RGe ISSN: 2177-3246

PREVISÃO DE EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA (GEE) PELO SETOR AGRÍCOLA DO ESTADO DO PIAUÍ, BRASIL

PROJECTED GREENHOUSE GAS (GHG) EMISSIONS FROM AGRICULTURE IN PIAUI, BRAZIL

PRONÓSTICO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) DEL SECTOR AGRÍCOLA EN EL ESTADO DE PIAUÍ, BRASIL

10.56238/revgeov17n5-086

José de Jesus Sousa Lemos[1]
Professor Permanente
Instituição: Universidade Federal do Ceará (UFC)
E-mail: lemos@ufc.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-2169-1360
Lattes: https://lattes.cnpq.br/5498218246827183

Francisco Nilson Silva Araújo
Doutor em Economia Rural
Instituição: Universidade Federal do Ceará (UFC)
E-mail: fnilson25@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-4235-1311
Lattes: http://lattes.cnpq.br/480531325967377

Fernando Marciano de Almeida
Doutorando em Economia Rural
Instituição: Universidade Federal do Ceará (UFC)
E-mail: marciano1406@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0009-0004-3246-8123
Lattes: https://lattes.cnpq.br/7870420162464494

Elizama Cavalcante de Paiva
Doutoranda em Economia Rural
Instituição: Universidade Federal do Ceará (UFC)
E-mail: elizamapaiva@yahoo.com.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-5917-8060
Lattes: https://lattes.cnpq.br/2236239894671202

[1] Bolsista de Produtividade do CNPq

RGe
ISSN: 2177-3246

Erika Costa Sousa
Doutoranda em Economia Rural
Instituição: Universidade Federal do Ceará (UFC)
E-mail: erikacosta@alu.ufc.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-3267-2779
Lattes: http://lattes.cnpq.br/5597065736818875

RESUMO
O presente estudo visa prever a evolução das emissões médias de gases de efeito estufa (GEE) no estado do Piauí, tendo como base os 242 municípios do estado, bem como: 1 – estimar as estatísticas descritivas associadas às emissões de GEE e às precipitações médias anuais observadas no estado do Piauí no período de 1973 e 2023; 2 - criar um modelo que seja capaz de prever a trajetória das emissões médias de gases do efeito estufa que são agregadas a partir das emissões observadas nos municípios anualmente entre 1973 e 2023; 3 – hierarquizar, em ordem crescente de emissões de GEE, os municípios do Piauí e dividi-los em quintis, para avaliar os comportamentos médios das emissões e das pluviometrias em cada quintil. A hipótese norteadora do estudo é que os 33 municípios situados no sul do estado, aos quais estão inseridos na fronteira agrícola do MATOPIBA cuja agricultura é intensiva no uso de máquinas, fertilizantes químicos, defensivos agrícolas e criação de bovinos, são os maiores emissores de GEE da região. Para fazer as previsões, estimou-se o modelo ARIMA (0,2,1). As principais evidencias da pesquisa mostraram que houve um crescimento expressivo das emissões de GEE no estado do Piaui no período analisado e que, conforme suposição norteadora da pesquisa, os municípios situados na região do MATOPIBA apresentaram as maiores emissões médias de GEE no período analisado.

Palavras-chave: Modelo ARIMA. Gases do Efeito Estufa. Alterações Climáticas.

ABSTRACT
This study aims to predict the evolution of average greenhouse gas (GHG) emissions in the state of Piauí, based on the 242 municipalities of the state, as well as: 1 - estimate the descriptive statistics associated with GHG emissions and average annual rainfall observed in the state of Piauí in the period from 1973 to 2023; 2 - create a model that is capable of predicting the trajectory of average greenhouse gas emissions that are aggregated from the emissions observed in the municipalities annually between 1973 and 2023; 3 - hierarchize, in ascending order of GHG emissions, the municipalities of Piauí and divide them into quintiles, to evaluate the average behavior of emissions and rainfall in each quintile. The study's guiding hypothesis is that the 33 municipalities located in the southern part of the state, which are located within the agricultural frontier of MATOPIBA, where agriculture is intensive in the use of machinery, chemical fertilizers, pesticides, and cattle raising, are the largest GHG emitters in the region. The ARIMA (0, 2, 1) model was used to make the predictions. The main evidence from the study showed that there was a significant increase in GHG emissions in the state of Piauí during the analyzed period and that, in accordance with the study's guiding assumption, the municipalities located in the MATOPIBA region had the highest average GHG emissions during the analyzed period.

Keywords: ARIMA Model. Greenhouse Gases. Climate Change.

ISSN: 2177-3246

RESUMEN
Este estudio tiene como objetivo predecir la evolución de las emisiones promedio de gases de efecto invernadero (GEI) en el estado de Piauí, con base en los 242 municipios del estado, así como: 1 – estimar estadísticas descriptivas asociadas con las emisiones de GEI y la precipitación anual promedio observada en el estado de Piauí entre 1973 y 2023; 2 – crear un modelo capaz de predecir la trayectoria de las emisiones promedio de gases de efecto invernadero agregadas a partir de las emisiones observadas anualmente en los municipios entre 1973 y 2023; 3 – clasificar los municipios de Piauí en orden ascendente de emisiones de GEI y dividirlos en quintiles para evaluar el comportamiento promedio de las emisiones y la precipitación en cada quintil. La hipótesis principal de este estudio es que los 33 municipios ubicados en el sur del estado, que forman parte de la frontera agrícola MATOPIBA y cuya agricultura es intensiva en el uso de maquinaria, fertilizantes químicos, pesticidas y ganadería, son los mayores emisores de gases de efecto invernadero (GEI) en la región. Para realizar las predicciones, se estimó el modelo ARIMA (0,2,1). Los principales hallazgos de la investigación mostraron un incremento significativo en las emisiones de GEI en el estado de Piauí durante el periodo analizado y que, según la hipótesis principal de la investigación, los municipios ubicados en la región de MATOPIBA presentaron las mayores emisiones promedio de GEI durante dicho periodo.

