

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGOCIOS**

WELLINGTON SILVA TEIXEIRA

**ECOEFIÊNCIA NA AGROPECUÁRIA DA REGIÃO CENTRO-
OESTE: FATORES DETERMINATES**

PUBLICAÇÃO: 218/2023

**Brasília/DF
JAN/2023**

2023

Wellington Silva Teixeira
Ecoeficiência na Agropecuária da Região Centro-Oeste: fatores determinantes.

000.000
N651p



WELLINGTON SILVA TEIXEIRA

ECONOMIA NA AGROPECUÁRIA DA REGIÃO CENTRO-OESTE: FATORES DETERMINANTES

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado do Programa de Pós-graduação Agronegócios (PROPAGA), da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília (UnB), como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Agronegócios.

Orientador(a): Prof. Dr. Karim Marini Thomé

**Brasília/DF
Janeiro/2023**

FICHA CATALOGRÁFICA

TEIXEIRA, W. S. **Ecoeficiência na Agropecuária da Região Centro-Oeste: fatores determinantes**. 2023, 71 f. Dissertação. (Mestrado em Agronegócio) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2023.

Documento formal, autorizando reprodução desta dissertação de mestrado/tese de doutorado para empréstimo ou comercialização, exclusivamente para fins acadêmicos, foi passado pelo autor à Universidade de Brasília e acha-se arquivado na Secretaria do Programa. O autor reserva para si os outros direitos autorais, de publicação. Nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada a fonte.

FICHA CATALOGRÁFICA

Teixeira, Wellington Silva

Ecoeficiência na agropecuária da Região Centro-Oeste: fatores determinantes./ Wellington Silva Teixeira; orientador Prof Dr Karim Marini Thomé - Brasília: 2023.

71 f

Orientador: Prof. Dr. Karim Marini Thomé.

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2023.

1. Agropecuária. 2. Ecoeficiência. 3. Produtividade. 4. Sustentabilidade. I Thomé, Karim Marini, orient. II. Universidade de Brasília. III. Mestrado em Agronegócios. IV. Título.

CDD ou CDU

WELLINGTON SILVA TEIXEIRA

**ECOEFIÊNCIA NA AGROPECUÁRIA DA REGIÃO CENTRO-OESTE:
FATORES DETERMINANTES**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado/Doutorado do Programa de Pós-graduação em Agronegócios da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília (UnB), como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Agronegócios.

Aprovada pela seguinte Banca Examinadora:

**Prof. Dr. Karim Marini Thomé – UnB/Propaga
(ORIENTADOR)**

**Prof. Dr. Carlos Rosano Peña - UnB/FACE
(EXAMINADOR EXTERNO AO PROGRAMA)**

**Prof. Dr. Thiago Moreira de Carvalho - UNICEUB
(EXAMINADOR EXTERNO À INSTITUIÇÃO)**

Brasília, 24 de janeiro de 2023

Primeiramente agradeço a Deus pela proteção e seus desígnios.

À minha filha, Maria Clara e esposa Heloisa, pelo amor e compreensão em relação a tantas vezes que tive que abdicar do nosso convívio familiar.

À minha família, que sempre me incentivou com uma torcida muito positiva.

Ao colega João Borges, cujo auxílio nos cálculos, engrandeceu bastante este trabalho

Ao meu orientador, professor Dr. Karim Marini Thomé, meus sinceros agradecimentos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronegócios da Universidade de Brasília (PROPAGA/UnB) pela oportunidade cursar este mestrado. Aos professores pelos inestimáveis conhecimentos compartilhados.

Ao apoio dos meus gestores na Companhia Nacional de Abastecimento e no Ministério da Agricultura.

Por fim, aos colegas do Propaga/UnB, que sempre estiveram na torcida um pelo outro, o que foi muitas vezes decisivo para a continuidade dos estudos.

RESUMO

Produzir alimentos e alimentar o mundo frente a uma demanda crescente enfrenta um paradoxo, já que os recursos disponíveis são limitados e cada vez mais escassos. Por outro lado, a combinação ótima dos fatores de produção contribui para a redução de custos. Assim, a busca pela eficiência, cada vez mais, tem se mostrado um fator chave no alcance da competitividade. Todavia, não basta somente ser eficiente, o desafio atual é agregar o fator ambiental ao processo produtivo e à análise da eficiência, ao que chamam de ecoeficiência. O objetivo deste trabalho foi analisar a ecoeficiência da agropecuária na Região Centro-Oeste do Brasil e seus fatores determinantes, de modo a identificar as melhores práticas, oferecendo informações e ferramentas para a tomada de decisões e implementação de políticas públicas voltadas à agropecuária. Trata-se de um estudo com abordagem quantitativa, de natureza aplicada e objetivos exploratórios. Utilizou-se como método a Análise Envoltória de Dados (DEA) com técnica de reamostragem (bootstrap) e regressão truncada para estimar indicadores de ecoeficiência não viesados e seus fatores determinantes. Os resultados demonstram que há espaço para a agropecuária na Região Centro-Oeste se tornar mais ecoeficiente, reduzindo insumos e emissões de gases de efeito estufa (GEE) e aumentando as receitas e a preservação ambiental, equiproporcionalmente, na ordem de 32,2%. O acesso ao crédito e à assistência técnica foram as variáveis exógenas de maior influência na eficiência econômico-ambiental da região. Esses resultados permitiram concluir que é possível economizar recursos e a pressão ao meio ambiente, com aumento da produção, tendo o financiamento da produção e a orientação técnica como ferramentas de grande impacto na promoção da ecoeficiência.

Palavras-chave: Agropecuária. Ecoeficiência. Produtividade. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Producing food and feeding the world in the face of growing demand faces a paradox, since available resources are limited and increasingly scarce. On the other hand, the optimal combination of production factors contributes to cost reduction. Thus, the search for efficiency, more and more, has been shown to be a key factor in achieving competitiveness. However, just being efficient is not enough, the current challenge is to add the environmental factor to the production process and to the analysis of efficiency, what they call eco-efficiency. The objective of this work was to analyze the eco-efficiency of agriculture in the Brazilian Midwest Region and its determining factors, in order to identify the best practices, offering information and tools for decision-making and implementation of public policies aimed at agriculture. This is a study with a quantitative approach, with an applied nature and exploratory objectives. Data Envelopment Analysis (DEA) was used as a method with resampling technique (bootstrap) and truncated regression to estimate unbiased eco-efficiency indicators and their determining factors. The results demonstrate that is possible for agriculture in the Midwest Region to become more eco-efficient, reducing inputs and greenhouse gas (GHG) emissions and increasing revenues and environmental preservation, equiproportionately, in the order of 32.2%. Access to credit and technical assistance were the exogenous variables that most influenced the region's economic-environmental efficiency. These results led to the conclusion that it is possible to save resources and pressure on the environment, with increased production, with production financing and technical guidance as tools of great impact in promoting eco-efficiency.

Keywords: Agriculture. Eco-efficiency. Productivity. Sustainability.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	06
1.1	Apresentação do tema	06
1.2	Descrição da Situação Problemática	08
1.3	Objetivo Geral	09
1.4	Objetivos Específicos	09
1.5	Justificativa	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
3	MÉTODOS E TÉCNICAS DE PESQUISA	20
3.1	Tipo e descrição geral da pesquisa	20
3.2	Caracterização da organização, setor ou área.....	27
3.3	População e amostra.....	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	57
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do tema

A agricultura brasileira exerce um importante papel socioeconômico ao prover alimentos para o abastecimento interno e ainda gerar excedentes que contribuem com o suprimento mundial. A produção nacional de grãos vem batendo recorde, ano após outro, e deverá atingir na safra 2021/22, cerca de 268,2 milhões de toneladas (CONAB, 2022). Para atingir esse recorde é necessário o emprego de diversos fatores de produção, como sementes, fertilizantes, agroquímicos, os serviços de mão de obra, dentre outros, que combinados, demonstram níveis de eficiência no uso de insumos para a geração de produtos.

Todavia, sabe-se que os recursos disponíveis são cada vez mais escassos e limitados frente a uma demanda crescente. Por outro lado, a combinação ótima dos fatores de produção contribui para a redução de custos. Assim, a busca pela eficiência, cada vez mais, tem se mostrado um fator chave no alcance da competitividade.

Dentre outros produtos, leite, carnes, cana-de-açúcar e florestas plantadas, juntamente com os grãos, movimentam a economia e elevam o Produto Interno Bruto (PIB). Além da incorporação de novas áreas, ganhos expressivos de produtividade ao longo de décadas de desenvolvimento e uso de novas tecnologias foram alcançados. Dentre as cinco regiões demográficas do Brasil, a Região Centro-Oeste responde por 43,5% da área plantada e 50,1% da produção nacional de grãos, desempenhando, portanto, papel relevante no cenário agropecuário nacional (CONAB, 2022). Predomina na Região Centro-Oeste o Bioma Cerrado, altamente adequado para a produção de grãos, o que o leva a experimentar desmatamentos para o plantio de grãos muito superiores aos verificados na Região Amazônica (SONG et al., 2021).

A região era explorada basicamente pela pecuária extensiva e agricultura de subsistência. Parte desse desempenho se deve aos incentivos fornecidos pelos governos militares na década de 1970, com o intuito de promover a ocupação das regiões Norte e Centro-Oeste. A pesquisa foi outro fator que contribuiu sobremaneira para que a agricultura pudesse se desenvolver de maneira tão forte na Região central do Brasil. Se de um lado a expansão da agricultura trouxe grandes benefícios à

economia do país, as externalidades negativas deste processo, como os impactos ao meio ambiente, não podem ser omitidas.

As emissões de gases de efeito estufa, perda da biodiversidade e deterioração dos ecossistemas são resultado dos desmatamentos para o plantio de grãos, impulsionado pelo aumento da demanda mundial por alimentos (SONG et al., 2021). Se por um lado a atividade econômica agroindustrial impulsiona a economia nacional, a degradação ambiental causada por essas atividades traz prejuízos ao meio ambiente. Entre 2008 e 2021 foram desmatados cerca de 131.231 km² de cerrado, sendo 30% dessa área concentrada na Região Centro-Oeste. No estado do Mato Grosso foram, no mesmo período, foram desmatados 20.490 km² do bioma amazônico (INMET, 2022).

De acordo com a plataforma do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito (SEEG Brasil), em 2020 a atividade agropecuária emitiu 190.345 mil toneladas de CO₂ na atmosfera, sendo em sua maioria decorrente de atividades de manejo de solo e fermentação entérica (SEEG, 2022). Portanto, os estudos de ecoeficiência trazem uma contribuição importante sob a perspectiva de desenvolvimento sustentável, incorporando os impactos ambientais em um arcabouço microeconômico da teoria da produção (SILVA et al., 2021).

Estudos reconhecem o conflito entre a expansão das fronteiras agrícolas e os ecossistemas naturais, contudo identificam benefícios ecossistêmicos proporcionados por sistemas consorciados de floresta, agricultura e pecuária (ALCON et al., 2020; ALVES-PINTO et al., 2017; DE SARTRE et al. 2016). Neste sentido, a ideia de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) surge como uma possibilidade de incentivar o uso sustentável da terra e seus recursos naturais através da transferência de recursos entre os atores sociais, o que é válido, sobretudo, para a Região Centro-Oeste que abriga parte do bioma amazônico, grande fornecedor de serviços ecossistêmicos ao mundo (SCHOMERS; MATZDORF, 2013).

De acordo com Pissarra et al. (2021), um modelo de PSA que reconhecesse a agricultura e pecuária, praticadas de forma sustentável, como fornecedoras de bens essenciais poderia estimar o custo da mudança de sistemas de produção intensivos para agroflorestais concomitantemente com a implantação das melhores práticas de manejo, integrando o resultado no valor do PSA. Esse valor compensaria os agricultores dispostos a mudar seus sistemas de produção para os mais sustentáveis,

permitindo a coexistência simbiótica de uma atividade econômica essencial e um ambiente saudável, assim como remuneraria os agricultores pelos altos custos de oportunidade financeira evitados pelo desmatamento (AGRAWAL et al., 2011; PISSARRA et al., 2021). Salnykov e Zelenyuk (2005) buscaram estimar a eficiência ambiental e preços sombra de poluentes de países em transição, propondo um método alternativo para valoração ambiental por meio de preços sombra de poluentes ambientais (CO₂, SO₂ e NO₂).

1.2 Descrição da Situação Problemática

Diferentemente da realidade importadora e dependente do mercado externo enfrentada no final do século XX, especificamente nos idos de 1960/70, o Brasil se apresenta atualmente como um importante *player* no mercado internacional. Em 2021 o total exportado com o agronegócio resultou em US\$ 120,59 bilhões, consolidando um recorde em valor (MAPA, 2022). Produtos como açúcar, soja, carnes e café são exportados para mais de 160 países ao redor do mundo.

As exportações em conjunto com a elevada demanda interna, e ainda associada às excelentes condições climáticas, à abundância de terras e água, além do avanço tecnológico, fomentaram a expansão do agronegócio e seus impactos ao meio ambiente, principalmente no que diz respeito ao uso dos mananciais, aplicação de agrotóxicos e fertilizantes, emissões de gases de efeito estufa, desmatamento e queimadas (ASSAD et al., 2012).

Outro ponto nevrálgico, enfrentado pelo agronegócio, refere-se a contínua elevação dos custos de produção, motivada por fatores como a pandemia, a guerra entre Rússia e Ucrânia, além da alta dos preços internacionais de insumos importados, internalizados com câmbio desfavorável à moeda brasileira (CNA, 2021). Neste cenário, observar as premissas da ecoeficiência, combinando os insumos e processos de forma a reduzir os insumos, mantendo o nível produtivo e menor dano ambiental, torna-se fundamental para uma agropecuária competitiva e preservadora do meio ambiente.

Considerando a preocupação global com as mudanças climáticas, estudos que buscam identificar indicadores de ecoeficiência têm ganhado força no cenário acadêmico (GURGUL; LACH, 2020; HERAS-SAIZARBITORIA et al., 2020; MAIA;

JÚNIOR, 2021). As discussões a respeito de ecoeficiência foram iniciadas na década de 90 e avançaram no sentido de trazer o aspecto ambiental no desempenho econômico das firmas. Tyteca (1996) procurou identificar instrumentos que poderiam levar em conta os vários impactos ambientais das atividades industriais e monitorar o seu comportamento ao longo do tempo. Utilizou abordagens clássicas como Análise Envoltória de Dados (DEA) para obter indicadores de sustentabilidade.

Desli et al. (2021), relata haver muitas inconsistências nos estudos de ecoeficiência, as quais surgem, principalmente da falta de consenso em relação aos aspectos teóricos e metodológicos, bem como da seleção de dados. Para tanto, desenvolveram uma metodologia que identifica as variáveis do processo de produção e em seguida constrói duas fronteiras de eficiência, sendo uma para a atividade econômica típica sem considerar a carga ecológica e outra com a atividade desenvolvida sob os princípios ecológicos. Rebolledo-Leiva et al. (2021) propõe um novo método para análise ecoeficiência de apicultores chilenos focado nas emissões de gases de efeito estufa com Análise Envoltória de Dados (DEA).

No Brasil os estudos de ecoeficiência têm se concentrado no bioma amazônico (PÉÑA et al., 2018; SILVA et al., 2021). Todavia, também é possível encontrar abordagens específicas e recentes, como a análise de pagamento por serviços ambientais no caso da soja no cerrado (GARRETT et al., 2022).

Assim, considerando a importância dos estudos de ecoeficiência, as seguintes perguntas norteadoras são apresentadas: *É possível aumentar a produção com menos recursos e impactos ambientais na Região Centro-Oeste?* Quais variáveis influenciam a ecoeficiência?

1.3 Objetivo Geral

Buscando responder à questão apresentada no tópico anterior, o objetivo geral desta pesquisa é analisar a ecoeficiência da agropecuária na Região Centro-Oeste e seus fatores determinantes.

1.4 Objetivos Específicos

No intuito de alcançar o objetivo geral desta pesquisa, traçam-se as seguintes metas:

- Calcular os índices de ecoeficiência na agropecuária na Região Centro-Oeste;
- Estimar as metas de melhorias das variáveis envolvidas;
- Examinar os fatores determinantes da ecoeficiência na agropecuária da Região Centro-Oeste.

1.5 Justificativa

Considerando as discussões em torno do aquecimento global, da escassez de água e de recursos naturais, não se pode admitir que as atividades agropecuárias tenham seu olhar voltado apenas para o aspecto produtivista, ignorando os impactos potenciais das práticas agrícolas no meio ambiente (GIRARDIN et al., 2000).

Retomando a visão de Desli et al. (2021), ainda que os estudos acerca da ecoeficiência estejam em ascensão, principalmente na literatura internacional, são bastante diversificados, por muitas vezes inconsistentes, os aspectos metodológicos utilizados. Embora existam diversos estudos abordando ecoeficiência na área agrícola, seja com métodos paramétricos e não paramétricos, levantando ainda custos de oportunidade da preservação ambiental são incipientes na comunidade acadêmica brasileira, sobretudo para a Região Centro-Oeste (PEÑA et al., 2018; PEÑA, et al., 2021).

A análise de ecoeficiência pode fornecer informações úteis para *benchmarking* ecológico e econômico, permitindo que municípios ou estados se espelhem nas melhores práticas enquanto monitoram seus desempenhos (ABDELLA et al., 2021).

Neste sentido, trata-se de um estudo com relevância sob o aspecto social, podendo se tornar um importante direcionador da formulação e aplicação de políticas públicas que contribuam para que a agropecuária se torne mais sustentável frente ao desenvolvimento econômico. A estimativa dos índices de ecoeficiência permitirá a um determinado estado identificar a sua distância em relação à fronteira das melhores práticas e do seu potencial para produzir mais sem causar danos ao meio ambiente. Por outro lado, o estudo poderá ser também utilizado pelos produtores rurais como uma ferramenta de tomada de decisão em busca da melhoria dos seus índices de ecoeficiência.

1.6 Estrutura e Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo abarca a introdução, contemplando a apresentação do tema, o problema de pesquisa, objetivos gerais e específicos além da justificativa. Em seguida é apresentado no segundo capítulo o marco conceitual e teórico apresentando os principais autores e conceitos do tema em estudo. O terceiro capítulo descreve os caminhos metodológicos que se pretende trilhar. O quarto capítulo traz a discussão dos resultados, e por fim, no quinto capítulo têm-se as considerações finais, apontando possíveis contribuições deste trabalho.

2 MARCO CONCEITUAL E TEÓRICO

2.1 Produtividade e eficiência

Os estudos de produtividade são, via de regra, concebidos com o objetivo de medir a performance das firmas, que tem como princípio a conversão de *inputs* em *outputs* (COELLI et al., 2005). Este mesmo autor define então matematicamente a produtividade de uma firma através da razão entre os produtos gerados e os insumos utilizados no processo produtivo.

Coelli et al. (2005) aborda a análise da produtividade sob a ótica da Produtividade Total dos Fatores (PTF), em que a produtividade é medida considerando absolutamente todos os fatores de produção, o que difere das tradicionais abordagens de produtividade parcial, onde cada elemento é estudado individualmente.

