e desempenho superior em GML frente a países como EUA e França. O índice geral de sustentabilidade (IGS) reforça a posição intermediária-alta do país, apesar de deficiências na dimensão social. O ritmo recente da razão PTF/GEE ($\beta = 0,0522$) sugere que o Brasil pode superar a meta oficial de 1,35 até 2027. Existem avanços na eficiência sustentável medidos pelos parâmetros deste artigo, mas persistem desafios em equidade social e diversificação produtiva.

Palavras-chave:

Sustentabilidade; Agropecuária; Produtividade Total dos Fatores; Indicadores

Abstract: This article analyzes the evolution of Brazilian agribusiness through a multidimensional sustainability perspective, combining productive, environmental, and social indicators in an international comparison from 1990 to 2021. It applies the Global Malmquist-Luenberger (GML) index, which adjusts Total Factor Productivity (TFP) by greenhouse gas (GHG) emissions. After the Paris Agreement, Brazil showed a decoupling trend between productivity and emissions (β dropped from 1.474 to 0.740), with GML performance above countries like the U.S. and France. The General Sustainability Index (IGS) confirms Brazil's upper-intermediate position, despite lags in the social dimension. The current growth rate of the TFP/GHG ratio ($\beta = 0.0522$) suggests that Brazil may exceed the official 2027 target of 1.35. The findings highlight progress in sustainable efficiency, although challenges remain in social equity and productive diversification.

Keywords:

Sustainability; Agricultural; Total Factor Productivity; Indicator

1. Introdução

O agronegócio brasileiro desempenha um papel central na economia nacional, sendo responsável por uma parcela significativa do produto interno bruto (PIB), tendo crescido nas



últimas décadas e refletindo não apenas o aumento da produção e da produtividade, mas também a forte inserção internacional do setor. (Vieira Filho, 2022). No entanto, esse crescimento também acentuou desigualdades sociais, pressão sobre o capital natural e concentração fundiária (Manzatto et al., 2018; Balsadi et al., 2016).

Em particular, a literatura técnica brasileira destaca a importância da integração de variáveis ambientais aos modelos convencionais de análise da produtividade. Estudos recentes apontam que o progresso técnico brasileiro é o principal determinante do crescimento da Produtividade Total dos Fatores (PTF), mas alertam que esse avanço deve ser compatibilizado com metas ambientais claras (Gasques, 2025). Além disso, experiências comparadas a de países desenvolvidos evidenciam a necessidade de ajustar a metodologia para melhor capturar as externalidades ambientais negativas associadas à intensificação produtiva (Herman, 2024). Nesse sentido, a aplicação, neste trabalho, de metodologias como o índice de Malmquist-Luenberger orientado às emissões permite a incorporação de variáveis não desejadas (como GEE) e a comparação da eficiência ambiental entre países e ao longo do tempo, o que reforça a relevância da abordagem adotada.

O objetivo deste artigo é analisar a evolução do agronegócio brasileiro no contexto internacional, sob uma perspectiva multidimensional da sustentabilidade, com base em referências de indicadores agroambientais, produtivos e sociais por meio de índices de sustentabilidade. Avalia-se a *performance* do Brasil em um modelo baseado na PTF ajustada às emissões de GEE, comparando-a com a de outros países e com as metas definidas para a agropecuária sustentável.

2. Fundamentação teórica

A seguir são abordados os principais conceitos relacionados à sustentabilidade e à eficiência do agronegócio.

2.1 A evolução do agronegócio brasileiro

O agronegócio brasileiro passou por três grandes fases de desenvolvimento: agricultura tradicional, modernização estatal e consolidação como potência agroexportadora. Políticas públicas como o crédito rural e a pesquisa agropecuária permitiram ganhos expressivos de produtividade, especialmente em culturas como soja, milho e algodão. A expansão da fronteira



agrícola e o uso de tecnologias (biotecnologia, agricultura de precisão, entre outras) consolidaram o país como uma liderança global em *commodities*, ainda que com impactos sociais e ambientais significativos, como tensões fundiárias e pressão sobre biomas sensíveis. A sustentabilidade surge, assim, como eixo central das novas exigências internacionais e como desafio estratégico para o futuro do setor (Feres et al., 2020; Gasques et al., 2021; Vieira Filho, 2022; Britto et al., 2024).

O desafio da sustentabilidade emerge como um dos principais pontos de tensão para o futuro do agronegócio brasileiro. A pressão internacional por cadeias de valor livres de desmatamento e com menor pegada de carbono vem crescendo, especialmente em mercados como a União Europeia (OECD-FAO, 2022). A política agrícola brasileira passou por um “esverdeamento” com maior foco em critérios socioambientais para acesso ao crédito, como a regularidade ambiental e o Cadastro Ambiental Rural (CAR) (Marques et al., 2022).

A expansão do agronegócio brasileiro sobre novas fronteiras agrícolas, como o Matopiba (região composta por parte dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) ocorre em um contexto de crescente escrutínio internacional, especialmente por parte da União Europeia, que aprovou o Regulamento (UE) 2023/1115 (EUDR), que restringe a entrada de produtos associados ao desmatamento, ainda que legal no país de origem (Moura, 2025).

2.2 Indicadores de sustentabilidade ambiental

Os principais modelos de indicadores ambientais utilizam dados de emissões de GEE, uso de fertilizantes químicos, pesticidas e erosão do solo. Estudos recentes destacam a necessidade de integração entre domínios e maior capacidade de informar decisões políticas (Spânu et al., 2022). No Brasil, os padrões de uso da terra revelam dois vetores de pressão ambiental: intensificação via insumos e expansão extensiva sobre áreas naturais, sendo o GEE um reflexo central dessas dinâmicas (Gasques et al., 2021). Uma análise crítica da qualidade dos indicadores agroambientais utilizados na União Europeia aponta lacunas na cobertura temporal, falta de integração entre domínios e deficiências na comunicação com os tomadores de decisão, além da existência de fragilidades nos principais indicadores empregados (Spânu et al., 2022).