Palabras clave: Modelo ARIMA. Gases de Efecto Invernadero. Cambio Climático.

1 INTRODUÇÃO

O efeito estufa é um fenômeno natural e fundamental para a vida na Terra. Nele, os gases retêm o calor irradiado pelo planeta enquanto permitem a passagem da radiação solar, proporcionando uma temperatura média global, próxima à superfície, entre 16-18ºC. O que mantém as temperaturas médias globais toleráveis no planeta terra é a troca de energia entre a superfície e atmosfera.

Uma parte da energia solar que chega até ao planeta terra é refletida à atmosfera terrestre e outra é absorvida. A parte que é bloqueada na atmosfera é justamente devido aos gases de efeito estufa, que deixam passar a energia solar (por ter comprimentos de onda menores), são opacos à radiação terrestre, pois apresentam comprimentos de onda diferentes devido à temperatura solar e terrestre.

Contudo, o aumento desse fenômeno, vem sendo impulsionado pelas atividades humanas, e gerando problemas que ultrapassam as fronteiras nacionais. Tornando as mudanças climáticas uma importante questão global, sendo uma responsabilidade e missão compartilhada por toda a humanidade (IPCC, 2022; HU et al, 2022).

O aumento da concentração de dióxido de carbono (CO2) na atmosfera vem incentivando a velocidade atual do aquecimento do planeta. De acordo com o sexto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), em 2021, a concentração de CO_2 atingiu 410 partes por milhão (ppm), o maior nível em 2 milhões de anos.

Esse aumento exacerbado das emissões de gases do efeito estufa criam problemas quando as suas quantidades superam a sua existência de forma natural. Isso acontece em decorrência das atividades humanas como: 1 - queima de combustíveis fósseis como carvão mineral, gás natural e petróleo; 2 - A remoção de florestas seja por queimadas ou devido ao corte da vegetação, que libera o carbono armazenado nas árvores de volta para a atmosfera, além de reduzir a capacidade natural de absorção de CO_2, através do fenômeno chamado de fotossíntese; 3 – Industrialização em certas atividades como a produção de cimento; 4 – emissão de gases através dos escapamentos dos automóveis, meios de transportes nas rodovias ou nos centros urbanos e transportes em geral; 5 - atividades agrícolas praticadas de forma inadequada, especialmente a criação de gado em elevadas concentrações por área que libera grandes quantidades de metano durante a digestão, sobretudo por parte do gado bovino.

Dentre outras implicações essas elevações dos gases do efeito estufa acima dos níveis naturais podem alterar variações climáticas que, no geral, são localizadas, tendo em vistas a imensidão do planeta terra em que 71% da superfície é constituída de água (oceanos e rios) e dos 29% restantes apenas 6% da superfície é ocupada por seres humanos (Felicio, 2014).

Apesar do crescimento econômico impulsionado pelo setor agrícola, essa é uma das atividades responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE), devido ao uso de fertilizantes à base de combustíveis fósseis, à queima de biomassa, à alta densidade de gado por unidade de área e ao uso de

maquinário agrícola pesado, que também utiliza esse tipo de combustível em sua matriz energética (Liu et al., 2017).

Desta forma o setor agropecuário, embora essencial para a segurança alimentar, para a produção de matérias primas para o setor industrial, agroenergia e, em decorrência, contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico, sendo praticado mediante a utilização de práticas inadequadas, pode contribuir para essas emissões. De acordo com a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), o setor agrícola pode ser responsável por até 21% das emissões mundiais de GEE (FAO, 2016).

A intensificação das variações climáticas representa um dos desafios mais prementes da atualidade, demandando ações urgentes em diversas frentes para mitigar as suas causas e adaptar-se aos seus efeitos.

O semiárido brasileiro, caracterizado por condições climáticas adversas, como irregularidade pluviométrica e elevadas temperaturas, apresenta vulnerabilidades particulares aos impactos dessas variações ou instabilidades climáticas (Lemos, 2022). No estado do Piauí, os municípios que fazem parte do semiárido concentram uma parcela significativa da população rural e da atividade agropecuária, com destaque para a pecuária bovina, que desempenha um papel crucial na economia local, mas também representa uma fonte relevante de emissões de GEE, principalmente pela fermentação entérica do rebanho.

Compreender e prever a dinâmica dessas emissões torna-se fundamental para o planejamento de estratégias de desenvolvimento sustentável que conciliem a produção agropecuária com a conservação ambiental e a convivência das populações com essas instabilidades.

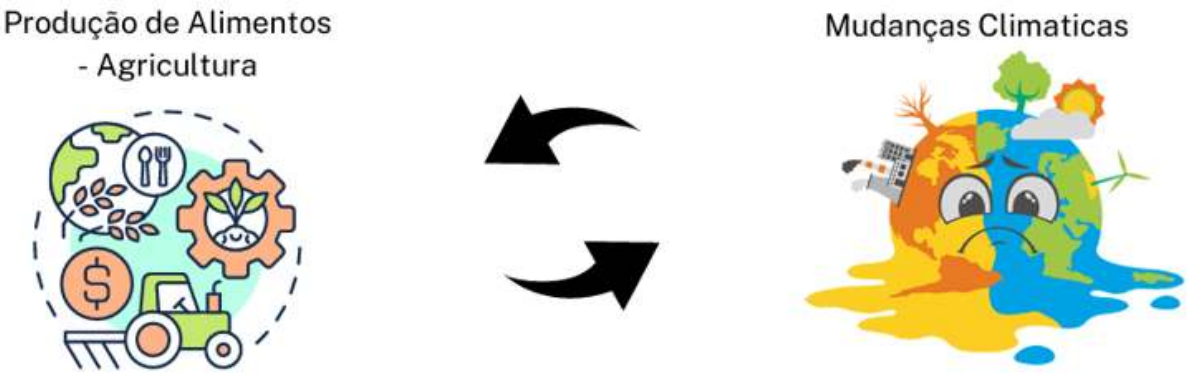
Estudos recentes e iniciativas governamentais, como o Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) e programas voltados para o semiárido, como o "Viva o Semiárido" no Piauí, buscam promover práticas agropecuárias mais sustentáveis e de baixa emissão. A avaliação da eficiência produtiva e a adoção de tecnologias de baixa emissão de carbono são temas emergentes, conforme apontado por pesquisas da Embrapa e discussões em fóruns técnicos. No entanto, a capacidade de antecipar tendências futuras de emissão em nível municipal, considerando as especificidades locais, ainda é um campo que necessita de maior exploração.