A década de 50 foi muito importante no que se refere a estudos inspirados em análise microeconômica, voltados a medidas de eficiência que relaciona as firmas e sua capacidade de uso de insumos na produção (SCHERER, 2016). Foi em 1951 que o conceito de eficiência técnica produtiva foi proposto por Koopmans, como sendo a habilidade de aumentar a produção mantendo os níveis de insumos (KOOPMANS, 1951). Mais tarde, Farrel (1957) ampliou a análise, trazendo os conceitos de eficiência técnica e alocativa, indicando a capacidade de obter a máxima produção a partir dos insumos disponíveis.

Nessa ótica, a eficiência técnica se assemelha ao ótimo de Pareto, onde uma unidade tem eficiência técnica quando para uma determinada quantidade de entradas, não for possível obter mais produção desejável ou reduzir a produção indesejável sem reduzir outra produção desejável ou aumentar outra saída indesejável. Segundo Kumbhakar (2003), por conta da discrepância entre as tecnologias disponíveis e acessíveis aos produtores, nem todos são bem-sucedidos, no que se refere a utilização de menor quantidade de insumos para obter a otimização do produto. Ou seja, não são todos os produtores que são tecnicamente eficientes.

Quando se refere ao Brasil, após diversos debates sobre a produtividade brasileira, é possível afirmar que houve um consenso de que, a partir dos anos 90, ocorreu um aumento da produtividade no Brasil. Para Araújo (2016) foi nessa mesma década que expandiram os estudos e trabalhos empíricos, aplicados à economia brasileira sobre o tema da produtividade.

O tema de produtividade ou eficiência técnica, tem aparecido com frequência nas pesquisas relacionadas às atividades agropecuárias, buscando principalmente identificar as unidades que têm maiores ganhos (podendo servir de referência) e também apresentar as atividades produtivas que são ineficientes (BARBOZA, 2012).

Entender e analisar a eficiência produtiva é uma questão muito importante, pois permite que os gestores possam tomar decisões em relação aos ajustes necessários para se tornar eficiente. Depois que Farrell (1957) foi o precursor na medição da eficiência, diversos pesquisadores desenvolveram novas maneiras, ou ampliaram as que já existiam. Com tecnologias específicas, os primeiros modelos foram criados, como por exemplo o Data Envelopment Analysis (DEA) que é um método não paramétrico para análise de eficiência desenvolvido por Charnes et al. (1978).

Para Stulp (2014), através das pesquisas de Farrel (1957), a eficiência técnica pode ser medida quando um produto ótimo (eficiente) é comparado com o observado (efetivo). A partir disso, o conjunto dos valores eficientes é disposto na forma de uma fronteira de produção, que por sua vez, demonstra o comportamento médio tecnológico da atividade estabelecida.

O modelo DEA é um método de programação matemática não paramétrica, que avalia a eficiência relativa das unidades de tomada de decisão DMU (Decision-Making Unit), e que tem por característica múltiplas entradas e saídas. Busca solucionar um problema de programação linear fracionária por meio de uma

formulação de uma programação equivalente considerando a convexidade e retornos constantes de escala – CRS (SHIRAZ, 2016).

Desde o início, o tradicional modelo DEA tem ganhado notoriedade, tanto no que se diz respeito à teoria quanto na aplicabilidade, o que fez com que se tornasse, rapidamente, uma ferramenta de grande importância, nas áreas de gestão, decisão e teoria e pesquisa operacional. Shiraz (2016) demonstra que a partir de um estudo particular sobre o custo-eficácia e desempenho da DMU, Farrell operacionalizou o entendimento de custo-eficiência. Para funcionar, a medida precisa de dados de entrada e saída.

Em uma unidade que emprega o processo de transformação de múltiplos insumos e que produz múltiplos produtos, ou seja, que possuem várias entradas e várias saídas, a produtividade pode ser determinada pela combinação linear das saídas dividida pela combinação linear das entradas.

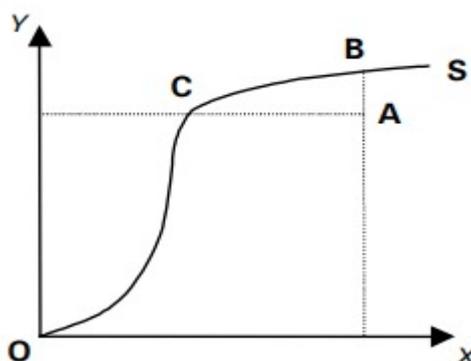
É possível aplicar a função da produção para analisar a eficiência, dando a liberdade de combinar a relação máxima entre os produtos e insumos para um conjunto específico de possibilidades de produção. Dessa maneira, o conjunto de possibilidades de produção (CPP) apresenta a relação de combinações possíveis de produtos e insumos (Färe et al., 1989). Considerando a dinâmica característica do setor agropecuário, é possível descrever os processos de produção usando um conjunto de insumos que combinados e processados, geram produtos e externalidades, conceito que retoma os postulados de Coelli et al. (2005) e Lauwers (2009), podendo ser representado, segundo Färe et al., (1989) pelo Conjunto de Possibilidades de Produção (CPP)

$$CPP = \{(x, y, b): x \text{ pode produzir } (y, b) \wedge x, y, b \geq 0\} \quad (1)$$

Onde: $(\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{n+})$ = o conjunto de entradas utilizadas; $(\mathbf{u} \in \mathbb{R}^{m+})$ = o conjunto de saídas desejáveis e indesejáveis, respectivamente, para cada Unidade de Tomada de Decisão (DMU). As saídas $\mathbf{u} = (\mathbf{y}, \mathbf{b})$ são segregadas, onde \mathbf{y} é o subvetor de saída desejado, com p elementos; \mathbf{b} é o vetor de saídas ruins ou indesejáveis, com q elementos, e $m = p + q$. O CPP permite caracterizar a tecnologia ecoeficiente e por conseguinte estimar a ecoeficiência de cada unidade produtiva.

Coelli et al. (2005) utiliza um gráfico (Figura 01) para demonstrar um processo de produção que contém apenas uma entrada (X) e uma saída (Y) e apresenta as diferenças entre a eficiência e a produtividade. A curva OS significou a fronteira de produção, ou seja, relaciona a entrada X com a saída Y.

Figura 01 – Modelo da Curva de um processo de produção



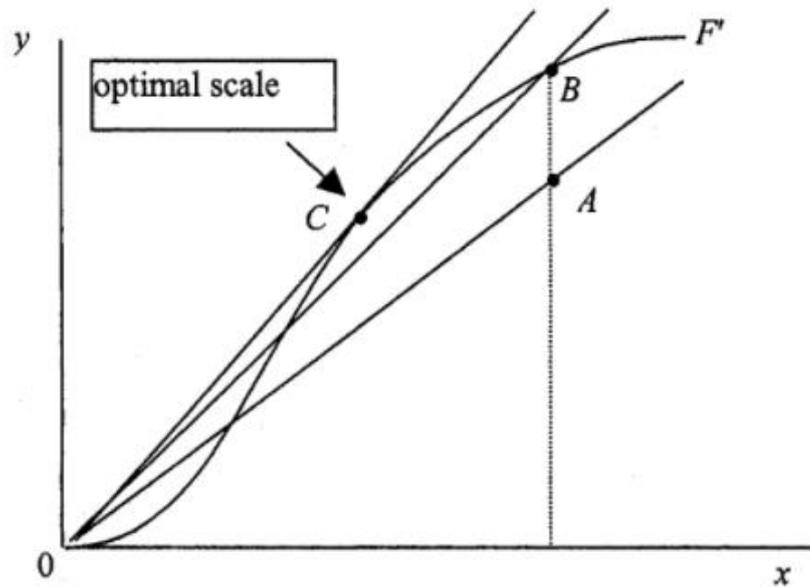
Fonte: Embrapa Territorial-Documents (INFOTECA-E), 2003.

A curva OS demonstra a quantidade máxima que a saída pode chegar, dados os níveis de entrada que foram utilizados e reflete o estado tecnológico atual de uma firma (COELLI et al., 2005). A área entre a fronteira de produção e o eixo do X, abrange todas as combinações viáveis entre a saída e entrada, originando o conjunto de possibilidades de produção (CPP).

Portanto, a organização que funciona ao longo da curva de produção é considerada tecnicamente eficiente, caso não ocorra, a produção se torna ineficiente. As organizações que operam nos pontos C e B, ao longo da fronteira de produção são eficientes. A organização que se encontra no ponto A é considerada tecnicamente ineficiente, pois poderia estar oferecendo a mesma quantidade de saídas que o ponto B, sem demandar mais insumos (COELLI et al., 2005).

Com vistas a aprofundar o entendimento dos conceitos de eficiência técnica e produtividade, Coelli et al. (2005) utiliza um gráfico (Figura 02) que demonstra que as firmas que operam na curva de eficiência técnica podem apresentar produtividades diferentes.

Figura 02 – Modelo da Curva de um processo de produção



Fonte: Coelli et al., 2005.

Nesse exemplo, as firmas B e C operam com eficiência técnica, contudo a firma que opera no ponto C encontra-se tangenciando a curva de eficiência técnica, definindo o ponto onde a produtividade máxima é encontrada através da economia de escala. Operar em qualquer outro ponto ao longo da fronteira de produção resulta em baixa produtividade (COELLI et al., 2005).

Farrel (1957) defende que a eficiência técnica é relativa, pois é definida em relação a um conjunto dado de firmas e de fatores de produção medidos de forma específica e que qualquer mudança neste conjunto dado de fatores afeta o resultado. Neste sentido afirma que *“uma firma pode ser altamente eficiente frente aos padrões Britânicos, mas não frente aos padrões mundiais”*.

2.1 Sustentabilidade do setor agropecuário

As discussões em torno do termo sustentabilidade tiveram início no encontro internacional *The Conservation Strategy*, em 1980, assumindo a partir daí dimensões econômicas, sociais e ambientais (SICHE et al., 2007). Em seguida, as discussões se intensificaram com a publicação do relatório da Comissão Mundial sobre o Meio

Ambiente e Desenvolvimento das Nações Unidas (1987), conhecido como Relatório Brundtland, ou “*Nosso futuro Comum*” (MARZALL; ALMEIDA, 1998).

Anos depois, já em 2015 a Assembleia Geral das Nações Unidas construiu seu plano de ação para as pessoas, o planeta e a prosperidade, chamando-o de “Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável”. E como parte dessa agenda, as Nações Unidas anunciaram 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), onde os países poderiam exercer um importante papel para avançar na Agenda de Desenvolvimento Sustentável ao integrar ODS em suas estratégias (ROSATI; LOURENÇO, 2019).

O conceito de sustentabilidade é abordado por inúmeros autores (Garnett, 2013; Crivellari et al., 2021; Larrea-Gallegos et al., 2022), em sua grande maioria convergindo para a viabilidade da vida humana nas gerações futuras. Sua concepção deriva da percepção de que os seres humanos estão utilizando ou consumindo os recursos naturais a uma taxa em que num futuro breve resultará no esgotamento destes recursos (MURDOCH, 1993).

Constanza e Patten (1995) definem a sustentabilidade de forma simples, onde um sistema sustentável é aquele que sobrevive ou persiste. Contudo, buscando melhor compreensão do conceito, os autores questionam qual sistema, subsistema ou características do sistema devem persistir, por quanto tempo e em que momento seria possível saber se o sistema, subsistema ou suas características, persistiram.

Sachs (1990) define sustentabilidade como um conceito dinâmico, envolvendo múltiplas dimensões diante das necessidades crescentes das populações em evolução. Essas dimensões seriam a social, a econômica, a ecológica, a ambiental, a geográfica e a cultural.

Ainda que a definição de sustentabilidade seja apresentada por diversos autores a partir de várias abordagens, na visão de Siche et al. (2007) em todas, é intrínseco o conceito de equilíbrio da biosfera e do bem-estar da humanidade. O termo sustentabilidade, portanto, não pode ser considerado como um conceito absoluto, mas sempre relativo, envolvendo normalmente agendas sociais, econômicas e ambientais (COCKLIN; DIBDEN, 2005).

Na produção rural, a sustentabilidade conhecida como “Agricultura Sustentável” abrange critérios ambientais (ecologia, preservação/conservação do meio ambiente) e sociais (elementos entre a sociedade e a produção agrícola que

extrapolam os limites do campo da agricultura) (ASSAD; ALMEIDA, 2004; CHAMBERS; CONWAY, 1991). A discussão, do ponto de vista ambiental, envolve analisar, por exemplo, se o uso da água se dá de forma a preservar suas fontes, se há práticas conservacionistas do solo ou se há indícios de salinização.

Estratégias para otimizar o uso da terra, controle do uso de fertilizantes e pesticidas também figuram a agenda sustentável. Na China, por exemplo, cerca de 27,5% do território nacional (2,64 milhões de km²) encontra-se desertificado e mais de 100 milhões de hectares encontram-se salinizados, o que demonstra a necessidade de inovação para o uso sustentável do solo (LIU, 2018).

Do ponto de vista metodológico, Assad e Almeida (2004) identificaram uma lacuna neste campo de estudo por entender que, na ocasião, seu referencial teórico ainda era bastante incipiente. Buscando preencher esta lacuna, Gorbenkova et al. (2018) definiram uma série de impulsionadores do desenvolvimento rural sustentável, sendo que o fator tecnológico é o que tem a maior significância. De fato, a tecnologia deverá ser a maior aliada na arte de produzir mais utilizando menos recursos.

Os objetivos de desenvolvimento sustentável propostos pelas Nações Unidas em 2015 colocam não só a produção sustentável como uma meta, mas também o consumo sustentável, o que ratifica a ideia de que para avaliar aspectos de sustentabilidade é necessária a profunda compreensão das atividades de produção e consumo no setor agrícola (MURDOCH, 1993).

Neste sentido, Gan et al. (2022) em um estudo de caso, buscaram medir a sustentabilidade do desenvolvimento rural chinês, com foco na produção e consumo sustentáveis, utilizando Análise Envoltória de Dados (DEA). O modelo utilizado no estudo avaliou o impacto de desastres geológicos na sustentabilidade do desenvolvimento rural, considerando as perdas econômicas como *outputs* indesejáveis. O estudo deixa contribuições importantes na utilização do DEA como ferramenta para tangenciar o significado de sustentabilidade.

Begic e Afgan (2007) utilizaram um método multicritério de avaliação da sustentabilidade de sistemas de geração de energia da Bosnia e Herzegovina por entender que a maioria dos modelos utilizados pelos tomadores de decisão eram baseados em modelos simplórios. Os autores utilizaram a metodologia *Analysis and Synthesis of Index at Information Deficiency* (ASPID). Essa metodologia compreende o modelo estocástico de incerteza e índices de normalização usando informações não

numéricas (ordinais) e não completas (informações NNN), permitindo que seus resultados facilitem a tomada de decisão direcionadas ao modelo mais sustentável.

2.3 Ecoeficiência produtiva

Deslia et al. (2021), assim como o Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (*World Business Council for Sustainable Development - WBCSD*) (2006), apresentam de forma resumida ecoeficiência como a possibilidade de agregar ou criar o maior valor econômico, com o menor impacto ecológico possível. Assim, ecoeficiência traz à baila a dimensão ecológica em paralelo ao aspecto econômico, conciliando as duas agendas. Como uma medida de sustentabilidade, ecoeficiência relaciona diretamente impactos ambientais com a performance econômica (FORLEO et al. 2018).

Silva e Thomé (2021) demonstram a partir de uma revisão sistemática da literatura que uma parte representativa de autores abordam a dimensão ambiental na análise de eficiência. Segundo os autores, *“em 62,3% dos casos (43) a escolha configurou-se pela avaliação da eficiência segundo sua dimensão técnica exclusivamente, ao passo que a opção pela (eco)eficiência se deu em 36,2% dos trabalhos.”*

Esses dados demonstram que a agenda ambiental tem despertado interesse na comunidade acadêmica mundial, sobretudo nas universidades da Europa, que concentram a maioria dos estudos relacionados à ecoeficiência (SILVA; THOMÉ, 2021). Este entendimento ratifica a discussão em torno da sustentabilidade ambiental defendida pelos europeus, que por vezes utilizam essa temática em prol da aplicação de embargos não tarifários, espelhando sua preocupação com as questões ambientais.

A ecoeficiência não está relacionada somente às atividades rurais, mas vem experimentando grandes avanços no âmbito das indústrias, no desenvolvimento das cidades e no dia a dia das empresas. A redução de emissões de gases poluentes e eliminação de resíduos na produção industrial são exemplos do que tem sido abordado sob o aspecto da ecoeficiência (WBCSD, 2006).

Ainda segundo o WBCSD, o conceito de ecoeficiência avançou da simples prevenção da poluição por parte das indústrias, para se tornar um direcionador de

inovação e competitividade, utilizado pelas empresas para otimizar seus processos, transformando seus resíduos em matérias-primas para outras indústrias e impulsionando a inovação para obter produtos com novas funcionalidades (WBCSD, 2006).

Ainda que seu conceito seja impreciso, verifica-se certa ambiguidade no seu tratamento, pois ao passo que alguns autores sintetizam suas percepções, outros buscam ir a fundo, explorando diversos aspectos envolvidos, sobretudo sob a ótica do uso de recursos renováveis e sua valoração. Neste sentido, Barton et al. (2009) promoveram um estudo com vistas a estimar o valor dos serviços ambientais na Costa Rica. Concluíram que os custos de oportunidade (preço sombra) de áreas acessíveis com solos férteis são superiores aos pagamentos pela conservação das florestas de \$42/ano.

Maciel et al. (2020) buscou calcular os índices de ecoeficiência para o Brasil entre os anos de 1991 a 2014, utilizando o método Envoltória com Livre Disposição (FDH – *Free Disposal Hull*) para analisar o comportamento das variáveis referentes a emissão de gases do efeito estufa, consumo de energias renováveis, emprego total, área de floresta e produto interno bruto. Como resultado, concluíram que o Brasil não apresenta resultados satisfatórios de ecoeficiência, já que os índices encontrados se classificam como baixo ou muito baixo.

Forleo et al. (2018) utilizou o método para cálculo da ecoeficiência, de acordo com a indicação do WBCSD (2000), o qual definiu a ecoeficiência como a razão entre o valor econômico e o impacto ambiental. Assim, a fórmula da ecoeficiência foi aplicada para medir o valor econômico adicionado por Kg de Gases de Efeito Estufa (GreenHouse Gases - GHGs) emitido na atmosfera, o que pode ser algebricamente representado pela equação abaixo, onde Y é o produto econômico gerado em cada unidade i e F é a função que agrega os impactos ambientais gerados pela atividade produtiva:

$$\text{Ecoeficiência} = \frac{\text{Valor econômico adicionado}}{\text{Impacto ambiental}} = \frac{Y_i}{F(p)} \quad (2)$$

Este modelo padrão para cálculo da ecoeficiência é bastante encontrado na literatura e na maioria dos casos é utilizada para calcular o impacto das externalidades

negativas geradas pelas atividades econômicas, porém é importante mencionar que as externalidades positivas também podem ser objeto de estudo a partir deste modelo, que é o caso do que se pretende com este trabalho (KUOSMANEN; KORTELAINE, 2005; GROVERMANN et al., 2019).

