

ANÁLISE DE ECOEFICIÊNCIA DA AGROPECUÁRIA DOS MUNICÍPIOS NORDESTINOS LOCALIZADOS NO BIOMA CAATINGA, BRASIL

ECO-EFFICIENCY ANALYSIS OF AGRICULTURE OF THE NORTHEAST MUNICIPALITIES LOCATED IN THE CAATINGA BIOMA, BRAZIL

Tanara Jéssica Marques Araújo
Doutoranda em Economia Rural (PPGER/UFC)
tanarajessica@gmail.com

Prof. Dr. Rogério César Pereira de Araújo, Ph.D.
Professor do Programa de Pós-Graduação em Economia Rural (PPGER/UFC)
rcpa@ufc.br



Grupo de Trabalho (GT4): << 4 Questão ambiental, agroecologia e sustentabilidade >>

Resumo

A análise da ecoeficiência ganhou maior atenção dos governos por permitir avaliar o desempenho da economia e de seus impactos no meio ambiente. A agropecuária tem papel importante para a segurança alimentar e na mitigação dos efeitos da mudança climática, à medida que se apresenta como uma fonte importante das emissões de gases de efeito estufa (GEEs). Nesse sentido, o presente trabalho avalia a ecoeficiência da agropecuária nos municípios que estão localizados no bioma Caatinga no semiárido nordestino. Para isto, aplicou-se o método de Análise Envoltória de Dados (DEA) para estimar o índice de ecoeficiência da agropecuária dos municípios localizados no bioma Caatinga no ano de 2017. Utilizaram-se os dados de produção agropecuária de 1.093 municípios, que foram extraídos do Censo Agropecuário (2017), e de emissões dos gases de efeito estufa, obtidos no Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) e da FIRMS – NASA. Os escores de ecoeficiência da agropecuária foram estimados com relação à fronteira de ecoeficiência formada por 238 (ou 21,8%) municípios que obtiveram índice de ecoeficiência unitária. A média do índice de ecoeficiência dos municípios do bioma Caatinga foi de 0,718, revelando nível “Alto” de ecoeficiência, sendo que 38% dos municípios obtiveram escores de ecoeficiência no intervalo de 0,80 a 1, enquadrando-se na categoria de ecoeficiência ‘Muito Alta’. Desse modo, observou-se que a agropecuária, na maioria dos municípios (78,2%) localizados no bioma Caatinga, experimentou ineficiência técnica e ambiental, particularmente relativo às emissões de GEEs.

Palavras-chave: Ecoeficiência. Nordeste. Análise Envoltória De Dados. Agropecuária. Caatinga.

Abstract

The eco-efficiency analysis has gained greater attention from governments as it makes it possible to evaluate the performance of the economy and its environmental impacts. Agriculture plays an important role in food security and in mitigating the effects of climate change, as it is an important source of greenhouse gas emissions (GHGs). In this sense, the present work evaluates the eco-efficiency of agriculture in municipalities that are located in the Caatinga biome in the northeast semi-arid. For this, the Data Envelopment Analysis (DEA) method was applied to estimate the agricultural eco-efficiency index of the municipalities located in the Caatinga biome in 2017. Agricultural production data from 1,093 municipalities were used, which were extracted from the Agricultural Census (2017), and greenhouse gas emissions, obtained from the Greenhouse Gas Emissions and Removals Estimation System (SEEG) and FIRMS – NASA. Agricultural eco-efficiency scores were estimated in relation to the eco-efficiency frontier formed by 238 (or 21.8%) municipalities that obtained a unitary eco-efficiency index. The average eco-efficiency index of the municipalities in the Caatinga biome was 0.718, revealing a “High” level of eco-efficiency, with 38% of the municipalities obtaining eco-efficiency scores in the range of 0.80 to 1, falling into the eco-efficiency category “Higher”. Thus, it was observed that agriculture, in the majority of municipalities (78.2%) located in the Caatinga biome, experienced technical and ecological inefficiency, particularly regarding GHG emissions.

Key words: Eco-efficiency. Northeast. Data Envelopment Analysis. Agriculture. Caatinga.

1. INTRODUÇÃO

A preocupação crescente da sociedade sobre os impactos da mudança climática no planeta tem levantado questões de como os diversos setores da economia podem contribuir para mitigar tais efeitos, principalmente aqueles que recaem sobre as gerações futuras (Allencar et al., 2019). Em 1992, a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (RIO-92), no Rio de Janeiro, tratou dos princípios norteadores do desenvolvimento sustentável para as empresas, quando se iniciou a discussão sobre ecoeficiência.

O termo ‘ecoefficiência’ foi, primeiramente, difundido pelo *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD, 1992), que se propunha a incentivar as empresas a serem, simultaneamente, ambientalmente responsáveis e economicamente lucrativas. Nas últimas décadas, o conceito de ecoeficiência recebeu maior atenção dos estudos acadêmicos, o que levou ao seu refinamento e à sua ampliação quanto ao escopo de aplicação, tendo sido utilizado para mensurar as eficiências econômica, ambiental e social de empresas, seja por setores da economia ou da economia do país como um todo.

Considerando que o setor agropecuário tem sua participação nas emissões de gases de efeito estufa (GEEs), seja diretamente (pelas atividades agropecuárias) ou indiretamente (pela mudança no uso do solo), mensurar a ecoeficiência da agropecuária nos municípios na região Nordeste permitirá avaliar a participação relativa dos mesmos no processo de mudança climática. Nesse sentido, hierarquizar os municípios quanto ao seu desempenho na produção agropecuária e suas emissões de GEEs é necessário para auxiliar na elaboração de políticas que se propõem a mitigar os efeitos da mudança climática.