É válido salientar que é possível observar uma espécie de "ciclo vicioso" entre a agricultura e as mudanças climáticas por meio do aumento das emissões dos Gases do Efeito Estufa, onde à interação negativa entre as práticas agrícolas, quando adotadas, causam aumento das emissões de gases de efeito estufa que por sua vez altera o clima causando aquecimento global contribuindo para condições mais desfavoráveis para a agricultura.

Rosane (2023), Bezerra (2022) e o IPCC (2022), enfatizam que o aumento das temperaturas e a alteração dos padrões climáticos afetam negativamente a agricultura levando à diminuição da

resiliência das culturas, deixando-as mais vulneráveis a pragas, o que leva ao aumento das taxas de aplicação de pesticidas, necessidade de maior desmatamento, dentre outras ações que, por sua vez, geram mais GEE, concordando assim que toda essas atividades levam a um ciclo (Figura 01).

Figura 01 – Ciclo vicioso



Fonte: Elaborado pelo autor

A intensificação das variações climáticas, dentre outras prioridades, tem evidenciado a importância de monitorar e prever as emissões de gases do efeito estufa (GEE) sobretudo em setores produtivos como a agropecuária. No semiárido brasileiro, em especial no estado do Piauí, que possui a maioria dos municípios inseridos nesse regime climático, as atividades pecuárias representam importante vetor de emissões, sendo influenciadas por fatores como a precipitação pluviométrica irregular e a variação do efetivo animal. No entanto, a maioria dos estudos sobre emissões ainda se concentra em escalas nacionais ou estaduais, carecendo de abordagens preditivas em nível municipal.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo geral investigar e a evolução das emissões médias emissões de GEE no estado do Piauí, a partir das informações coletadas em nível dos 224 municípios que fazem parte do estado, no período de 1973 a 2023.

De forma específica a pesquisa se propôs: 1 – estimar as estatísticas descritivas associadas às emissões de GEE e às precipitações médias anuais observadas no estado do Piauí no período de 1973 e 2023; 2 - criar um modelo que seja capaz de prever a trajetória das emissões médias de gases do efeito estufa que são agregadas a partir das emissões observadas nos municípios anualmente entre 1973 e 2023; 3 – hierarquizar, em ordem crescente de emissões de GEE, os municípios do Piauí e dividi-los em quintis, para avaliar os comportamentos médios das emissões e das pluviometrias em cada quintil.

1.1 O SEMIÁRIDO BRASILEIRO E AS EMISSÕES DE GEE

O Semiárido Brasileiro não é homogêneo em paisagem, em disponibilidade de recursos naturais, tampouco em revestimento florístico. É um tipo de clima caracterizado pelo baixo e instável índice pluviométrico. As temperaturas médias são elevadas com reduzidas amplitudes térmicas. Os dias são longos em termos de luminosidade. Na maior parte do ano não chove e a umidade relativa do

ar é muito baixa. Geralmente se caracteriza por apresentar chuvas concentradas em uma época do ano e um grande período do ano com estiagem. Pode-se dizer que a regra no semiárido brasileiro é a instabilidade pluviométrica (Lemos, 2020; Costa Filho, 2025).

No Brasil, o clima semiárido reconhecido oficialmente pelo Conselho Deliberativo da SUDENE (CONDEL/SUDENE) se dá em todos os 9 estados da região Nordeste, em parte do norte de Minas Gerais e em seis 6 municípios do estado do Espírito Santo. Atualmente são 1477 municípios fazendo parte do regime climático do semiárido. Esses municípios ocupam uma área de 1.335.298 km2, representando 15% do território brasileiro, onde mora uma população estimada pelo IBGE de 31 milhões de habitantes (SUDENE, 2024; IBGE, 2022).

As áreas definidas no clima semiárido apresentam especificidades climáticas de solos, cobertura vegetal e de fauna nativa. De acordo com os dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), as emissões de GEE da categoria de Mudança de Uso de Terra é a que contribui mais com esta emissão com um total em 2023 de 1.061.636.268, e segundo posição a agropecuária com emissão e 2023 de 631.176.931. Portanto, particularmente a bovinocultura contribui significativamente para as emissões de metano entérico, configurando-se como uma importante fonte de emissão de GEE no país (SEEG BRASIL, 2023).

Além desta seção introdutória, a pesquisa contém mais quatro seções. A segunda seção apresenta as fontes dos dados e os métodos econométricos aplicados. A terceira seção traz discussões a respeito dos resultados estimados e a quarta é dedicada às considerações finais.

2 METODOLOGIA

Nesta seção apresentam-se a base de dados com as respectivas fontes bem como as metodologias adotadas para alcançar cada um dos objetivos do estudo realizado para investigar a relação entre as emissões anuais médias de GEE no estado do Piauí e as pluviometrias médias do estado entre os anos de 1973 e 2023.

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa busca entender o comportamento das emissões de GEE no estado do Piauí entre os anos de 1973 a 2023. Esse estado possui 224 municípios, dos quais 216, ou 96,4%, estão atualmente reconhecidos oficialmente como fazendo parte do semiárido brasileiro. Em termos relativos é um dos estado que possuem maiores quantidades de municípios participantes do regime semiárido. Na figura 02 mostra-se a localização da área de estudo desta pesquisa.

Figura 02 – Municípios do semiárido do Piauí



Fonte: Elaborada pelos autores a partir dos dados do IBGE.

