

ECOEFICIÊNCIA NAS REGIÕES BRASILEIRAS: UMA ABORDAGEM TEMPORAL (2000-2020)

Maria Avyla Batista da Silva
Manoel Alexandre de Lucena
Eliane Pinheiro de Sousa

GRUPO DE TRABALHO: GT 4: Desenvolvimento rural, alimentação e consumo sustentável:

RESUMO

O conceito de ecoeficiência está diretamente relacionado ao desenvolvimento sustentável e é largamente adotado como estratégia para alinhar crescimento econômico com preservação ambiental. A importância da mensuração dos escores de ecoeficiência para formulação de políticas públicas mais eficazes tem sido consagrada na literatura. Em face da significativa diversidade socioeconômica e ambiental brasileira, evidencia-se que a busca por ecoeficiência adquire nuances regionais distintas. Diante dessas considerações, este estudo se propõe analisar a ecoeficiência nas cinco regiões geográficas brasileiras (Centro-Oeste, Nordeste, Norte, Sudeste e Sul) durante o período de 2000 a 2020. Para isso, utilizou-se o método de Análise Envoltória de Dados (DEA) com retornos constantes de escala (CRS) e variáveis de escala (VRS), orientação para inputs, por meio de análise de janela (WA) considerando como entradas a formação bruta de capital fixo, a área florestal e a quantidade de empregos formais e como saídas as emissões de CO₂ (indesejável) e o PIB (desejável). Os resultados indicam que a ecoeficiência não depende apenas dos fatores produtivos considerados, mas também das condições estruturais de cada região. Portanto, conclui-se que a diferença entre os modelos pode elucidar a crescente necessidade de políticas regionais adaptadas às especificidades de cada localidade, garantindo sustentabilidade de modo equitativo.

Palavras-chave: Escores de Ecoeficiência. Regiões Geográficas Brasileiras. Análise Envoltória de Dados. Análise de Janela.

1. INTRODUÇÃO

Desde a Revolução Industrial, a humanidade enfrenta o desafio de equilibrar o desenvolvimento econômico com a preservação ambiental, ao passo que essas atividades se intensificam, as mudanças climáticas tornam-se mais graves e a escassez de recursos se torna uma realidade, sendo urgente a necessidade de buscar alternativas sustentáveis (Caiado *et al.*, 2017). A esse respeito, a Organização das Nações Unidas (ONU), em 2015, lançou os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) como uma alternativa para superar esses desafios, que se caracterizam como uma agenda global para enfrentar questões ambientais, sociais e econômicas. Conforme Marques (2019), foram formuladas 17 metas, dentre elas, destaca-se o ODS 13: Ação Contra a Mudança Global do Clima.

Jacobi e Trani (2019) apontam que o intuito principal do ODS 13 é a redução das emissões de gases do efeito estufa (GEEs), sendo os principais responsáveis pelo alargamento do aquecimento global, e cujas concentrações de gases nocivos são aumentadas em virtude de algumas atividades que elevam cada vez mais as mudanças climáticas.

Apesar da importância de considerar os impactos antropológicos sobre o meio ambiente, o debate sobre sustentabilidade é de cunho recente. Debali (2010) aponta que os economistas clássicos negligenciaram a dimensão ambiental em suas análises, presumindo a inexauribilidade dos recursos naturais, enquanto os economistas neoclássicos passaram a tratar essa questão, incorporando a análise das externalidades em suas teorias. No entanto, a importância da dimensão ambiental ganhou destaque somente na década de 1980, impulsionada pelo surgimento de múltiplos conceitos de desenvolvimento, entre eles, o desenvolvimento sustentável (Oliveira *et al.*, 2024; Molina, 2019; Pessini; Sganzerla, 2016).

É nesse contexto, que emerge a ecoeficiência, uma ferramenta que integra eficiência econômica e ambiental. Conforme Silva *et al.* (2022), o conceito está diretamente relacionado ao desenvolvimento sustentável e é largamente adotado como uma estratégia para alinhar crescimento econômico com preservação ambiental, ou seja, a ecoeficiência tem relação direta ao conceito de sustentabilidade. Em outras palavras, há a busca pela promoção do desenvolvimento econômico sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem às suas próprias necessidades (Barbieri, 2020).

Diante da multidisciplinaridade do conceito de ecoeficiência e de suas aplicações empíricas em diversos setores econômicos como em vários recortes geográficos e em face das preocupações crescentes quanto aos impactos ambientais associadas à necessidade da continuidade da criação de valor das atividades econômicas, tem sido crescente o interesse sobre o tema em tela.

Ressalta-se que a ecoeficiência é orientada por alguns princípios fundamentais. Para Suzigan (2020), um dos principais é a redução do consumo de recursos, que envolve a utilização mais racional e eficiente dos recursos, ao passo que outro é a minimização de impactos ambientais, o que inclui a redução de emissões de poluentes, a diminuição da geração de resíduos e a conservação dos ecossistemas. Segundo Castiglione *et al.* (2021), a inovação tecnológica também desempenha um papel crucial, uma vez que possibilita a criação de processos e produtos mais sustentáveis.

A literatura internacional e nacional tem consagrada a importância da mensuração dos escores de ecoeficiência para nortear a formulação de políticas públicas mais eficazes que evidenciem as diferenças regionais (Olaya *et al.*, 2023; Bianchi; Valle; Tapia, 2020; Ren *et al.*,

2020) e que apontem seus efeitos sobre os mais diversos setores da economia (Caiado *et al.*, 2020; Xing; Wang; Zang, 2018). Ademais, de acordo com Maciel, Khan e Rocha (2018), a sua implementação enfrenta desafios, como a necessidade de mudanças culturais e organizacionais.