Diante disso, este artigo tem como foco investigar a eficiência técnica e ecológica dos municípios que estão localizados no bioma Caatinga, no semiárido nordestino. Para isto, este estudo tem como objetivo mensurar a ecoeficiência dos municípios que permite avaliar a eficiência técnica da produção agropecuária e o padrão de emissão de gases de efeito estufa (GEEs), em termos de emissões de CO₂ equivalente.

Para alcançar o objetivo proposto, utiliza-se a abordagem não paramétrica de Análise de Envoltório de Dados (DEA, acrônimo do inglês *Data Envelopment Analysis*). Este método permite estimar os escores de ecoeficiência com relação a uma fronteira de ecoeficiência, os quais permitem hierarquizar e classificar os municípios quanto ao seu desempenho técnico e ambiental. Os índices de ecoeficiência da agropecuária são úteis para auxiliar a elaboração de políticas agroambientais direcionadas a promover a agricultura de baixo carbono e mitigar os efeitos da mudança climática.

Este trabalho está dividido em cinco seções, incluindo esta seção introdutória. A segunda seção apresenta o referencial teórico relevante e os conceitos importantes para a construção desta análise. Na terceira seção, serão detalhados os procedimentos metodológicos, assim como o banco de dados da população e as variáveis utilizadas. Na quarta seção, são apresentados os resultados e discussões. Por fim, fundamentam-se as considerações finais, seguidas das referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo, inicialmente, conceitua-se a ecoeficiência e mostra-se sua relevância para o desenvolvimento sustentável. Em seguida, mostra-se a relação entre os conceitos de eficiência e ecoeficiência do ponto de vista metodológico.

2.1 Ecoeficiência

O conceito de ecoeficiência foi primeiramente proposto por Freeman *et al.* (1973), em 1970, no intuito de desenvolver um indicador de eficiência ambiental. Posteriormente, no início da década de 1990, o *World Business Council for Sustainable Development* difundiu este conceito, relacionando a sustentabilidade e o desempenho ambiental de um sistema produtivo, como se pode verificar a seguir (WBCSD, 1992):

Ecoeficiência é alcançada por “gerar bens e serviços competitivos que satisfaçam as necessidades humanas e promova qualidade de vida, enquanto progressivamente reduzam os impactos ecológicos e intensidade dos recursos ao longo do ciclo de vida, ao nível pelo menos alinhado com a capacidade de suporte da terra.

Desse modo, o escopo do conceito de eficiência foi ampliado para abranger a relação entre os aspectos técnico e ecológico da produção, especificamente promover simultaneamente a maximização do produto e a minimização o impacto ambiental, assegurando assim a eficiência técnica e a sustentabilidade ambiental da produção econômica.

Portanto, a ecoeficiência é um índice que tem a capacidade de mostrar o quanto uma unidade tomadora de decisão está produzindo a partir do uso dos recursos naturais e qual o impacto ambiental que esta produção está causando (WBCSD, 1992). Este indicador permite que as organizações possam desenvolver uma produção eficiente do ponto de vista econômico e ambiental (Zhang *et al.*, 2011).

Na agropecuária, pelo fato desta atividade depender diretamente dos recursos naturais e do meio ambiente), seu desempenho produtivo e ecológico poderá ser melhor avaliado por meio do conceito de ecoeficiência. A dimensão técnica do conceito de ecoeficiência da agropecuária está associada aos fatores técnicos (e.g., fertilizante, defensivos químicos, mão de obra, etc.) e econômicos (e.g., renda do trabalho, valor adicionado, PIB), assim como dos fatores ambientais e ecológicos (e.g., emissões atmosféricas, poluição, degradação).

2.2 Mensuração da Ecoeficiência

Inicialmente, a mensuração da ecoeficiência foi feita por meio de indicadores (Salgado, 2007), os quais tinham como objetivo mostrar a relação entre a eficiência técnica da produção e o impacto ambiental decorrente da atividade produtiva.

Erkko *et al.* (2005) expressou o conceito de ecoeficiência por meio de uma razão entre o valor da produção agregada e o valor do impacto ambiental agregado, como apresentado na equação a seguir:

$$Ecoeficiência = \frac{\text{valor da produção agregada}}{\text{impacto ambiental agregado}} \quad (1)$$

De acordo com a Equação 1, quanto maior o valor econômico agregado e menor o impacto ambiental, maior será o valor desta razão e melhor será o desempenho da atividade em termos de ecoeficiência.

Nesse contexto, inúmeros indicadores e índices foram propostos para mensurar a ecoeficiência, com destaque para a Análise de Envoltório de Dados (DEA). A aplicação do DEA na mensuração de ecoeficiência cresceu significativamente nos últimos anos, principalmente porque este método permite atribuir pesos aos fatores de produção (técnicos e ecológicos), independentemente da subjetividade do analista.

O DEA é um método não paramétrico que permite mensurar a eficiência técnica da produção por meio de programação matemática à medida que constrói uma fronteira de

produção a partir dos dados de *inputs* e *outputs* das unidades tomadoras de decisão (DMUs) que podem ser definidas como firmas, países, estados, municípios, etc.