No caso brasileiro, há esforços crescentes no que diz respeito à incorporação de modelos de mensuração mais coerentes com a realidade tropical e com os desafios da sustentabilidade



multidimensional (Bragagnolo, 2022), como o uso do índice Global Malmquist-Luenberger (GML) para integrar a eficiência técnica da produção agropecuária com indicadores ambientais como as emissões de GEE, o que permite captar sinergias e compensações entre diferentes dimensões. Essa abordagem dialoga com o modelo analítico proposto pela FAO (2021), baseado em cinco princípios para sistemas alimentares sustentáveis e indicadores compostos que reflitam não apenas insumos e *outputs*, mas também resiliência, biodiversidade e bem-estar. Assim, a construção de indicadores compostos, multiescalares e territorializados é essencial para orientar políticas públicas coerentes com os objetivos de desenvolvimento sustentável e com as demandas de uma governança climática justa.

2.3 PTF e sustentabilidade econômica

A PTF é um indicador-chave para a avaliação da eficiência do agronegócio, pois sintetiza o uso combinado de capital, trabalho e terra, recentemente adicionado de tecnologia, uma vez que o crescimento da produção agrícola brasileira foi impulsionado mais pelo progresso técnico do que pela expansão de insumos (Gasques et al., 2022). O PTF mede a eficiência no uso conjunto de terra, capital e trabalho. No Brasil, entre 1975 e 2010, ela cresceu em média 3,6% ao ano, mais do que o registrado nos EUA (1,9%) (Fornazier & Vieira Filho, 2013). A incorporação de variáveis ambientais, como GEE, na mensuração da PTF visa ao aprimoramento de sua capacidade de orientar políticas para uma produtividade “verde” (Ferreira et al., 2024).

O governo federal incorporou, a partir do Plano Plurianual (PPA) 2024–2027, um indicador de sustentabilidade agropecuária com base na razão entre a PTF e as emissões da agropecuária (PTF/GEE), tendo adotado o ano de 2012 como base (=1,00). Essa decisão metodológica foi sustentada por estudos técnicos do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) e pela literatura recente sobre sustentabilidade produtiva (Gasques, 2022; Ferreira et al., 2024). A meta oficial estabelecida pelo PPA 2024–2027 é que esse indicador alcance 1,35 até 2027, o que implicaria um crescimento médio anual da produtividade maior do que o ritmo de emissões (1,09).

A PTF tem sido amplamente empregada como um indicador da eficiência com que os insumos são transformados em produtos na agricultura, revelando avanços importantes no desempenho do setor, especialmente em países em desenvolvimento, como o Brasil (Fuglie, 2023).



No entanto, a PTF convencional apresenta limitações importantes ao desconsiderar externalidades ambientais e sociais, como o uso excessivo de recursos naturais, emissões de gases de efeito estufa e perda de biodiversidade (Hertel et al., 2025). A ausência desses elementos compromete sua utilidade como métrica completa de sustentabilidade, o que exige abordagens complementares, como a PTF ajustada ambientalmente, que incorporem as fronteiras planetárias como critérios normativos.

2.4 Sustentabilidade social no agronegócio brasileiro

A modernização da agropecuária brasileira resultou em significativas mudanças no mercado de trabalho rural. Entre 1995 e 2013, a participação do setor agrícola no total de ocupações caiu de 16,4% para 8,6% (Oliveira et al., 2015), como reflexo de um maior nível de mecanização e redução da demanda por mão de obra, notadamente a de menor qualificação. Entretanto, não resultou, de forma homogênea, em inclusão social. A dualidade entre agricultura empresarial e familiar ainda marca o campo, tendo os pequenos produtores dificuldades de acesso a crédito, à assistência técnica e a mercados. Estudos recentes mostram que regiões com maior diversificação produtiva apresentam melhores indicadores de educação e renda (Britto et al., 2024), sugerindo que a complexidade produtiva é a chave para a sustentabilidade social.

Apesar dos avanços da modernização agropecuária, persistem desigualdades regionais e desafios estruturais. A região Nordeste, por exemplo, tem mostrado baixa eficiência produtiva e limitada adoção de tecnologias sustentáveis, o que resulta em menor renda e produtividade do trabalho (Gasques et al., 2021). Essa heterogeneidade regional aponta para a necessidade de políticas públicas direcionadas e adaptadas às condições locais, especialmente no tocante ao uso sustentável da terra, ao crédito rural e à assistência técnica (Feres et al., 2020).

3. Metodologia

A metodologia do estudo relatado neste artigo fundamenta-se na construção de base de dados (1990–2021) que inclui o Brasil e mais sete países selecionados, com variáveis extraídas de informações obtidas da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), do Economic



Research Service of the United States Department of Agriculture (USDA-ERS) e do Banco Mundial.

A seleção dos países para este estudo — Brasil, Polônia, México, EUA, França, Austrália e Colômbia — contempla diversidade geográfica, climática e estrutural da agropecuária, o que permite comparações relevantes com o caso brasileiro. França e Polônia foram escolhidas por representarem modelos influentes da agricultura europeia. EUA e Austrália compartilham com o Brasil características de grande escala territorial e produção extensiva. México e Colômbia oferecem contrapontos latino-americanos com dinâmicas agrícolas similares em termos climáticos e estruturais, os quais possibilitam uma análise comparativa mais contextualizada da sustentabilidade e produtividade agroambiental.

Devido às diferenças de escala entre os indicadores, aplicou-se padronização por *z-score* (Jolliffe, 2002; Hair et al., 2019), critério necessário para análises multivariadas, como análise de componentes principais (PCA), conforme descrito na Tabela 1, a seguir.

Tabela 1. Descrição das variáveis utilizadas nos modelos econométricos de avaliação da sustentabilidade na evolução do agronegócio entre os países selecionados no período de 1990 a 2021 (Fonte: FAOSTAT, ERS/USDA, ILOSTAT, Banco Mundial, UNFCCC).