De modo específico, aborda-se o Brasil, cuja diversidade socioeconômica e ambiental é significativa, evidenciando que a busca por ecoeficiência adquire nuances regionais distintas, em virtude das suas especificidades tanto em termos de recursos naturais, desenvolvimento econômico e políticas públicas, como na presença de desafios e oportunidades particulares para o fomento da sustentabilidade (Suzigan, 2020). Dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2024) expressam que parte significativa das emissões brasileiras de GEEs são fomentadas pelo desmatamento das florestas. Desagregando essa análise às cinco grandes regiões brasileiras, o Centro-Oeste é responsável pelas maiores emissões, seguida pelo Norte, Sudeste, Nordeste e Sul, nesta ordem. Além disso, o *World Resources Institute* (WRI, 2024) aponta que a concretização de uma economia de baixo carbono ainda requer estratégias de longo prazo integradas às atividades econômicas.

Em face dessas considerações, torna-se relevante analisar a ecoeficiência nas cinco regiões geográficas brasileiras ao longo do tempo, especificamente entre os anos de 2000 a 2020. Para isso, utilizou-se a Análise Envoltória de Dados (DEA) considerando uma abordagem temporal, em outros termos, a análise de janela (*Window Analysis - WA*), que permite conhecer tendências e padrões da ecoeficiência para cada região. Dessa forma, busca-se evidenciar como a ecoeficiência evoluiu nas cinco regiões geográficas do Brasil, fornecendo informações para a formulação de políticas públicas que propiciem um desenvolvimento regional e sustentável mais equitativo.

O artigo está organizado em quatro seções, incluindo esta com as considerações introdutórias. A segunda detalha os procedimentos metodológicos adotados, explicitando o método analítico, variáveis consideradas e fontes dos dados. Na sequência, os resultados são mostrados e discutidos na terceira seção e, por último, reserva-se a quarta seção para as considerações finais.

2. METODOLOGIA

2.1 Método de análise

Com o intuito de mensurar os escores de ecoeficiência para as cinco regiões brasileiras (Centro-Oeste, Nordeste, Norte, Sudeste e Sul), empregou-se a ferramenta Análise Envoltória de Dados (DEA). A DEA foi desenvolvida por meio dos estudos de Charnes, Cooper

e Rhodes (1978) buscando mensurar a eficiência relativa de unidades de tomada de decisão (DMUs) (Silva *et al.*, 2022).

Ren *et al.* (2020) a definem como uma ferramenta analítica não paramétrica, baseada em programação linear, útil para estimar a eficiência (e ecoeficiência), pois determina a distância entre uma DMU e uma fronteira de produção, logo, o seu valor é relativo e corresponde à razão entre produto e insumo. Segundo essa definição, quanto mais próxima à fronteira, mais eficiente é a unidade. Rostamzadeh *et al.* (2021) elucidam que a principal vantagem do método é a flexibilidade na consideração de múltiplas entradas e saídas, em termos comparativos aos métodos paramétricos.

A Análise Envoltória de Dados (DEA) foi aplicada ao longo do tempo com diferentes especificações, destacando-se os modelos CCR e BCC, nomeados em referência aos seus formuladores: Charnes, Cooper e Rhodes (1978) e Banker, Charnes e Cooper (1984), respectivamente. Esses modelos clássicos se distinguem quanto aos retornos de escala assumidos: o modelo CCR corresponde ao modelo de Retornos Constantes de Escala (CRS – *Constant Returns to Scale*), enquanto o modelo BCC equivale ao de Retornos Variáveis de Escala (VRS – *Variable Returns to Scale*). Além disso, ambos podem ser formulados com orientação aos insumos ou aos produtos, a depender do objetivo da análise (Silva *et al.*, 2022).

O modelo clássico maximiza o quociente entre a combinação linear das saídas e das entradas, admitindo que nenhuma unidade de decisão apresente valor superior à unidade (Moreira; Ferreira; Mello, 2019). Por outro lado, conforme explicam Xiong *et al.* (2023), o modelo com retornos variáveis à escala inclui uma restrição de convexidade, garantindo que nenhuma unidade de decisão seja avaliada fora de sua escala de operação. Isso permite considerar retornos crescentes, constantes ou decrescentes à escala.

Ademais, admitindo as especificidades da base de dados empregada, que incorpora corte transversal e série temporal, tornou-se necessário considerar o fator tempo no cálculo do método DEA. A literatura considera o emprego da análise de janela (*Window Analysis - WA*) como uma das formas de incorporar as séries temporais na análise de ecoeficiência (Alkhars; Alnasser; Alfaraj, 2022). Ainda de acordo com tais autores, esse método é indicado para pequenas quantidades de DMUs, como é o caso do trabalho em tela.

Portanto, considerando os fatos supracitados, de modo particular, foram aplicados os modelos DEA-CCR-WA e DEA-BCC-WA, com retornos constantes e variáveis à escala, respectivamente, e orientação para os insumos. Ou seja, a ecoeficiência é alcançada por meio da redução do uso de insumos, mantendo a produção no mesmo nível ou aumentando-a sem consumir recursos adicionais (Rodrigues; Aquino; Thomaz, 2017).