Assim, o incremento de *outputs* para a mesma quantidade de *inputs* ou a redução dos *inputs* mantendo o nível de *outputs*, leva a melhoria da ecoeficiência (BONFIGLIO et al., 2017). De acordo com Masuda (2016) no cálculo da ecoeficiência a partir do DEA, o numerador do índice de ecoeficiência é composto por *outputs* que podem ser expressos em diferentes unidades de medida (física ou monetária).

Já o conjunto de *inputs* para o denominador difere entre os estudos. Kuosmanen e Kortelainen (2005) utilizando DEA agregaram vários impactos ambientais como entradas em uma única pontuação de dano ambiental. Peña et al. (2018) define ecoeficiência como a capacidade de uma empresa ou economia (DMU) de produzir uma determinada quantidade de um produto com o menor conjunto de insumos e simultaneamente menor impacto ambiental.

Ainda que DEA seja amplamente utilizado em estudos acadêmicos para cálculo de eficiência (Neff et al., 1993; Sharma et al., 1997), tão comum é a sua combinação com métodos paramétricos como a Análise de Fronteiras Estocásticas (*Stochastic Frontier Analysis - SFA*), que na visão de Coelli et al. (2005), é uma abordagem alternativa para estimar funções de fronteira usando técnicas econométricas, tendo como vantagem sobre o DEA o tratamento de ruído de dados, refletindo portanto, a ineficiência técnica ou ecoineficiência.

A técnica, inicialmente desenvolvida por Aigner et. al. (1977) e Meeusen e Broeck (1977), consiste em um método paramétrico estima a eficiência por meio de uma função de produção estocástica, geralmente expressa pela forma log-linear de Coobb-Douglas.

3 MÉTODOS E TÉCNICAS DE PESQUISA

3.1 Tipo e Descrição Geral da Pesquisa

Trata-se de um estudo com abordagem quantitativa, pois reúne um conjunto de procedimentos definidos para obter os dados e analisá-los de modo a responder a

questão básica proposta neste artigo, com informações expressas em números, os quais representam papel preponderante na análise proposta.

Quanto à natureza, se classifica como aplicada, pois é uma investigação que visa a aquisição de novos conhecimentos, com objetivos práticos. Concentra-se em torno de questões presentes no cotidiano das atividades agropecuárias dos municípios, estando empenhada na elaboração de diagnósticos, identificação de problemas e busca de soluções.

Da Silva et al. (2014), defende que “a pesquisa quantitativa por ser executada em amostras grandes e com critérios de abrangência de possibilidades pode – quando bem executada – permitir entender o que de fato uma área ou atividade ou segmento manifesta e assim permitir a tomada de decisão sobre uma questão de relevo gerencial”. Tal entendimento reforça a natureza aplicada do presente estudo, o qual poderá servir de base para decisões por parte de agentes de mercado e governo.

Esta pesquisa tem objetivos exploratórios, já que o tema abordado tem sido pouco estudado e busca-se trazer um entendimento acerca da eficiência produtiva de uma importante região produtora de alimentos.

3.2 - Método

Para atingir o objetivo geral desta pesquisa, de estimar a ecoeficiência da agropecuária na Região Centro-Oeste, será empregada Análise Envoltória de Dados (DEA) com técnica de reamostragem (*bootstrap*) e regressão truncada para estimar indicadores de ecoeficiência e seus fatores determinantes.

Em geral, modelos DEA são amplamente utilizados em estudos técnicos de ecoeficiência, como verificado no trabalho de Tyteca (1996) ao medir a performance ambiental de empresas sob a ótica da teoria da eficiência produtiva. Técnicas de regressão truncada e *bootstrap* foram utilizadas por Picazo-Tadeo et al. (2011) na avaliação do potencial de redução da pressão ambiental no arcabouço da DEA. Mais tarde Picazo-Tadeo et al. (2012) realizou uma análise de ecoeficiência com Função Distância Direcional (DDF) em uma amostra de propriedades produtoras de oliveira na Espanha. Deng e Du (2020) utilizaram DDF para medir produtividade e estimar

preço sombra de externalidades ambientais indesejadas em países do chamado Belt and Road Initiative (BRI)¹.

3.2.1 DEA

O DEA permite avaliar a ecoeficiência de unidades de tomada de decisão, denominadas DMU, estimando uma fronteira de melhores práticas, comparando umas às outras em função dos seus insumos e de seus produtos, além de considerar as externalidades do processo produtivo, utilizando programação linear. Assim, cada DMU será representada por um município, totalizando 446 na região de estudo.

Este método não paramétrico compara os insumos e os produtos de cada unidade e determina os índices de eficiência relativa de cada unidade analisada. Estes índices permitem determinar as melhores práticas, as unidades ineficientes e as mudanças necessárias nos níveis de insumos e produtos para que as últimas unidades se tornem eficientes.

O método, cujo desenvolvimento é atribuído a Charnes, Cooper e Rhodes (1978), tem dois modelos clássicos dividindo-se entre o que assume retornos constantes de escala (DEA-CRS ou DEA-CCR) e o que assume retornos variáveis de escala (DEA-VRS ou DEA-BCC), podendo ainda cada versão ser orientada ao insumo (reduzir o consumo de insumos, mantendo o nível de produção para ser eficiente) ou ao produto (aumentar a produção, mantendo o nível de insumos para ser eficiente).

3.2.1.1 DEA com retornos constantes de escala (DEA-CRS (ou CCR))

Retornos constantes de escala indicam que a produção aumenta pela mesma mudança proporcional que todos os insumos assumem. O modelo DEA-CRS orientado aos insumos considera de que para maximizar a eficiência, a firma deverá reduzir o consumo de insumos, mantendo o mesmo nível de produção.

¹ A Iniciativa do Cinturão e Rota (The Belt and Road Initiative - BRI) é um esforço ambicioso para melhorar a cooperação e a conectividade regional em escala transcontinental. A iniciativa visa fortalecer os vínculos de infra-estrutura, comércio e investimento entre a China e cerca de 65 outros países que representam coletivamente mais de 30% do PIB global, 62% da população e 75% das reservas de energia conhecidas. O BRI consiste, principalmente, no Cinturão Econômico da Rota da Seda, ligando a China à Ásia Central e do Sul e adiante para a Europa, e a Nova Rota da Seda Marítima, ligando a China às nações do Sudeste Asiático, Países do Golfo, Norte da África e Europa (WORD BANK, 2018).

$$\begin{aligned}
& \min \theta_i \\
& \text{s. a } \theta_i \bar{x}_i - X\bar{\lambda} \geq \bar{0}_m \\
& \quad Y\bar{\lambda} - \bar{y}_i \geq \bar{0}_s \\
& \quad \bar{\lambda} \geq \bar{0}_n
\end{aligned} \tag{3}$$

Em que θ_i é o escore de eficiência da DMU i , \bar{x}_i é o vetor ($m \times 1$) de insumos utilizados por essa unidade. Nas restrições, y é o vetor ($s \times 1$) de produtos gerados, $\bar{\lambda}$ é o vetor ($n \times 1$) de pesos para combinações lineares das melhores práticas que formam a fronteira eficiente, X é uma matriz ($m \times n$) formada pelos vetores de insumos, e Y é uma matriz ($s \times n$) de produtos da amostra.

A eficiência relativa da unidade analisada, definida como a solução do problema de programação linear acima, devido à restrição do problema, sempre tomará valores entre 0 e 1. Assim, o método determina quais são as melhores práticas observadas, que tomam o valor de $\theta_i=1$ ou 100% e formam a fronteira eficiente com as unidades virtuais ou fictícias. Segundo Peña (2008), a eficiência das outras unidades analisadas é medida a partir das posições relativas por elas ocupadas em relação à fronteira. Por exemplo, se o coeficiente encontrado é 0,80, sua interpretação indicará que essa unidade produtiva deverá reduzir equiporionalmente o consumo de insumos em 20% para ser eficiente. Por isso esse Modelo é chamado orientado aos insumos.

Por outro lado, para uma firma atingir a eficiência sob a ótica do modelo DEA-CRS orientado aos produtos, deverá aumentar a produção para uma mesma quantidade de consumo de insumos. As unidades ineficientes terão um índice que será o inverso do indicador calculado com orientação voltada aos insumos. Portanto, o índice da unidade anterior será $1,25=1/0,8$. Assim, essa unidade produtiva deverá aumentar equiporionalmente os bens e serviços produzidos em 25% para ser eficiente.

$$\begin{aligned}
& \max \theta_i \\
& \text{s. a } \bar{x}_i - X\bar{\lambda} \geq \bar{0}_m \\
& \quad Y\bar{\lambda} - \theta\bar{y}_i \geq \bar{0}_s \\
& \quad \bar{\lambda} \geq \bar{0}_n
\end{aligned} \tag{4}$$

3.2.1.2 DEA com retornos variáveis de escala (DEA-VRS (ou BCC))

Considerando que o presente estudo contemplará um universo de municípios com características diferentes umas das outras, a DEA-VRS será de grande aplicabilidade, uma vez que o modelo admite que a eficiência máxima varie em função da economia de escala e permite comparar unidades de portes distintos (PEÑA, 2008). Serão consideradas neste estudo as orientações aos insumos e produtos, já que se busca estimar a possibilidade de os produtores aumentarem a sua produção, reduzindo os impactos ambientais e o nível de consumo dos insumos.

O modelo analisado na seção anterior considerava retornos constantes de escala, pressupondo proporcionalidade, já o modelo DEA-VRS admite haver convexidade entre insumos e produtos, levando à comparação de unidades produtivas, exclusivamente, com características produtivas similares. Abaixo, segue o PPL em formato matricial desse modelo, em que a descrição das matrizes é análoga ao modelo clássico já apresentado.

$$\begin{aligned}
 & \max \rho_i \\
 \text{s. a } & \bar{x}_i - X\bar{\lambda} \geq \bar{0}_m \\
 & Y\bar{\lambda} - \rho\bar{y}_i \geq \bar{0}_s \\
 & \bar{\lambda} \geq \bar{0}_n \\
 & \bar{n}\bar{\lambda} = 1
 \end{aligned} \tag{5}$$

3.2.1.3 Modelo de dois estágios: DEA com duplo *bootstrap* e regressão truncada (DEA-BTR)

O Modelo DEA, em dois estágios, ou seja, com duplo *bootstrap* e regressão truncada, conforme sugerido por Simar e Wilson (2007), contrapõe o modelo clássico DEA, uma vez que este tende a gerar escores superestimados em relação à eficiência factual. A combinação de algoritmos de *bootstrap* com a regressão Tobit no arcabouço da DEA resulta em um método semiparamétrico, uma técnica considerada robusta para a determinação dos fatores que podem interferir na ecoeficiência da agropecuária da Região Centro-Oeste e para a construção de intervalos de confiança dos escores estimados. Tal método foi utilizado por Silva et al. (2022) para analisar a ecoeficiência da Região Amazônica.

De acordo com Simar e Wilson (2007), a regressão truncada pode ser descrita segundo a Equação 3:

$$\tilde{\theta}_i \approx \beta Z_i + \epsilon_i \quad (6)$$

$$i = 1, \dots, n$$

Passos do algoritmo:

1. Estimar a ecoeficiência dos municípios por meio do modelo clássico DEA-VRS.
2. Por meio do método de máxima verossimilhança, obter as estimativas de $\hat{\beta}$ e $\hat{\sigma}_e$ de seus parâmetros populacionais da regressão truncada.
3. Para cada município, repetir os quatro passos abaixo L_1 vezes para produzir o conjunto de estimativas $B_i = \{\hat{\theta}_{ib}^*\}_{b=1}^{L_1}$:
 - a. Extrair os resíduos ϵ_i da distribuição $N(0, \hat{\sigma}_e^2)$.
 - b. Estimar $\theta_i^* = Z_i \hat{\beta} + \epsilon_i$
 - c. Produzir uma pseudo base de dados (x_i^*, y_i^*) em que $x_i^* = \hat{\theta}_i / \theta_i^*$ e $y_i^* = y_i$ se o modelo for orientado aos insumos, e o inverso, com os produtos transformados se o modelo tiver orientação aos produtos.
 - d. Estimar a pseudo ecoeficiência $\hat{\theta}_i^*$ com base na pseudo base gerada, em que os vetores de insumos e produtos são substituídos por X^* e Y^* .
4. Para cada município, estimar o índice $\tilde{\theta}_i$ definido na equação 3 utilizando as estimativas de *bootstrap* obtidos no passo anterior e as estimativas originais: $\tilde{\theta}_i = \hat{\theta}_i - Bias(\hat{\theta}_i)$. O viés é calculado por $Bias(\hat{\theta}_i) = \overline{\hat{\theta}_{ib}^*} - \hat{\theta}_i$, em que $\overline{\hat{\theta}_{ib}^*} = \frac{1}{L_1} \sum_{b=1}^{L_1} \hat{\theta}_{ib}^*$.
5. Utilizar o método de máxima verossimilhança para estimar a regressão truncada $\tilde{\theta}_i$ com Z_i para gerar os parâmetros estimados $\hat{\beta}$ e $\hat{\sigma}_e$.
6. Repetir os próximos passos L_2 vezes para produzir um conjunto de estimativas de *bootstrap* $\Gamma = \{(\hat{\beta}^*, \hat{\sigma}_e^*)\}_{b=1}^{L_2}$.
 - a. Para cada município, extrair os resíduos ϵ_i da distribuição $N(0, \hat{\sigma}_e^2)$.
 - b. Para cada município, computar $\theta_i^{**} = Z_i \hat{\beta} + \epsilon_i$.

- c. Utilizar o método de máxima verossimilhança para estimar a regressão truncada de θ_i^{**} para gerar as estimativas $\hat{\beta}^*$ e $\hat{\sigma}_e^*$.
7. Utilizar as estimativas Γ e as estimativas $\hat{\beta}$ e $\hat{\sigma}_e$ para construir intervalos de confiança para cada β e σ_e .

3.2.2 Análise de outliers

A estimativa de eficiência a partir do modelo DEA é sensível à presença de *outliers*, já que usa observações extremas para identificar um desempenho superior. Identificar *outliers* é uma tarefa complexa, pois cada registro que descreve uma observação é tipicamente um vetor de alta dimensão com múltiplas entradas e saídas. Alguns *outliers* são os resultados de erros de medição ou registro, enquanto outros são resultados de características incomuns, incluindo fatores relacionados ao ambiente externo, ou fatores incontroláveis (CHEN; JOHNSON, 2010). Barnett e Lewis (1984) definem *outliers* como uma observação (ou conjunto de observações) que se mostram inconsistentes em relação ao restante do conjunto de dados.

Nesse sentido, essa pesquisa empregou o protocolo de Sousa e Stošić (2005), que combina *bootstrap* e *jackknife* para identificação de valores atípicos na fronteira. O procedimento de jackstrap de (Sousa & Stošić, 2005) pode ser descrito como: (i) selecionar uma bolha artificial aleatória sem reposição formada por K unidades produtivas; (ii) estimar a eficiência das K unidades da bolha antes e depois da retirada de cada DMU k; (iii) calcular a alavancagem para a i-ésima DMU por meio da equação $l_i = \sqrt{\sum_{k=1, k \neq i}^n (\theta_{ji}^- - \theta_k)^2 / n - 1}$; (iv) repetir os passos anteriores B vezes, formando um subconjunto \tilde{I}_i ; (v) calcular a alavancagem de cada DMU por meio da média das alavancagens obtidas em cada bolha, \bar{l}_i , e a alavancagem global, \tilde{I} ; (vi) determinar o ponto de corte em que todas as unidades com alavancagens maiores ou iguais a esse valor são consideradas *outliers*. Nessa dissertação, foi considerado o critério Heaviside (step-function), haja vista que a técnica parte do pressuposto de que o tamanho da amostra é mais restritivo.

3.2 Caracterização da Organização

Esta pesquisa terá como base a atividade agropecuária da Região Centro-Oeste, localizada na porção central do país, em uma área de 1.606.358,6 km² (18,9% do território brasileiro), sendo a segunda maior região do Brasil (IBGE, 2021). Agrupa três grandes bacias hidrográficas, como a Amazônica, a do Tocantins-Araguaia e a Bacia Platina. A região abriga os estados de Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e o Distrito Federal. É coberta em parte por Floresta Amazônica, áreas de Cerrado e o Pantanal. Abriga ainda, o maior estado produtor de grãos (Mato Grosso) e se destaca na produção nacional de algodão, soja, milho e sorgo, além de exercer relevante papel também na pecuária de corte e de leite (CONAB, 2022).

3.3 População

Cada município da Região Centro-Oeste representa uma DMU, totalizando 446 na região de estudo. Foram obtidos dados secundários, coletados do Censo Agropecuário de 2017 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), organizados em planilha do Excel e exportados para o RStudio, onde calculou-se a eficiência (DEA CCR e VRS) orientada aos insumos e produtos, com retorno constante e variável de escala, aplicando em seguida duplo *bootstrap* e regressão truncada.

Faz-se necessário estabelecer o conjunto de variáveis: insumos e produtos para efeito de cálculo. Para tanto, neste estudo empregou-se as variáveis padrão do setor agropecuário, amplamente utilizados em diversos estudos, como encontrado na revisão de literatura de Suzigan et al. (2020) e replicado por Peña, et al. (2021). No caso dos insumos, denominados pelo programa como inputs, foi utilizado em relação a cada município destes estados:

x1 = Área total (hectares) – Área dos estabelecimentos destinada ao cultivo e a pastagens;

x2 = Salários pagos (mil. R\$) – Despesas com mão-de-obra;

x3 = Combustíveis e lubrificantes (mil. R\$) – proxy para medir o capital;

x4 = Insumos para produção vegetal e animal (mil. R\$);

x5 = Outras despesas das propriedades (mil. R\$).

Como produto, denominado como *output tem-se*:

Y1 = Receita (mil. R\$) – produto desejável.

Em relação às externalidades, foram consideradas uma positiva - produto ambiental desejável - (y2) e uma negativa - produto ambiental indesejável - (y3):

y2 = Área preservada (hectares): área de matas ou florestas naturais dos estabelecimentos agropecuários destinada à Preservação Permanente (APPs) ou Reserva Legal (RL), equivalente a 20% na Região Centro-Oeste segundo o novo código Florestal (Lei n.º 12.651/12). Contribui com uma série de fatores ambientais – proteção do solo, recursos hídricos, fauna e flora;

y3 = Emissões de Gases de Efeito Estufa (TonCO₂eq) - variável clássica utilizada para medir o impacto ambiental.

As informações referentes às emissões de gases de efeito estufa da agropecuária foram levantadas junto à base de dados disponível no Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). Na plataforma SEEG é possível encontrar dados de emissões de gases de efeito estufa por setores ou atividades econômicas, podendo obter dados agregados por estados ou até mesmo municípios, em uma série que cobre o período de 1970 a 2020.

Empregou-se para cada município (DMU) os dados referentes às emissões da agropecuária de todos os gases que provocam o efeito estufa (CO₂, CH₄, N₂O e HFCs) contidos no inventário nacional, convertidos em toneladas de CO₂ equivalente (TonCO₂eq), tendo como referência o ano de 2017, mesmo ano do Censo Agropecuário do IBGE.