Variável	Tipo		Fonte	
Área agrícola e área colhida	Contínua	Hectares (ha)	FAOSTAT	Superfície dedicada à produção agropecuária, considerada como insumo produtivo
Produção estimada	Contínua	Toneladas	FAOSTAT	Soma total da produção agropecuária (grãos e pecuária)
Capital fixo	Contínua	US\$ mil	FAOSTAT	Capital fixo agropecuário: máquinas, construções, etc.
População rural e urbana	Contínua	Habitantes	FAOSTAT / Banco Mundial	Número de pessoas vivendo em áreas rurais
GEE da Agropecuária LULUCF	Contínua (bad output)	Toneladas de CO ₂ eq	FAOSTAT / UNFCCC	Emissões totais de GEE oriundas da agropecuária



PTF	Contínua (índice)	Índice base 2015 = 100	USDA- ERS	PTF na agropecuária
Agrotóxicos	Contínua (input)	Toneladas	FAOSTAT	Volume total de defensivos agrícolas utilizados
Fertilizantes	Contínua (input)	Toneladas de nutrientes (NPK)	FAOSTAT	Volume total de fertilizantes minerais aplicados
Trabalhadores na agropecuária e valor agregado	Contínua	US\$ constantes por trabalhador	ILOSTAT / FAOSTA	Número total de trabalhadores no setor agropecuário, valor agregado e gênero
Emissões de metano (CH ₄) e Óxido Nitroso (N ₂ O) da agropecuária	Contínua (<i>bad output</i>)	Toneladas de CH ₄ eq	FAOSTAT / UNFCCC	Emissões de metano ligadas à produção pecuária, manejo de resíduos e adubação nitrogenada e solos agrícolas

Tabela elaborada pelos autores.

Os índices de sustentabilidade foram agregados em três dimensões:

- Ambiental: emissão de GEE da agropecuária e do uso da terra, emissões de metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), uso de fertilizantes e pesticidas, área agrícola.
- Econômica: PTF, valor adicionado agrícola, PIB agrícola total e *per capita*.
- Social: emprego na agricultura (geral e feminino), população rural.

Cada índice foi construído como a média dos *z-scores* das variáveis disponíveis, por país e ano.

O índice global foi calculado como a média simples dos três componentes:

$$IS_{dt}^i = \frac{1}{n_d} \sum Z_{ijt}$$

(índice de sustentabilidade por dimensão)

$$IGS_{dt} = \frac{1}{3} (IS_{ambiental} + IS_{economico} + IS_{scial})$$



(índice global de sustentabilidade)

Na fórmula, i representa o país e t o ano. O índice global permite comparar o desempenho agregado de sustentabilidade entre os países ao longo do tempo.

A metodologia comparativa adotada baseia-se na padronização de emissões (GEE), na razão PTF/GEE e na integração de indicadores multivariados harmonizados nas dimensões ambiental, econômica e social. O painel foi construído conforme critérios de validade, decomposição e aplicabilidade a políticas públicas (ARCAGÖK, 2024), o Guia da OECD (Bureau, 2022) e o modelo de Chaudhary et al. (2018).

Para a mensuração da PTF ajustada às emissões, adotou-se o índice Global Malmquist-Luenberger (GML), que expande o índice de produtividade de Malmquist tradicional com a incorporação de *outputs* indesejados como variáveis de eficiência. O GML é especialmente adequado para avaliar a sustentabilidade da agropecuária, pois permite que se estime o crescimento da produtividade com base, simultaneamente, nos ganhos econômicos e nos impactos ambientais, como as emissões de gases de efeito estufa (GEE) (Chung et al., 1997).

No presente estudo, como aproximação empírica, o índice foi estimado por meio da razão entre o valor da produção agropecuária (*output* desejado) e as emissões de GEE (*output* indesejado), ambos normalizados pelos insumos totais utilizados, conforme a equação:

$$GML = \frac{Y/X}{B/X} = \frac{Y}{B}, \text{ com } X \neq 0$$

onde:

Y_{it} : = valor da produção agropecuária da unidade i no tempo t ;

B_{it} : = emissões totais de gases de efeito estufa;

X_{it} : i = insumos totais utilizados;

GLM_{it} : = índice de produtividade ajustado ambientalmente.

As análises estatísticas descritivas e comparativas foram realizadas com o *software* Jamovi (versão 2.4) e utilizadas rotinas em Python, com o apoio das bibliotecas Pandas, Seaborn e Matplotlib, para o processamento de dados em painel, assim como índice o índice GML foi



estimado com apoio da biblioteca PyDEA (Hunter, 2007, Jamovi Project, 2024; Mcckinney, 2024; Waskom. 2024; Amirbeagi, 2021).

4. Resultados e discussão

4.1 A relação entre PTF e emissões (GEE)

A análise por regressão linear da PTF evidencia desempenho superior do Brasil em relação à média de países como Colômbia, México e Polônia ($p < 0,001$). Ao incorporar GEE como variável explicativa, observou-se que o crescimento da PTF passou a ocorrer com menor intensidade de emissões, o que indica desacoplamento progressivo após 2015, como demonstrado no Gráfico 1, a seguir.