2.2 Variáveis consideradas e fontes dos dados

Para a aplicação do método supracitado, as variáveis foram distribuídas em *inputs* e *outputs* para as cinco regiões brasileiras no recorte temporal de 2000 a 2020. A escolha deste período pode ser atribuída à disponibilidade dos dados para as cinco variáveis especificadas no Quadro 1, sendo consideradas como entradas a formação bruta de capital fixo, a área florestal e a quantidade de empregos formais, e, para as saídas, as emissões de CO₂ (indesejável) e o PIB (desejável). Constitui-se assim, uma função de produção que incorpora *proxies* para capital, terra e trabalho, desse modo, sendo possível visualizar quais DMUs conseguem manter constante a sua produção em concomitância com a redução dos insumos e a diminuição das externalidades sobre o meio ambiente.

Quadro 1: Variáveis elencadas para mensurar os escores de ecoeficiência das regiões brasileiras entre os anos de 2000 a 2020

Categoria	Variável	Descrição	Unidade de medida	Fonte
Entrada	fbkf	Formação bruta de capital fixo	Milhões de reais	IPEA (2024)
	area	Área florestal	Hectares	SNIF (2024)
	empregos	Postos formais de trabalho	Unidade	RAIS (2024)
Saída desejável	pib	Produto Interno Bruto das regiões	Milhões de reais	IBGE (2024)
Saída indesejada	co2	Emissão de gás carbônico	Toneladas	SEEG (2024)

Fonte: elaboração própria (2025).

A seleção de tais variáveis foi inspirada nos estudos de Gama (2022) e Moutinho e Madaleno (2021). Os dados para a primeira variável foram retirados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2024), enquanto a segunda foi colhida no Serviço Nacional de Informações Florestais (SNIF, 2024). Ademais, a terceira e a quarta variáveis foram coletadas, respectivamente, da Relação Anual de Informações Sociais (RAIS, 2024) e do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2024). Por fim, a última variável foi extraída do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA), do Instituto de Geografia e Estatística (IBGE, 2024).

No tratamento de *outputs* indesejáveis, considera-se que esses elementos negativos devem ser minimizados, assim como ocorre com os insumos no modelo DEA. Essa abordagem baseia-se na premissa de que a redução de impactos ambientais representa um fator de eficiência, alinhando-se à lógica da ecoeficiência. Dessa forma, ao incluir os *outputs* indesejáveis como *inputs*, por meio da técnica INP (*Input-Oriented Transformation of*

Undesirable Outputs), o modelo DEA penaliza as unidades que geram maiores quantidades desses elementos, incentivando práticas produtivas mais sustentáveis sem a necessidade de transformações matemáticas nos dados (Amirteimoori *et al.*, 2024).

Por fim, a implementação computacional dos modelos DEA foi realizada por meio da linguagem de programação *Python*, utilizando a biblioteca *pyStoNED*. Além disso, tanto as tabelas quanto os gráficos apresentados neste estudo foram desenvolvidos com o auxílio dessa mesma linguagem.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas das variáveis utilizadas na mensuração da ecoeficiência das regiões brasileiras entre os anos de 2000 e 2020, incluindo medidas de tendência central e dispersão. Por meio da interpretação desses valores, torna-se possível compreender a distribuição dos dados e identificar a presença de heterogeneidade entre as unidades analisadas.

Tabela 1: Estatísticas descritivas das variáveis utilizadas na mensuração da ecoeficiência das regiões brasileiras (2000-2020)

Variável	Máximo	Mediana	Mínimo	Média	DP	CV (%)
Trabalho	21446467	3675852	63751	6165351	6297687,72	102,15
Área	356641988	37169066	2131517	100181740	125265096,97	125,04
Capital	197588	102795	5161	99520	43249,83	43,46
PIB	4713000000	485600000	51710000	847500000	992302473,02	117,09
Emissões CO2	1094000000	383900000	200500000	444100000	213607491,58	48,10

Nota: DP e CV remetem ao desvio padrão e ao coeficiente de variação, respectivamente.

Fonte: Elaboração própria (2025).

Inicialmente, a comparação entre média e mediana fornece informações relevantes sobre a distribuição dos dados. Para as variáveis Trabalho, Área Florestal e PIB, observa-se que a média é consideravelmente superior à mediana, o que sugere distribuições assimétricas à direita. Por outro lado, para a variável Capital, a proximidade entre média e mediana indica uma distribuição mais simétrica, reflexo das políticas de crédito que promovem um equilíbrio distributivo, ainda que persistam diferenças na formação de capital entre as regiões. De maneira similar, as Emissões de CO2 também apresentam variações regionais, embora sigam padrões relativamente homogêneos.