A vantagem deste método está associada à sua flexibilidade, pois, embora ainda apresente pressuposições necessárias para a construção de seu modelo, tal método dispõe de menores exigências para que aconteça a realização de seus procedimentos (Almeida; Rebelatto, 2005). Portanto, este método dispensa a definição prévia a priori de uma função estocástica de produção e um tipo de distribuição dos erros aleatórios (Rios, 2005).

Além disso, esse método pode ser aplicado aos sistemas que possuem múltiplos insumos e múltiplos produtos e impõe menos restrições quanto à tecnologia de produção, impedindo com que aconteçam restrições desnecessárias sobre a função de produção (Gillen; Lall, 1997).

Entre os métodos não paramétricos mais utilizados, encontra-se a Análise Envoltória de Dados (DEA), modelo desenvolvido por Charnes, Cooper e Rhodes (1978), para avaliar a eficiência relativa das DMUs, incorporando indicadores de entradas e saídas.

Na literatura, a ecoeficiência na agropecuária tem sido mensurada em diferentes contextos produtivos e escalas, tais como para uma cultura isolada, ao nível de fazenda, ou para o setor como o todo, ao nível de município ou país. No Brasil, a análise de ecoeficiência encontra-se em seu estágio inicial devido ao número reduzido de trabalhos nessa área, principalmente quando se trata do setor agropecuário.

Vale destacar os trabalhos realizados por Silva *et al.* (2021), que mensuraram a ecoeficiência da produção agropecuária na Amazônia. Rosano-Peña *et al.* (2020) avaliou a dependência espacial da ecoeficiência da agricultura em São Paulo. Araújo *et al.* (2021) estudou a ecoeficiência dos municípios da Região Centro-Oeste do Brasil. Até o presente, desconhecem-se estudos que tenham investigado a ecoeficiência da agropecuária dos municípios localizados no bioma Caatinga, levando em consideração as emissões de GEEs, objeto de estudo deste artigo.

3 METODOLOGIA

Nesta seção, delimita-se a área de estudo, descreve-se o método DEA e, por último, definem-se as variáveis consideradas na análise de ecoeficiência e a fonte de dados.

3.1 Área de Estudo

A área de estudo compreende os municípios localizados no bioma Caatinga, correspondendo a nove estados. Este bioma ocupa uma área de 844.452 km², correspondendo a 11% do território nacional, e está sob a influência do clima semiárido.

O bioma Caatinga, desde o período colonial, tem oferecido dificuldades para seu desenvolvimento econômico devido à aridez da terra e às instabilidades das precipitações pluviométricas. Por sua vez, as atividades agropecuárias realizadas neste bioma têm degradado cerca de 80% deste bioma, principalmente como resultado do desmatamento e queimadas.

O Semiárido, além da classificação climática, é definido legalmente como uma região geográfica que está sujeita a períodos críticos de longas estiagens. O Polígono das Secas passou a ser denominado de Semiárido Brasileiro após a Conferência Internacional das Nações Unidas, em 1977, tendo recebido prioridade de fomento para seu desenvolvimento pela Constituição Federal de 1988.

O semiárido brasileiro possui aproximadamente 27 milhões de habitantes, ocupa 12% do território nacional, correspondendo a 1,03 milhão de km² (Asa, 2019), com densidade populacional de 23 hab./km² (Medeiros *et al.*, 2012). Este território compreende 1.262 municípios pertencentes a dez estados brasileiros.

Apesar dos entraves climáticos que castigam a população do semiárido, a região concentra quase um milhão e meio de estabelecimentos agropecuários familiares, - cerca de 30% do total de estabelecimentos agropecuários familiares do Brasil - o que reflete um baixo dinamismo econômico (IBGE, 2019).

3.2 Métodos

Neste estudo, a abordagem escolhida para mensurar a ecoeficiência da agropecuária nos municípios do bioma Caatinga foi o DEA-CCR (Charnes; Cooper; Rhodes, 1978), orientada pelos insumos e com retornos constantes à escala.

3.2.1 Análise Envoltória de Dados

Conforme Golany e Roll (1989), o modelo DEA é conduzido em três fases: (i) identificação das DMUs que compõem a população de observações da análise. (ii) seleção das variáveis (*inputs* e *outputs*) relevantes para a análise de ecoeficiência; e (iii) definição do modelo DEA e de seus pressupostos.

Como argumenta Pinto e Coronel (2020), o problema de otimização do DEA para cada UDM pode ser escrito da seguinte maneira:

$$\frac{\sum_j u_j Y_{jk}}{\sum_i v_i X_{ik}} = \frac{u Y_k}{v X_k} \quad (3)$$

em que: u e v são os pesos atribuídos aos insumos e produtos; X_k são os insumos; e Y_k são os produtos. Por convenção, pressupõe-se $\frac{u Y_k}{v X_k} \leq 1$, o que assegura que os índices de eficiência irão variar no intervalo 0 e 1 (Lins *et al.*, 2007).

A formulação do modelo CCR orientada aos *inputs* é apresentada conforme:

$$Max\ Eff_0 = \sum_{j=1}^s u_j y_{j0} \quad (4)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^r v_i x_{i0} = 1 \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^s u_j y_{jk} - \sum_{i=1}^r v_i x_{ik} \leq 0, \forall k \quad (6)$$

$$v_i, u_j \geq 0, \forall i, j$$

em que os pesos v_i e u_j , são as variáveis de decisão.

Seguindo a abordagem de Araújo (2021), os escores de ecoeficiência são distribuídos em cinco faixas ou níveis, cada nível associado a um intervalo de escores previamente especificado. A Tabela 1 mostra a classificação dos índices de ecoeficiência adotada neste estudo.