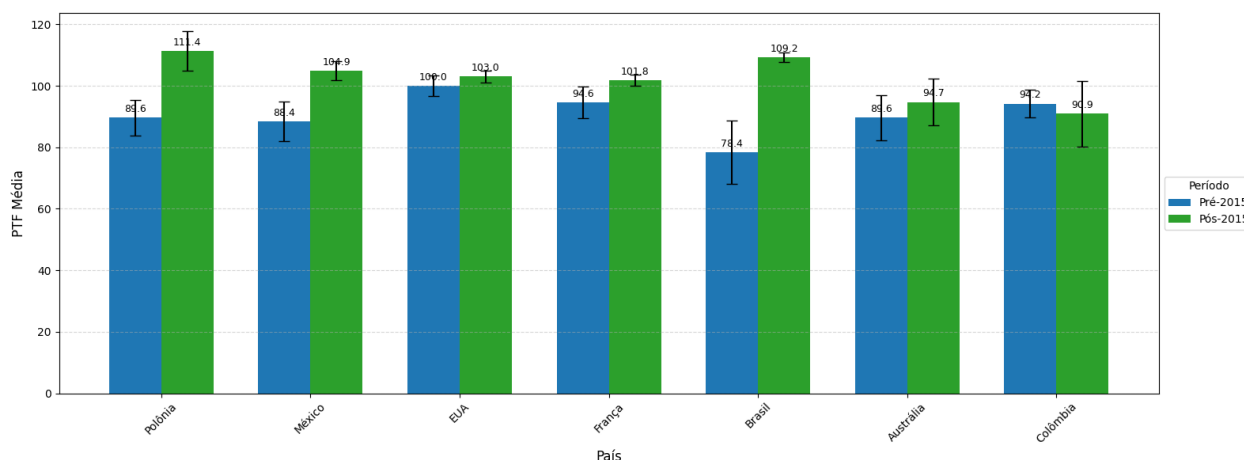


Gráfico 1: Barras comparativas da PTF média por país no período pré e pós-Acordo de Paris (2015).

A análise da relação entre a PTF e as emissões de GEE revela uma inflexão importante no comportamento do Brasil após a assinatura do Acordo de Paris (COP21) (Zhang, 2025). Esse comportamento de desacoplamento observado no Brasil é compatível com tendências recentes na América Latina, onde o progresso técnico tem sido o principal motor do crescimento da produtividade verde, como evidenciado por Li et al. (2024), que identificaram taxa média anual de 0,71% para o crescimento da PTF classificada como ambientalmente ajustada na região, com destaque para o papel da inovação tecnológica.



Antes de 2015 (COP21), verificava-se no Brasil forte correlação entre produtividade e emissões ($\beta = 1,474$; $R^2 = 0,662$). Após o Acordo de Paris, esse coeficiente caiu para 0,740 ($R^2 = 0,431$), o que sinaliza desacoplamento entre eficiência produtiva e impactos ambientais, tal como demonstrado no Gráfico 2, a seguir.

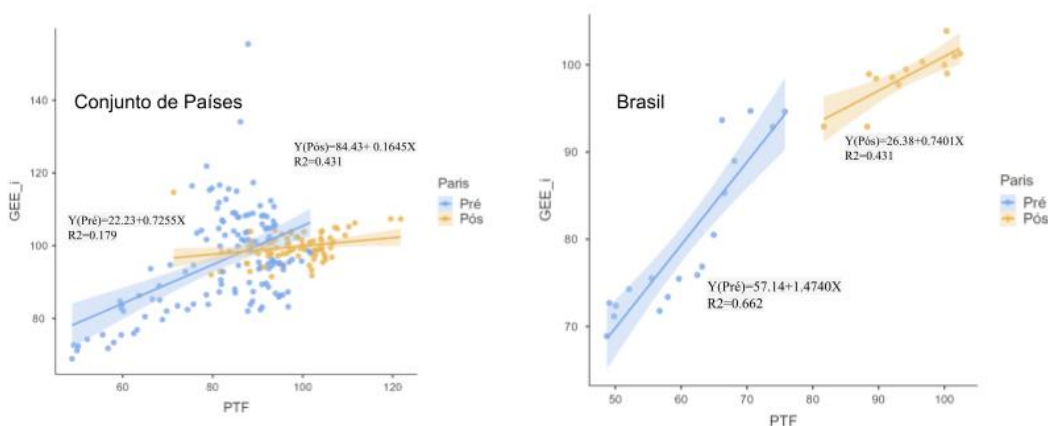


Gráfico 2. Comportamento de emissões de GEE em função da evolução da PTF entre a série histórica de 1990 a 2021, dos países analisados.

Em contraste com o Brasil, a média dos países analisados apresentou um comportamento inverso em relação ao intercepto da reta: enquanto as emissões iniciais (nível) aumentaram, o coeficiente angular caiu (de 0,725 para 0,164), com melhora no ajuste do modelo (R^2 de 0,179 para 0,431). A redução simultânea no nível de emissões e na sensibilidade das emissões ao crescimento da PTF está em consonância com os achados de Bragagnolo et al. (2022), que demonstraram que, ao se ajustar a PTF pelas emissões de CO₂, a eficiência do setor agropecuário brasileiro é significativamente reavaliada, o que evidencia os limites da análise baseada apenas em produtividade bruta.

4.2 Índice global de sustentabilidade (IGS)

O IGS foi construído por meio de análise de componentes principais (ACP ou PCA), com base em variáveis produtivas, sociais e ambientais. Três componentes foram extraídos: o social (emprego, valor agregado, fertilizantes), o ambiental (emissões e insumos químicos) e o econômico



(produção e produtividade). A matriz apresentou um ajuste mediano ($KMO = 0,513$; $p < 0,001$), o que demonstra que um índice agregado deverá considerar variáveis ainda não exploradas neste estudo (Hongyu, 2018).

As cargas fatoriais obtidas por meio da PCA, com rotação varimax, aplicada a um conjunto de variáveis representativas da sustentabilidade agropecuária podem ser observadas na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2: Cargas fatoriais por componente e interpretação das dimensões da sustentabilidade.

	Componente			
	Social	Ambiental	Econômico	Singularidade
Área_Agrícola	0.923			0.1419
Área_colhida			0.852	0.2112
Producao_estim			0.924	0.1092
Produtividade	0.336			0.8752
GEE_Agricultura		0.953		0.0537
GEE_LULUCF		-0.866		0.2052
Agrotóxicos		0.637		0.5681
PTF			0.358	0.8017
Valor_Trabalhador (USD)	0.942			0.0744
Trabalhadores na agropecuária (%)	-0.863			0.1772
Trabalhadoras mulheres na agropecuária (%)	-0.845			0.2231
N2O	0.864	0.453		0.0372
CH4	0.664	0.616		0.1662
Fertilizantes	0.912	0.321		0.0653

Nota. Foi utilizada a rotação 'varimax'

(Tabela elaborada pelos autores)

A adequação da matriz foi confirmada pelo teste de esfericidade de Bartlett ($\chi^2 = 4761$; $p < 0,001$), e o índice KMO global (0,513), que, apesar de medíocre, indica suficiência para a análise neste trabalho, com destaque para variáveis de alta comunalidade. Com base nesses três componentes, foram construídos os índices temáticos de sustentabilidade econômica, ambiental e social, os quais, quando normalizados, compõem o IGS proposto neste estudo.