Com vistas a investigar possíveis variáveis explanatórias de ecoineficiência, com base em Peña et al. (2018) e Silva et al. (2021), foi estabelecido o seguinte conjunto de variáveis:

- (i) agricultura familiar: % da mão de obra familiar em relação ao total;
- (ii) associação à cooperativa: % dos estabelecimentos associados a cooperativas;

- (iii) assistência técnica: % dos estabelecimentos que receberam assistência técnica;
- (iv) escolaridade: % dos estabelecimentos cujo produtor possui pelo menos ensino médio;
- (v) terras próprias: % dos estabelecimentos cujo produtor é proprietário;
- (vi) sexo: % dos estabelecimentos cujo produtor principal é mulher;
- (vii) crédito: % dos estabelecimentos que obtiveram financiamento;
- (viii) % de estabelecimentos que utilizam a queima como uma prática agrícola;

Para efeito de cálculo, foi utilizada a linguagem R de programação que consiste em um software livre e de fonte aberta, o qual disponibiliza uma variedade de funções para análise de dados e rotinas gráficas, como o pacote FEAR (Frontier Efficiency Analysis with R). A escolha se deu em função de se tratar de uma ferramenta eficiente, confiável, de baixo custo e com menos restrições quando comparado com os programas dedicados apenas aos modelos DEA (PESSANHA et al., 2013). Os mapas foram produzidos utilizando software de georreferenciamento e análise espacial de dados QGIS (Aplicativo de Sistema de Informação Geográfica).

3.4 Instrumentos e Procedimentos para Coleta e Análise de Dados

Considera-se como instrumento de coleta de dados, a observação não participante. A análise de conteúdo visando obter inferências válidas e replicáveis dos dados foi empregada e os resultados apresentados através de gráficos, mapas e tabelas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise descritiva

Encaminhando para a análise das estatísticas descritivas é importante mencionar que, conforme descrito na seção anterior, utilizando o pacote jackstrap, versão 3.0 da linguagem de programação estatística R, procedeu-se o tratamento e remoção dos outliers seguindo o protocolo de Sousa e Stošić (2005), que combina

bootstrap e *jackknife* para identificação de valores atípicos na fronteira. Assim, conforme verificado na Tabela 1, foram removidos 18 municípios dos 446 existentes na região Centro-Oeste, sendo um do Mato Grosso do Sul, nove do Mato Grosso e oito de Goiás.

Tabela 1 – Municípios removidos como outliers

Und	Município	UF
1	Brasilândia	MS
2	Apiacás	MT
3	Araguainha	MT
4	Aripuanã	MT
5	Cotriguaçu	MT
6	Novo Santo Antônio	MT
7	Ponte Branca	MT
8	Porto Estrela	MT
9	Rio Branco	MT
10	Santo Afonso	MT
11	Águas Lindas de Goiás	GO
12	Anhanguera	GO
13	Buriti Alegre	GO
14	Joviânia	GO
15	Nazário	GO
16	Nerópolis	GO
17	Teresina de Goiás	GO
18	Valparaíso de Goiás	GO

Fonte: elaborado pelo autor

A relação de municípios que se mostraram inconsistentes em relação ao conjunto de dados é composta por municípios em geral pequenos e que não apresentam nenhum reconhecimento em função da atividade agropecuária. Por exemplo o município de Apaiacás no MT se localiza no extremo norte do estado, muito caracterizado por abrigar tribos indígenas e áreas de garimpo. Embora abrigue de forma tímidas as atividades de pecuária e agricultura familiar, não se mostra como parâmetro na análise da ecoeficiência. Já o município de Valparaíso de Goiás, na divisa com o Distrito Federal, praticamente não apresenta receita agropecuária, tendo

uma área ínfima de preservação ambiental. Sua economia é focada no mercado informal e na indústria moveleira.

A partir dos dados apresentados na Tabela 2, procede-se uma análise das estatísticas descritivas das variáveis de estudo, de forma a conhecer preliminarmente suas características. Isto se dá previamente à análise dos modelos.

Tabela 2 – Estatística descritiva das variáveis de estudo (insumos e produto).

Variável	Mínimo	Média	Mediana	Desvio Padrão	Máximo
- Área (cultivo, ha)	22	41.003	11.535	72.856	579.229
- Área (pastagens, ha)	0	90.418	50.549	112.566	923.658
- Salários Pagos (mão-de-obra, R\$ mil)	628	21.500	11.016	30.529	214.531
- Combustíveis e lubrificantes (R\$ mil)	202	12.255	5.904	18.133	162.202
- Despesas com insumos (R\$ mil)	4.089	184.742	86.241	273.853	1.975.980
- Receita (R\$ mil)	3.657	247.024	116.609	372.771	3.080.817
- Área preservada (ha)	102	59.996	25.583	97.929	1.098.755
- Emissões GEE (TonCO ₂ eq)	6.252	387.394	258.393	390.279	3.766.273

Fonte: elaborado pelo autor.

As áreas destinadas ao cultivo nos municípios analisados variam entre o mínimo de 22 a 579.229 hectares, com média de 41.003 hectares. O desvio padrão de 72.856 hectares indica a presença de propriedades agropecuárias de pequena e grande escala, embora prevaleça estabelecimentos de maior tamanho. Quando comparamos as áreas de cultivo com aquelas destinadas ao pastoreio, observamos que a maior destinação das áreas agricultáveis na Região Centro-Oeste é para pastagens. A média das áreas de pastagens é de 90.418 hectares e o máximo de 923.658 hectares.

A análise do desvio padrão indica o grau de dispersão entre os estabelecimentos, em praticamente todas as variáveis analisadas, o que é compreensível quando se fala de atividade agropecuária. Maiores destaques são dados às variáveis Receita e Emissões de GEE, que apresentam graus de dispersão de R\$ 372.771 mil e 390.279 TonCO₂eq, respectivamente.

Dos 449 municípios (DMUs) analisados, 53,0% pertencem ao estado de Goiás, 29,4% ao estado do Mato Grosso e 17,4% a Mato Grosso do Sul. O Distrito Federal é considerado como apenas uma DMU, representando, portanto, 0,2% do universo.

A maior receita da atividade agropecuária é encontrada em Rio Verde (GO), seguido de dois municípios mato-grossenses, Sorriso e Sapezal. Embora Sorriso (MT) seja reconhecido mundialmente como a capital da soja, a atividade pecuária não tem destaque. Sapezal (MT) apresenta área de cultivo superior a Rio Verde, porém suas áreas de pastagens representam apenas 65% das áreas de pastagens do município goiano. Já Rio Verde (GO) apresenta um certo equilíbrio entre áreas de cultivo e pastagens, o que contribui para que lidere o *ranking* da receita agropecuária. Portanto, a geração de riqueza na Região Centro-Oeste está concentrada no Norte Mato-grossense e Sul Goiano, conforme observado na Tabela 3.

Tabela 3 – Participação percentual das mesorregiões nas variáveis analisadas (%).

	Área	Receita	Emissões GEE	Área de Preservação
Norte Mato-Grossense	21,32	26,96	18,25	32,18
Sul Goiano	11,84	18,84	13,40	6,32
Sudoeste de Mato Grosso do Sul	8,80	11,06	8,76	4,07
Sudeste Mato-grossense	5,55	7,40	4,61	4,81
Nordeste Mato-grossense	9,60	7,13	7,18	13,36
Total	57,10	71,40	52,20	60,74

Fonte: elaborado pelo autor.

Em seguida aparecem as mesorregiões do Sudoeste de Mato Grosso do Sul, Sudeste Mato-Grossense e Nordeste Mato-grossense, totalizando 71,40% da receita agropecuária da região. Essas mesmas mesorregiões, ou seja, cinco (1/3), detém 57,10% das áreas de cultivo e pastagens, 60,74% das áreas de preservação e respondem por 52,20% das emissões de GEE. A Tabela 03 permite verificar que há um alinhamento entre as variáveis Área, Receita, Emissões GEE e Área de preservação, pois em todas essas variáveis observa-se acima de 50% de participação das cinco principais mesorregiões. Os dados apresentam questões que parecem óbvias, como deter a maior receita estar relacionado também ao maior uso da terra e a pressão ambiental. Contudo, a forma como isso vai ser apresentado na análise de ecoeficiência poderá trazer informações importantes que possam correlacionar essas variáveis e explicar o modelo ecoeficiente, uma vez que estas mesmas regiões apresentam a maior concentração de áreas preservadas.

Analisando as emissões de gases de efeito estufa destes três municípios detentores da maior receita agropecuária, observa-se a mesma posição, ou seja, o município goiano lidera com o maior volume de emissões. Contudo, estes não são os maiores emissores da Região Centro-Oeste. Curiosamente o município pantaneiro de Corumbá (MS) lidera o ranking com emissões de 3.766.273 TonCO₂eq. Nesta localidade as áreas de pastagens somam 748.669 hectares frente a apenas 4.777 hectares de cultivo.

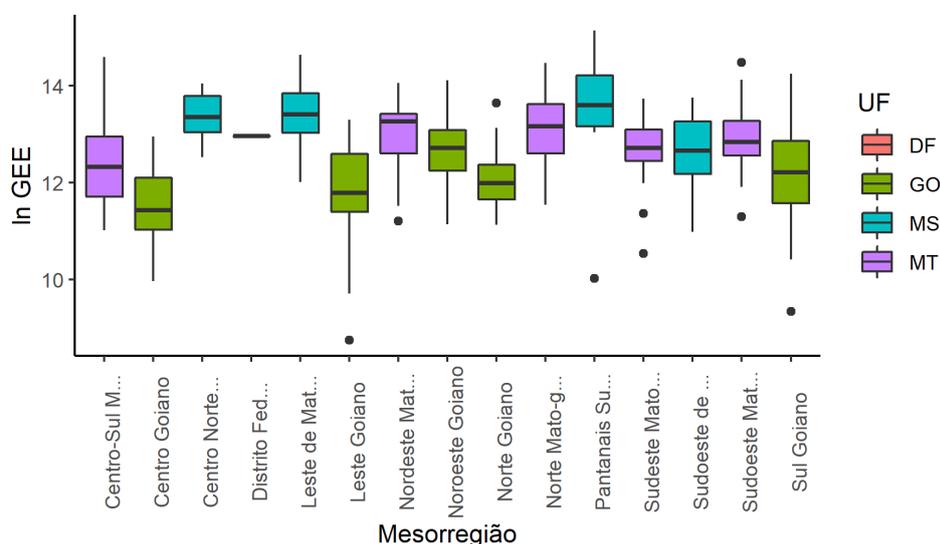
Analisando a emissão de GEE por mesorregião e estado, é possível observar padrões preliminares interessantes de serem ressaltados. Conforme depreende-se do gráfico de *box-plot* abaixo (ver Figura 3), entre as mesorregiões mais intensivas em emissão de carbono equivalente, destacam-se Centro Norte de Mato Grosso do Sul, Leste de Mato Grosso do Sul, Nordeste Mato-Grossense, Norte Mato-Grossense e Pantanaís Sul Mato-Grossense. Com efeito, há uma prevalência de municípios dessas mesorregiões e, evidentemente, dos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul em termos de geração de impactos ambientais pela atividade agropecuária.

Adiciona-se a isso que, relativamente às mesorregiões de Goiás, a dispersão dos dados é menor nas duas UFs mato-grossenses em análise, o que indica maior homogeneidade dessas regiões em torno de um patamar de emissão. Em geral, esses indícios são relevantes, pois, na análise da ecoeficiência da amostra em estudo, é de se esperar que esses municípios tenham desempenho econômico-ambiental reduzido. Isso pode ser observado especialmente se a contrapartida produtiva desses casos não for compensatória o suficiente para manter o nível de ecoeficiência maior. Dito de outra forma, a penalização nos indicadores deve estar relacionada com a relação intensidade de impactos ambientais e produção agropecuária. Quanto mais necessária a formação de GEE para produção agrícola marginal, menos ecoeficiente esses municípios podem ser.

No que diz respeito às áreas de preservação, produto desejável nesta análise, mais uma vez aparece o município de Corumbá (MS) com a maior área preservada, cerca de 1.098.755 hectares. Portanto, na região Centro-Oeste o município que mais emite GEE e o mesmo que tem maior área preservada. O comportamento verificado na análise da Figura 4 reflete algo muito similar às emissões de GEE, ou seja, as maiores áreas de preservação estão localizadas nos municípios do Mato Grosso e

Mato Grosso do Sul, com destaque para as mesorregiões dos Pantanaís Sul Mato-Grossenses e Norte Mato-grossense.

Figura 3 – tendência central e dispersão da GEE por mesorregião e UF

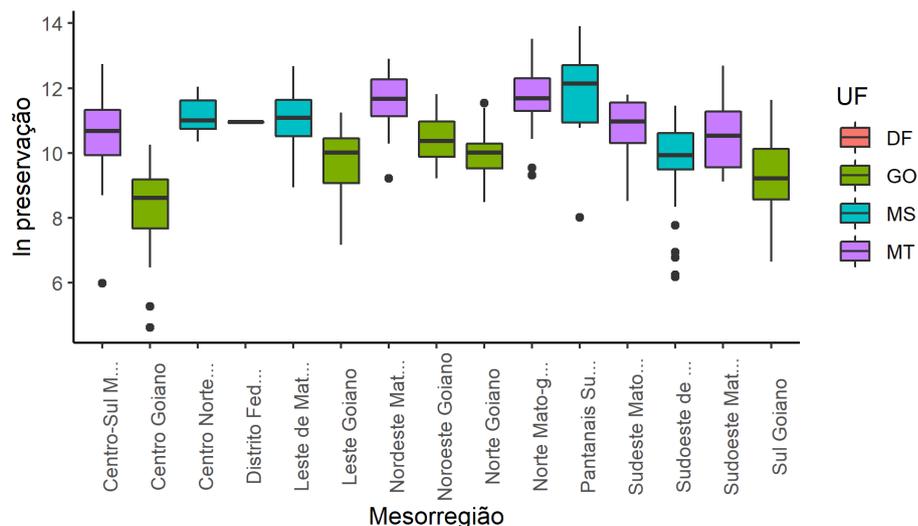


Fonte: elaborado pelo autor.

Aprofundando essa análise, da análise dos *box-plots* depreende-se que, além das duas mesorregiões citadas, Nordeste Mato-Grossense, Leste de Mato Grosso do Sul e Centro Norte de Mato Grosso do Sul apresentam medianas elevadas e maior homogeneidade da distribuição em torno da média. Aqui, vale notar que há uma convergência entre as mesorregiões que mais emitem gases de efeito estufa e aquelas que mais preservam áreas. Esse dado é relevante, pois, por um lado, a intensidade em geração de externalidades negativas ambientais tem como contrapartida uma maior preservação de áreas naturais, por outro, será interessante verificar o peso de ambas as variáveis na determinação dos indicadores de ecoeficiência. Isto é, se o efeito líquido das externalidades ambientais na ecoeficiência será positivo ou negativo.

Outrossim, novamente há uma prevalência dos estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul em termos de valor absoluto da externalidade ambiental em análise. Uma análise a nível de UF será igualmente relevante para compreender o impacto do baixo nível de preservação dos municípios de Goiás quando comparados com as demais UFs do Centro-Oeste. Em suma, as municipalidades Mato-grossenses parecem determinar a tendência do desempenho agrícola e pecuário dessa região brasileira.

Figura 4 – tendência central e dispersão da área preservada por mesorregião e UF



Fonte: elaborado pelo autor.

A tabela 4 apresenta os dados médios de insumos e produtos, de forma a verificar o comportamento dos estados analisados a partir da agregação dos dados de seus municípios. Como o Distrito Federal é considerado na amostra com apenas uma DMU, seu dado médio é equivalente ao valor total. Portanto, não tem valor médio compatível com os demais estados.

Tabela 4 – Insumos e produtos objeto de análise.

UF	DMUs	Área (lavouras)	Área (pastagens)	Combustíveis	Despesas (Insumos)	Salários	Receita da Agropecuária	Área Preservada	Emissões GEE
DF	1	108.865	27.751	47.939	727.853	129.485	923.082	57.308	424.570
GO	238	41.003	90.418	12.255	184.742	21.500	247.024	59.996	387.394
MS	78	46.418	163.894	17.752	256.002	36.326	312.032	75.758	625.281
MT	132	74.511	125.326	18.612	288.053	25.936	390.792	122.587	531.942

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, feita a ressalva em relação ao Distrito Federal, a análise terá foco nos demais estados. Verifica-se que o estado de Mato Grosso desponta com a maior receita média da agropecuária da região, assim como emprega maior dispêndio médio com insumos. Todavia, na média, o estado do Mato Grosso tem dispêndio com salários menor que Mato Grosso do Sul. Observa-se certa homogeneidade em relação

à geração de receita entre os estados analisados, acompanhando a mesma tendência quando se observa o emprego dos fatores de produção, apontando possível convergência no aspecto da eficiência. A área média de pastagens é significativamente maior que a de lavouras em todos os estados, o que demonstra uma vocação pecuária na região em estudo, ainda que seja o principal celeiro de grãos do país.

O estado do Mato Grosso detém a maior média de área preservada entre os municípios da região Centro-Oeste, destacando-se frente os demais estados. Contudo, assim como seu vizinho, Mato Grosso do Sul, lidera nas emissões de GEE, promovendo maior pressão ambiental, alinhado com o maior emprego de fatores de produção e geração de receita.

Assim, será relevante investigar através do modelo matemático se os municípios que detém maior receita e utiliza mais insumos são ecoineficientes ou se estão compensados pela externalidade positiva da área preservada, obtendo balanço positivo.

4.2 Ecoeficiência: modelo determinístico

Segundo o modelo DEA-CRS, a ecoeficiência média da agropecuária da Região Centro-Oeste **é de 67,8%**, o que implica dizer que é possível reduzir os insumos e aumentar os produtos equiproporcionalmente em 32,2%. Resultado semelhante foi encontrado por Peña, et al. (2021) ao analisar a ecoeficiência da agropecuária na Região Amazônica por meio do modelo DEA-DDF, concluindo que, na média, os municípios daquela região poderiam aumentar a produção em 38,2%, reduzindo os insumos e as áreas degradadas na mesma proporção.

Observou-se uma amplitude bastante significativa entre o valor mínimo e máximo de ecoeficiência, assim como elevado desvio padrão de 0,20, o que já era esperado dada a heterogeneidade dos municípios que pertencem à região. São múltiplos municípios de estados diferentes que não necessariamente tem a mesma vocação agrícola, perfazendo este, uma limitação aos resultados apresentados.

O modelo DEA-VRS orientado aos insumos aponta ecoeficiência média de **73,3%**, indicando que seria possível reduzir 26,7% do uso de fatores de produção na região, mantendo o mesmo nível de outputs, diminuindo assim a pressão ambiental

da agropecuária da Região Centro-Oeste. Sob a ótica do modelo DEA-VRS orientado aos produtos, encontrou-se ecoeficiência muito similar ao modelo orientado aos insumos, ou seja, ecoeficiência de **73,4%**, demonstrando ser possível aumentar em 26,6% a produção mantendo o mesmo nível de consumo de recursos. Todavia, dada as especificidades da produção agropecuária, os produtores rurais têm mais controle no uso de insumos do que no resultado da sua produção, a qual está via de regra, sob influência de fatores exógenos, como riscos climáticos, pragas e doenças.