No que se refere à análise do coeficiente de variação, observa-se, de forma geral, a dispersão relativa das variáveis em relação às suas respectivas médias. Variáveis como Área Florestal, PIB e trabalho (representada pela quantidade de empregos formais) exibem os maiores níveis de dispersão, com 125,04%; 117,09%; e 102,15%, respectivamente, sugerindo

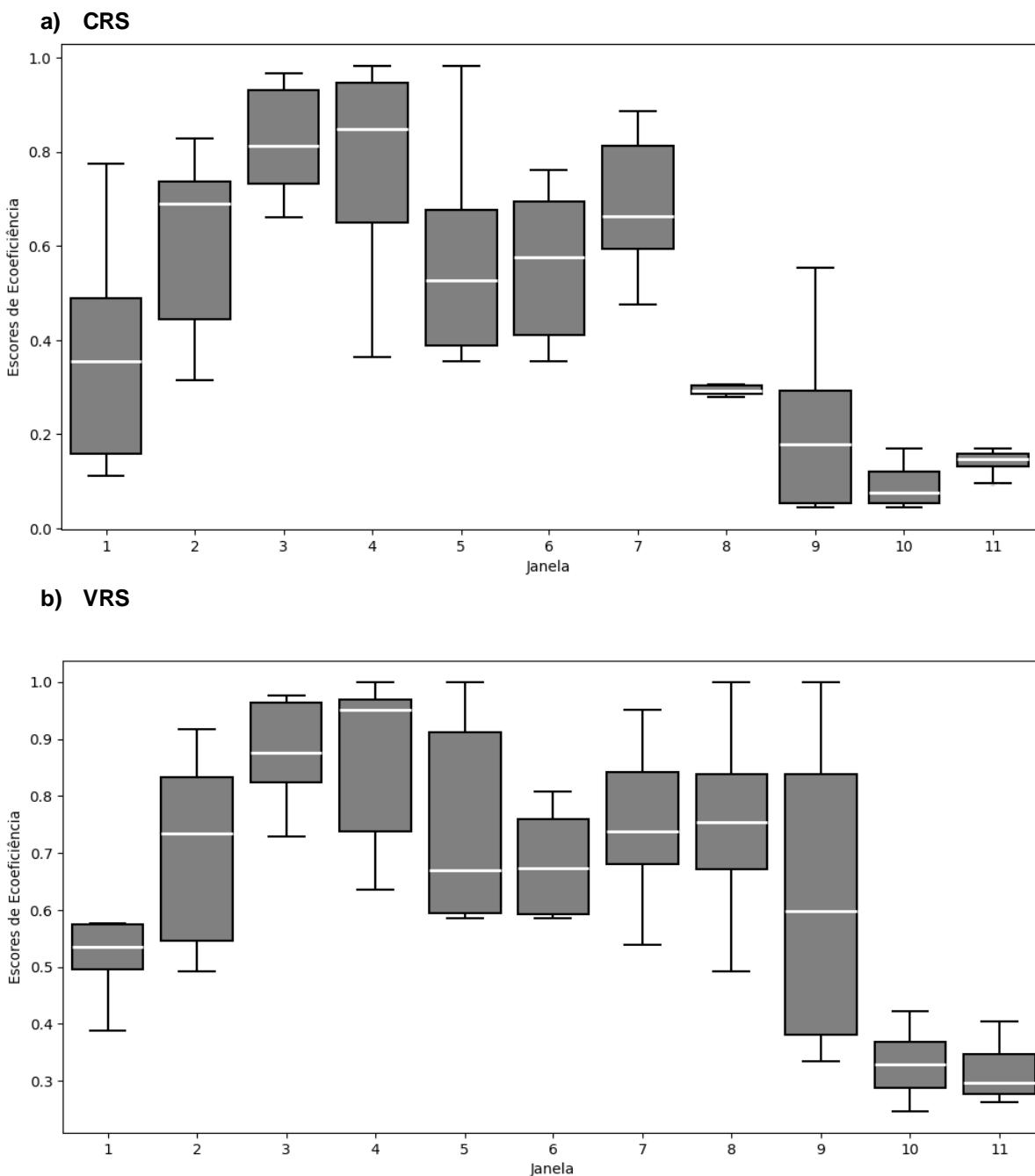
uma significativa heterogeneidade entre as regiões avaliadas. Em contrapartida, a variável Capital apresenta a menor dispersão, com 43,46%, evidenciando uma distribuição menos heterogênea, em termos comparativos com as anteriormente especificadas. Mesmo assim, como o coeficiente de variação excede a 30%, sinaliza elevada heterogeneidade, também presente nas emissões de CO₂, consideradas um *output* indesejável, com coeficiente de variação de 48,10%, indicando variações relevantes entre as unidades analisadas.

Esses fenômenos refletem a concentração desigual de recursos e a diversificação das atividades econômicas nas diferentes regiões do Brasil, impactando diretamente o processo de conversão de insumos em produtos. Nesse sentido, Silva, Corseuil e Russo (2022) explicam que as regiões com estados mais ricos e industrializados não apenas apresentam elevados índices de emprego, mas também um expressivo volume de produção econômica. Além disso, a distribuição desigual do território brasileiro distorce a alocação da área, uma vez que algumas regiões possuem extensões territoriais significativamente maiores, intensificando a disputa por espaço e dificultando o desenvolvimento rural sustentável (Silva; Santos Júnior, 2025). Ademais, apesar de a formação bruta de capital nas regiões brasileiras se mostrar constante na presente análise, verifica-se um declínio associado à ausência de estímulos, o que, segundo Silva (2024), reflete a falta de perspectivas de crescimento e diversificação das atividades econômicas, culminando em retração.

No que diz respeito às Emissões de CO₂, Arcanjo, Silva e Perobelli (2024) apontam que essas emissões revelam disparidades regionais significativas. Enquanto as regiões Sul e Sudeste apresentam cadeias produtivas mais sustentáveis e desempenham um papel econômico central, as regiões Centro-Norte, que dependem fortemente do setor primário, registram maiores emissões em decorrência da especialização agrícola e das mudanças no uso do solo. Esse cenário evidencia a interdependência entre crescimento econômico e sustentabilidade.