Como demonstrado na Tabela 3, a seguir, os resultados da ANOVA e dos testes *post-hoc* de Tukey indicam que o Brasil e a Colômbia apresentam desempenhos significativamente diferentes entre si e em relação à maioria dos países do grupo no que se refere ao IGS. A Colômbia destaca-se com valores médios mais baixos, significativamente diferentes de Brasil, EUA e Austrália ($p < 0,001$). O Brasil, por sua vez, não apresenta diferença estatisticamente significativa em relação aos EUA, apresentando os dois países desempenhos similares no índice agregado. Em relação à Polônia e ao México, os resultados demonstram uma homogeneidade estatística entre esses países e os países de desempenho intermediário, como Austrália e Colômbia. Já a França obteve o pior desempenho médio, com diferenças estatisticamente significativas em relação aos países de melhor resultado ($p < 0,001$).

Tabela 3: Teste *post-hoc* de Tukey IGS.

		Austrália	Brasil	Colômbia	EUA	França	México	Polônia
Austrália	Diferença média	—	-0.595	0.0396	-0.6306	0.144	-0.0627	-0.0515
	p-value	—	<.001	0.983	<.001	0.054	0.857	0.939
Brasil	Diferença média		—	0.6343	-0.0358	0.739	0.5321	0.5433
	p-value		—	<.001	0.990	<.001	<.001	<.001
Colômbia	Diferença média			—	-0.6701	0.105	-0.1023	-0.0911
	p-value			—	<.001	0.329	0.357	0.502
EUA	Diferença média				—	0.775	0.5679	0.5791
	p-value				—	<.001	<.001	<.001
França	Diferença média					—	-0.2069	-0.1957
	p-value					—	<.001	0.002
México	Diferença média						—	0.0112
	p-value						—	1.000
Polônia	Diferença média							—
	p-value							—

(Tabela Elaborada pelos autores)



Os gráficos de radar apresentados para os anos de 2000, 2008 e 2015, a seguir, ilustram a evolução da sustentabilidade nos países selecionados com base em três dimensões fundamentais: ambiental, econômica e social e permitem visualizar, em uma perspectiva integrada, o equilíbrio (ou a assimetria) entre os pilares da sustentabilidade para cada país em um dado momento do tempo.

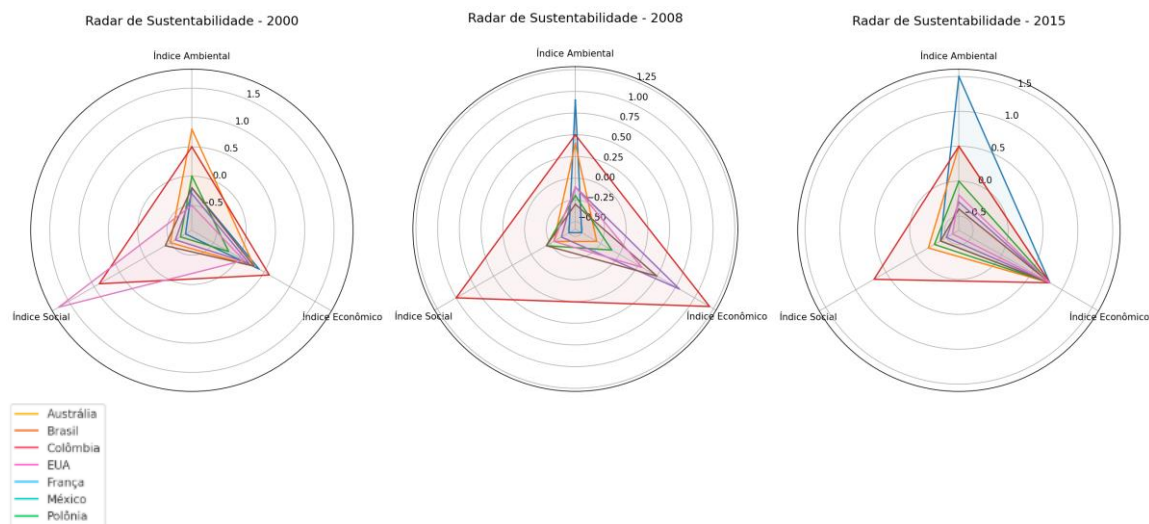


Gráfico 3. Comportamento das dimensões: ambiental, econômica e social do IGS nos anos de 2000, 2008 e 2015 para os países estudados. Gráfico elaborado pelos autores.

No Gráfico 3, observamos a evolução gradual, com melhora econômica e ambiental até 2015, mas sem avanços equivalentes no social, revelando persistente desequilíbrio entre dimensões da sustentabilidade.

Já em 2015, os resultados apontam para trajetórias divergentes: alguns países lograram avanços mais equilibrados, tendo apresentado desempenho consistente nos três eixos, o que indica progresso rumo a um modelo de sustentabilidade integrada; outros, no entanto, continuaram a apresentar concentração em apenas uma ou duas dimensões — por exemplo, crescimento econômico e parte do eixo ambiental — mas sem avanços equivalentes no social. Esse descompasso revela que, mesmo diante de melhorias ambientais e produtivas, persistem desafios relacionados a inclusão, equidade e condições de trabalho no setor agropecuário.