Tabela 1 – Classificação dos Índices de Ecoeficiência

Nível	IE
Muito baixa	$0 < IE \leq 0,20$
Baixa	$0,20 < IE \leq 0,40$
Intermediária	$0,40 < IE \leq 0,60$
Alta	$0,60 < IE \leq 0,80$
Muito Alta	$0,80 < IE \leq 1$

Fonte: Adaptado de Araújo (2021).

3.3 Dados e Variáveis

A Região Nordeste do Brasil possui 1.794 municípios, dos quais 1.262 (ou 22,7%) estão sob a influência do clima semiárido e 1.210 (ou 21,8%) municípios estão inseridos no bioma Caatinga, segundo classificação do IBGE. Por sua vez, a população da pesquisa é formada por 1.093 municípios (ou 19,7%) que correspondem aos municípios pertencentes ao semiárido brasileiro e estarem inseridos no bioma Caatinga. Desse total, dois municípios fazem parte do estado do Maranhão, os demais fazem parte de estados da região Nordeste.

A escolha das variáveis para esta pesquisa foi feita a partir da revisão de literatura sobre a ecoeficiência agropecuária, com o intuito de capturar os efeitos econômicos e ambientais que condicionam a ecoeficiência dentro da área delimitada para o estudo.

Os dados utilizados na pesquisa são de natureza secundária, extraídos das bases de dados de acesso público. O Quadro 1 apresenta a descrição das variáveis (insumos e produtos) utilizadas na elaboração dos modelos, acompanhada das respectivas fontes dos dados. As variáveis de receitas e custos estão expressas em reais (R\$) a preços correntes do ano de 2017.

Quadro 1. Variáveis utilizadas na análise de ecoeficiência da agropecuária no bioma Caatinga, no ano de 2017

Variável	Descrição	Fonte/Tabela
Inputs Econômicos		
x ₁ Área utilizada com pastagens	Área dos estabelecimentos ocupada por pastagens naturais e pastagens em boas condições (não degradadas), em hectares.	IBGE, Censo Agro (tabela 6801)
x ₂ Área utilizada com lavouras	Área dos estabelecimentos utilizada para produção agrícola (lavouras temporárias e permanentes), em hectares.	IBGE, Censo Agro (tabela 6754)
x ₃ Capital físico	Número de tratores, número de máquinas e implementos agrícolas existentes nos estabelecimentos agropecuários.	IBGE, Censo Agro (tabela 6874)
x ₄ Custos variáveis	Despesas com insumos para produção vegetal e animal (adubos, corretivos, sementes, compra de animais, etc.), em mil reais (R\$); exceto agrotóxicos.	IBGE, Censo Agro (tabela 6899)

x ₅	Mão de obra	Número do pessoal ocupado nos estabelecimentos agropecuários (assalariado e familiar).	IBGE, Censo Agro (tabela 6888)
x ₆	Queimadas	Consiste na quantidade média de focos de incêndio ocorridos em cada município por ano, para o período de 2017.	FIRMS
x ₇	Uso de agrotóxicos	Despesas com agrotóxicos para a produção vegetal e animal, em mil reais (R\$).	IBGE, Censo Agro (tabela 6881)

Quadro 1. Variáveis utilizadas na análise de ecoeficiência da agropecuária no bioma Caatinga, no ano de 2017 (conclusão)

Variável	Descrição	Fonte/Tabela
Outputs Econômicos		
y ₁	Receita agrícola	Receita obtida com a venda de produtos vegetais, em mil reais (R\$).
y ₂	Receita pecuária	Receita obtida com a venda de produtos de origem animal, em mil reais (R\$).
Outputs Ambientais		
y ₃	Área preservada	Matas e florestas dos estabelecimentos destinada à preservação permanente (APPs) ou reserva legal (RL), em hectares.
y ₄	Área de pastagens degradadas	Área de pastagens em más condições, em hectares.
y ₅	Emissão de gases do Efeito Estufa (GEEs)	Emissões de CO ₂ realizadas pelos municípios brasileiros referentes ao setor da agropecuária, medidas em milhões de toneladas de CO ₂ equivalente (Mt CO ₂ eq).

Fonte: Elaboração própria.

Nota: As áreas com pastagens degradadas, segundo o IBGE (2019), eram inicialmente produtivas, porém, assumiram esta condição devido à ausência de manutenção.

A seleção das variáveis respeitou a classificação sugerida por Koeijer *et al.* (2002). A variável ambiental x₆ (queimada) é considerada como insumo na função de produção agropecuária, pois é uma das técnicas rudimentares mais utilizadas pelos agricultores para o preparo da área de cultivo.

Os dados de queimadas foram compilados a partir dos registros de focos de incêndio ocorridos no Brasil durante o período de 2017. Esses dados foram extraídos do *Fire Information*

for Resource Management System (FIRMS) da National Aeronautics and Space Administration (NASA), que dispõe de dados sobre focos de incêndios ocorridos em todo o planeta.

Duas variáveis foram classificadas como variáveis ambientalmente negativas, sendo y_4 (área de pastagens degradadas) e y_5 (emissões de gases de efeito estufa), considerados como produtos indesejáveis.