A área do estado é caracterizada pela predominância do regime climático semiárido, com baixos índices pluviométricos anuais e geralmente instáveis. O clima apresenta alta evapotranspiração potencial, igualmente elevadas temperaturas e uma estação de escassez hídrica prolongada que se estende anualmente, em geral, a partir do mês de junho até dezembro. A vegetação predominante é a Caatinga, mas parte dos municípios situados ao sul do estado está inserida no bioma Cerrado. Prevalecem nos municípios as unidades agrícolas familiares (UAF) que praticam uma agricultura em que prevalece cultivos de sequeiro, majoritariamente arroz, feijão, mandioca e milho. De acordo com o censo agropecuário de 2017, se pratica também de forma extensiva a criação de gado bovino (IBGE, 2017).

2.2 FONTES E PREPARAÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS NA PESQUISA

A base de dados utilizados na pesquisa provém das seguintes fontes. As informações acerca das emissões anuais dos gases do efeito estufa (GEE) pelas atividades agrícolas praticadas nos 224 municípios do estado no período de 1973 a 2023 foram levantadas junto ao SEEG (System of Estimates of Greenhouse Gas Emissions and Removals). As informações acerca das pluviometrias anuais dos municípios do Piauí computadas para o período de 1973 a 2023 foram levantadas junto à NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

As informações de emissões anuais de GEE pelo setor agrícola dos municípios do estado do Piauí, bem como das precipitações pluviométricas anuais foram agregadas nas suas respectivas médias. Assim, o estudo avaliou as emissões médias anuais de GEE pelo estado do Piauí, aferindo os impactos das pluviometrias médias, tendo como base as informações coletadas em nível dos seus municípios entre os anos de 1973 a 2023.

2.3 METODOLOGIA PARA ATINGIR O PRIMEIRO OBJETIVO

Para atingir o primeiro objetivo da pesquisa estimam-se os valores médios, máximos e mínimos das emissões de GEE e das precipitações de chuvas, a partir dos valores médios obtidos da agregação das informações observadas nos 242 municípios do estado do Piauí entre os anos de 1973 a 2023.

Estimam-se também os valores mínimos, máximos, coeficientes de variação dessas duas variáveis, bem como estima-se a correlação linear entre elas.

2.4 METODOLÓGICA PARA ALCANÇAR O SEGUNDO OBJETIVO: AFERIÇÃO DA EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE

Inicialmente, realizou-se uma análise exploratória das séries temporais para verificar eventuais padrões, tendências e possíveis rupturas estruturais. As séries foram visualizadas graficamente e submetidas a testes estatísticos, como o teste de Dickey-Fuller Aumentado (ADF), para avaliar a estacionariedade, condição essencial para a aplicação do modelo ARIMA.

Após fazer estudo exploratório dos dados, iniciam-se as avaliações para procurar atingir o esse objetivo estimando a correlação entre as emissões médias de GEE no estado com as respectivas precipitações de chuvas. Caso a correlação seja significativamente elevada, parte-se para duas estratégias que serão apresentadas a seguir.

Como o objetivo de buscar aferir o impacto das pluviometrias sobre as evoluções das emissões anuais de GEE, que nesta pesquisa é tratada como Y_t parte das seguintes premissas. Seja Y_t uma variável aleatória observada no t-ésimo período (t = 1, 2, ..., n). Seja Y_P o valor projetado de Y_t, e que $€_t$ seja o termo aleatório que, por hipótese, atende aos fundamentos do modelo linear clássico, de ser "ruido branco". Neste caso, os valores de (Y_P) que prevê os valores de (Y_t) podem ser sintetizados na equação (1):

$$Y^P = Y_t + €_t \quad (1)$$

Nesta pesquisa se supõe que o termo aleatório ($€_t$) que, por hipótese é endógeno, experimenta variações decorrentes da variável exógena que nesta pesquisa assume-se que seria a pluviometria média anual observada (X_t). Sendo assim escreve-se que:

$$€_t = f(X_t) \quad (2)$$

Para estimar o impacto de $f(X_t)$ sobre o termo de erro, a pesquisa utiliza de duas estratégias. A primeira mais simples seria estimar um modelo de regressão linear simples entre o termo de erro ($€_t$) e a variável exógena (X_t).

Outra alternativa seria inserir a variável exógena em modelo ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) criado por Box, Jenkins (2015). O modelo ARIMA é amplamente utilizado para a previsão de séries temporais univariadas. Este modelo é representado como ARIMA

(p,d,q), onde: p é a ordem da parte autorregressiva (AR); d é o número de diferenças necessárias para tornar a série estacionária (integração) q é a ordem da média móvel (MA).

Caso o teste de correlação das séries de emissões de GEE e de chuvas seja estatisticamente significante, a pesquisa testa outra alternativa que é a construção do modelo ARIMA com variável exógena. A inserção da variável (Xt) no modelo, o transforma em ARIMAX(p,d,q,x). Caso o regressor associado à variável (Xt) seja estatisticamente diferente de zero, se confirma a hipótese de que o modelo original pode ser estendido. Caso a hipótese não se confirme, trabalha-se com o modelo ARIMA original.

Paiva et al (2024) elaboraram modelo ARIMAX para prever o impacto das pluviometrias nas series anuais de produção de lavouras de sequeiro em Pernambuco. Lemos e Bezerra (2019); Lessa et al (2023) mostraram, através de regressão linear que as pluviometrias impactam as produções de grãos no Ceará e de lavouras de sequeiro na Paraíba, respectivamente.

Para estimar o modelo de previsão seguiu-se, de forma resumida, as seguintes etapas: 1- Estacionarização da série: Aplicou-se diferenciação quando necessário, conforme indicado pelo teste ADF e inspeção do gráfico da série. 2 - Identificação do modelo: Com base nos gráficos da função de autocorrelação (ACF) e autocorrelação parcial (PACF), identificaram-se os valores iniciais de p e q. O critério de informação de Akaike (AIC) foi utilizado para comparar modelos e selecionar o mais parcimonioso. Os parâmetros do modelo foram ajustados por máxima verossimilhança. 3 - Diagnóstico do modelo: Os resíduos dos modelos foram analisados para verificar a ausência de autocorrelação (teste de Ljung-Box), normalidade e homocedasticidade.