A análise de ecoeficiência, ilustrada na Figura 1, apresenta os escores de ecoeficiência ao longo das janelas temporais sob as suposições de retornos constantes de escala (CRS) e retornos variáveis de escala (VRS). De maneira geral, a distribuição desses escores revela variações significativas entre as janelas de tempo, com algumas atingindo altos níveis de ecoeficiência, com medianas que se aproximam de 1, enquanto outras registram desempenhos substancialmente inferiores.

Figura 1: Escores de ecoeficiência das regiões brasileiras entre os anos 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: elaboração própria (2025).

Especificamente, observa-se que, nas sete primeiras janelas do modelo com retornos constantes à escala, os escores de ecoeficiência tendem a apresentar um desempenho mais elevado e disperso, indicando uma variação considerável entre as unidades analisadas. Já a partir da janela 8, verifica-se uma queda acentuada nos escores, sugerindo um declínio no

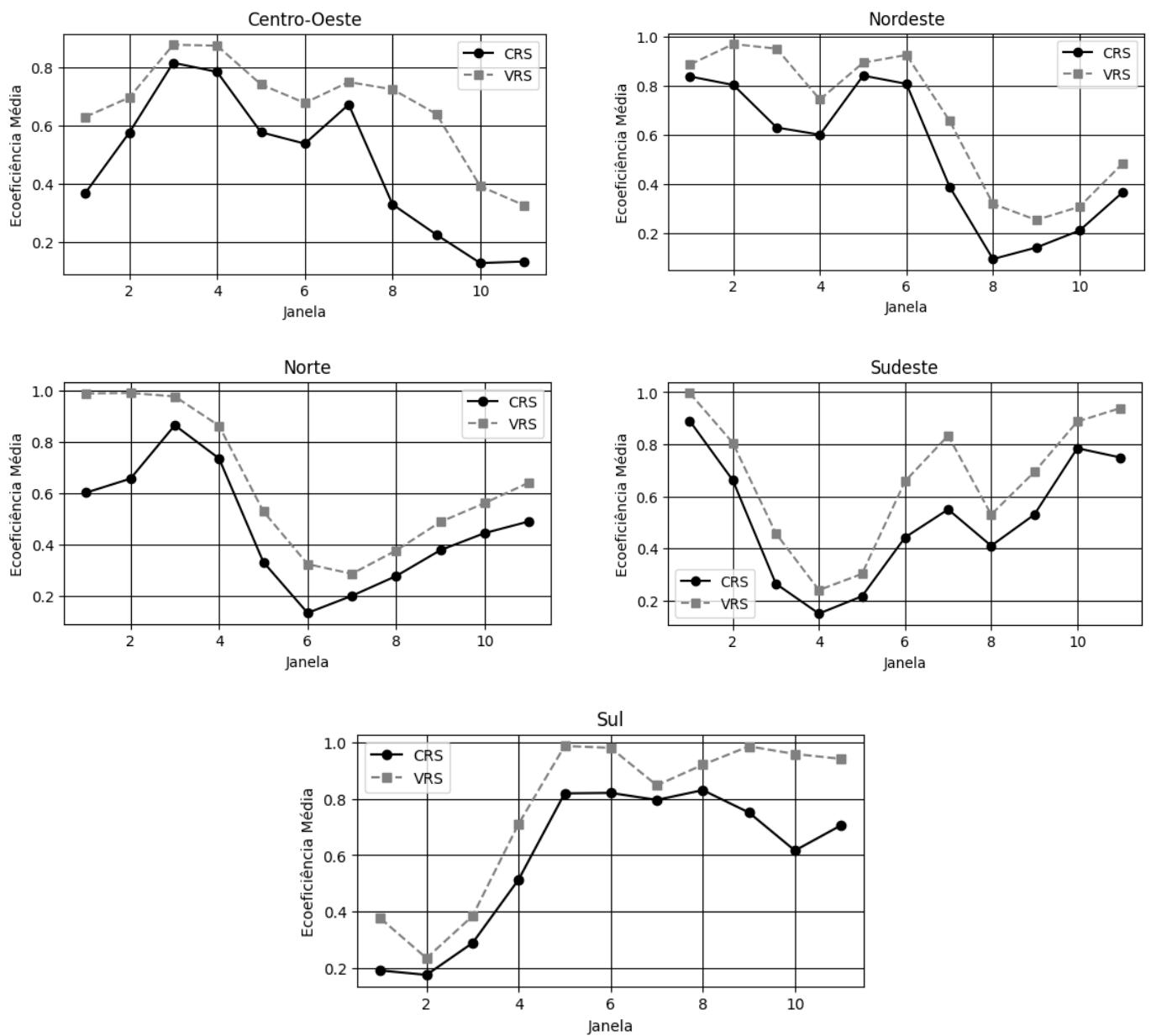
desempenho relativo das unidades. Esses fatos podem ser explicados pela exploração intensiva de recursos naturais, crises econômicas que reduziram investimentos sustentáveis, maior uso de fontes energéticas poluentes e avanço do desmatamento (Gama, 2022). Além disso, as fragilidades institucionais e mudanças estruturais regionais comprometeram a eficiência ambiental, evidenciando desafios na conciliação entre crescimento econômico e sustentabilidade (Miranda; Koeller; Lustosa, 2023).