Estudos de Caiado *et al.* (2020) recomendam que os *outputs* indesejáveis sejam incorporados como *inputs*. Neste estudo, utiliza-se o artifício matemático para minimizar o produto indesejável considerando esta variável como insumo. Desta forma, para fins de estimativa, a variável ambiental y_3 é considerada como produto desejável, enquanto as variáveis ambientais y_4 e y_5 são consideradas como insumos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os principais resultados encontrados para a ecoeficiência dos municípios pertencentes ao bioma Caatinga.

4.1. Estatística Descritiva das Variáveis

A Tabela 2 apresenta a estatística descritiva das variáveis utilizadas na análise de ecoeficiência da agropecuária dos municípios do bioma Caatinga.

A média da receita total da agropecuária nos municípios estudados foi R\$14,6 milhões, que se mostrou maior do que a média dos custos variáveis, R\$ 11,8 milhões, demonstrando receita líquida positiva, em termos médios. Em termos médios, as lavouras (35,9 mil ha) ocupavam área três vezes maior do que a as pastagens (11,4 mil ha). As pastagens degradadas ocupavam aproximadamente 2,5 mil ha, em média. As médias das emissões de GEEs na área de estudo foram de 377,1 Mt CO₂eq. Os valores dos desvios padrão de todas as variáveis demonstrou elevada variabilidade dos dados entre os municípios.

Tabela 2 - Estatísticas Descritivas dos insumos e produtos

Variável	Média	DP	Mín.	Máx.
Receita total agropecuária (R\$1.000)	14.605,44	49.343,39	1	1.025.368,00
Área preservada (ha)	14.818,84	24.848,22	1	332.725
Área utilizada com lavouras (ha)	35.933,26	46.302,46	1	539.948
Área utilizada com pastagens (ha)	11.419,42	16.106,61	1	144.067
Capital físico (unid.)	59,01	131,24	1	1.625
Mão de obra (unid.)	4.490,03	4.418,05	1	44.259
Custos variáveis (R\$1.000)	11.848,16	35.924,51	1	958.695
Emissão gases de efeito estufa (Mt CO ₂ eq)	377,14	413,47	6,71	4.440,13
Áreas de pastagens degradadas (ha)	2.528,56	5.074,90	1	53.075
Uso de agrotóxicos (R\$1.000)	712,04	7.153,08	1	161.395

Queimadas (unid.)	1,79	4,21	0,08	69,33
-------------------	------	------	------	-------

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Receitas agropecuárias totais correspondem à soma das receitas agrícolas e pecuária. DP = desvio padrão; Min. = valor mínimo; Máx. = valor máximo.

A elevada variabilidade observada nos insumos e produtos dá indícios da existência de heterogeneidade da produção agropecuária entre municípios da área de estudo. Essa heterogeneidade pode refletir ineficiência técnica e ecológica presente neste setor.

4.2 Ecoeficiência dos Municípios

A Tabela 3 apresenta a frequência absoluta e a estatística descritiva dos índices estimados de ecoeficiência dos municípios do bioma Caatinga, distribuídos por faixa de ecoeficiência. Do total de 1.093 municípios, 238 (ou 21,8%) deles posicionaram-se na fronteira de ecoeficiência, servindo de *benchmark* para o cálculo das ecoeficiências dos demais municípios (DMUs).

Os índices estimados de ecoeficiência variaram no intervalo entre 0,114 e 1, com média de ecoeficiência de 0,718 (ou 71,8%) e desvio padrão de 0,216. Em termos médios, no ano de 2017, a produção agropecuária no bioma Caatinga mostrava-se ineficiente do ponto de vista técnico e ecológico, sendo necessário reduzir o emprego de todos os insumos em 28,2%, inclusive a quantidade dos produtos indesejáveis.

Tabela 3 – Distribuição dos índices de ecoeficiências estimados para os municípios do bioma Caatinga, no ano de 2017

Ecoeficiência	N.	Percentual	Média	DP	Mín.	Máx.	IE
Muito baixa	3	0,3%	0,150	0,042	0,114	0,196	$0 < IE \leq 0,20$
Baixa	77	7,0%	0,334	0,052	0,200	0,399	$0,20 < IE \leq 0,40$
Intermediária	286	26,2%	0,510	0,057	0,400	0,599	$0,40 < IE \leq 0,60$
Alta	312	28,5%	0,699	0,054	0,600	0,799	$0,60 < IE \leq 0,80$
Muito Alta	415	38,0%	0,950	0,068	0,802	1,000	$0,80 < IE \leq 1$
<i>Benchmarks</i>	238	21,8%	1,000	NA	1,000	1,000	$IE = 1$
<i>População</i>	1.093	100,0%	0,718	0,216	0,114	1,000	-

Fonte: Elaboração própria com base nas eficiências calculadas.

A faixa de ecoeficiência mais elevada, ‘Muito Alta’, reuniu o maior número de municípios (415 ou 38%), dos quais 21,8% deles encontravam-se na fronteira de ecoeficiência ($IE = 1$), servindo de *benchmark* para o cálculo dos índices dos demais municípios. Do total das observações, 54,7% ou 598 municípios ficaram concentrados nas faixas “Intermediária” ou “Alta”. A faixa de ecoeficiência ‘Muito Baixa’ teve o menor número de municípios (3 ou 0,3%).

A Tabela 4 mostra a distribuição dos *benchmarks* entre os estados do bioma Caatinga. O estado que mais contribuiu para a formação da fronteira de ecoeficiência foi Bahia (21%), seguido dos estados do Ceará (17,2%), Rio Grande do Norte (15,5%), Paraíba (14,6%), Pernambuco (12,6%) e Piauí (11,7%). Os estados de Sergipe, Alagoas e Maranhão apresentaram um número reduzido de municípios ou não participaram da fronteira de ecoeficiência.