A estatística Ljung-Box (LB) verifica o fator aleatório e a independência da série de dados ao longo do tempo. Se o teste indicar que as observações não são independentes, então existe correlação diferente de zero entre uma ou mais observações passadas.

Com o modelo validado, geraram-se previsões para os próximos 10 anos. A acurácia das previsões será avaliada por meio do erro quadrático médio (RMSE) e do erro absoluto médio (MAE).

A partir das estimações geradas no modelo será traçado dois cenários considerados otimistas para estimações “menores” que as estimadas pela previsão central e “pessimistas” para estimações maiores que os previstos pelo ARIMA. As previsões centrais representarão as estimativas pontuais de emissão dos GEE em cada ano.

Os limites inferiores e superiores serão estimados por meio do intervalo de confiança (intervalo de previsão).

Limite inferior = yp − $z \cdot SE$t

Limite superior = yp + $z \cdot SE$t

Onde:

yp = previsão central para o ano t;

SEt = erro padrão da previsão (quanto maior a incerteza, mais largos os limites);

z = valor crítico da distribuição normal (ex.: 1,96 para intervalo de 95%).

2.5 ESTRATÉGIA METODOLÓGICA PARA ALCANÇAR O TERCEIRO OBJETIVO

O terceiro objetivo busca hierarquizar, em ordem crescente, as emissões de GEE pelos 224 municípios do estado do Piauí, agrupá-los em quintis e estimar as correlações entre as médias de emissões em cada quintil com as respectivas médias pluviométricas observadas em cada quintil.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados encontrados na pesquisa na sequência em que foram apresentados os objetivos da pesquisa.

3.1 RESULTADOS ENCONTRADOS PARA ATINGIR O PRIMEIRO OBJETIVO

As séries temporais da variável emissões de gases do efeito estufa GEE pelas atividades agrícolas do estado Piauí. Após análise gráfica, observou-se tendência de crescimento e variância não constante, especialmente na variável GEE, o que motivou a aplicação de transformações logarítmicas para estabilizar a variância.

Tabela 01 – Medidas descritivas da amostra

Estatísticas estimadas	Emissões de GEE	Precipitação de chuvas
Média	2291,57	785,56
Mínimo	661,45	320,8
Máximo	7719,25	1.772,90
CV(%)	73,71	36,0
R de Pearson = -0,044^{NS}		

Fonte: NOOA e GEE, vários anos

Nota: NS=coeficiente estatisticamente não diferente de zero aos níveis usuais de probabilidades de erro

A análise descritiva das variáveis emissões anuais de GEE, bem como das precipitações anuais de chuvas revelaram características distintas e importantes para a compreensão do fenômeno em estudo. As emissões de GEE apresentaram uma média anual de 2291,57 toneladas, com um mínimo de 661,45 toneladas e um máximo de 7719,25 toneladas. O coeficiente de variação foi bastante elevado, da ordem de 73,71%. Este alto CV indica uma heterogeneidade significativa nas emissões ao longo do período estudado, tanto de forma espacial (entre os municípios) como temporal, quando se computam as médias anuais dessas emissões. Esta evidencia sugere a presença de tendências ou de ciclos que justificam a aplicação de modelos de análises de séries temporais.

A precipitação registrou uma média de 785,56 mm, com valores mínimos de 320,8 mm e máximos de 1.772,90 mm, e um CV de 36,00%. A pluviometria no semiárido é conhecida por sua

irregularidade, o que pode impactar diretamente as atividades agrícolas, tanto da produção vegetal como animal.

O coeficiente de correlação entre as séries de emissões anuais de GEE e de pluviometria foi muito baixo (-0,044), com um nível de significância de 0,759. Portanto, observou-se que no período analisado, ao menos de um ponto de vista das séries anuais das emissões de GEE e de pluviometria, rejeita-se a hipótese de existência de correlação entre essas duas variáveis.

Com base nesta evidência, não foi possível introduzir a variável exógena, precipitação anual das chuvas no modelo ARIMA utilizado para fazer as previsões das emissões de GEE médio pelo estado do Piauí entre os anos de 1973 a 2023, contudo avaliam-se os comportamentos das pluviometrias nas definições das magnitudes das emissões de GEE nos quintis que são objetos do terceiro objetivo.

3.2 ANÁLISE DE ESTACIONARIEDADE DAS SÉRIES TEMPORAIS

Uma série é dita estacionária quando suas propriedades estatísticas como média, variância e auto-covariância são constantes ao longo do tempo.

A estacionariedade das séries temporais é um pré-requisito fundamental para a aplicação de modelos ARIMA. Para avaliar esta condição, foram utilizados os testes de Dickey-Fuller Aumentado (ADF) e Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS) para as séries log-transformadas de GEE. A log-transformação foi aplicada para estabilizar a variância e linearizar as relações, conforme prática comum em séries temporais com dados de emissões e populações.

O teste ADF resultou em um p-valor de 0,7506, que é significativamente maior que o nível de significância de 0,05. Com base neste resultado, não foi possível rejeitar a hipótese nula de não estacionariedade, indicando que a série log (GEE) não é estacionária. Complementarmente, a estatística KPSS para log (GEE) foi de 1,0122, excedendo o valor crítico de 0,463. Este resultado levou à rejeição da hipótese nula de estacionariedade, confirmando que a série log (GEE) é não estacionária e, portanto, requer diferenciação para se tornar estacionária antes da modelagem ARIMA.

3.3 MODELAGEM ARIMA PARA ESTIMAÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE

Com base na análise de estacionariedade, a série temporal de emissões de GEE foi processada utilizando um modelo ARIMA (0,2,1). A escolha da ordem de diferenciação (d=2) foi determinada pela necessidade de tornar a série estacionária, conforme indicado pelos testes ADF e KPSS. O modelo ARIMA(0,2,1) significa que a série não tem componente autoregressivo (p=0), foi diferenciada duas vezes (d=2) e que há um componente de média móvel (q=1) de primeira ordem MA(1).