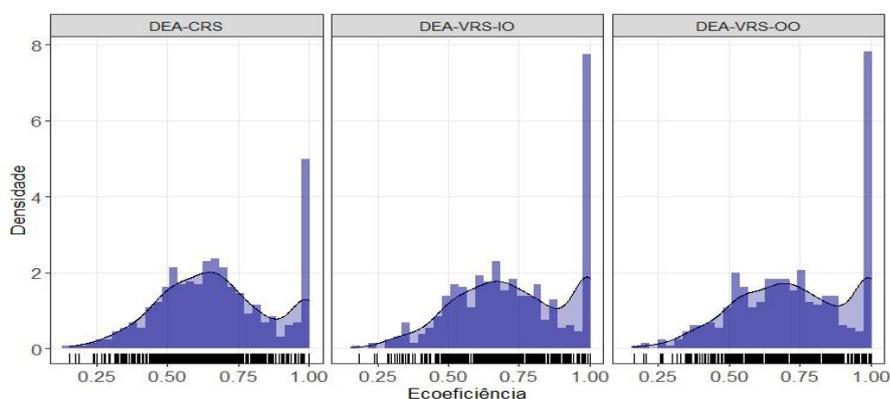
Tabela 5: ecoeficiência média da produção agropecuária

Modelo	Média	Desv.pad	Mín	Max
DEA-CRS	0,678	0,201	0,155	1,000
DEA-VRS-IO	0,733	0,201	0,186	1,000
DEA-VRS-OO	0,734	0,203	0,165	1,000

Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 5 apresenta a distribuição dos escores de ecoeficiência, com a frequência absoluta dos indicadores a partir de intervalos de 0,05 e sua respectiva densidade. Notadamente, é possível observar que há uma concentração em torno de 0,5 e 0,75. Entretanto, é evidente também que os modelos VRS apresentam maior assimetria à esquerda da distribuição e, conseqüentemente, concentração de municípios com níveis mais próximos a 1 de ecoeficiência. Essa característica é esperada porque os modelos VRS são mais benevolentes ao comparar apenas unidades de tamanho similar, de modo que os índices de ecoeficiência tendem a se aglutinar em torno de valores mais próximos a unidade.

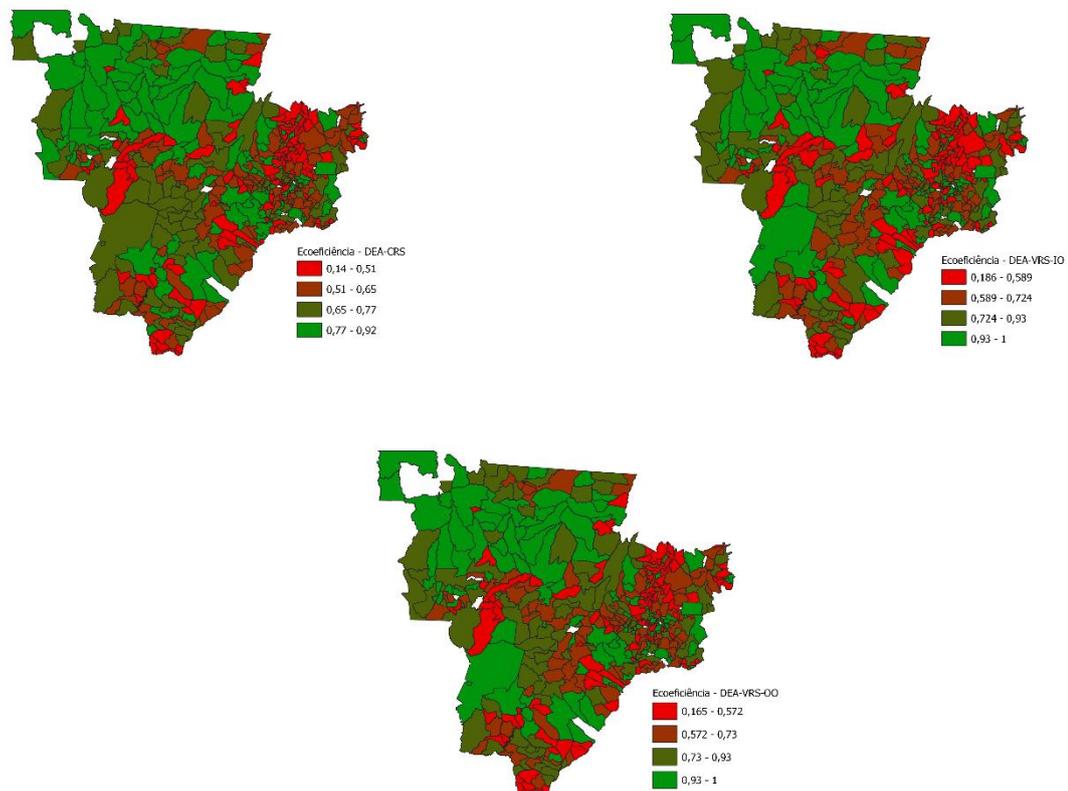
Figura 5: densidade e histograma dos índices de ecoeficiência



Fonte: elaborado pelo autor.

Adicionalmente, a Figura 6 apresenta a distribuição espacial dos índices de ecoeficiência dos municípios do Centro-Oeste, considerando os modelos determinísticos. Naturalmente, há uma convergência dessa distribuição entre as diferentes orientações e modelos DEA, assim como notado na análise acima, de modo que a principal diferença ocorre na densidade do último quartil, que apresenta maior quantidade de observações entre 0,9 e 1 para os modelos com retornos variáveis de escala. Contudo, a principal evidência dessa análise é que parece haver associação espacial entre os índices de ecoeficiência, pois é nítida a presença de agrupamentos de municipalidades dentro do mesmo intervalo de desempenho.

Figura 6: distribuição espacial da ecoeficiência dos municípios do Centro-Oeste



Fonte: elaborado pelo autor.

Desta feita, por um lado, ressalta-se o ótimo desempenho econômico-ambiental dos municípios do Mato Grosso, que formam *hotspots* de melhores práticas de ecoeficiência em relação a amostra. Por outro lado, é igualmente evidente a formação

de conglomerados de baixa ecoeficiência no estado de Goiás e mais ao Sul do Mato Grosso do Sul. Nesse sentido, formuladores de políticas públicas podem considerar essas ilhas de alta ecoeficiência como possíveis *benchmarks* para cidades próximas. Similarmente, em regiões com ilhas de baixa ecoeficiência, as políticas podem se centrar em municípios outliers próximos geograficamente para buscar gerar efeitos de *spillover*.

4.2.1 - Metas de melhorias

Tão importante quando estimar a ecoeficiência, é extrair do modelo as metas de melhorias, que são as projeções de cada variável para a fronteira ecoeficiente, ou seja, estimar as metas para redução dos insumos e da externalidade negativa e para expansão do produto desejável e da externalidade positiva, conforme Tabela 6.

Tabela 6: metas de melhorias – Outputs

Modelo	Receitas	Area_p
DEA-CRS	54.119,05	13.921,78
DEA-VRS	39.156,9	9.396,51

Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando a receita da agropecuária na Região Centro-Oeste, o modelo DEA-CRS voltado ao produto indica que seria possível para um município representativo da amostra, na média, expandir sua receita em R\$54,11 milhões, assim como preservar 13.921,78 ha a mais, tornando-se mais produtivo e menos opressor do meio ambiente. O modelo DEA-VRS aponta que seria possível, na média, aumentar a receita da agropecuária em R\$ 39,15 milhões mantendo o mesmo patamar de utilização de insumos e também preservar mais 9.396,51 ha.

Tabela 7: metas de melhorias – inputs

Modelo	Cultivo	Pasto	Salários	Capital	Desp_ins	GEE
DEA-CRS	9.025,87	27.520,31	5.987,93	3.157,95	44.949,70	112.749,20
DEA-VRS	7.133,76	22.019,80	4.971,47	2.574,99	36.522,54	90.406,130

Fonte: elaborado pelo autor.

A respeito da externalidade negativa (GEE), o modelo DEA-CRS aponta para a possibilidade de um município localizado na Região Centro-Oeste reduzir suas emissões, na média, em 112.749,20 TonCO₂eq sem perder desempenho produtivo, valor que chega a 90.406,13 TonCO₂eq no modelo DEA com retornos variáveis de escala para o município se tornar ecoeficiente. Esta informação é bastante valiosa, pois serve de subsídio à formulação de políticas públicas voltadas à preservação do meio ambiente e redução do aquecimento global pela emissão de gases de efeito estufa.

A análise da ecoeficiência média por mesorregião, por outro lado, permite encontrar possíveis agrupamentos e características semelhantes em termos de desempenho no espaço geográfico. De acordo com os resultados listados na Tabela 8, observa-se que os maiores níveis de ecoeficiência média são encontrados no Norte Mato-grossense e no Sudoeste Mato-grossense. Nestas mesorregiões é possível identificar municípios que são referência e estão na vanguarda em termos tecnológicos. Como exemplo, podemos citar Sorriso, Sinop e Lucas do Rio Verde, ambos às margens da BR 163, importante corredor logístico para exportação via portos do arco norte.

Tabela 8: ecoeficiência média – mesorregião

Mesorregião	DEA-CRS	DEA-VRS-IO	DEA-VRS-OO
Centro-Sul Mato-grossense	0,6422	0,6874	0,6892
Centro Goiano	0,5788	0,6527	0,6278
Centro Norte de Mato Grosso do Sul	0,6672	0,7356	0,7573
Distrito Federal	1,0000	1,0000	1,0000
Leste de Mato Grosso do Sul	0,6204	0,6651	0,7015
Leste Goiano	0,5875	0,6819	0,6612
Nordeste Mato-grossense	0,6703	0,7429	0,7519
Noroeste Goiano	0,6803	0,7049	0,7076
Norte Goiano	0,5497	0,6024	0,5811
Norte Mato-grossense	0,7908	0,8402	0,8502
Pantanaís Sul Mato-grossense	0,6642	0,7716	0,7843
Sudeste Mato-grossense	0,7122	0,7579	0,7776
Sudoeste de Mato Grosso do Sul	0,6088	0,6361	0,6499
Sudoeste Mato-grossense	0,7208	0,7741	0,7879
Sul Goiano	0,6523	0,7015	0,7049

Fonte: elaborado pelo autor.

Na média, os municípios localizados no Norte Mato-grossense têm ecoeficiência de 79,08%, o que implica dizer que poderiam aumentar sua produção em 20,92% reduzindo a quantidade de insumos equiproporcionalmente, segundo o

modelo DEA -CRS. Por outro lado, a partir do modelo DEA-VRS, voltado aos insumos, a ecoeficiência encontrada é de 84,02%. Assim, os municípios localizados na referida mesorregião poderiam, na média, reduzir a utilização dos recursos na ordem de 15,98%, mantendo o mesmo nível produtivo. Considerando a alta dos custos de produção verificada entre 2021 e 2022, anos de pandemia, em que segundo a Esalq/USP (2022)², os fertilizantes tiveram majoração de 153,6% de um ano para o outro, os resultados apontados por este estudo se tornam ainda mais relevantes como ferramenta para uma análise pormenorizada para a tomada de decisões no ambiente técnico/produtivo.

Os resultados apurados retomam às impressões verificadas na análise descritiva, pois a mesorregião Norte Mato-grossense lidera o *ranking* da ecoeficiência e, como visto anteriormente, detém a maior participação percentual na receita (26,96%) e na área de preservação (32,18%), o que indica intensa atividade produtiva, contudo com equilíbrio do ponto de vista da preservação de matas nativas. Na contramão, o Norte Mato-grossense detém 18,25% das emissões de GEE, exercendo, portanto, a maior pressão ambiental com emissão de gases de efeito estufa e ainda assim detém a maior quantidade de municípios na fronteira ecoeficiente, o que demonstra que a contrapartida produtiva dos municípios do Norte Mato-grossense é compensatória o suficiente para alcançar maiores índices de ecoeficiência.

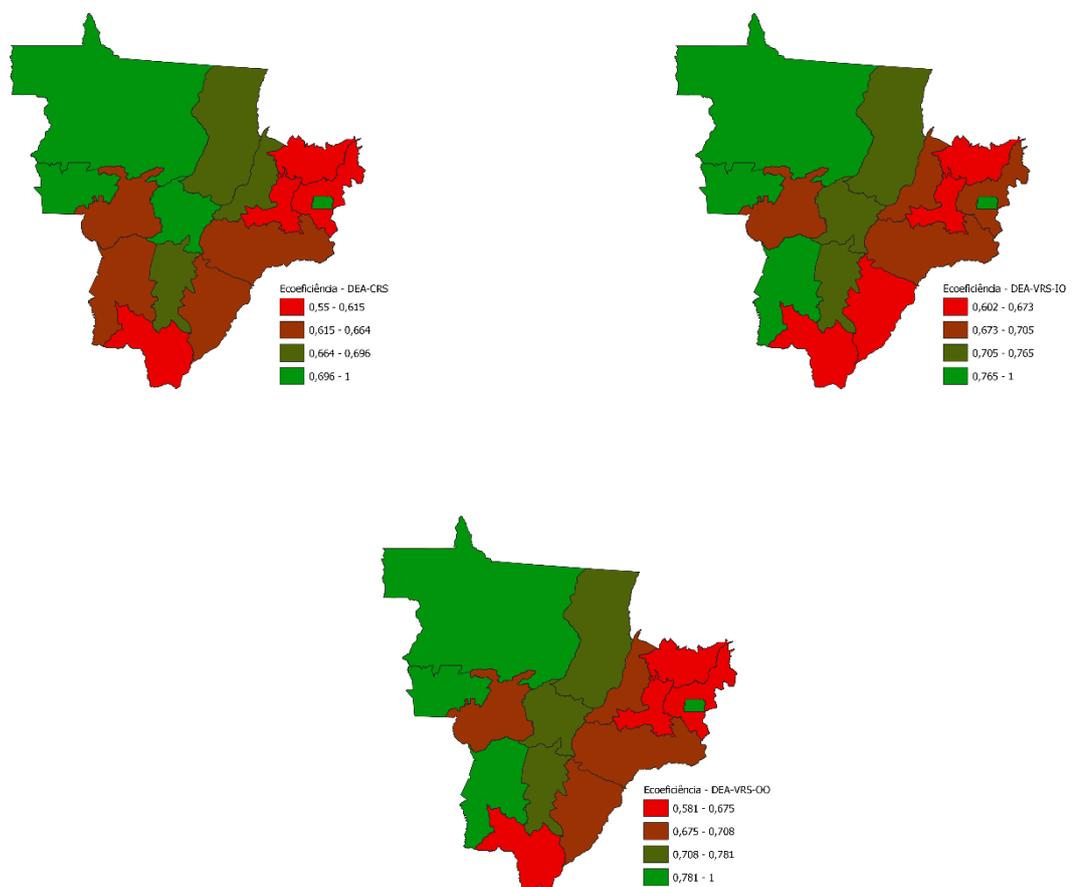
A menor dispersão das emissões de GEE verificada na análise descritiva para as UFs Mato-grossenses indicaria uma tendência de que os municípios destes estados tivessem desempenho econômico-ambiental reduzido, o que não se confirmou para as UFs do Mato Grosso, mais uma vez reforçando a compensação produtiva daquele estado para o alcance de índices de ecoeficiência próximos a 1. Portanto, diante da convergência entre as mesorregiões que mais emitem gases de efeito estufa e aquelas que mais preservam áreas, o efeito líquido das externalidades ambientais, teve a capacidade produtiva como contrapeso na fronteira ecoeficiente.

Por outro lado, Centro Goiano, Leste Goiano, Norte Goiano são as mesorregiões com maior nível de ecoineficiência. Os valores encontrados a partir do modelo DEA-CRS demonstram que no Norte Goiano seria possível aumentar a

² <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/opiniao-cepea/gasto-medio-com-fertilizantes-para-producao-de-graos-dobra-em-um-ano.aspx>

produção em 45,03% reduzindo os inputs e emissão de gases efeito estufa equiproporcionalmente. O modelo DEA-VRS voltado aos insumos indica possibilidade de redução dos insumos e pressão ambiental em expressivos 39,76%, garantindo o mesmo nível produtivo. No Norte Goiano predomina a atividade pecuária, sistema extensivo, normalmente caracterizado por ser menos produtivo.

Figura 7: distribuição espacial da ecoeficiência média por mesorregião



Fonte: elaborado pelo autor.

Além disso, ainda na análise de mesorregiões, a distribuição espacial dos indicadores de ecoeficiência por mesorregião é elucidativa e confirma a análise anterior dos dados resultados georreferenciados por municípios: há uma maior concentração de ilhas de baixa ecoineficiência nas mesorregiões do estado de Goiás e uma maior concentração de ilhas de alta ecoeficiência no estado do Mato Grosso.

Esse apontamento reforça a possibilidade de correlação espacial dos resultados, já que indica que municípios próximos uns aos outros tendem a ter feições similares entre si. Nesse ponto, destaca-se as mesorregiões Norte Mato-Grossense, Sudoeste Mato-Grossense e Pantanaís Sul Mato-Grossense, que se mantiveram no maior estrato de ecoeficiência nos três modelos clássicos.

Os dados apresentados na Tabela 9 confirmam que a nível de estado, o Mato Grosso é o Estado mais ecoeficiente. Goiás e Mato Grosso do Sul apresentam níveis de ecoeficiência muito próximos considerando os modelos DEA-CRS e DEA-VRS com orientação para os insumos. A diferença aumenta mais significativamente a partir do modelo DEA-VRS voltado aos produtos, indicando que o Estado de Goiás tem mais espaço para aumento da produção, mantendo os mesmos níveis de consumo dos recursos produtivos.

Tabela 9: ecoeficiência média – UF

UF	DEA-CRS	DEA-VRS-IO	DEA-VRS-OO
DF	1,0000	1,0000	1,0000
GO	0,6094	0,6713	0,6587
MS	0,6278	0,6733	0,6935
MT	0,7262	0,7797	0,7905

Fonte: elaborado pelo autor.

É importante destacar as limitações dos modelos clássicos DEA empregados até aqui. A fronteira ecoeficiente é calculada e não estimada, de modo que se presume que os índices observados são os índices reais, ou seja, não existem ruídos estocásticos que possam distanciar o valor da amostra do valor real de ecoeficiência, trazendo ainda indicadores superestimados. Visando minimizar esses efeitos, aplica-se a técnica DEA com duplo *bootstrap*, incorporando o fator aleatório e probabilístico no cálculo, que produz resultados mais robustos e permite inferência estatística nos índices DEA, e permitindo testar a hipótese da influência de fatores exógenos sem perda de consistência dos coeficientes da regressão *Tobit*.

4.3 Ecoeficiência: modelo estocástico

4.3.1 Primeiro estágio: índices de ecoeficiência *bootstrapped*

As Tabelas 10, 11 e 12 apresentam os resultados dos índices de ecoeficiência, comparando os resultados entre os modelos determinístico (clássicos) e semi-paramétricos. Notadamente, percebe-se que os índices determinísticos superestimam a ecoeficiência, produzindo valores ligeiramente mais altos nos escores, em média. O viés representa a diferença entre o índice determinístico e o índice bootstrap. Com efeito, os modelos DEA com bootstrap são mais robustos porque consideram choques estocásticos na fronteira de ecoeficiência.