De acordo com os dados divulgados pelo IBGE em 2019, apenas 37% dos municípios de Alagoas e 36% dos municípios de Sergipe faziam parte do semiárido brasileiro. Isto pode explicar a baixa participação dos municípios desses estados na fronteira de ecoeficiência. Por outro lado, o estado do Ceará que tem 95% dos seus municípios na região semiárida teve uma participação relativamente alta na formação da fronteira de ecoeficiência (41 ou 17,2% dos municípios).

Tabela 4 – Distribuição dos *benchmarks* entre os estados do bioma Caatinga.

Estados	Nº de Municípios	Percentual
PI	28	11,7%
PB	35	14,6%
RN	37	15,5%
CE	41	17,2%
BA	52	21,8%
PE	30	12,6%
SE	6	2,5%
AL	9	3,8%
MA	0	0,0%
Total	239	100,0%

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 5 destaca os vinte municípios com os menores índices de ecoeficiência, seguida da unidade da federação e do valor do índice. Com exceção de Alagoas e do Maranhão, os estados tiveram pelo menos um município entre os vinte de menor desempenho econômico e ecológico.

Tabela 5 – Ranking dos Municípios com os 20 Menores Índices de Ecoeficiência

Ranking	DMU	Município	UF	Nível	IE
1	2925600	Presidente Dutra	BA	Muito Baixo	0,114
2	2805000	Pedra Mole	SE	Muito Baixo	0,141
3	2807303	Telha	SE	Muito Baixo	0,196
4	2413300	Serra de São Bento	RN	Baixo	0,201
5	2407203	Macau	RN	Baixo	0,207

6	2916906	Itiruçu	BA	Baixo	0,236
7	2914208	Irajuba	BA	Baixo	0,244
8	2414001	Tangará	RN	Baixo	0,245
9	2604908	Cumaru	PE	Baixo	0,245
10	2304459	Fortim	CE	Baixo	0,257
11	2413607	Severiano Melo	RN	Baixo	0,258
12	2919058	Lajedo do Tabocal	BA	Baixo	0,259
13	2901155	América Dourada	BA	Baixo	0,263
14	2913804	Ipecaetá	BA	Baixo	0,275
15	2204204	Francisco Santos	PI	Baixo	0,280
16	2412708	São Pedro	RN	Baixo	0,281
17	2924306	Piatã	BA	Baixo	0,282
18	2510501	Olivedos	PB	Baixo	0,284
19	2409332	Santa Maria	RN	Baixo	0,285
20	2900207	Abaré	BA	Baixo	0,292

Fonte: Elaboração própria com base nas eficiências calculadas.

Entre os vinte municípios listados, o estado da Bahia apresentou oito municípios, dos quais sete deles integram a mesorregião do Centro Norte Baiano, exceto pela cidade de Abaré que se localiza na mesorregião do Vale São Francisco. O Rio Grande do Norte contou com seis municípios, enquanto o estado do Ceará teve apenas um único município, Fortim, que fica localizado no litoral leste do estado.

Todos os municípios citados na Tabela 5 têm em comum o fato de serem municípios pequenos, em termos populacionais ou territoriais, e não possuem áreas expressivas cobertas por matas, florestas nativas (ou preservadas) e agroflorestas plantadas, característica decorrente do clima e da vegetação nativa dessas localidades. Tal particularidade pode ser uma evidência de que municípios cuja área de cobertura vegetal é praticamente inexistente têm baixa capacidade de resiliência ambiental, ou seja, baixa capacidade de mitigar os impactos ambientais ocasionados nessas regiões.

4.3 Eficiência dos Estados

A Tabela 6 apresenta a estatística descritiva dos índices de ecoeficiência por estado da federação. A participação dos estados no total de municípios localizados no bioma Caatinga variou consideravelmente, sendo a Bahia o estado que possui o maior número de municípios nesse bioma (253 ou 23,1%), seguido da Paraíba (194 ou 17,7%), do Ceará (175 ou 16%), do Rio Grande do Norte (147 ou 13,4%) e do Piauí (139 ou 12,7%), conjuntamente concentrando 82,9% dos municípios.

Tabela 6 – Descrição das médias de ecoeficiências técnicas para os Estados Nordestinos pertencentes ao bioma Caatinga, no ano de 2017

Estados	Nº de Municípios	Percentual	Média	DP	Mín	Máx	Rank de IE
PI	139	12,7%	0,777	0,177	0,28	1	1º
AL	37	3,4%	0,738	0,211	0,333	1	2º
PB	194	17,7%	0,737	0,197	0,284	1	3º
MA	1	0,1%	0,733	NA	0,733	0,733	4º
CE	175	16,0%	0,720	0,212	0,257	1	5º
SE	28	2,6%	0,699	0,252	0,141	1	6º
PE	119	10,9%	0,698	0,229	0,245	1	7º
BA	253	23,1%	0,695	0,221	0,114	1	8º
RN	147	13,4%	0,688	0,243	0,201	1	9º
Total	1093	100%	0,718	0,216	0,114	1,000	

Fonte: Elaboração própria com base nas eficiências calculadas.

Considerando a média dos índices de ecoeficiência por estado, todos os estados ficaram na faixa de ‘Alta’ de ecoeficiência, isto é, no intervalo entre 0,6 e 0,8. Pode-se observar que o desvio padrão do índice de ecoeficiência dos estados manteve-se em torno de 0,2, demonstrando baixa variabilidade do índice no estado.