O modelo ajustado demonstrou um bom desempenho preditivo. Com efeito o coeficiente determinação (R2) foi de 0,909; com um erro médio absoluto percentual (MAPE) de 15,3%; BIC

normalizado = 12,50; o coeficiente de correlação estimado entre os valores observados e previstos da série de emissões de GEE foi de 0,951. Coeficientes de determinação elevados, valores de MAPE abaixo de 20%, são geralmente considerados aceitáveis para previsões em séries temporais. Além disso valores reduzidos da estatística BIC sinalizam para sinalizar que o ajustamento foi parcimonioso.

O coeficiente de correlação de Pearson entre as séries observada e prevista da ordem de 0,951 corrobora com o bom grau de ajustamento do modelo estimado. Finalmente a estatística de Ljung-Box (Q=23,41) com 17 graus de liberdade, que foi significativamente diferente de zero apenas em níveis superiores a 13,3% de probabilidade de erro, sinaliza que não se pode rejeitar a hipótese de que os resíduos gerados na estimação são ruido branco (Hyndman, R. J.; Athanasopoulos, G., 2021).

O coeficiente da média móvel de primeira ordem MA(1) foi estimado em 0,916, sendo estatisticamente significativo a um nível de probabilidade menor do que 1% de erro, o que valida a inclusão deste componente no modelo, e consolida o modelo estimado como adequado para fazer as previsões de emissões de GEE usando as médias agregadas das emissões dos 242 municípios estudados.

3.4 PREVISÕES DE EMISSÕES PELO MODELO ARIMA (0,2,1)

As previsões do modelo ARIMA (0,2,1) para as emissões de GEE para o estado do Piaui indicam uma tendência crescente consistente no período 2024-2033, sendo representada na Tabela 02.

O modelo projetou um aumento significativo nas emissões para o período analisado, passando de 8054,79.354,44 ton de GEE em 2024 para 11074,65 ton de GEE em 2033, com incremento médio anual de 335,54 t(3,5% a.a.) de emissões de GEE. Na Tabela 3 e no Gráfico 2 apresentam-se os valores pontuais previstos, juntamente com os intervalos de confiança de 95% (IC=95%). Observa-se que as emissões totais de GEE mantêm uma tendência de crescimento ao longo do período projetado e previsto.

Tabela 02 – Previsão de aumento no GEE (ton)

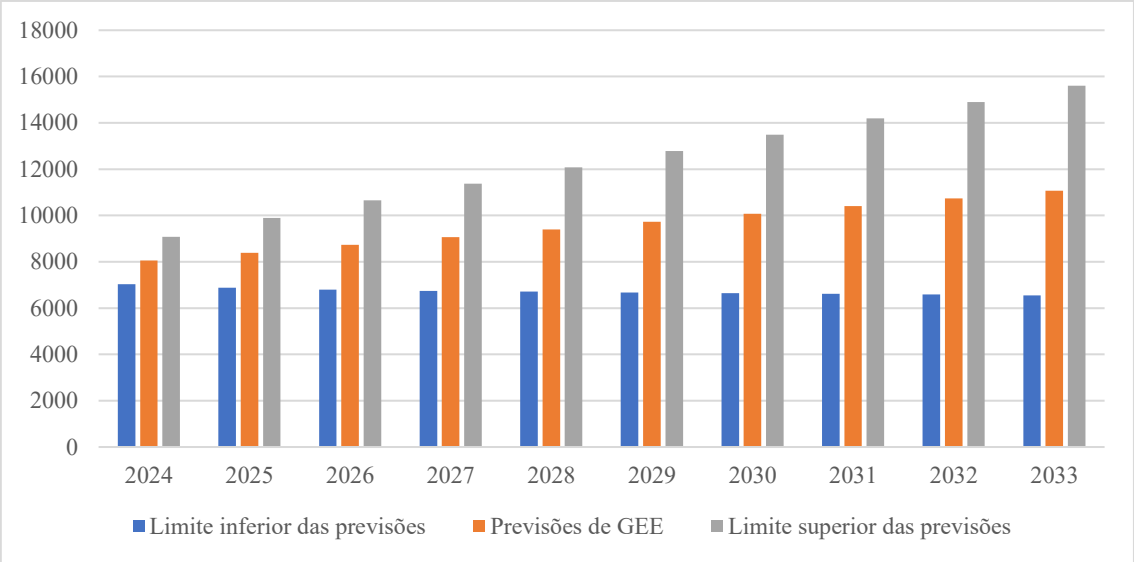
Ano	Previsão GEE	Limite inferior	Limite superior
2024	8054,79	7030,49	9079,09
2025	8390,33	6879,87	9900,79
2026	8725,87	6799,32	10652,42
2027	9061,41	6747,49	11375,33
2028	9396,95	6709,19	12084,71
2029	9732,49	6677,04	12787,94
2030	10068,03	6646,90	13489,16
2031	10403,57	6616,24	14190,90
2032	10739,11	6583,44	14894,78
2033	11074,65	6547,40	15601,90

Fonte: Elaborada pelos autores a partir dos dados da amostra.

O aumento progressivo da amplitude dos intervalos de confiança é consistente com o comportamento esperado de séries temporais com alta ordem de diferenciação, refletindo maior incerteza à medida que se projeta para anos mais distantes.

A previsão para 2033 indica que, no cenário mais conservador (IC 95% inferior), as emissões ainda podem superar 11074,65 toneladas de GEE, enquanto, no cenário mais pessimista (IC 95% superior), podem ultrapassar 15601,90 toneladas de emissões de GEE, o que reforça a necessidade de políticas públicas de mitigação. Esses resultados sugerem a necessidade de monitoramento contínuo e intervenções políticas eficazes, especialmente se o cenário de alta se concretizar.

Gráfico 1 – Valores médios, limites inferiores e limite superiores das previsões de emissões de GEE pelo estado do Piauí entre os anos de 2024 a 2033



Fonte: Resultados baseados nas evidências mostradas na Tabela

3.5 EMISSÕES DO GEE POR MUNICÍPIOS AGRUPADOS EM QUINTIS (TERCEIRO OBJETIVO DA PESQUISA)

Os municípios do Piauí foram organizados em quintis de acordo com as emissões de GEE. Os resultados desta etapa da pesquisa estão mostrados na tabela 03 e no gráfico 02.