Tabela 10: ecoeficiência média – modelo determinístico e semi-paramétrico (CRS)

Descrição	Determinístico $\hat{\theta}_i$	Bootstrap $\tilde{\theta}_i$
Média	0,678	0,596
Viés	-	0,081
IC 95% Sup.	-	0,643
IC 95% Inf.	-	0,546
Mediana	0,662	0,593
Desvio Padrão	0,200	0,165
Máximo	1,000	0,921
Mínimo	0,155	0,135

Fonte: elaborado pelo autor.

O índice de ecoeficiência médio gerado pelo procedimento bootstrap é de 0,5960, o que demonstra a possibilidade dos municípios da Região Centro-Oeste, na média, reduzirem a utilização de fatores de produção e o impacto no meio ambiente em 40,4%, aumentando equiproporcionalmente o nível produtivo e de áreas preservadas. O viés estimado de 0,0810 é bastante significativo, reforçando o que o modelo semi-paramétrico demonstra, de haver ainda mais espaço para que a agropecuária se torne ecoeficiente, reduzindo mais recursos e a pressão ambiental, sem comprometer a produção.

O modelo clássico DEA-VRS-IO apontou que 67 municípios (14,92% do total) da Região Centro-Oeste atingiram o nível ótimo estimado na fronteira original, sendo considerados, portanto, ecoeficientes. Aplicando-se o procedimento de reamostragem, o nível máximo de ecoeficiência encontrado foi de 0,9060, o que indica que até mesmo os municípios considerados como benchmark, não alocam os

recursos produtivos de forma eficiente, ao passo que exercem pressão desnecessária no meio ambiente.

Tabela 11: ecoeficiência média – modelo determinístico e semi-paramétrico (VRS-IO)

Descrição	Determinístico $\hat{\theta}_i$	Bootstrap $\tilde{\theta}_i$
Média	0,733	0,633
Viés	-	0,100
IC 95% Sup.	-	0,703
IC 95% Inf.	-	0,567
Mediana	0,724	0,646
Desvio Padrão	0,200	0,160
Máximo	1,000	0,906
Mínimo	0,186	0,158

Fonte: elaborado pelo autor.

Assim, seria possível um município representativo da Região Centro-Oeste reduzir a utilização de insumos e as emissões em 9,4%, mantendo o nível produtivo e de preservação. Considerando a despesa média com insumos de R\$184,7 milhões, seria possível economizar R\$17,3 milhões, entregando o mesmo patamar produtivo e de preservação. Estes mesmos parâmetros indicam ainda, que a atividade agropecuária nesta municipalidade poderia ter emitido 36.415 TonCO₂eq a menos.

Consoante os índices demonstrados da Tabela 12, o modelo DEA- VRS voltado aos produtos indica potencial de aumento da produção de 8,5% de um município representativo da Região Centro-Oeste, mantendo o mesmo patamar de utilização de insumos.

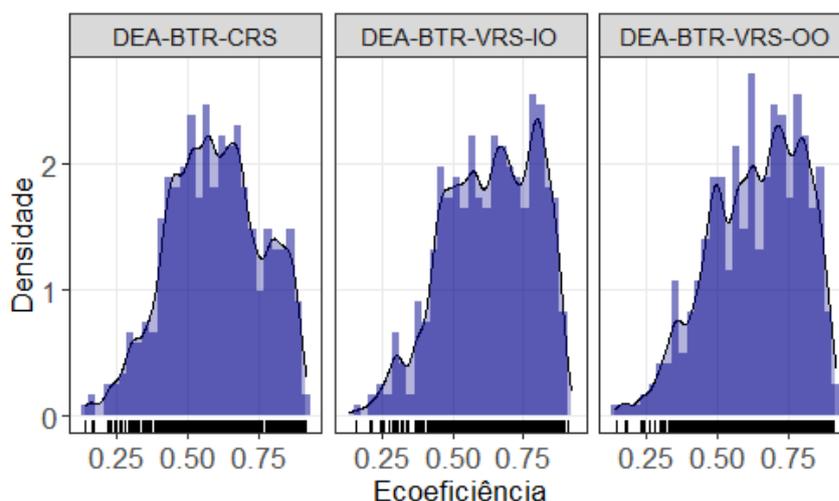
Tabela 12: ecoeficiência média – modelo determinístico e semi-paramétrico (VRS-OO)

Descrição	Determinístico $\hat{\theta}_i$	Bootstrap $\tilde{\theta}_i$
Média	0,734	0,637
Viés	-	0,097
IC 95% Sup.	-	0,706
IC 95% Inf.	-	0,574
Mediana	0,730	0,653
Desvio Padrão	0,202	0,164
Máximo	1,000	0,915
Mínimo	0,165	0,142

Fonte: elaborado pelo autor.

Ao analisar a distribuição dos índices de ecoeficiência com a reamostragem apresentados na Figura 8, o histograma aponta que há uma maior concentração de valores em torno do segundo e terceiro quartis, com exceção no modelo DEA-BTR-VRS com orientação aos produtos, cuja concentração está entre o terceiro e quarto quartil, o que reforça a tese de que há menos espaço para alcance da ecoeficiência pelo olhar da produção quando comparado à alocação dos recursos produtivos. A distribuição não é mais truncada em 1, de modo que municípios que eram ecoeficientes nos modelos determinísticos, não são mais aqui.

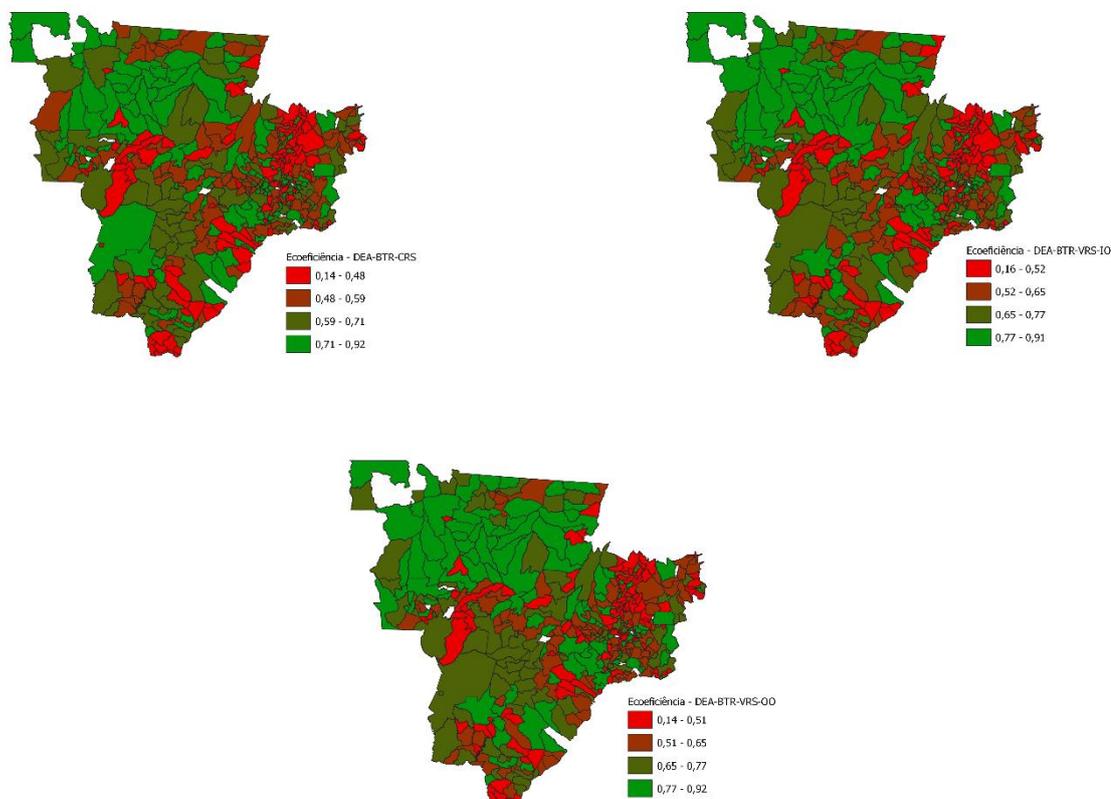
Figura 8: densidade e histograma dos índices de ecoeficiência bootstrapped



Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 9, tem-se a distribuição espacial municipal dos índices de ecoeficiência *bootstrapped*. Aqui, a análise corrobora com o outrora levantado nos resultados determinísticos, haja vista que existem ilhas de alta ecoeficiência no Mato Grosso, que podem funcionar como *spillovers* espaciais para outras regiões próximas, e existe também alta concentração ilhas de baixa ecoeficiência no Goiás, de modo que municípios com desempenho atípico, próximos a essa região, podem ser estudados para replicar suas práticas nessas ilhas próximas. A principal diferença em relação a análise dos indicadores determinísticos reside no apontamento basilar do procedimento de reamostragem, isto é, que os índices de ecoeficiência estão tipicamente superestimados no primeiro caso, o que demonstra a robustez da DEA-BTR.

Figura 9: distribuição espacial dos indicadores de ecoeficiência *bootstrapped*



Fonte: elaborado pelo autor.

No que tange às projeções das cidades ineficientes na fronteira, a Tabela 13 traz as metas de melhorias a partir do modelo semi-paramétrico, para expansão dos produtos desejáveis, ou seja, da Receita Agropecuária e da Área de Preservação.

Tabela 13: metas de melhorias modelo semi-paramétrico. – Outputs

Modelo	Receitas	Area_p
DEA-BTR-CRS	75.215,09	19.790,60
DEA-BTR-VRS	64.532,28	16.311,44

Fonte: elaborado pelo autor.

Face à robustez do modelo semi-paramétrico, tem-se agora projeções médias maiores do que o modelo determinístico apresentou. Ou seja, o modelo DEA-BTR-CRS voltado ao produto indica que seria possível para um município da Região Centro-Oeste, na média, expandir sua receita em R\$75.215,09 (mil), assim como preservar 19.790 ha a mais, tornando-se mais produtivo e mais sustentável ambientalmente. A diferença para o modelo clássico é de uma receita de R\$21,0 milhões e de 6.914 ha. Esta mesma municipalidade poderia ainda, segundo o modelo DEA-BTR-VRS, aumentar a receita da agropecuária em R\$64.532,28 (mil) mantendo o patamar de utilização de insumos e também preservar mais 16.311 ha.

As metas de melhorias para redução dos insumos e da externalidade negativa para o modelo semi-paramétrico são apresentadas no Tabela 14.

Tabela 14: metas de melhorias modelo semi-paramétrico – inputs

Modelo	Cultivo	Pasto	Salários	Capital	Desp. ins	GEE
DEA-BTR-CRS	12.439,44	35.029,49	7.742,35	4.166,31	60.311,88	144.844,30
DEA-BTR-VRS	11.539,27	31.498,33	7.209,51	3.871,17	56.260,85	131.114,90

Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme esperado, o procedimento com *bootstrap* apresenta índices mais robustos quando comparados ao modelo determinístico, mostrando que um município localizado na Região Centro-Oeste pode reduzir suas emissões, na média, em 144.844 TonCO₂eq sem perder desempenho produtivo, valor que chega a 131.114 TonCO₂eq no modelo DEA com retornos variáveis de escala para o município se tornar ecoeficiente. As diferenças entre os modelos são de 32.095 TonCO₂eq e 40.708 TonCO₂eq, respectivamente.

De outro modo, em média, um município da região poderia reduzir suas despesas com insumos na ordem de R\$60,0 milhões no modelo com retornos constantes de escala e de R\$56,2 milhões no modelo de retornos variáveis de escala, sem comprometer a produção. Com 47.468 ha a menos de áreas de cultivo e de pastagens, a atividade agropecuária teria a mesma performance produtiva de acordo com o modelo DEA-BTR-CRS, ao passo que com retornos variáveis de escala, essa redução seria da ordem de R\$43.037 ha. Considerando a conjuntura internacional, em que os olhares do mundo se voltam ao Brasil em função dos aspectos ambientais

e da produção, já que o país é um potencial fornecedor de alimentos, estes dados se mostram extremamente importantes no sentido de traçar estratégias que permitam ao país continuar expandindo sua produção, porém a partir de um modelo que exerça menos pressão no meio ambiente, utilizando menos insumos, poupando o uso da terra, emitindo menos gases de efeito estufa e preservando mais matas nativas.

A exemplo do que foi feito na seção anterior, com os dados da Tabela 15 retoma-se a análise dos parâmetros de ecoeficiência por mesorregião, agora com o modelo semi-paramétrico, portanto com os escores corrigidos, permitindo analisar se há agrupamentos caracterizados por desempenhos semelhantes. O Distrito Federal que no modelo clássico apresentou o nível máximo de ecoeficiência, continua liderando. Contudo, trata-se de uma mesorregião representada por apenas uma observação, diferentemente das demais mesorregiões que contam com diversas municipalidades. Assim, como feito até aqui, a análise se concentra nas demais mesorregiões.

Tabela 15: ecoeficiência média – mesorregião

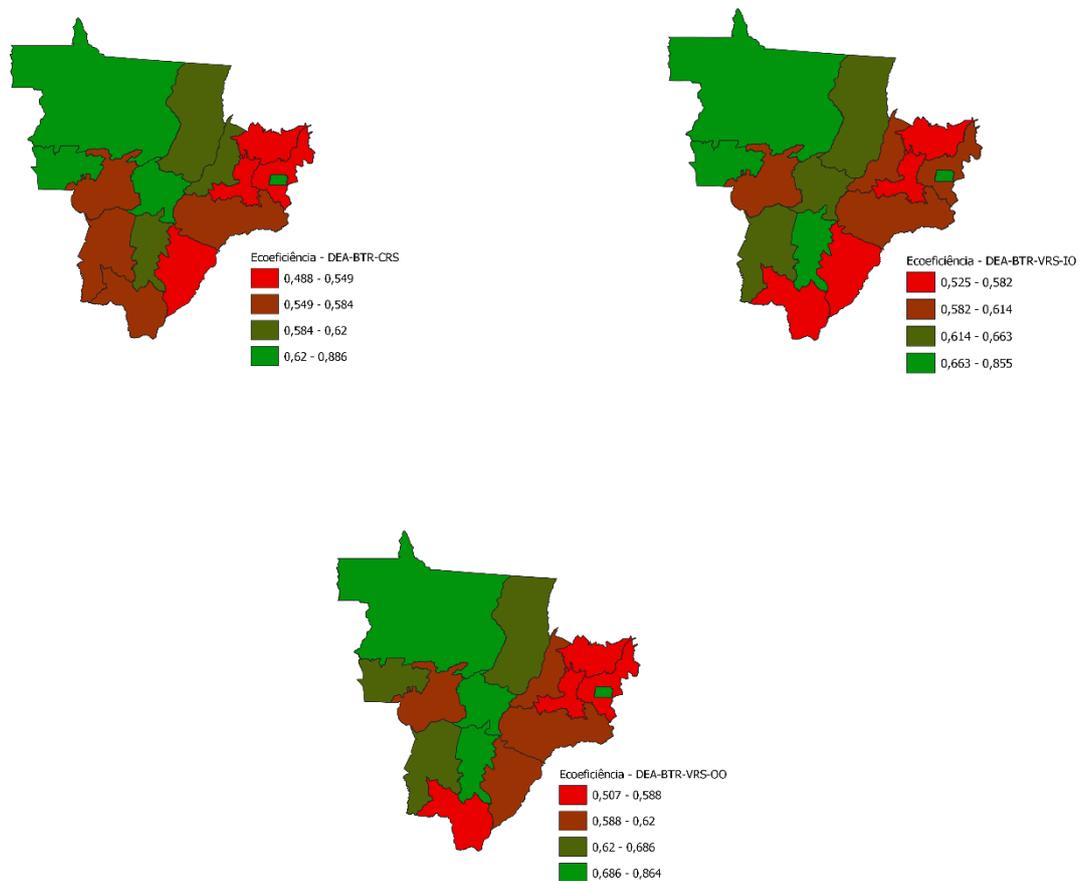
Mesorregião	DEA-BTR-CRS	DEA-BTR-VRS-IO	DEA-BTR-VRS-OO
Centro-Sul Mato-grossense	0,5542	0,5899	0,5925
Centro Goiano	0,5030	0,5516	0,5292
Centro Norte de Mato Grosso do Sul	0,6116	0,6633	0,6889
Distrito Federal	0,8858	0,8550	0,8639
Leste de Mato Grosso do Sul	0,5469	0,5752	0,6150
Leste Goiano	0,5223	0,5889	0,5675
Nordeste Mato-grossense	0,5895	0,6438	0,6601
Noroeste Goiano	0,6038	0,6144	0,6202
Norte Goiano	0,4881	0,5247	0,5074
Norte Mato-grossense	0,6948	0,7280	0,7450
Pantanaís Sul Mato-grossense	0,5694	0,6444	0,6563
Sudeste Mato-grossense	0,6334	0,6626	0,6884
Sudoeste de Mato Grosso do Sul	0,5503	0,5651	0,5833
Sudoeste Mato-grossense	0,6284	0,6682	0,6839
Sul Goiano	0,5838	0,6129	0,6201

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados trazem o Norte Mato-grossense com o maior índice de ecoeficiência (69,48%) com retornos constantes de escala, indicando uma disparidade

em relação às demais mesorregiões. Os dados apontam possibilidade de redução de 27,2% dos insumos e de externalidade negativa para o mesmo nível de saídas, segundo o modelo DEA-VRS com orientação aos *inputs*. Já o Norte Goiano apresenta escore corrigido de 48,81%, figurando-se como a mesorregião menos ecoeficiente da Região Centro-Oeste.

Figura 10: distribuição espacial da ecoeficiência média por mesorregião



Fonte: elaborado pelo autor.

Complementarmente, a Figura 10 apresenta a distribuição espacial dos índices de ecoeficiência *bootstrapped* por mesorregião. A análise de indícios de associação espacial é corroborada, pois observa-se a manutenção de conglomerados de

ecoineficiência entre as mesorregiões goianas, ao passo que se observa agrupamentos de ecoeficiência entre as mesorregiões mato-grossenses. A convergência de análise entre os distintos modelos, sejam determinísticos ou semi-paramétricos, é importante porque confere robustez aos resultados encontrados.

Nesse sentido, os resultados de análise espacial encontrados nessa pesquisa podem ser considerados subsídios relevantes para eventuais políticas públicas de promoção de sustentabilidade da agricultura do Centro-Oeste, pois sugere-se que o espaço geográfico é uma variável cujo efeito na ecoeficiência não deve ser negligenciado e pode ser significativo na constituição do desempenho econômico-ambiental do agronegócio da região.

Ademais, a Tabela 16 apresenta o ranking da ecoeficiência média por UF, a partir da reamostragem com procedimento *bootstrap*. Retomando as conclusões apresentadas a partir do modelo semi-paramétrico, tem-se agora resultados mais robustos e menos enviesados, todavia, ainda apontando para a liderança do Distrito Federal. Analisando especificamente os estados mais expressivos em termos de atividade agropecuária, o Mato Grosso é o estado mais ecoeficiente, seguido do Mato Grosso do Sul e de Goiás. Considerando o modelo DEA com retornos variáveis de escala, conclui-se que ao comparar o Mato Grosso com Mato Grosso do Sul e Goiás, há maior aproximação entre os índices com orientação aos *inputs*, o que significa dizer que estes Estados podem ter um nível de ecoeficiência mais próximo um do outro em relação a forma como lançam mão dos recursos produtivos.