4.3 Índice GML



Para mensurar a eficiência sustentável da produção agropecuária no tempo, foi estimado o índice GML, com base no modelo de Bragagnolo et al. (2022). Utilizaram-se como *inputs* a terra, o trabalho, o capital, os fertilizantes e os defensivos; como *output* desejável, o valor da produção; e como *output* indesejável, as emissões de GEE. O índice resultante reflete o progresso técnico ajustado ao impacto ambiental, sendo valores superiores a 1 indicativos de melhoria sustentável.

A regressão do índice GML demonstrou que o valor da produção agropecuária exerce influência positiva e estatisticamente significativa sobre a sustentabilidade técnico-produtiva ($p < 0,001$), ao passo que o uso de fertilizantes apresenta impacto negativo significativo (coeficiente = $-0,2119$; $p = 0,037$), o que reforça a penalização pelo uso intensivo de insumos químicos. Embora o coeficiente associado às emissões de GEE ($-0,0213$) não tenha se mostrado estatisticamente significativo ($p = 0,367$), sua direção negativa está alinhada à lógica do modelo Malmquist-Luenberger, que incorpora externalidades ambientais como "*bad outputs*" (Tabela 4).

Tabela 4. Coeficientes do Modelo do GML ($R = 0.906$ e $R^2 = 0.821$)

Preditor	Estimativas	Erro-padrão	t	p
Intercepto ^a	-7.2323	2.2014	-3.285	0.001
Output_Prod_USD	0.6411	0.1303	4.921	<.001
Output_GEE_tCO2eq	-0.0213	0.0236	-0.904	0.367
Input_Terra_ha	0.1072	0.3078	0.348	0.728
Input_Trabalho_Pessoas	-0.1475	0.0879	-1.678	0.096
Input_Capital_USD	-0.1051	0.0768	-1.368	0.174
Input_Fertilizante_ton	-0.2119	0.1004	-2.111	0.037
Input_Defensivos_ton	0.0189	0.0418	0.451	0.652
País:				
Austrália – Brasil	0.2173	0.2767	0.785	0.434
Colômbia – Brasil	0.0641	0.2223	0.288	0.774
EUA – Brasil	0.1620	0.2812	0.576	0.565
França – Brasil	-0.2106	0.2646	-0.796	0.427
México – Brasil	0.0450	0.2106	0.214	0.831
Polônia – Brasil	0.7163	0.3235	2.214	0.028

^a representa o nível de referência

(Tabela elaborada pelos autores)

Os resultados da Tabela 4 sugerem que o índice é sensível à presença de impactos ambientais, ainda que outros fatores — como insumos — tenham maior peso explicativo na



variância do GML. Os testes t para comparação entre países não indicaram diferenças estatisticamente significativas entre Brasil e países como Austrália, EUA ou França ($p > 0,4$), mas revelaram desempenho significativamente superior do Brasil em relação à Polônia ($p = 0,028$). Esses achados reforçam a aderência do GML como métrica agregada de sustentabilidade técnico-produtiva, e são coerentes com estudos prévios, como Moreira et al. (2007), que identificam maior produtividade nas regiões brasileiras com acesso à tecnologia e menor dependência de insumos químicos.

As análises revelaram que o Brasil apresenta média intermediária (2,11), mas com a maior variância entre todos os países (0,24), o que sugere heterogeneidade significativa entre anos ou regiões internas. A aplicação do teste de normalidade de Shapiro-Wilk mostrou que os dados de França e Polônia seguem distribuição normal, enquanto os demais, incluindo-se o Brasil, não atendem ao pressuposto de normalidade ($p < 0,05$) — fator que deve ser considerado na escolha dos testes inferenciais.

A regressão linear com o índice GML como variável dependente confirmou que tanto a PTF quanto o país de origem são determinantes estatisticamente significativos do desempenho em sustentabilidade técnico-produtiva ($R^2 = 0,494$; $p < 0,001$). O coeficiente da PTF foi positivo ($\beta = 0,00756$), o que indica que ganhos de produtividade estão associados a melhorias no índice de sustentabilidade ajustado às emissões (Tabela 5).

Tabela 5: Coeficientes da regressão linear para o índice GML com PTF e país como preditores.

Coeficientes do Modelo – índice_GML R= 0.703 e R2=0.494				
Preditor	Estimativas (β)	Erro-padrão	t	p
Intercepto ^a	1.40444	0.12903	10.884	<.001
PTF	0.00756	0.00147	5.153	<.001
País:				
Austrália – Brasil	-0.16277	0.05010	-3.249	0.001
Colômbia – Brasil	0.15351	0.05266	2.915	0.004
França – Brasil	0.01310	0.05276	0.248	0.804
México – Brasil	-0.06970	0.05165	-1.349	0.179



Polônia – Brasil	0.13147	0.05216	2.520	0.013
USA – Brasil	-0.27559	0.05469	-5.039	<.001
^a representa o nível de referência				

(Tabela elaborada pelos autores)

No que se refere aos países, os resultados mostram que Colômbia ($\beta = 0,1535$; $p = 0,004$) e Polônia ($\beta = 0,1315$; $p = 0,013$) apresentaram desempenhos significativamente superiores ao Brasil, enquanto os EUA ($\beta = -0,2756$; $p < 0,001$) e Austrália ($\beta = -0,1628$; $p = 0,001$) tiveram desempenhos significativamente inferiores. França e México, por sua vez, não apresentaram diferenças estatisticamente significativas em relação ao Brasil.

Esses achados reforçam a interpretação de que o Brasil se posiciona em um patamar intermediário a alto no grupo de países analisados, com trajetórias de sustentabilidade técnico-produtiva mais próximas de países com características agrícolas comparáveis, como Colômbia e Polônia. Além disso, os resultados evidenciam a aplicabilidade prática dos indicadores agroambientais para orientar decisões políticas baseadas em evidências, contribuindo para o alinhamento gradual do Brasil a referências internacionais de sustentabilidade agrícola, como as discutidas por Salvan et al. (2022).