Tabela 03 – Médias e classificações das emissões de GEE nos quintis - Piaui entre 1973 a 2023

Quintis	Emissões médias de GEE (ton)	Classificação
1	407	Baixas emissões
2	694	Emissões moderadamente baixas
3	1001	Emissões medias
4	1698	Emissões altas
5	7779	Emissões muito altas

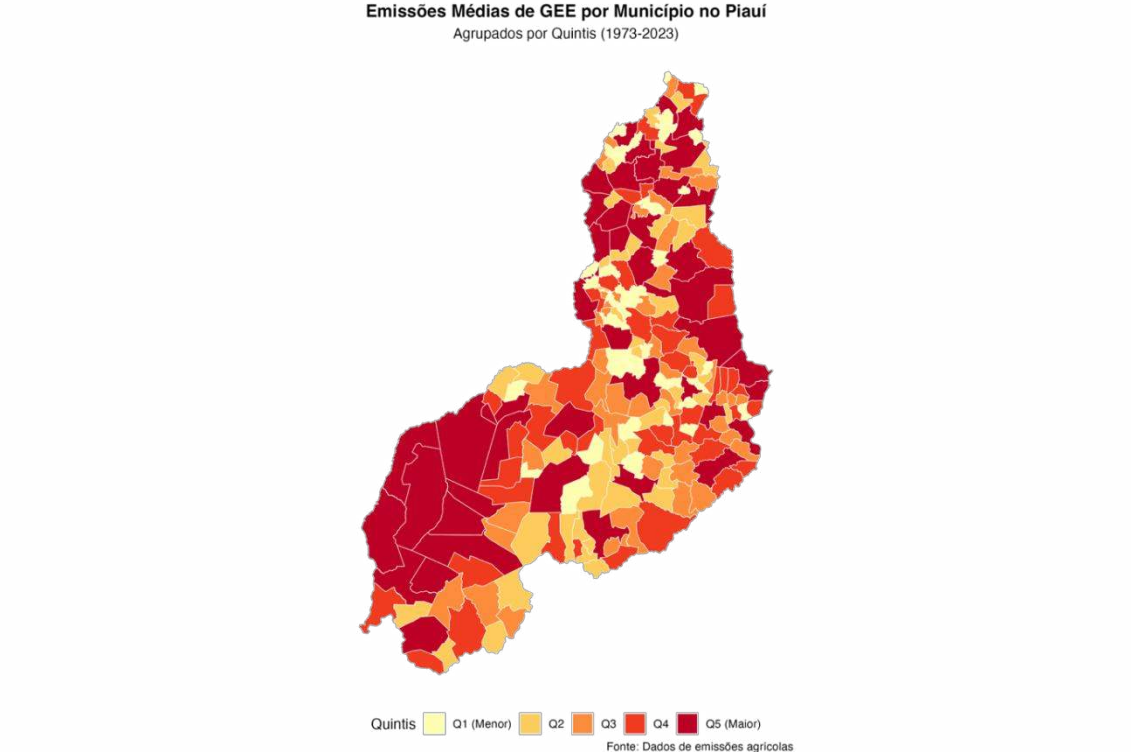
Fonte: Resultados encontrados na pesquisa.

Pelas evidencias mostradas na tabela 3, observa-se uma distribuição espacial das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no estado do Piauí, classificadas por quintis. Esta análise baseia-se na legenda numérica fornecida, que representa valores contínuos de emissões de GEE.

Verifica-se que os maiores emissores de GEE (vermelho) formaram dois blocos. O maior bloco está localizado nos municípios situados na região sul do estado. Esses municípios fazem parte da fronteira agrícola do MATOPIBA. Nessa região é praticada agricultura intensiva no uso de máquinas

e equipamentos que utilizam combustíveis fósseis. Além disso, também aí se concentra uma elevada concentração de fazendas criadoras de gado bovino.

Gráfico 02 – Distribuição espacial dos quintis por municípios emissores de GEE do semiárido do Piauí

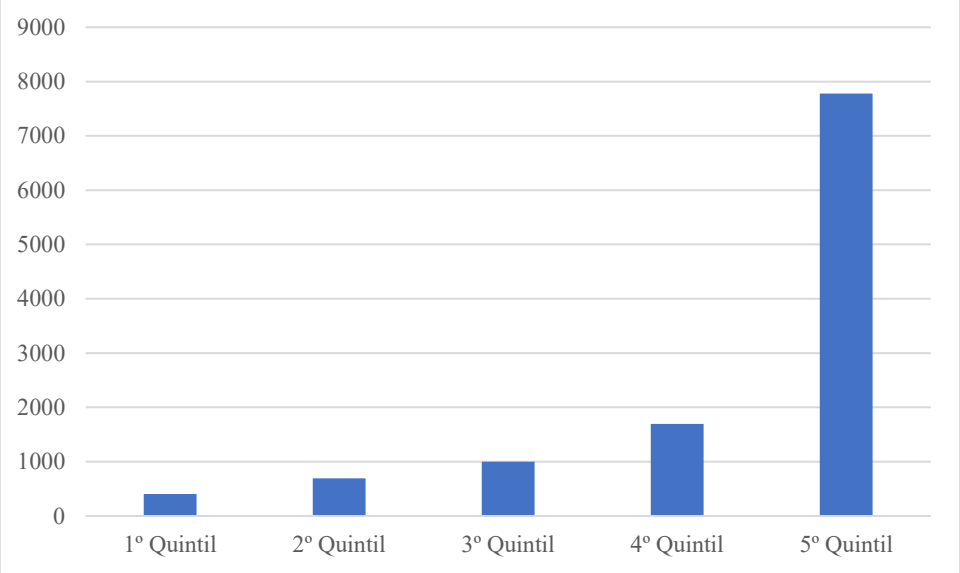


Fonte: Elaborada a partir dos resultados da pesquisa.