Tabela 16: ecoeficiência média – UF

UF	DEA-CRS	DEA-VRS-IO	DEA-VRS-OO
DF	0,8858	0,8550	0,8639
GO	0,5387	0,5788	0,5688
MS	0,5633	0,5932	0,6171
MT	0,6372	0,6753	0,6914

Fonte: elaborado pelo autor.

Por outro lado, a distância nos índices aumenta quando a análise é feita com orientação aos outputs, o que sinaliza possivelmente uma proximidade maior do limite tecnológico para o estado do Mato Grosso quando comparado ao Mato Grosso do Sul

e Goiás, que teriam um espaço muito maior para ganho de produtividade. Em outras palavras, um município do Mato Grosso pode, em média, aumentar o nível de *outputs* e de áreas preservadas em 30,16% mantendo o mesmo nível de *inputs*. No Mato Grosso do Sul e Goiás o aumento da produção e das áreas preservadas poderia ser de 38,29% e 43,12%, respectivamente.

4.3.2 Segundo estágio: Fatores determinantes da ecoeficiência

Buscando identificar os fatores determinantes da ecoeficiência da produção agropecuária na Região Centro-Oeste, foi realizada regressão Tobit nos índices de ecoeficiência *bootstrapped*, como segundo estágio. Os intervalos de confiança são estimados posteriormente ao segundo procedimento de *bootstrap*, que desta vez é utilizado na regressão a fim de gerar coeficientes consistentes. As tabelas abaixo condensam os resultados do segundo estágio, em que o intervalo de confiança utilizado como base foi de $\alpha = 0,1$ mas há o indicativo da significância estatística a 1%, 5% e 10%. As variáveis são inversamente relacionadas, ou seja, o sinal negativo do coeficiente representa que a variável tem um efeito positivo na ecoeficiência, ao passo que um sinal positivo indica um efeito negativo.

A Tabela 17 apresenta os coeficientes da regressão das variáveis explicativas nos índices estimados para o modelo de ecoeficiência com retornos constantes de escala.

Tabela 17: Fatores determinantes da ecoineficiência agropecuária do centro-oeste (DEA-BTR-CRS).

Variável	Coefficientes	IC inf. 5%	IC sup. 95%
Intercepto	2,0818**	0,1366	4,2360
z_1 - Assistência técnica	-2,7898**	-4,4694	-0,7388
z_2 - Escolaridade	-3,8481	-7,6820	0,3958
z_3 - Terras próprias	0,7062	-0,9841	2,2181
z_4 - Sexo	-0,6465	-5,2728	4,0837
z_5 - Crédito	-4,9864**	-7,8150	-1,7716
$\hat{\sigma}_e$	1,3429***	1,0742	1,5964

Fonte: elaborado pelo autor.

Nota: *** significativa ao nível de 1%; ** significativa ao nível de 5%; * significativa ao nível de 10%.

Observa-se que acesso ao crédito e à assistência técnica foram os fatores que apresentaram significância estatística com sinal negativo, a um nível de confiança de

95%, demonstrando que o financiamento da produção e a orientação técnica são ferramentas de grande impacto como promotores de ecoeficiência na Região Centro-Oeste. Este resultado era esperado e está alinhado ao que se verifica em estudos de ecoeficiência, como Khanal et al., 2018 ao analisar a eficiência técnica de fazendas no Nepal, concluindo que o acesso a crédito possibilita a utilização de tecnologias nas propriedades, o que melhora sua performance.

Os coeficientes estimados para o percentual das propriedades cujo produtor é o proprietário (Terras Próprias), cujo produtor principal é mulher (Sexo) e cujo produtor principal possui pelo menos ensino médio foram estatisticamente iguais a zero. Portanto, não é possível concluir pela existência de uma associação entre essas variáveis e o nível de ecoeficiência.

Tabela 18: Fatores determinantes da ecoeficiência agropecuária do centro-oeste (DEA-BTR-VRS-IO).

Variável	Coefficientes	IC inf. 5%	IC sup. 95%
Intercepto	1,4985	-0,3344	3,5431
z_1 - Assistência técnica	-2,3756**	-3,8261	-0,6694
z_2 - Escolaridade	-1,2026	-4,6708	2,4277
z_3 - Terras próprias	0,2338	-1,3476	1,6171
z_4 - Sexo	-0,7375	-5,0300	3,8593
z_5 - Crédito	-2,9582*	-5,1964	-0,1044
$\hat{\sigma}_e$	1,1800***	0,9086	1,4051

Fonte: elaborado pelo autor.

Nota: *** significativo ao nível de 1%; ** significativo ao nível de 5%; * significativo ao nível de 10%.

Analisando os fatores determinantes da ecoeficiência a partir do modelo BTR com retornos variáveis de escala e orientação aos insumos (Tabela 18), observa-se que a assistência técnica prevalece como principal variável indutora da ecoeficiência, se mostrando como o fator de maior consistência estatística na análise, já que apresenta a mesma significância nos modelos BTR-CRS e BTR-VRS-IO. Reforça-se então a importância de políticas públicas voltadas à assistência técnica na atividade agropecuária, notadamente no que diz respeito a gestão, já que o modelo voltado aos insumos indica a capacidade de redução dos recursos produtivos com possibilidade de manter o nível de saídas.

O acesso a financiamento (Crédito) aparece neste modelo com menor significância estatística e menor intensidade do efeito, indicado pelo menor valor do

coeficiente, mas ainda sinalizando, pelo sinal negativo do coeficiente, ser um fator indutor da ecoeficiência e corroborando para a importância do acesso ao crédito no desenvolvimento de práticas agrícolas eficientes tanto da perspectiva econômica como da perspectiva ambiental. Novamente, a variável escolaridade não apresentou significância estatística com retornos variáveis de escala, assim como terras próprias e sexo do produtor, tanto na orientação aos insumos quanto na orientação aos produtos, conforme apresentado nas Tabelas 18 e 19. Com efeito, não é possível concluir se há influência dessas variáveis na ecoeficiência das unidades.

Tabela 19: Fatores determinantes da ecoeficiência agropecuária do centro-oeste (DEA-BTR-VRS-OO).

Variável	Coefficientes	IC inf. 5%	IC sup. 95%
Intercepto	1,7736	-0,9256	5,2857
z_1 - Assistência técnica	-4,1277*	-6,6873	-0,6156
z_2 - Escolaridade	-3,0012	-8,0321	3,1944
z_3 - Terras próprias	0,7687	-1,9090	2,8714
z_4 - Sexo	-4,0396	-10,7284	3,3464
z_5 - Crédito	-6,9951*	-11,2277	-1,3217
$\hat{\sigma}_e$	1,5096***	1,0200	1,8756

Fonte: elaborado pelo autor.

Nota: *** significativa ao nível de 1%; ** significativa ao nível de 5%; * significativa ao nível de 10%.

Para o modelo BTR-VRS com orientação aos produtos (Tabela 19), os resultados do coeficiente para o acesso a crédito e assistência técnica estão alinhados como modelo BTR-CRS, porém com uma diferença sensível na magnitude do efeito. No modelo com retornos variáveis de escala e orientação ao produto, o valor do coeficiente de assistência técnica é 1,73x maior que o valor desse coeficiente para o modelo orientado aos insumos com retornos variáveis e 1,48x maior que o valor do modelo com retornos constantes. Semelhantemente, em relação ao acesso à crédito, o modelo VRS-OO apresentou coeficiente associado a essa variável 2,35x quando comparado com o resultado do modelo VRS-IO e 1,4x maior em comparação ao modelo com retornos constantes a escala.

Pode-se encarar essa diferença como uma evidência de uma maior intensidade do efeito da assistência técnica e do acesso ao crédito na promoção de ecoeficiência agrícola do Centro-Oeste quando se considerando a ótica de otimização do nível de produção e ineficiências de escala. Assim, o desenho de políticas públicas pode priorizar programas de assistência técnica e acesso a financiamento tendo em vista

principalmente a expansão da produção sem aumento do consumo de insumos e do nível de impacto ambiental via emissão de gases de efeito estufa.

Além disso, uma análise geral dos três modelos indica uma forte convergência e, conseqüentemente, robustez dos fatores determinantes observados. Nesse sentido, a manutenção do sinal do coeficiente e significância estatística entre os três modelos para os fatores de assistência técnica e acesso a crédito indica que essas variáveis são robustas a variações no modelo de ecoeficiência e que, portanto, tem impacto significativo na ecoeficiência agropecuária do Centro-Oeste.

Similar afirmação pode ser feita com relação as variáveis de escolaridade, sexo e terras próprias, que também apresentaram robustez em relação aos modelos escolhidos. Esses resultados são evidências sólidas de como as políticas públicas de indução de sustentabilidade da agricultura e pecuária da região devem considerar aspectos como financiamento e promoção de boas práticas de gestão entre os produtores, mas não tanto escolaridade, gênero e se o produtor principal é dono das terras, pois estes não apresentam efeito na ecoeficiência agropecuária da região.

No que tange à variável de assistência técnica, é uma convergência com a com trabalho recente em relação ao seu efeito: Silva et al. (2022) encontra efeito similar ao avaliar a ecoeficiência da agricultura dos municípios do bioma Amazônico e observar efeito positivo da assistência técnica na promoção de ecoeficiência na região. Entretanto, Huy e Nguyen (2019), ao avaliar a eficiência técnica de regiões do Vietnam, não observam efeito estatisticamente significativo para ações de extensão rural.

Por outro lado, o resultado de efeito positivo do acesso à crédito na ecoeficiência agrícola converge com os resultados de Chandio et al. (2017), que analisam a eficiência técnica de culturas de arroz no Paquistão, e com os resultados de Masuku et al. (2014) na análise do efeito do acesso à crédito na eficiência técnica de agricultores de repolho, mas divergente com o resultado do mesmo trabalho para produtores de pimentão. Ainda, Silva et al. (2022), encontra efeito de diminuição da ecoeficiência agropecuária amazônica associado a crédito agrícola, de modo que essa relação ainda não é consolidada na literatura, seja para culturas específicas, seja para análises holísticas de agricultura e pecuária.

No que se refere a variável de terras próprias, o resultado parece ser contra intuitivo, ainda mais considerando que a literatura documenta, em geral, efeito

significativo e positivo na ecoeficiência da agricultura. Nesse sentido, Huy e Nguyen (2019) evidenciam que produtores que detém titulação de terras são mais eficientes que aqueles que não o detém, e, ainda, que os produtores que detém terras e arrendam tem melhor desempenho produtivo. Em outras palavras, a posse de terras próprias por parte de produtores é importante porque induziria eficiência produtiva diretamente, mas também indiretamente via mercado de arrendamento de terras. Similarmente, a variável de percentual de produtores detentores de terras também teve efeito positivo no *paper* de Silva et al. (2022). Entretanto, para o caso da análise de ecoeficiência para a região Centro-Oeste, essa evidência não se manteve.

Similarmente, a ausência de efeito estatisticamente significativo para a variável de sexo, que indica o efeito do produtor principal ser do sexo feminino na ecoeficiência, é um resultado que aumenta a difusão de correlações do tipo na literatura. Seymour (2017) estimou a eficiência técnica relativa de produtores rurais em Bangladesh e observou que menores níveis de desigualdade de gênero na região esteve associada com maiores nível de eficiência técnica da agricultura. Em contraposição, Silva et al. (2022) e Kansime et al. (2018) avaliaram que o produtor ser do sexo masculino esteve associado com maiores níveis de ecoeficiência agrícola.

Por fim, o resultado de escolaridade é inesperado e trabalhos adicionais de estudo da ecoeficiência agropecuária no Centro-Oeste são necessários para avaliar essa relação, pois, em geral, é documentado na literatura uma relação positiva entre educação básica e eficiência econômica-ambiental da agricultura. Essa relação se explica pelo fato de que, intuitivamente, melhor preparo dos produtores está relacionado com gestão mais adequada da produção agropecuária (Fernandes e Pascual, 2015). Desta forma, considerando a agricultura brasileira, os trabalhos recentes de Rosano et al. (2022) e Silva et al. (2022) estimam efeitos positivos da escolaridade do produtor principal na ecoeficiência da agricultura do bioma Amazônia. Por outro lado, De Oliveira Fernandes e Pascual (2015), ao analisarem a eficiência técnica da agricultura familiar no Rio Grande do Sul, observam resultado similar: o nível de escolaridade do produtor está associado com melhor desempenho produtivo na atividade agrícola.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A Região Centro-Oeste se destaca pela produção pecuária e é a maior região produtora de grãos do país, de onde saem quase 50% da produção nacional de grãos para alimentar o Brasil e o mundo. Desempenha, portanto, notável papel no desempenho econômico do país, sobretudo da própria região. Por outro lado, para se chegar ao ponto de liderar a oferta nacional de grãos, a questão ecológica foi por muitas vezes negligenciada, através do desmatamento e da emissão de gases de efeito estufa.

Buscando preencher uma lacuna na literatura no que diz respeito à análise de eficiência com o viés ambiental, sobretudo na Região Centro-Oeste, este trabalho teve como objetivo analisar a ecoeficiência da agropecuária na Região Centro-Oeste e seus fatores determinantes, traçando duas metas para o alcance deste objetivo: 1) Calcular os índices de ecoeficiência da agropecuária na Região Centro-Oeste, e; 2) Examinar os fatores determinantes da ecoeficiência na agropecuária da Região Centro-Oeste.

A partir de uma abordagem quantitativa com natureza aplicada e objetivos exploratórios, utilizou-se como método a Análise Envoltória de Dados (DEA) com técnica de reamostragem (bootstrap) e regressão truncada para estimar indicadores de ecoeficiência não viesados e seus fatores determinantes.

A análise descritiva demonstrou que a maior receita da agropecuária da região tem como origem o município de Rio Verde em Goiás, seguido pelos municípios mato-grossenses, Sorriso e Sapezal e que a geração de riqueza advinda da atividade agropecuária na Região Centro-Oeste está concentrada no Sul Goiano e Norte Mato-grossense. Ficou demonstrado também que as mesorregiões com maior área de cultivo e pastagens são aquelas que detêm a maior receita, as maiores áreas de preservação e em consequência da atividade produtiva, são as que mais emitem gases de efeito estufa.

A partir do modelo DEA-CRS obteve-se como resultado de ecoeficiência, 67,8%, o demonstra ser possível reduzir os insumos e aumentar os produtos equiproporcionalmente em 32,2%. Face a heterogeneidade dos municípios que pertencem à Região Centro-Oeste, o modelo apontou grande amplitude entre o valor máximo e mínimo, assim como elevado desvio padrão de 0,20. Já a análise DEA-

VRS, apontou resultados praticamente idênticos para a orientação aos produtos e aos insumos. O resultado médio de 73,3% e 73,4%, respectivamente, indica possibilidade de diminuir a utilização de insumos e emissões de GEE, na média, em 26,65% para um mesmo patamar produtivo e de conservação ambiental. Na mesma linha de raciocínio, porém com olhar voltado aos produtos, seria possível aumentar a produção e as áreas preservadas, na média, em 26,65%, mantendo o mesmo patamar de insumos e emissões de GEE.

A análise da distribuição espacial indicou a possibilidade de associação espacial entre os índices de ecoeficiência, além de evidenciar que os municípios do Mato Grosso apresentaram as melhores práticas no que diz respeito ao desempenho econômico-ambiental, ao passo que ficou evidente a formação de conglomerados de baixa ecoeficiência no estado de Goiás e mais ao Sul do Mato Grosso do Sul. A mesorregião Norte Mato-grossense lidera o ranking da ecoeficiência, com índice de 79,08% com retornos constantes de escala, ao passo que a mesorregião mais ecoineficiente é o norte goiano, com índice de 54,97%. O modelo DEA com retornos variáveis de escala, com orientação aos insumos, apontou índice de ecoeficiência de 84,02% para o Norte Mato-grossense.

A aplicação da técnica de reamostragem com bootstrap amenizou o viés benevolente apresentado pelo modelo determinístico, trazendo o índice de ecoeficiência médio a 59,60% com retornos constantes de escala, indicando haver ainda mais espaço para que a agropecuária se torne ecoeficiente, reduzindo mais recursos e a pressão ambiental, sem comprometer a produção. A análise com retornos variáveis de escala apontou maior concentração de valores entre o terceiro e quarto quartil o que reforça a tese de que há menos espaço para alcance da ecoeficiência pelo olhar da produção quando comparado à alocação dos recursos produtivos.

A análise de metas de melhorias demonstrou ser viável reduzir substancialmente a área de pastagens em relação à área de lavouras da região, refletindo a possibilidade de expandir a produção agrícola desses municípios, mais produtiva que a pecuária, abrindo espaço para a atividade agrícola, sem a necessidade de avanço para novas fronteiras. Ficou demonstrada a possibilidade de município localizado na Região Centro-Oeste, sob a ótica de retornos constantes de escala, poder reduzir suas emissões, na média, em 144.844 TonCO₂eq sem perder desempenho produtivo, valor que chega a 131.114 TonCO₂eq no modelo DEA com

retornos variáveis de escala. Trata-se, portanto, de uma informação de grande valia na definição de políticas públicas voltadas à preservação ambiental e ao comércio de créditos de carbono.

Aplicando a regressão Tobit nos índices de ecoeficiência bootstrapped, o principal resultado deste trabalho indica que o acesso ao crédito e à assistência técnica foram as variáveis exógenas de maior influência na eficiência econômico-ambiental da região. Portanto, corroborando com resultados encontrados na literatura, como em Silva et al. (2022), o financiamento da produção e a orientação técnica são ferramentas de grande impacto como promotores de ecoeficiência, o que desperta a necessidade de aprimoramento das políticas voltadas à concessão de crédito e assistência técnica no arcabouço da política agrícola.

Por outro lado, o modelo não apontou significância estatística para as outras variáveis exógenas, como escolaridade, terras próprias ou sexo do proprietário do estabelecimento agropecuário, evidenciando que não há influência dessas variáveis na ecoeficiência das unidades produtivas, ainda que estudos disponíveis na literatura indiquem haver grande influência destas na ecoeficiência agrícola.

Por fim, como fator limitante para realizar este trabalho, tem-se sob o cunho teórico, que a ecoeficiência é estimada em termos relativos, ou seja, ainda que um município atinja o grau máximo de ecoeficiência, este grau é apenas em relação à amostra, não significando que seja uma referência em termos de desempenho econômico e ecológico para outras regiões não analisadas. Tampouco enseja concluir que os impactos ambientais gerados por sua atividade produtiva possam ser absorvidos pelo ecossistema.

Tem-se ainda como fator limitante, o fato de a região de estudo apresentar grande heterogeneidade, abrigando vários biomas e atividades produtivas desempenhadas em propriedades de diversos tamanhos, com e sem a presença de agricultura familiar, o que pode exercer influência sobre os resultados. Assim, este trabalho indica a possibilidade de em estudos futuros comparar o desempenho econômico-ecológico entre regiões brasileiras e também no tempo, permitindo analisar se houve evolução ou retrocesso.