4.4 A relação entre os índices GML e IGS

O gráfico de barras a seguir (Gráfico 4), no qual são comparados os índices GML e IGS por país permite avaliar a eficiência produtiva ajustada às externalidades ambientais e a sustentabilidade em suas três dimensões clássicas. O índice GML é derivado de uma extensão do índice de Malmquist, incorporando a noção de “*bad inputs*”, enquanto o IGS é um índice composto e normalizado, calculado a partir dos pilares ambiental, econômico e social, refletindo o equilíbrio estrutural das práticas e condições de sustentabilidade nos países.

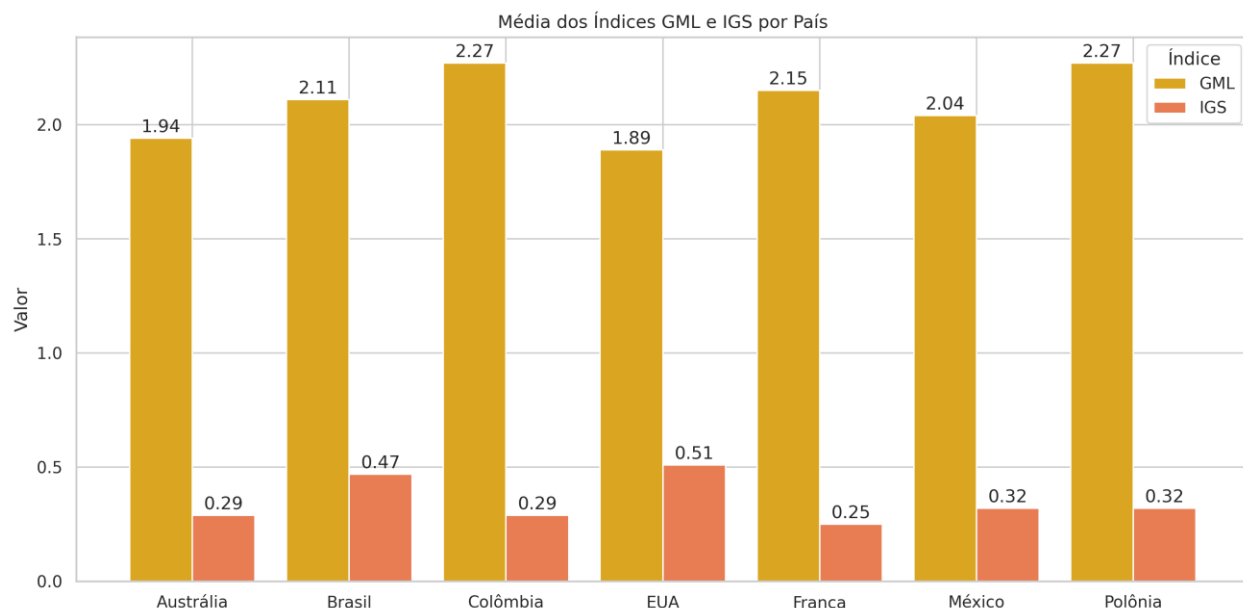


Gráfico 4: Comparação dos índices GML e IGS por país. (Gráfico elaborado pelos autores)

A comparação entre os dois índices mostra que, em alguns casos, há alta correspondência entre eles, o que indica que os países mais eficientes em termos de GML também são os mais sustentáveis de maneira geral. No entanto, as discrepâncias observadas em outros casos revelam que o progresso técnico-ambiental pode não estar sendo acompanhado por melhorias sociais ou institucionais, evidenciando assimetrias no modelo de desenvolvimento agropecuário.

5. Conclusão

O Brasil apresenta desempenho destacado no cenário internacional no que se refere à eficiência produtiva ajustada aos impactos ambientais, especialmente após a assinatura do Acordo de Paris. A combinação entre avanço tecnológico, maior produtividade e desacoplamento relativo das emissões de gases de efeito estufa revela uma trajetória positiva de transição para um modelo de agronegócio mais sustentável.

Essa tendência, alinhada com o esforço aplicado às políticas públicas, sugere que o ritmo recente de crescimento da produtividade em relação às emissões supera o que foi antecipado pelas metas oficiais. Apesar dos avanços verificados, a análise multidimensional evidencia que o equilíbrio entre as três dimensões da sustentabilidade ainda não foi plenamente alcançado, com



fragilidades sociais significativas e a heterogeneidade estrutural entre regiões e segmentos produtivos.

A adoção de indicadores compostos, como o GML, e nossa proposta, baseada na aplicação do IGS demonstram a real possibilidade de capturar a complexidade das interações entre produtividade e impactos ambientais e sociais. Nossa pesquisa evidencia que a construção de índices complexos como a proposta do IGS é bastante desafiadora e fica limitada às variáveis disponíveis. A construção de indicadores a partir de variáveis adequadas deve passar por um escrutínio detalhado, sendo validadas por especialistas para a formulação de políticas públicas mais eficazes e baseadas em evidências.

6. Referências

AMIRBEAGI, Sahand; RUZZENE, Andrea; FÄRE, Rolf. PyDEA: Data Envelopment Analysis in Python. Version 0.4.1. 2021. Disponível em: <https://pydea.readthedocs.io>. Acesso em: 10 maio 2025.

ARCAGÖK, U. Review of the Environmental Performance Index (EPI): Methods, Constraints and Recommendations. *Istanbul Management Journal*, v. 96, p. 59–73, 2024. DOI: 10.26650/imj.2024.96.1403313.

BALSADI, Otavio Valentim; DEL GROSSI, Mauro Eduardo. Trabalho e emprego na agricultura brasileira um olhar para o período 2004–2014. *Revista de Política Agrícola*, v. 25, n. 4, p. 82-96, 2016.

BRAGAGNOLO, Cassiano; TATEISHI, Henrique Ryosuke. Produtividade total dos fatores e emissões de dióxido de carbono na agricultura brasileira: uma medida de PTF ambientalmente sensível. *Economia Agrícola e do Meio Ambiente*, 2022.

BRITTO, Gustavo; ROMERO, João Prates. Desenvolvimento, mudança estrutural e complexidade econômica. 2024.