A ordem crescente do *ranking* das médias de ecoeficiência dos estados ficou assim distribuído: 1º - Piauí (0,777); 2º - Alagoas (0,738); 3º - Paraíba (0,737); 4º - Maranhão (0,733); 5º - Ceará (0,720); 6º - Sergipe (0,699); 7º - Pernambuco (0,698); 8º - Bahia (0,695); 9º Rio Grande do Norte (0,688). Deve-se destacar que o Maranhão participou da análise com os dados de um único município, Araisos, portanto a média de ecoeficiência deste município.

A Tabela 7 mostra a distribuição dos municípios por faixa de ecoeficiência em cada estado e também o número de municípios *benchmark* por estado.

Tabela 7 - Descrição da quantidade de municípios e suas proporções dentro das categorias de ecoeficiência para estado

Estados	Nº de Municípios	Muito Baixo	Baixo	Intermediário	Alto	Muito Alto	Benchmark
PI	139	0 (0%)	3 (2,2%)	21 (15,1%)	51 (36,7%)	64 (46%)	28 (21,1%)
PB	194	0 (0%)	7 (3,6%)	46 (23,7%)	58 (29,9%)	83 (42,8%)	35 (18%)
RN	147	0 (0%)	15 (10,2%)	53 (36,1%)	26 (17,7%)	53 (36,1%)	37 (25,2%)

CE	175	0 (0%)	13 (7,4%)	43 (24,6%)	54 (30,9%)	65 (37,1%)	41 (23,4%)
BA	253	1 (0,4%)	21 (8,3%)	74 (29,2%)	72 (28,5%)	85 (33,6%)	52 (20,6%)
PE	119	0 (0%)	14 (11,8%)	33 (27,7%)	33 (27,7%)	39 (32,8%)	30 (25,2%)
SE	28	2 (7,1%)	2 (7,1%)	5 (17,9%)	9 (32,1%)	10 (35,7%)	6 (21,4%)
AL	37	0 (0%)	2 (5,4%)	11 (29,7%)	8 (21,6%)	16 (43,2%)	9 (24,3%)
MA	1	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	1 (100%)	0 (0%)	0 (0%)
Total	1.093	3 (0,3%)	77 (7,0%)	286 (26,2%)	312 (28,6%)	415 (38%)	238 (21,8%)

Fonte: Elaboração própria com base nas eficiências calculadas.

De acordo com a Tabela 7, com exceção do estado do Maranhão, mais de 30% dos municípios situaram-se na faixa de ecoeficiência ‘Muito Alta’. O número de municípios *benchmarks* por faixa de ecoeficiência também se mostrou relativamente elevado, acima de 18%. O estado que participou com o maior número de municípios na fronteira de ecoeficiência foi a Bahia, com 52 municípios (ou 20,6%).

As estimativas de ecoeficiência dos municípios da Caatinga, obtidos neste trabalho, divergiram marcadamente daqueles obtidos em outros biomas, tais como Silva (2021) e Araújo *et al.* (2021). Silva (2021), ao estimar a ecoeficiência da agropecuária nos municípios da Amazônia por meio da DEA-DDF (função distância direcional) e da SFA (função distância hiperbólica), concluiu que apenas 13% dos municípios analisados foram de fato ecoeficientes e que a maioria das unidades produtivas apresentaram um desempenho econômico e ecológico de moderado a baixo. Cita ainda que a variável de maior impacto na ecoeficiência agropecuária em questão foi o impacto na biodiversidade e as despesas com insumos produtivos.

Araújo *et al.* (2021), analisando a ecoeficiência para a região Centro-Oeste brasileira por meio do método DEA-VRS, encontraram valores de ecoeficiência média de 0,45 para o ano de 2014 e 0,48 para o período de 2016, sendo a variável de área desmatada a principal influenciadora dos resultados de ecoeficiência.

Ressalta-se que as diferenças entre as medidas de ecoeficiência da agropecuária nos biomas e nas regiões brasileiras são esperadas, já que os fatores determinantes são diversos, tais como os níveis de atuação dos recursos tecnológicos, as condições edafoclimáticas e os aspectos socioeconômicos que caracterizam os contextos nos quais está inserido o bioma.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho estimou os índices de ecoeficiência da agropecuária para os 1.093 municípios localizados no bioma Caatinga e no semiárido brasileiro, considerando os insumos típicos da produção agropecuária, produtos desejáveis (receitas da agropecuária e área preservada) e produtos indesejáveis (as emissões de gases de efeito estufa (GEEs)). A análise

municipal da ecoeficiência da agropecuária permitiu hierarquizar os municípios e identificar aqueles que serviram de benchmark para o cálculo dos índices dos demais municípios, considerados ineficientes do ponto de vista técnico e ecológico.

Do total de municípios analisados, 238 (ou 21,8%) deles formaram a fronteira de ecoeficiência, servindo de *benchmark*. A média do índice de ecoeficiência da população foi estimada em 0,718 (ou 71,8%), concentrando a maioria dos municípios nas faixas “Intermediária” ou “Alta”, compreendendo 54,7% da população ou 598 municípios. Pelo fato de os índices de ecoeficiência serem calculados endogenamente por meio de programação matemática, os resultados não permitiram avaliar os fatores determinantes de ecoeficiência. Porém, pelo fato da agropecuária na região semiárida, predominantemente ser baseada em agricultura familiar e utilizar práticas rudimentares, portanto, com baixo nível de eficiência técnica, o desempenho do índice de ecoeficiência pode estar associado ao melhor desempenho ecológico da produção agropecuária, em particular devido ao baixo impacto das práticas rudimentares.