Em outro plano, a Figura 1 também exibe os escores de ecoeficiência sob a hipótese de retornos variáveis de escala (VRS) ao longo das janelas temporais. Infere-se que, em razão da maior flexibilidade do modelo VRS, os escores tendem a ser superiores aos observados sob retornos constantes de escala (CRS) (Figura 1a).

Ocupando-se da análise dos resultados, nos primeiros períodos, há uma distribuição relativamente elevada e homogênea dos escores, com medianas variando entre 0,5 e 0,9. E, similarmente ao modelo CRS, a partir da janela 7, observa-se um declínio gradual nos escores de ecoeficiência, culminando em valores substancialmente menores nas últimas janelas. Além disso, a dispersão dos escores é maior em algumas janelas intermediárias, refletindo diferenças significativas no desempenho entre as unidades. Esse comportamento está alinhado com estudos que apontam que, apesar do aumento da produtividade da terra no Brasil, o crescimento das emissões e do uso de insumos limitou os ganhos em ecoeficiência (Suzigan, 2020). Somado a isso, a dispersão sugere impactos desiguais, com algumas unidades mais sustentáveis e outras enfrentando desafios na promoção do equilíbrio.

A Figura 2, por sua vez, sintetiza a evolução da ecoeficiência média por região, comparando os modelos CRS e VRS. No Centro-Oeste, a ecoeficiência CRS apresenta um crescimento inicial até a quinta janela, seguido de um declínio acentuado, enquanto VRS se mantém relativamente estável ao longo do período, sugerindo que a escala produtiva pode estar influenciando a eficiência. Em consonância Teixeira (2023) expõe que a região apresenta elevado potencial para turbinar a ecoeficiência, principalmente no setor agropecuário, cuja possibilidade de crescimento sustentável é impactada por políticas de crédito e fomento das atividades produtoras. Outrossim, o Nordeste exibe um comportamento similar, com escores mais elevados, fato elucidado pelo sucesso na implementação de políticas públicas voltadas ao fomento da atividade sustentável no campo, pois, dado o pioneirismo das atividades agropecuárias na formação do seu produto econômico, fora responsável por conferir, conforme dados do Censo Agropecuário de 2017 (IBGE, 2025), altas taxas de ecoeficiência às cidades dessa região.

Figura 2: Ecoeficiência média das regiões brasileiras entre os anos 2000 e 2020 considerando os modelos com retornos constantes e variáveis



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: elaboração própria (2025).

No Norte, observa-se uma queda abrupta na ecoeficiência CRS após a sexta janela, enquanto VRS permanece estável, evidenciando que a eficiência pode estar sendo impactada por restrições estruturais no modelo CRS. Estudos como os de Silva *et al.* (2024), ao abordarem a região Norte, explicam que o alcance da ecoeficiência pode ser feito por meio

da otimização entre entradas e saídas. Além disso, o Sudeste apresenta oscilações mais pronunciadas, refletindo variações na eficiência ao longo das janelas, o que pode estar relacionado às mudanças na produtividade regional. Por fim, o Sul apresenta uma tendência de estabilidade nos escores VRS, ao passo que os valores CRS caem nas primeiras janelas, sugerindo que a eficiência da região pode estar sendo limitada por fatores de escala. As regiões Sul e Sudeste, conforme destacado por Chiodini e Amarante (2018), apresentam os melhores desempenhos médios do país, equilibrando baixos níveis de ecoineficiência com altos escores de ecoeficiência, o que impacta diretamente a redução da desigualdade social nestas regiões.

Considerando os fatos supracitados, estes resultados põem em foco que a ecoeficiência depende não apenas dos fatores produtivos considerados, mas também das condições estruturais de cada região. A diferença entre os modelos pode elucidar a crescente necessidade de políticas regionais adaptadas às especificidades de cada localidade, garantindo sustentabilidade de modo equitativo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No caminho para o desenvolvimento sustentável, que envolve as dimensões econômicas, ambiental e social, a busca por ecoeficiência se constitui em uma medida fundamental. Em termos simples, a ecoeficiência se refere à busca por uma produção que ao minimize os impactos ambientais, ao mesmo tempo que o produto final é gerado. Com efeito, são comuns estudos que buscam aferir a ecoeficiência de uma conjuntos de unidades tomadoras de decisão (DMUs), que podem ser países, regiões, municípios, setores econômicos, dentre outros.

Nesse sentido, o presente estudo buscou avaliar a ecoeficiência das cinco grandes regiões brasileiras (Centro-Oeste, Nordeste, Norte, Sudeste e Sul) no período de 2000 a 2020. Com um conjunto de dados para proxies de terra, trabalho e capital, além de emissões de CO₂, para gerar o Produto Interno Bruto (PIB), utilizou-se a Análise Envoltória de Dados (DEA) com retornos constantes e (CRS) e variáveis (VRS) de escala, combinada com análise de janela (WA).

Os resultados mostraram que, de forma geral, a ecoeficiência média das janelas experimentou uma melhoria nos anos iniciais, mas que se reduziu ao longo tempo, terminando a série com escores baixos. Em relação às grandes regiões, o comportamento é similar, com crescimento da ecoeficiência, seguida por um leve declínio e recuperação, sendo a exceção a região Sul, que manteve escore acima de 0,6 a partir da janela 4.

Em conclusão, pode-se ratificar a importância da análise da ecoeficiência, sobretudo na formulação de políticas públicas visando o aumento da produção concomitante com a redução dos impactos ambientais. Nesse sentido, em face da heterogeneidade brasileira, em termos de áreas, o estudo regional contribui para uma visão macro de tais questões, sendo importante para o enfoque nacional.