BUREAU, Jean-Christophe; JESUS, Anton. Agricultural Total Factor Productivity and the environment: A guide to emerging best practices in measurement. 2022. (OECD).

CHAODHARY, A.; GUSTAFSON, D.; MATHYS, A. Multi-indicator sustainability assessment of global food systems. *Nature Communications*, [S.l.], v. 9, p. 848, 2018. DOI: 10.1038/s41467-018-03308-7.

CHUNG, Y. H.; FÄRE, R.; GROSSKOPF, S. Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach. *Journal of Environmental Management*, v. 51, n. 3, p. 229–240, 1997.



FERES, J. G.; FERREIRA, M. D. Sustentabilidade da agropecuária brasileira: o desafio da intensificação. In: VIEIRA FILHO, J. E. R.; GASQUES, J. G. (Org.). Uma jornada pelos contrastes do Brasil: cem anos de censo agropecuário. Brasília: Ipea, 2020. p. 341-349.

FERREIRA, H. R. et al. PTF ajustada à emissão de GEE como indicador de sustentabilidade produtiva: fundamentos e aplicações. IPEA, Texto para Discussão nº 2951, 2024.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). FAOSTAT: Statistics Database. Roma: FAO, [2024?]. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat>. Acesso em: 10 maio 2025.

FORNAZIER, Armando; VIEIRA FILHO, José Eustáquio Ribeiro. Heterogeneidade estrutural na produção agropecuária: uma comparação da produtividade total dos fatores no Brasil e nos Estados Unidos. Texto para Discussão, 2013.

FUGLIE, K. Accounting for Growth in Global Agriculture. Bio-based and Applied Economics, v. 4, n. 3, p. 221–254, 2015.

GASQUES, J. G. et al. Produtividade da agropecuária brasileira: desempenho recente e principais desafios. Textos para Discussão Ipea, n. 2755, 2021.

GASQUES, J. G. et al. Produtividade da agropecuária brasileira: metodologia de cálculo e análise dos resultados. Brasília: Ipea, 2022.

GASQUES, José Garcia et al. O Desenvolvimento do agronegócio em Mato Grosso. 2025.

HAIR, J. F. et al. Multivariate Data Analysis. 8th ed. Cengage Learning, 2019.

HERMAN, Emilia. Sustainable agriculture and its impact on the rural development in EU countries: A multivariate analysis. Land, v. 13, n. 7, p. 947, 2024.

HONGYU, Kuang. Análise Fatorial Exploratória: resumo teórico, aplicação e interpretação. E&S Engineering And Science, v. 7, n. 4, p. 88-103, 2018.

HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2D graphics environment. Computing in Science & Engineering, v. 9, n. 3, p. 90–95, 2007. Disponível em: <https://matplotlib.org>. Acesso em: 10 maio 2025.

INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION (ILO). ILOSTAT Database. Genebra: ILO, [2024]. Disponível em: <https://ilostat ilo.org>. Acesso em: 10 maio 2025.

IPCC. 2022 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022.

JAMOVI PROJECT. Jamovi (Version 2.4) [Computer software]. 2023. Disponível em: <https://www.jamovi.org>. Acesso em: 10 maio 2025.

JOLLIFFE, I. T. Principal Component Analysis. Springer Series in Statistics, 2002.

LI, Tianxiang; ORMEÑO-CANDELARIO, Vanessa; CHEN, Xueli. Assessing Agricultural Green Total Factor Productivity in Latin America. Agribusiness, 2024.



MANZATTO, C. V. et al. Agricultura de baixo carbono: uma estratégia sustentável para o Brasil. Embrapa, 2018.

MARQUES, Marta Inez Medeiros. Financiamento Ambiental, Mudanças Climáticas e o Agronegócio no Brasil. MIOLA, IZ et al. Finanças Verdes no Brasil: perspectivas multidisciplinares sobre o financiamento da transição verde. São Paulo: Blucher, p. 143-170, 2022.

MCCKINNEY, Wes. pandas: powerful Python data analysis toolkit. Version 2.2.1. 2024. Disponível em: <https://pandas.pydata.org>. Acesso em: 10 maio 2025.

MOURA, Aline Beltrame de. *Brazil–EU under the EUDR: Shaping Global Sustainability and Trade*. Anuario Colombiano de Derecho Internacional, Bogotá, v. 18, p. 1–26, 2025. DOI: <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/acdi/a.15067>.

OECD-FAO Agricultural Outlook 2022-2031. OECD Publishing, 2022.

OLIVEIRA, Régis Borges; HOFFMANN, Rodolfo. Evolução do emprego e dos salários na agricultura brasileira, 1995 a 2013. 2015.

SALVAN, Michele Giuseppe et al. Agri-environmental indicators: A selected review to support impact assessment of new EU green deal policies. *Agronomy*, v. 12, n. 4, p. 798, 2022.

SPÂNU, S. et al. Comparative analysis of agri-environmental indicators: EU, OECD and FAO. *Ecological Indicators*, v. 135, 2022.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). GHG Data Interface. Bonn: UNFCCC, [2024]. Disponível em: <https://di.unfccc.int>. Acesso em: 10 maio 2025.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). Economic Research Service: International Agricultural Productivity. Washington, DC: USDA, [2024]. Disponível em: <https://www.ers.usda.gov/data-products/international-agricultural-productivity>. Acesso em: 10 maio 2025.

VIEIRA FILHO, José Eustáquio Ribeiro. Indicadores de produtividade e sustentabilidade do setor agropecuário brasileiro. 2022.

WASKOM, Michael et al. Seaborn: statistical data visualization. Version 0.13.2. 2024. Disponível em: <https://seaborn.pydata.org>. Acesso em: 10 maio 2025.

WORLD BANK. World Development Indicators. Washington, DC: World Bank, [2024?]. Disponível em: <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>. Acesso em: 10 maio 2025.

ZHANG, Jiahang. From Commitment to Action: The Paris Agreement and Corporate Emissions (2025) Available at SSRN 5343962.