Dentre as limitações encontradas na realização deste estudo, configuram-se as omissões de informações que compusessem os dados para alguns municípios durante a seleção das variáveis e a indisponibilidade de outros dados estatísticos e confiáveis que possibilitasse a incorporação de dados ambientais.

Espera-se que o presente trabalho sirva de substrato para estudos posteriores fazendo uso de outros métodos que sejam capazes de avaliar as influências de variáveis exógenas aliadas à produção. Para futuras pesquisas nesta área, sugere-se incorporar informações contidas no Censo de 2006, a fim de analisar a evolução da ecoeficiência do Nordeste nas últimas décadas, além da inclusão de outras variáveis não investigadas neste estudo.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, P. A. *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.

ALMEIDA, M.; REBELATTO, D. Sistematização das técnicas para avaliar a eficiência: variáveis que influenciam a tomada de decisão estratégica. **Proceedings of the II SEGeT, Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, Rezende RJ, Brazil**, p. 26-28, 2005.

ARAÚJO, R. V. de *et al.* Eco-efficiency measurement as an approach to improve the sustainable development of municipalities: A case study in the Midwest of Brazil. **Environmental Development**, v. 39, p. 100652, 2021. Disponível em : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221146452100049X> . Acesso em 03 maio 2023.

ASA – ARTICULAÇÃO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO. Disponível em : <http://www.asabrasil.org.br>. Acesso em: 28 jan. 2023.

BATTESE, G. E. Frontier production functions and technical efficiency: a survey of empirical applications in agricultural economics. **Agricultural Economics**, v. 7, n. 1, p. 185-208, 1992.

BARBOSA, F. C.; FUCHIGAM, H. Y. **Análise Envoltória de Dados: Teoria e Aplicações práticas**. 1. ed. Itumbiara: Ulbra, 2018. 109 p. Disponível em: <https://conhecimentolivre.org/wp-content/uploads/2019/03/Livro-DEA1.pdf> Acesso em: 15 mar. 2023.

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

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

ERKKO, S.; MELANEN, M.; MICKWITZ, P. Eco-efficiency in the Finnish EMAS reports - A buzz word? **Journal of Cleaner Production**, v. 13, n. 8, p. 799-813, 2005.

FÄRE, Rolf *et al.* Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries. **The American economic review**, p. 66-83, 1994.

FREEMAN, M. A.; HAVEMAN, R. H.; KNEESE, A. V. **The Economics of Environmental Policy**. New York: John Wiley & Sons, 1973.

GILLEN, David; LALL, Ashish. Developing measures of airport productivity and performance: an application of data envelopment analysis. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 33, n. 4, p. 261-273, 1997.

GOLANY, B.; ROLL, Y. An application procedure for DEA. **Omega**, v. 17, n. 3, p. 237-250, 1989.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo agropecuário 2017: Resultados definitivos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/3096/agro_2017_resultados_definitivos.pdf.

KOEIJER, T. J. de *et al.* Measuring agricultural sustainability in terms of efficiency: the case of Dutch sugar beet growers. **Journal of environmental management**, v. 66, n. 1, p. 9-17, 2002.

LINS, Marcos Estellita *et al.* O uso da Análise Envoltória de Dados (DEA) para avaliação de hospitais universitários brasileiros. **Ciência & saúde coletiva**, v. 12, n. 4, p. 985-998, 2007.

LOPES, B. A. G. **Ecoeficiência na agropecuária: uma aplicação de Análise Envoltória de Dados - DEA nos municípios brasileiros da região norte**. 2014, 183 p. Dissertação (Mestrado em Agronegócio) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

MEDEIROS, S. D. S., Pinto, T. F., Hernan Salcedo, I., Cavalcante, A. D. M. B., Perez Marin, A. M., & Tinôco, L. B. D. M. **Sinopse do censo demográfico para o semiárido brasileiro**. Instituto Nacional de Seminário (INSA), 2012. Disponível em: <https://livroaberto.ibict.br/handle/1/941> . Acesso em 30 abril 2023.

PINTO, Nelson Guilherme Machado; CORONEL, Daniel Arruda. Aplicação de modelos de eficiência e eficácia para a agropecuária brasileira: análise com um painel de dados. **Revista de la Facultad de Agronomía**, v. 119, n. 1, p. 9, 2020.

RIOS, Leonardo Ramos. **Medindo a eficiência relativa das operações dos terminais de contêineres do MERCOSUL**. 2005, 149 p. Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/4956>.

ROSANO-PENÑA, Carlos *et al.* Dependência Espacial da Ecoeficiência da Agricultura em São Paulo. **BBR. Brazilian Business Review**, v. 17, n. 3, p. 328-343, 2020.

SALGADO, Vivian Gullo. **Indicadores de Ecoeficiência e o Transporte de Gás Natural**. 2007, 248 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Vivian_Gullo_Salgado.pdf. Acesso em 13 mar. 2024.

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.

SUDENE, Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Semiário. 2021.

TABARELLI, Marcelo *et al.* Caatinga: legado, trajetória e desafios rumo à sustentabilidade. **Ciência e Cultura**, v. 70, n. 4, p. 25-29, 2018.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD), 1992. Eco-efficiency Learning Module. Available at: www.wbcsd.org (Acesso em : 29 jan. 2023).