As principais limitações desta pesquisa incluem à área de estudo, por se tratar de um enfoque agregado, ou seja, para as grandes regiões. Dessa forma, em estudos futuros, pode-se considerar amostras de municípios brasileiros, permitindo uma análise com maiores detalhes. Além disso, pode ser relevante incluir as metas das variáveis, ou seja, o quanto cada DMU precisa modificar em seus valores para alcance da fronteira ótima, bem como destacar as unidades de referência.

REFERÊNCIAS

- ALKHARS, M.; ALNASSER, A.; ALFARAJ, T. A Survey of DEA Window Analysis Applications. **Processes**. v. 10, n. 9, p. 1836. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10091836>.
- AMIRTEIMOORI, A.; CEZAR, A.; ZADMIRZAEI, M.; SUSAETA, A. Environmental Performance Evaluation in the Forest Sector: An extended Stochastic Data Envelopment Analysis Approach. **Socio-Economic Planning Sciences**. v. 94, p. 101943. 2024. DOI: 10.1016/j.seps.2024.101943.
- ARCANJO, G. M.; SILVA, J. C.; PEROBELLINI, F. S. Emissões regionais de CO₂: uma análise temporal sistêmica. In: ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA, 51., 2024, Brasília. **Anais** [...]. Brasília: SBE, 2023. Disponível em: <https://brsa.org.br/wp-content/uploads/wpcf7-submissions/32169/EMISSOES-REGIONAIS-DE-CO2-UMA-ANALISE-TEMPORAL-SISTEMICA.pdf>. Acesso em: 1 abr. 2025.
- BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. **Management Science**, v. 30, n. 9, p. 1078-1092. 1984. DOI: <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.30.9.1078>.
- BARBIERI, J. C. **Desenvolvimento sustentável**: das origens à Agenda 2030. Editora Vozes, 2020.
- BIANCHI, M.; VALLE, I.; TAPIA, C. Measuring eco-efficiency in European regions: evidence from a territorial perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 276, p. 123246. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123246>.
- CAIADO, R. G. G.; DIAS, R. F.; MATTOS, L. V.; QUELHAS, O. L. G.; LEAL FILHO, W. Towards sustainable development through the perspective of eco-efficiency - A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 890-904. 2017.
- CASTIGLIONE, C.; YAZAN, D.; ALFIERI, A.; MES, M. A holistic technological eco-innovation methodology for industrial symbiosis development. **Sustainable Production and Consumption**. v. 28, p. 1538-1551. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.09.002>.

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. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8).

CHIODINI, Marcos; AMARANTE, Janaína Gabrielle Moreira Campos da Cunha. Capacidades ecoeficientes e as interferências no desempenho social: um estudo das Unidades Federativas do Brasil. **Revista de Ciências da Administração**, [S. I.], v. 20, n. 52, p. 74–94, 2018. DOI: 10.5007/2175-8077.2018V20n52p74.

DEBALI, J. C. **Desenvolvimento sustentável**: evolução e indicadores de sustentabilidade. 2010. 90f. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas). Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2010.

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.

GOMES, F. P. **Curso de Estatística Experimental**. Piracicaba, SP: Nobel, 1990.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. Dados. **Ipeadata**. Disponível em: <http://www.ipeadata.gov.br/Default.aspx>. Acesso em: 20 de ago. de 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário 2017**: Resultados Definitivos. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/>. Acesso em: 01 de abr. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA). **Produção Agrícola Municipal**. 2024. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pib-munic>. Acesso em: 15 ago. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA). **Produto Interno Bruto dos Municípios - 2021**. 2024. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pib-munic>. Acesso em: 15 ago. 2024.

JACOBI, P. R.; TRANI, E. **Planejando o futuro hoje**: ODS 13, Adaptação e Mudanças Climáticas em São Paulo. São Paulo: IEE-USP, 2019.

MACIEL, H. M.; KHAN, A. S.; ROCHA, L. A. Índice de ecoeficiência e a regressão tobit: uma análise entre os anos de 1991 a 2012. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 49, n. 2, p. 27-42, abr./jun. 2018. DOI: <https://doi.org/10.61673/ren.2018.554>.

MARQUES, M. F. C. **Agenda 2030**: objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) da ONU: desafios ao desenvolvimento tecnológico e à inovação empresarial. 2019. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Qualidade e Ambiente) - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa. 2019.

MIRANDA, P.; KOELLER, P.; LUSTOSA, M. C. Ecoinovação no Brasil: o desempenho das empresas brasileiras no período 2000-2017. **Texto para Discussão**, n. 2892. Brasília: Ipea, 2023. (

MOLINA, M. C. G. Desenvolvimento sustentável: do conceito de desenvolvimento aos indicadores de sustentabilidade. **Revista Metropolitana de Governança Corporativa** (ISSN 2447-8024), v. 4, n. 1, p. 75-93, 2019.

MOREIRA, L. S.; FERREIRA, W. L.; MELLO, J. C. C. B. S. Cálculo de eficiência na alocação de mão de obra em estações ferroviárias da malha do Rio de Janeiro por meio da Análise Envoltória de Dados (DEA). **Transportes**, [S. I.], v. 27, n. 4, p. 24–35, 2019. DOI: 10.14295/transportes.v27i4.1644.

MOUTINHO, V.; MADALENO, M. Assessing Eco-Efficiency in Asian and African Countries Using Stochastic Frontier Analysis. **Energies**, v. 14, p. 1-17. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/EN14041168>.