REFERÊNCIAS

ABDELLA, Galal M. et al. A novel approach for developing composite eco-efficiency indicators: The case for US food consumption. **Journal of Cleaner Production**, v. 299, p. 126931, 2021.

AGRAWAL, Arun; NEPSTAD, Daniel; CHHATRE, Ashwini. Reducing emissions from deforestation and forest degradation. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 36, p. 373-396, 2011.

AIGNER, Dennis; LOVELL, CA Knox; SCHMIDT, Peter. Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. **Journal of Econometrics**, v. 6, n. 1, p. 21-37, 1977.

ALCON, Francisco et al. Valuing diversification benefits through intercropping in Mediterranean agroecosystems: A choice experiment approach. **Ecological Economics**, v. 171, p. 106593, 2020.

ALENCAR, Pollyanna Araujo et al. Ecoeficiência e preço sombra das emissões de gases de efeito estufa na suinocultura brasileira. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 12, n. 2, p. 377-408, 2019.

ALVES-PINTO, Helena N. et al. Reconciling rural development and ecological restoration: strategies and policy recommendations for the Brazilian Atlantic Forest. **Land Use Policy**, v. 60, p. 419-426, 2017.

ARAÚJO, William Bruno Cerqueira; ARAUJO, Jair Andrade. Produtividade, variação da eficiência técnica e tecnológica na agricultura dos municípios cearenses. **Interações (Campo Grande)**, v. 17, p. 223-233, 2016.

ASSAD, Eduardo Delgado; MARTINS, Susian Christian; PINTO, H. P. Sustentabilidade no agronegócio brasileiro. **Embrapa Informática Agropecuária-Livro científico (ALICE)**, 2012.

ASSAD, Maria Leonor Lopes; ALMEIDA, Jalcione. Agricultura e sustentabilidade. **Contexto e Desafios**, 2004.

BARBOSA, W. F.; SOUSA, E. P. Eficiência técnica e de escala da agropecuária no estado do Ceará. **SEMANA DE ECONOMIA DA URCA-SECON, XIV**, 2012.

BARNETT, Vic; LEWIS, Toby. Outliers in statistical data. **Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. Applied Probability and Statistics**, 1984.

BARTON, David N. et al. Environmental service payments: Evaluating biodiversity conservation trade-offs and cost-efficiency in the Osa Conservation Area, Costa Rica. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 2, p. 901-911, 2009.

BATTESE, George Edward; COELLI, Tim J. A model for technical inefficiency effects in a stochastic frontier production function for panel data. **Empirical Economics**, v. 20, n. 2, p. 325-332, 1995.

BEGIĆ, Fajik; AFGAN, Naim H. Sustainability assessment tool for the decision making in selection of energy system—Bosnian case. **Energy**, v. 32, n. 10, p. 1979-1985, 2007.

BONFIGLIO, Andrea; ARZENI, Andrea; BODINI, Antonella. Assessing eco-efficiency of arable farms in rural areas. **Agricultural Systems**, v. 151, p. 114-125, 2017.

BORGES DA SILVA, João Vitor; MARINI THOMÉ, Karim. (Eco) eficiência da produção alimentar: uma revisão sistemática da literatura. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v. 14, n. 3, 2021.

CHAMBERS, Robert; CONWAY, Gordon. **Sustainable rural livelihoods: practical concepts for the 21st century**. Institute of Development Studies (UK), 1992.

CHANDIO, Abbas Ali et al. The nexus of agricultural credit, farm size and technical efficiency in Sindh, Pakistan: A stochastic production frontier approach. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 18, n. 3, p. 348-354, 2019.

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

CHEN, Wen-Chih; JOHNSON, Andrew L. A unified model for detecting efficient and inefficient outliers in data envelopment analysis. **Computers & Operations Research**, v. 37, n. 2, p. 417-425, 2010.

CHRISTENSEN, Laurits R. Conjugate duality and the transcendental logarithmic production function. **Econometrica**, v. 39, p. 255-256, 1971.

CHUNG, Yangho H.; FÄRE, Rolf; GROSSKOPF, Shawna. Productivity and undesirable outputs: a directional distance function approach. **Journal of Environmental Management**, v. 51, n. 3, p. 229-240, 1997.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA AGRICULTURA (CNA). **Sistema CNA/Senar apresenta resultados dos custos de produção no campo**. 2021. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/noticias/sistema-cna-senar-apresenta-resultados-dos-custos-de-producao-no-campo>. Acesso em 20 abr. 2022.

COCKLIN, Chris; DIBDEN, Jacqui (Ed.). **Sustainability and change in rural Australia**. UNSW Press, 2005.

COELLI, Timothy J. et al. **An introduction to efficiency and productivity analysis**. Springer Science & Business Media, 2005.

CONAB. **Safra Brasileira de Grãos**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 08 mar. 2022.

COSTANZA, Robert; PATTEN, Bernard C. Defining and predicting sustainability. **Ecological economics**, v. 15, n. 3, p. 193-196, 1995.

CRIVELLARI, A. et al. Multi-criteria sustainability assessment of potential methanol production processes. **Journal of Cleaner Production**, v. 293, p. 126226, 2021.

CUESTA, Rafael A.; LOVELL, CA Knox; ZOFÍO, José L. Environmental efficiency measurement with translog distance functions: A parametric approach. **Ecological Economics**, v. 68, n. 8-9, p. 2232-2242, 2009.

DA SILVA, Dirceu; LOPES, Evandro Luiz; JUNIOR, Sérgio Silva Braga. Pesquisa quantitativa: elementos, paradigmas e definições. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 5, n. 1, p. 01-18, 2014.

DE OLIVEIRA FERNANDES, Lúcio André; PASCUAL, Unai. Análise da eficiência da agricultura familiar agroecologista. **Revibec: revista de la Red Iberoamericana de Economía Ecológica**, v. 24, p. 0221-233, 2015.

DE SARTRE, Xavier Arnauld et al. Sustainable development policies and the spread of land-sharing practices—A statistical assessment in a frontier region of the Brazilian Amazon. **Journal of Rural Studies**, v. 48, p. 65-76, 2016.

DENG, Xiyue; DU, Limin. Estimating the environmental efficiency, productivity, and shadow price of carbon dioxide emissions for the Belt and Road Initiative countries. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, p. 123808, 2020.

DESLI, Evangelia et al. Eco-efficiency: A methodological framework and assessment. **Cleaner Environmental Systems**, v. 3, p. 100049, 2021.

FÄRE, Rolf et al. Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: a nonparametric approach. **The Review of Economics and Statistics**, p. 90-98, 1989.

FÄRE, Rolf et al. Derivation of shadow prices for undesirable outputs: a distance function approach. **The Review of Economics and Statistics**, p. 374-380, 1993.

FÄRE, Rolf; GROSSKOPF, Shawna. Theory and application of directional distance functions. **Journal of Productivity Analysis**, v. 13, n. 2, p. 93-103, 2000.

FARRELL, Michael James. The measurement of productive efficiency. **Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General)**, v. 120, n. 3, p. 253-281, 1957.

FORLEO, Maria Bonaventura et al. The eco-efficiency of rapeseed and sunflower cultivation in Italy. Joining environmental and economic assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 3138-3153, 2018.

GAN, Lu et al. Do geologic hazards affect the sustainability of rural development? Evidence from rural areas in China. **Journal of Cleaner Production**, p. 130693, 2022.

GARNETT, Tara. Food sustainability: problems, perspectives and solutions. **Proceedings of the nutrition society**, v. 72, n. 1, p. 29-39, 2013.

GARRETT, R. D. et al. Should payments for environmental services be used to implement zero-deforestation supply chain policies? The case of soy in the Brazilian Cerrado. **World Development**, v. 152, p. 105814, 2022.

GIRARDIN, Philippe; BOCKSTALLER, Christian; VAN DER WERF, Hayo. Assessment of potential impacts of agricultural practices on the environment: the AGRO* ECO method. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 20, n. 2, p. 227-239, 2000.

GOMES, E. G.; BAPTISTA, JCC; BIONDI NETO, L. Avaliação de eficiência por Análise de Envoltória de Dados: conceitos, aplicações à agricultura e integração com Sistemas de Informação Geográfica. **Embrapa Territorial-Documentos (INFOTECA-E)**, 2003.

GORBENKOVA, E.; SHCHERBINA, E.; BELAL, A. Rural areas: critical drivers for sustainable development. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 30, p. 786-790, 2018.
Koopmans, T.C., 1951. Efficient allocation of resources. *Econometrica: Journal of the Econometric Society* 455-465.

GURGUL, Henryk; LACH, Łukasz. Linkages-based indicators of production-source sectoral eco-efficiency with application to Polish data. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, p. 123545, 2021.

GROVERMANN, Christian et al. Eco-efficiency and agricultural innovation systems in developing countries: Evidence from macro-level analysis. **PloS one**, v. 14, n. 4, p. e0214115, 2019.

HERAS-SAIZARBITORIA, Iñaki et al. The use of eco-efficiency indicators by environmental frontrunner companies. **Ecological Indicators**, v. 115, p. 106451, 2020.

HUY, Hoang Trieu; NGUYEN, Trung Thanh. Cropland rental market and farm technical efficiency in rural Vietnam. **Land use policy**, v. 81, p. 408-423, 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Áreas territoriais**. 2021. Disponível em: <
<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municipios.html?=&t=acesso-ao-produto>>. Acesso em: 20 abr. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). *Portal TerraBrasilis: incrementos de desmatamento no Cerrado*. 2022. Disponível em:

<<http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/cerrado/increments>>. Acesso em: 12 abr. 2022.

KANSIIME, Monica K.; VAN ASTEN, Piet; SNEYERS, Koen. Farm diversity and resource use efficiency: Targeting agricultural policy interventions in East Africa farming systems. **NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences**, v. 85, p. 32-41, 2018.

KHANAL, Uttam et al. Farm performance analysis: Technical efficiencies and technology gaps of Nepalese farmers in different agro-ecological regions. **Land use policy**, v. 76, p. 645-653, 2018.

KUOSMANEN, Timo; KORTELAJINEN, Mika. Measuring eco-efficiency of production with data envelopment analysis. **Journal of Industrial Ecology**, v. 9, n. 4, p. 59-72, 2005.

KUMBHAKAR, Subal C.; LOVELL, CA Knox. **Stochastic frontier analysis**. Cambridge university press, 2003.

LARREA-GALLEGOS, Gustavo et al. Sustainability, resilience and complexity in supply networks: A literature review and a proposal for an integrated agent-based approach. **Sustainable Production and Consumption**, 2022.

LAUWERS, Ludwig. Justifying the incorporation of the materials balance principle into frontier-based eco-efficiency models. **Ecological Economics**, v. 68, n. 6, p. 1605-1614, 2009.

LIU, Yansui. Introduction to land use and rural sustainability in China. **Land Use Policy**, v. 74, p. 1-4, 2018.

MACIEL, Harine Matos; MACIEL, Wlisses Matos; GOMES, Maria Antunizia. Brasil e a Ecoeficiencia: Uma análise através do método envoltoria com livre disposição. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 10, p. 82049-82061, 2020.

MAIA, Rodrigo Gomes Távora; JUNIOR, Amaro Olimpico Pereira. Eco-Efficiency of the food and beverage industry from the perspective of sensitive indicators of the water-energy-food nexus. **Journal of Cleaner Production**, v. 324, p. 129283, 2021.

MARZALL, Katia; ALMEIDA, Jalcione. Parâmetros e indicadores de sustentabilidade na agricultura: limites, potencialidades e significado no contexto do desenvolvimento rural. **Extensão Rural**, n. 5, p. 25-38, 1998.

MASUDA, Kiyotaka. Measuring eco-efficiency of wheat production in Japan: a combined application of life cycle assessment and data envelopment analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 126, p. 373-381, 2016.

MASUKU, Micah B.; RAUFU, M. O.; MALINGA, Nokwanda G. The impact of credit on technical efficiency among vegetable farmers in Swaziland. **Sustainable Agriculture Research**, v. 4, n. 526-2016-37875, 2014.

MEEUSEN, Wim; VAN DEN BROECK, Julien. Efficiency estimation from Cobb-Douglas production functions with composed error. **International economic review**, p. 435-444, 1977.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). *Nota à imprensa - Balança Comercial 12/2021*. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/exportacoes-do-agronegocio-batem-recorde-em-dezembro-e-no-ano-de-2021>>

MURDOCH, Jonathan. Sustainable rural development: towards a research agenda. **Geoforum**, v. 24, n. 3, p. 225-241, 1993.

NEFF, David L.; GARCIA, Philip; NELSON, Charles H. Technical efficiency: a comparison of production frontier methods. **Journal of Agricultural Economics**, v. 44, n. 3, p. 479-489, 1993.

PEÑA, Carlos Rosano, et al. A measure of sustainability of Brazilian agribusiness using directional distance functions and data envelopment analysis. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 21, n. 3, p. 210-222, 2014.

PEÑA, Carlos Rosano. Um modelo de avaliação da eficiência da administração pública através do método análise envoltória de dados (DEA). **Revista de Administração Contemporânea**, v. 12, n. 1, p. 83-106, 2008.

PEÑA, Carlos Rosano et al. Environmental preservation costs and eco-efficiency in Amazonian agriculture: Application of hyperbolic distance functions. **Journal of Cleaner Production**, v. 197, p. 699-707, 2018.

PEÑA, Carlos, Rosano; TEIXEIRA, Joanílio Rodolpho; KIMURA, Herbert. Eco-efficiency in Brazilian Amazonian agriculture: opportunity costs of degradation and protection of the environment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 44, p. 62378-62389, 2021.

PESSANHA, José Francisco Moreira et al. Implementando modelos DEA no R. **SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO DE TECNOLOGIA**, v. 10, 2013.

PICAZO-TADEO, Andrés J.; GÓMEZ-LIMÓN, José A.; REIG-MARTÍNEZ, Ernest. Assessing farming eco-efficiency: a data envelopment analysis approach. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 4, p. 1154-1164, 2011.

PICAZO-TADEO, Andrés J.; BELTRÁN-ESTEVE, Mercedes; GÓMEZ-LIMÓN, José A. Assessing eco-efficiency with directional distance functions. **European Journal of Operational Research**, v. 220, n. 3, p. 798-809, 2012.

PISSARRA, Teresa Cristina Tarlé; FERNANDES, Luís Filipe Sanches; PACHECO, Fernando António Leal. Production of clean water in agriculture headwater

catchments: A model based on the payment for environmental services. **Science of The Total Environment**, v. 785, p. 147331, 2021.

PITTMAN, Russell W. Issue in pollution control: Interplant cost differences and economies of scale. **Land Economics**, v. 57, n. 1, p. 1-17, 1981.

PITTMAN, Russell W. Multilateral productivity comparisons with undesirable outputs. **The Economic Journal**, v. 93, n. 372, p. 883-891, 1983.

REBOLLEDO-LEIVA, Ricardo et al. A new method for eco-efficiency assessment using carbon footprint and network data envelopment analysis applied to a beekeeping case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 329, p. 129585, 2021.

ROSANO-PEÑA, Carlos et al. Agricultural eco-efficiency and climate determinants: application of dea with bootstrap methods in the tropical montane cloud forests of Puebla, Mexico. **Sustainable Environment**, v. 8, n. 1, p. 2138852, 2022.

ROSANO-PEÑA, Carlos et al. Eco-Efficiency of Agriculture in the Amazon Biome: Robust Indices and Determinants. **World**, v. 3, n. 4, p. 753-771, 2022.

ROSATI, Francesco; FARIA, Lourenço GD. Addressing the SDGs in sustainability reports: The relationship with institutional factors. **Journal of Cleaner Production**, v. 215, p. 1312-1326, 2019.

SACHS, Ignacy. Desarrollo sustentable, bio-industrialización descentralizada y nuevas configuraciones rural-urbanas. El caso de la India y el Brasil. **Pensamiento Iberoamericano**, v. 16, p. 235-256, 1989.

SALNYKOV, Mykhaylo.; VALENTIN, Zelenyuk. **Estimation of environmental efficiencies of economies and shadow prices of pollutants in countries in transition**. EERC Research Network, Russia and CIS, 2005.

SCHERER, Clauber Eduardo Marchezan; PORSSE, Alexandre Alves. Eficiência Produtiva Regional da Agricultura Brasileira: uma análise de fronteira estocástica. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 55, p. 389-410, 2017.

SCHOMERS, Sarah; MATZDORF, Bettina. Payments for ecosystem services: A review and comparison of developing and industrialized countries. **Ecosystem Services**, v. 6, p. 16-30, 2013.

SEYMOUR, Greg. Women's empowerment in agriculture: Implications for technical efficiency in rural Bangladesh. **Agricultural Economics**, v. 48, n. 4, p. 513-522, 2017.

SHARMA, Khem R.; LEUNG, Pingsun; ZALESKI, Halina M. Productive efficiency of the swine industry in Hawaii: stochastic frontier vs. data envelopment analysis. **Journal of Productivity Analysis**, v. 8, n. 4, p. 447-459, 1997.

SIMAR, Leopold; WILSON, Paul W. Estimation and inference in two-stage, semi-parametric models of production processes. *Journal of econometrics*, v. 136, n. 1, p. 31-64, 2007.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG). *Emissões por setor*. 2022. Disponível em: <<https://plataforma.seeg.eco.br/sectors/agropecuaria>>. Acesso em: 29 abr. 2022.

Shephard, R. W. (1953). **Cost and production functions**. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press.

SHIRAZ, Rashed Khanjani et al. Uma análise de envoltória de dados integrada e estrutura de casco de descarte livre para medição de eficiência de custo usando conjuntos brutos. **Applied Soft Computing**, v. 46, p. 204-219, 2016.

SICHE, Raúl et al. Índices versus indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. **Ambiente & Sociedade**, v. 10, p. 137-148, 2007.

SILVA, João Vitor Borges da et al. Ecoeficiência da produção agropecuária na Amazônia brasileira: fatores determinantes e dependência espacial. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 60, 2021.

SONG, Xiao-Peng et al. Massive soybean expansion in South America since 2000 and implications for conservation. **Nature Sustainability**, v. 4, n. 9, p. 784-792, 2021.

STULP, Valter José; ALVIM, Augusto Mussi. Eficiência técnica da produção agropecuária nas regiões do Rio Grande do Sul de 1975 a 2006. **Planejamento e Políticas Públicas**, n. 43, 2014.

SUZIGAN, Luis H.; PEÑA, Carlos Rosano; GUARNIERI, Patricia. Eco-efficiency assessment in agriculture: a literature review focused on methods and indicators. **Journal of Agricultural Science**, v. 12, n. 7, p. 118, 2020.

TYTECA, Daniel. On the measurement of the environmental performance of firms—a literature review and a productive efficiency perspective. **Journal of Environmental Management**, v. 46, n. 3, p. 281-308, 1996.

WBCSD, 2006. World Business Council for Sustainable Development. Eco-efficiency Learning Module. <https://www.wbcsd.org/Projects/Education/Resources/Eco-efficiency-Learning-Module>. (acesso em 18 de fevereiro de 2022).

WORD BANK. *Belt and Road Initiative*. 2018. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20190219015644/http://www.worldbank.org/en/topic/regional-integration/brief/belt-and-road-initiative>>. Acesso em: 04 mai. 2022.