Por outro lado, o quintil com menor média de emissões está situado na região norte do estado. O bloco vermelho, mais ao norte, concentra municípios em torno da capital, logo é de se esperar que haja elevadas emissões nessa área, devido ao grande aglomerado populacional, que induzir a uma maior demanda energética, associada às emissões provocadas pela contaminação provocada pelos destinos inadequados de dejetos humanos. De acordo com o último Censo Demográfico de 2022, o estado do Piauí tem um dos mais críticos acessos de domicílios urbanos às redes de esgotamento sanitário.

Através das evidencias mostradas nos gráficos 2 e 3, observa-se também que o grupo formado pelas médias dos quintis 4 e 5 (os maiores emissores de GEE no estado) emitem, em média, 4,5 vezes mais que a média agregada computada pelas emissões de GEE do primeiro, segundo e terceiro quintis.

Gráfico 3 – Distribuição da média dos quintis por municípios emissores de GEE do estado do Piauí entre 1973 e 2023



Fonte: Elaborada a partir dos resultados da pesquisa.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo principal prever a evolução das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) nos municípios da região semiárida do Piauí, utilizando modelos de séries temporais ARIMA. A pesquisa foi motivada pela significativa evolução da agricultura intensiva no uso de máquinas e defensivos agrícolas, bem como do crescimento da atividade pecuária em todo o estado, mas com maior ênfase no sul do estado, em que os municípios estão inseridos na fronteira agrícola do MATOPIBA.

A análise descritiva das variáveis revelou a alta variabilidade das emissões de GEE e a irregularidade da precipitação nos municípios estudados, consolidados pelas médias anuais no período de 1973 a 2023. A correlação entre a precipitação pluviométrica e as emissões de GEE foi bastante tênue, ao contrário do que se supunha quando se concebeu a realização deste estudo. Observou-se ainda que as emissões de GEE no Piauí cresceram significativamente entre 1973 e 2023, e a tendência de aumento deve continuar na próxima década.

O modelo ARIMA(0,2,1) mostrou-se uma ferramenta eficaz e bem-sucedida para prever a evolução das emissões, alcançando um dos objetivos centrais da pesquisa. Com base nesse modelo foi possível elaborar as previsões das emissões de GEE para um período de dez anos (2024 a 2033), que era um dos objetivos da pesquisa que, por tanto, foi alcançado com sucesso.

A Conclusão geral da pesquisa é que os 242 municípios do estado do Piaui apresentam padrão médio elevado de emissões de GEE e que os municípios situados na fronteira agrícola do MATOPIBA e aqueles situados no entorno da capital do estado apresentaram os maiores níveis de emissões no período estudado. Por outro lado, os municípios situados nas áreas de agricultura que utiliza baixos padrões tecnológicos e extrativismo, mostraram ter menores emissões de GEE.

ISSN: 2177-3246

Por fim, os resultados reforçam a necessidade de políticas públicas de mitigação e monitoramento contínuo, especialmente nas regiões de agricultura intensiva, para conciliar o desenvolvimento agropecuário com a sustentabilidade ambiental.

REFERÊNCIAS

COSTA FILHO, J. Degradação dos solos nos estabelecimentos rurais do Nordeste brasileiro. Fortaleza. 2025. Tese de Doutorado.

BEZERRA, F. N. R. (2022). Avaliação Da Agricultura De Baixa Emissão De Carbono E Inteligente Ao Clima No Brasil. Tese (Doutorado Em Economia Rural) – Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza.

BOX, G.E. Et Al. Time Series Analysis Forecasting And Control. New Jersey,Wiley.Fifth Edition. 2015.

FELÍCIO, R. A. (2014). Mudanças climáticas e aquecimento global – Nova formatação e paradigma para o pensamento contemporâneo? Ciência e Natura, 36 (3), 257–266.

LEMOS, J.J.S. Vulnerabilidades induzidas do semiárido. Fortaleza. Inprensa Universitária, 2020

FIELD, A. Discovering Statistics Using BM SPSS Statistics. 2018.

GEE. SEEG Brasil – O Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) oferece dados em tempo real, que apoiam a transformação necessária para enfrentar os desafios globais que afetam todas as regiões brasileiras.[s. l.], 2025. Disponível em: https://seeg.eco.br/. Acesso em: 5 jun. 2025.

GUJARATI, Damodar N.; PORTER, Dawn C.Econometria básica.5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.924 p.ISBN 9788563308320.

HYNDMAN, R. J.; ATHANASOPOULOS, G. Forecasting: Principles and Practice (3rd ed). [S. l.: s. n.]. E-book. Disponível em: https://otexts.com/fpp3/. Acesso em: 3 jul. 2025.

HU, S. et al. Spatial pattern of the effects of human activities on the land surface of China and their spatial relationship with the natural environment. Environment, Development and Sustainability, v. 24, p. 10379-10401, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Agropecuário 2017. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: https://censoagro2017.ibge.gov.br/. Acesso em: 5 abr. 2025.

IPCC_AR6_WGI_SummaryVolume.pdf. . , [s. d.]. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SummaryVolume.pdf. Acesso em: 5 jun. 2025.

LIU, X., ZHANG, S., & Bae, J. (2017). The nexus of renewable energy-agriculture environment in BRICS. Applied Energy, 204, 489–496.

MYHRE, G., et al. (2014). Anthropogenic and natural radiative forcing. In Climate change 2013 - The physical science basis (pp. 659–740). Cambridge University Press.

OLIVEIRA, I. R. (2018). Agricultura De Baixo Carbono: Tecnologias E Estratégias De Implantação. Brasília, Df: Embrapa. P. 61-104.

Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). (2022). Sexto Relatório de Avaliação do IPCC. Grupo de Trabalho I: Mudanças Climáticas - A Base Científica. Disponível em: https://www.ipcc.ch/. Acesso em: 30 ago. 2025.

PAIVA, Elizama Cavalcante de et al. Forecast Of Rainfed Agricultural Production In The State Of Pernambuco, Brazil. IOSR Journal Of Humanities And Social Science (IOSR-JHSS), v. 29, n. 11, p. 38-48, nov. 2024.