OLAYA, W. R. C.; ARAÚJO, V. W. S.; OLIVEIRA, R. M. S.; ZANELLA, A. Avaliação da ecoeficiência no transporte público dos estados brasileiros: um estudo baseado na abordagem Benefit of the Doubt em Data Envolopment Analysis. **Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, v. 16, e16002, p. 1-18, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.4322/PODes.2023.002>

OLIVEIRA, R. B.; SOUSA, E. P.; RODRIGUES, A. S.; KHAN, A. S. Índice de Desenvolvimento Humano Sustentável: uma abordagem para blocos econômicos a partir de países selecionados. **Gestão & Regionalidade**, [S. I.], v. 40, p. e20248321, 2024. DOI: 10.13037/gr.vol40.e20248321.

PESSINI, L.; SGANZERLA, A. Evolução histórica e política das principais conferências mundiais da ONU sobre o clima e meio ambiente. **Revista Iberoamericana de Bioética**, n. 1, p. 1-14, 2016.

RELAÇÃO ANNUAL DE INFORMAÇÕES SOCIAIS – RAIS. Bases Estatísticas da RAIS e CAGED. **RAIS vínculos**. Disponível em: <https://bi.mte.gov.br/bgcaged/rais.php>. Acesso em: 15 de ago. 2024.

REN, W.; ZHANG, Z.; WANG, Y.; XUE, B.; CHEN, X. Measuring regional eco-efficiency in China (2003–2016): A “Full World” Perspective and Network Data Envelopment Analysis. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, p. 1-15. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17103456>.

RODRIGUES, M. V. S.; AQUINO, M. D.; THOMAZ, A. C. F.; Seleção de variáveis em Análise por Envoltória de Dados na análise da eficiência do instrumento da cobrança pela água bruta no setor do abastecimento público nas bacias cearenses por meio da ferramenta computacional SIAD (Sistema Integrado de Apoio à Decisão). **Revista DAE**, São Paulo, v. 65, n. 208, p. 5-20. 2017.

ROSTAMZADEH, R.; AKBARIAN, O.; BANAITIS, A.; SOLTANI, Z. Application of DEA in benchmarking: a systematic literature review from 2003–2020. **Technological and Economic Development of Economy**, v. 27, n. 1, p. 175-222. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3846/tede.2021.13406>.

SERVIÇO NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS - SNIF. **Florestas Naturais**. Disponível em: <https://snif.forestal.gov.br/pt-br/os-biomass-e-suas-florestas>. Acesso em: 21 de ago de 2024.

SILVA, J. V. B.; ROSANO-PEÑA, C.; MARTINS, M. M. V.; TAVARES, R. C.; SILVA, P. H. Ecoeficiência da produção agropecuária na Amazônia brasileira: fatores determinantes e dependência espacial. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 60, p. e250907. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.250907>

SILVA, S. P.; CORSEUIL, C. H. L.; RUSSO, F.. Trabalho e renda. **Políticas sociais: acompanhamento e análise**. Brasília, DF: IPEA, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/11540>. Acesso em: 01 abr. 2025.

SILVA, T. P. P.; SANTOS JUNIOR, A. A. A luta pela e na terra no Brasil: uma análise das primeiras ligas camponesas do Nordeste. **Revista Contexto Geográfico**, v. 10, n. 23, p. e102318704-e102318704, 2025.

SILVA, V. M. Nível de atividade. **Informações Fipe**, São Paulo, n. 525, p. 3, jun. 2024. Disponível em: <https://downloads.fipe.org.br/publicacoes/bif/bif525.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2025.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA – SEEG. **Emissões totais**. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/?highlight=br-net-emissions-by-sector-nci>. Acesso em: 15 ago. 2024.

SUZIGAN, L. H. **Ecoeficiência agropecuária nos municípios brasileiros**. 2020. 128 f., il. Dissertação (Mestrado em Agronegócios) -- Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

TEIXEIRA, W. S. **Ecoeficiência na agropecuária da região Centro-Oeste**: fatores determinantes. 2023. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2023.

WEI, C. K.; CHEN, L. C.; LI, R. K.; TSAI, C. H. Exploration of efficiency underestimation of CCR model: Based on medical sectors with DEA-R model. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 4, p. 3155–3160. 2011. DOI: [doi:10.1016/j.eswa.2010.08.108](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.08.108).

WRI Brasil -WORLD RESOURCES INSTITUTE. **Os países que mais emitiram gases de efeito estufa**. 2024. Disponível em: <<https://www.wribrasil.org.br/noticias/os-paises-que-mais-emitiram-gases-de-efeito-estufa#:~:text=A%20pandemia%20de%20Covid%2D19%20teve%20um%20efeito%20profundo%20nas,do%20Jap%C3%A3o%20no%20mesmo%20ano.>> Acesso em: 16 ago. 2024.

XING, Z.; WANG, J.; ZHANG, J. Expansion of environmental impact assessment for eco-efficiency evaluation of China's economic sectors: An economic input-output based frontier approach. **The Science of the total environment**, v. 635, p. 284-293. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.076>

XIONG, B.; ZHANG, Q.; TAO, X.; GOH, M. Benchmarking with quasiconcave production function under variable returns to scale: exploration and empirical application. **Expert Syst. Appl.**, v. 243, p. 122888. 2023. DOI: [10.1016/j.eswa.2023.122888](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122888).